



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

**OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL
INGENIO "SANTA ANA"**

Melvin Ezequiel Axpuc Bámaca

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, octubre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL
INGENIO "SANTA ANA"**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

MELVIN EZEQUIEL AXPUAC BÁMACA

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANIBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

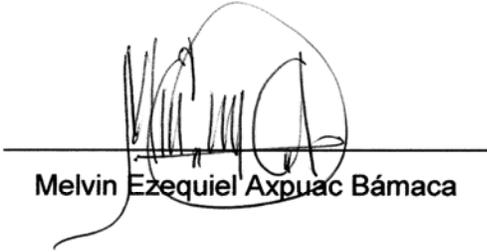
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Freddy Estuardo Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO "SANTA ANA",

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 13 de marzo de 2006.



Melvin Ezequiel Axpuc Bámaca



Guatemala, 13 de agosto de 2008
REF.EPS. D.440.08.08

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña:

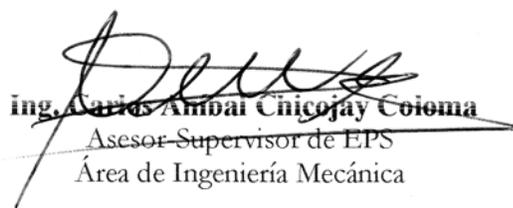
Por este medio atentamente le informo que como Asesor – Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) de el (la) estudiante universitario (a) **MELVIN EZEQUIEL AXPUAC BÁMACA** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO “SANTA ANA”**”.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Dá y Enseñad a Todos”


ing. Carlos Ambal Chicojay Coloma
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica

AAAA/ra



Guatemala, 13 de agosto de 2008.
REF.EPS. D.440.08.08

Ing. Julio Campos Paiz
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Campos Paiz:

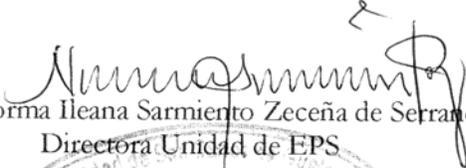
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO "SANTA ANA"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **MELVIN EZEQUIEL AXPUAC BÁMACA** quien fue debidamente asesorado (a) y supervisado (a) por el Ingeniero (a) Carlos Anibal Chicojay Coloma.

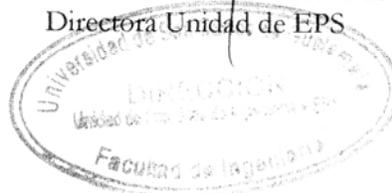
Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor -Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS



NISZ/as

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación de la Directora de la Unidad del Ejercicio Profesional Supervisado, al trabajo de graduación OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO "SANTA ANA", del estudiante Melvin Ezequiel Axpuc Bámaca, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, octubre de 2008.

/behdei

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 328.2008

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, al trabajo de graduación titulado: **OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO "SANTA ANA"**, presentado por el estudiante universitario **Melvin Ezequiel Apxuac Bámaca** procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2008

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

DIOS	Fuente de mi vida
MI PADRE	Santos Ezequiel Axpuc Velásquez, por todo el esfuerzo brindado durante mi aprendizaje
MI MADRE	Olivia Teresa Bámaca Pérez, por su apoyo y esfuerzo brindado incondicionalmente
MI ESPOSA	Verónica Siomara Martínez Linares, por el apoyo y amor brindado incondicionalmente
MI HIJO	Donel David Axpuc Martínez, por ser la persona que más amo en este mundo y ser la razón de mi superación.
MIS HERMANOS	Donel Ariel, Santos David, Celso Omar y Cristian Ronaldo, por brindarme su amistad y su apoyo en todo momento.
MIS HERMANAS	Elsy Maricela y Enma Jeaneth, por su cariño y comprensión
A TODA MI FAMILIA EN GENERAL	Respetuosamente
MIS AMIGOS	Por su apoyo y comprensión
USTED	Con mucho aprecio y respeto

AGRADECIMIENTO ESPECIAL A:

CRISTO

Por su sacrificio y el perdón de mis pecados

La Universidad de San Carlos de Guatemala, por su aporte al desarrollo de la educación

El Ing. Aníbal Chicojay Coloma, por transmitirme sus conocimientos

El Ing. Gustavo De León, por su aporte al desarrollo de este trabajo de graduación.

MIS

CATEDRÁTICOS Profesor Rubén Ernesto Axpuc Velásquez, por la ayuda brindada durante mis estudios

El Ingenio Santa Ana

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA INSTITUCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Reseña histórica	1
1.1.2. Misión	2
1.1.3. Visión	3
1.1.4. Servicios que presta	3
1.2. Estructura de la empresa	6
1.3. Proceso de producción del azúcar	10
1.4. Ubicación	12
2. MARCO DE REFERENCIA	15
2.1. Características de operación de una planta generadora de energía eléctrica con vapor	15
2.1.1. Descripción de Equipos	16
2.1.1.1. Caldera	17
2.1.1.2. Turbina	18
2.1.1.3. Re-calentadores	19
2.1.1.4. Bomba de alimentación	20

2.1.1.5. Condensador	20
2.2. Torre de enfriamiento	21
2.2.1. Clasificación	23
2.2.2. Componentes	27
2.2.2.1. Pileta	27
2.2.2.2. Estructura	28
2.2.2.3. Ventiladores	28
2.2.2.4. Empaquetadura	28
2.3. Sistema de circulación	29
2.3.1. Componentes	30
2.3.1.1. Bombas	30
2.3.1.2. Válvulas	32
2.3.1.3. Tubería	32
2.4. Motores eléctricos	33
2.4.1. Clasificación	34
2.4.2. Componentes	37
3. FUNCIONAMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	41
3.1. Generalidades de una torre de enfriamiento de tiro inducido tipo contracorriente	41
3.2. Ventajas operativas del equipo	43
3.3. Ventajas ambientales	44
4. OPERACIÓN	47
4.1. Control de funcionamiento operativo	47
4.2. Procedimiento para sacar o meter en línea una torre de enfriamiento	48

4.3. Tratamiento químico del agua	52
5. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO	53
5.1. Pileta	54
5.2. Estructura de madera	54
5.3. Sistema de alimentación de agua	56
5.3.1. Sistema de bombeo	56
5.3.2. Tubería y valvulería en general	62
5.4. Tiro inducido	63
5.4.1. Transmisión	63
5.4.2. Ventilador	66
6. COMPARACIÓN DE CICLO <i>RANKINE</i> QUE OPERA CON UN TURBO GENERADOR DE 25 MW., ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	69
6.1. Eficiencia del Ciclo <i>Rankine</i>	69
6.1.1. Bases teóricas de la prueba	70
6.1.2. Prueba de comportamiento del sistema de vapor	72
6.1.2.1. Balance térmico de calentadores del ciclo	75
6.1.2.2. Rendimiento térmico del ciclo	80
6.1.2.3. Razón por kilovatio	82
6.1.3. Análisis de Resultados	84
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	89
APÉNDICE	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Organigrama funcional división industrial	8
2	Proceso de producción de azúcar	12
3	Mapa de la ubicación de la empresa	13
4	Torres de tiro natural	24
5	Torres de flujo a contracorriente	26
6	Torre de flujo cruzado	27
7	Partes de una bomba centrífuga	32
8	Partes de un motor eléctrico	38
9	Rotor de motor eléctrico	39
10	Diagrama de operación de la torre de enfriamiento	42
11	Uniones de estructura	55
12	Hoja de la ruta limpieza de motores	57
13	Hoja de mantenimiento de un motor eléctrico	59
14	Hoja de mantenimiento de una bomba	62
15	<i>Coupling</i> flexible	65
16	Ángulo de inclinación aspas del ventilador	66
17	<i>Coupling</i> apriete de aspas del ventilador	67
18	Ciclo <i>rankine</i>	75
19	Calentador #1 de alta presión	76
20	Calentador #2 de alta presión	77
21	Deareador	78
22	Calentador de baja presión	79
23	Turbina de vapor	80
24	Esfuerzos de tornillos grado SAE	91
25	Tablas de vapor	92

TABLAS

I	Eficiencias de diferentes tecnologías de cogeneración	71
II	Presiones de vapor	72
III	Temperaturas de vapor	73
IV	Volumen específico y entalpías en cada punto	74

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiencia
W_{neto}	Trabajo neto
Q_{sum}	Calor suministrado
W_T	Trabajo realizado por la turbina
W_B	Trabajo realizado por la bomba
h	Entalpía
v_f	Volumen específico
P	Presión
P_{abs}	Presión absoluta
P_{atm}	Presión atmosférica
P_{man}	Presión manométrica
T	Temperatura
h_g	Entalpía de vapor saturado
m	Flujo másico
U_T	Energía producida por una turbina
U_{EG}	Energía eléctrica producida por un generador
RV	Razón por kilovatio generado
\dot{V}_{vap}	Caudal de vapor
$E.E_G$	Generación eléctrica del turbo generador condensing

GLOSARIO

Alabe	Parte que compone el rotor de una turbina de vapor, en donde recibe el chorro de vapor y lo convierte en energía mecánica.
Bagazo	Desecho fibroso de la caña de azúcar.
Bomba	Dispositivo empleado para elevar, transferir o comprimir líquidos y gases.
Caldera	Es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, en forma de calor, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.
Ciclo <i>rankine</i>	Consiste en un ciclo termodinámico cerrado que consta de una caldera, una turbina, un condensador y una bomba.
Co-generación	Procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria, hielo, agua fría, aire frío, por ejemplo).
Desairador	Equipo que sirve para eliminar los gases disueltos en el agua para alimentación de calderas.
Evaporación	Es el paso de un líquido a estado de vapor, y sólo se realiza en la superficie libre de un líquido.

Factor de potencia

Cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo.

Hotwell

Zona donde se acumula el condensado del vapor que acciona una turbina.

Mantenimiento**preventivo**

Es la programación de inspecciones, tanto de funcionamiento como de seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, que deben llevarse a cabo en forma periódica con base en un plan establecido y no a una demanda del operario o usuario.

Mantenimiento**correctivo**

En este tipo de mantenimiento se cambian las piezas dañadas.

Rotor

Parte giratoria de un motor.

Transferencia por**convección**

Transporte de calor en un fluido a través del movimiento del propio fluido.

Transferencia por**conducción**

Transporte de calor desde un extremo de un cuerpo hacia la parte más fría.

Zafra

Época en la cual se cosecha la caña de azúcar.

Regularmente se realiza entre los meses de noviembre a mayo.

RESUMEN

Este trabajo fue realizado a través del programa EPS en el Ingenio Santa Ana, con el objetivo de poner en práctica los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería mecánica.

Hace algunos años, el Ingenio Santa Ana utilizaba directamente para sus procesos, agua proveniente del río Guacalate, en ese entonces utilizaba una serie de filtros de arena y coladores para poder limpiar el agua que se extraía de dicho río, no obstante, no se lograba el objetivo con totalidad.

La suciedad que presentaba el agua, era reflejada en la obstrucción de la tubería que la transportaba hacia los equipos que lo requerían para su funcionamiento, principalmente en el condensador de un turbo que genera actualmente 25 MW.

Este equipo funciona con un sistema que condensa el vapor que ya fue utilizado en el turbo, generando un vacío que es necesario para su buen funcionamiento. Esta condensación se logra al hacer pasar agua fría por un serpentín que hace contacto directo con el vapor utilizado. Por esta razón, es de mucha importancia tener limpio este serpentín.

Con el anterior sistema de suministro de agua, provocaba la obstrucción de este serpentín y era necesaria la limpieza de éste cada semana.

Para un mejor funcionamiento de este condensador, se necesitaba un flujo constante de agua sin suciedad, esto se lograba mediante una torre de enfriamiento, el cual hace circular agua limpia a través del sistema del turbo condensador.

Al ver todo este tipo de problemas que generaba un flujo no constante y además contaminado, se requirió una torre de enfriamiento.

Con este nuevo sistema, también fue necesario diseñar un plan de mantenimiento preventivo para mantener en óptimas condiciones los equipos que lo componen.

Además, se requirió un estudio de los beneficios que se obtuvieron al instalar este nuevo sistema, como se puede observar en el 6to. capítulo de este trabajo.

OBJETIVOS

General

Optimizar la condensación de vapor, a través de conservar constante la temperatura del agua que re-circula en el condensador y la presión de vacío en el *hotwell*, y así mismo, mejorar la producción de energía eléctrica.

Específicos

1. Especificar la operación correcta de la torre de enfriamiento.
2. Proporcionar material técnico para efectuar un mantenimiento correcto de los equipos que componen la torre de enfriamiento para un mejor desempeño.
3. Comparar la eficiencia térmica del ciclo *rankine* en cuestión, con la tabla publicada por la Comisión Nacional de la Electricidad de México (CONAE), referente a tecnologías de cogeneración.
4. Demostrar teóricamente los beneficios obtenidos al haber implementado la torre de enfriamiento al ciclo *rankine*, de la cual es parte la unidad de 25 MW.

INTRODUCCIÓN

Hace algunos años, no eran tan frecuentes las torres de enfriamiento, sin embargo, debido a la alta contaminación existente en los ríos que alimentan a varias industrias, y al alto costo que provocaba limpiar los equipos que utilizaban el agua para su circuito de enfriamiento, fue necesario encontrar alguna forma de tener agua suficientemente limpia y constante; todos estos aspectos hicieron crear un equipo que fuera capaz de sufragar todas estas necesidades.

El presente proyecto se realizó en el Ingenio Santa Ana, S.A., y para poder definir sus necesidades fue necesario conocer las características de operación de la planta generadora de energía eléctrica con vapor, el ciclo térmico con la que funciona, la descripción de sus componentes y la función que realiza cada uno de ellos.

También fue necesario conocer el funcionamiento de la torre de enfriamiento, sus componentes y el funcionamiento de cada uno de ellos.

Otro punto necesario de conocer, fue las ventajas operativas del equipo, así como también las ventajas ambientales de la misma.

Al conocer el circuito, en el cual funciona el turbo generador *condensing*, se decidió definir procedimientos básicos de operación de la torre de enfriamiento, que funciona con el circuito del turbo condensador, además de ello, se decidió también definir procedimientos básicos de mantenimiento y corroborar la mejora de la eficiencia por medio de un estudio térmico completo del ciclo, comparando eficiencias antes y después de la implementación de la torre.

1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA

1.1. Antecedentes

En estos últimos años, la producción azucarera de Guatemala ha tomado más importancia, debido a que en las cosechas recientes se han alcanzado niveles récord de producción, ocupando en el último año el tercer lugar como exportador más grande de Latinoamérica y el Caribe, y el sexto en importancia a nivel mundial. Este hecho representa significativos beneficios económicos para el país, sobre todo, por la generación de divisas y por el empleo que la industria azucarera provee.

1.1.1. Reseña histórica

En 1968, un grupo de empresarios adquirió parte de los equipos de los Ingenios Santa Juana y Canóvanas de Puerto Rico, iniciándose así la construcción de Ingenio Santa Ana, en la Finca Cerritos, ubicada a 65 Km. al sur de la ciudad de Guatemala, en el departamento de Escuintla, a 220 metros sobre el nivel del mar. La primera zafra prueba se hizo en 1969/70, moliéndose 154,973.75 toneladas de caña y produciendo 239,525 quintales de azúcar en 136 días; la capacidad instalada en esa época era de 3,500 ton/día.

En 1993, comenzó a operar la refinería, diseñada para elaborar refina de alta calidad, partiendo de la azúcar blanca sulfatada con capacidad de 500 toneladas de azúcar por día. Cuenta con tres tachos, siete filtros, seis centrífugas automáticas, una secadora y una enfriadora; años más adelante, se instaló un clarificador de azúcar disuelta, para poder trabajar con azúcares afinadas.

En el área de cogeneración, el Ingenio Santa Ana produjo su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. En efecto, desde 1969 contó con una potencia instalada de 3,500 Kw., hoy en día la capacidad instalada actual es de 53 Mw.

Las operaciones de corte de caña, se iniciaron en el período 1,977/78. Se empleaban 1,200 cortadores para cortar 1,000 toneladas de caña diarias, con machete convencional. Hace seis años, se inició el programa de capacitación permanente para el corte de caña con machete australiano, habiéndose incrementado la eficiencia en el corte, la calidad de producto final, y los ingresos de los cortadores. Así también, se construyeron módulos habitacionales con todas las comodidades, para albergar a los cortadores de cuadrilla, procedentes del altiplano guatemalteco, a los cuales se proporciona alimentación abundante en proteínas, completada con sales de rehidratación oral.

En 1,996, Santa Ana avanzó significativamente en sus planes estratégicos, al desarrollar una de las fábricas más eficientes, lo cuál logró colocando mayor capacidad instalada, con equipo de alta tecnología, ello apoyado por un proyecto de automatización industrial único en Centro América, alcanzando en la zafra 2004/05 una producción récord de 5, 000,000 de quintales de azúcar.

1.1.2. Misión

Ser el equipo líder por excelencia en la administración estratégica de la agroindustria azucarera, competitivo en el contexto empresarial que nos demanda el siglo XXI, a través de un alto grado de tecnificación en todas nuestras áreas y un equipo humano motivado, desarrollado y visionario que nos consolide como un grupo de clase mundial; superándonos permanentemente por medio del mejoramiento continuo, con participación activa a todo nivel,

sirviendo de modelo a otras empresas de Guatemala y Centro América para proyectarse al mundo.

1.1.3. Visión

Somos un grupo corporativo visionario, comprometido con el progreso y bienestar de Guatemala, dedicado a producir eficientemente bienes y servicios de óptima calidad, derivados de la caña de azúcar, por medio del desarrollo de los recursos humanos y tecnológicos para satisfacer las necesidades de nuestros clientes nacionales e internacionales.

1.1.4. Servicios que presta

Como muchas de las empresas, Ingenio Santa Ana tiene dos mercados hacia los cuales comercializa los diversos productos que son aceptados por su calidad.

- **Mercado de Exportación**

- a) Azúcar Refinada Tipo "A"

Es el azúcar de mayor calidad. Sus especificaciones técnicas son: color 0 -45 grados ICUMSA (constituye el factor mas importante para este tipo de azúcar), Pol 99.85 % mínima; humedad 0.04 %.

- b) Azúcar Cruda

Constituye el azúcar con una Pol mínima de 97.9%.

- **Mercado Interno**

- a) Azúcar Blanca Standard (Sulfitada).

Es el azúcar de mayor venta para consumo local. Sus características son Pol 99.4 – 99.6 %, color 180 – 400 ICUMSA, Humedad 0.20 %. Contiene vitamina A en una concentración de 12 a 20 ppm. En Santa Ana, este tipo de azúcar se envasa bajo la marca “Caña Real”.

- b) Azúcar Refinada Local

Es un azúcar con 0 – 80 grados ICUMSA, Pol 99.6 – 99.8 %, Humedad 0.04 %. Este tipo de azúcar es igual que la anterior, también esta vitaminada. En Santa Ana se empaca bajo la marca “Nevada”.

- c) Azúcar Superior

Es un azúcar con 99.6 – 99.79 % de Pol, Humedad 0.10 %, Color 80 – 200 ICUMSA.

- d) Azúcar Morena

Es un azúcar con 98 – 99.4 Pol, 0.40 % Humedad y Color 400 – 800.

- e) Melaza.

Se le denomina así a la miel final que se obtiene en el último agotamiento en el ciclo de mazas. Sus especificaciones técnicas son: Brix 85 % y pureza entre 30 y 35. Constituye la materia prima para hacer alcohol y ron; además se usa

para alimento de ganado. Este producto se distribuye, tanto para mercado nacional como para el internacional.

f) Torta de Cachaza

Constituye el lodo filtrado y lavado, producido por la precipitación en el proceso de clarificación de jugo mezclado. Sirve como fuente primaria para abonos orgánicos en la producción Agrícola.

g) Energía Eléctrica

Las especificaciones de este servicio es que la empresa cumpla con la cantidad de MW que se proyecte generar o cogenerar. Para tal efecto, Santa Ana cuenta con 6 calderas, una que se alimenta con bunker y bagazo, y otras cinco que trabajan utilizando solo bagazo. Se cuenta además con dos tipos de turbogeneradores:

- **Turbos de escape:** Que se alimentan de vapor del ingenio y devuelven vapor al proceso.
- **Turbos de condensación:** Que se alimentan de vapor y sacan agua condensada.

Dicha generación se efectúa a 69,000 voltios, 60 Hz, trifásica y un factor de potencia de 0.85. Actualmente, durante la época de zafra, se generan 40 MW de los cuales se venden 32 MW a la Empresa Eléctrica de Guatemala; durante la época de reparación, se mantienen disponibles con una capacidad de 25 MW.

1.2. Estructura de la empresa

Como empresa, Santa Ana está dirigida por una Junta Directiva, y se estructura en siete divisiones y el staff de la gerencia general.

a) Gerencia General

El gerente general es responsable de dirigir, planificar, coordinar, supervisar, controlar y evaluar las actividades de la gestión técnica y administrativa de las gerencias de división e impartir las instrucciones para la ejecución de las funciones correspondientes, además de definir e interpretar las políticas establecidas por la dirección. El correcto desempeño de estas obligaciones requiere de un conocimiento funcional de todas las fases de la operación de la empresa, y una buena comunicación con sus subordinados.

b) División de recursos humano

Su misión es satisfacer en forma eficaz los requerimientos del Recurso Humano adecuado, mediante técnicas y procedimientos actualizados, propiciando las condiciones óptimas para su desarrollo personal y dentro de la Empresa, con el propósito de lograr la mayor eficiencia del Grupo Corporativo.

c) División agrícola y servicios

Es un equipo multidisciplinario, cuyo compromiso fundamental es el aprovechamiento integral sostenible de los recursos naturales, para producir caña de azúcar, otros productos agrícolas, servicios de cosecha, taller y transporte.

d) División administrativa

Es una División completamente de servicio, comprometida con todas las divisiones de la Corporación, a quienes asiste en sus necesidades en forma eficiente y oportuna, a través de una organización adecuada, utilizando recurso humano capacitado y tecnología para satisfacer a sus clientes.

e) División industrial

Se ocupa de la transformación de la caña de azúcar y otros insumos en productos de óptima calidad, administrando los recursos humanos, físicos y tecnológicos para satisfacer las necesidades de los clientes nacionales e internacionales.

f) División de informática

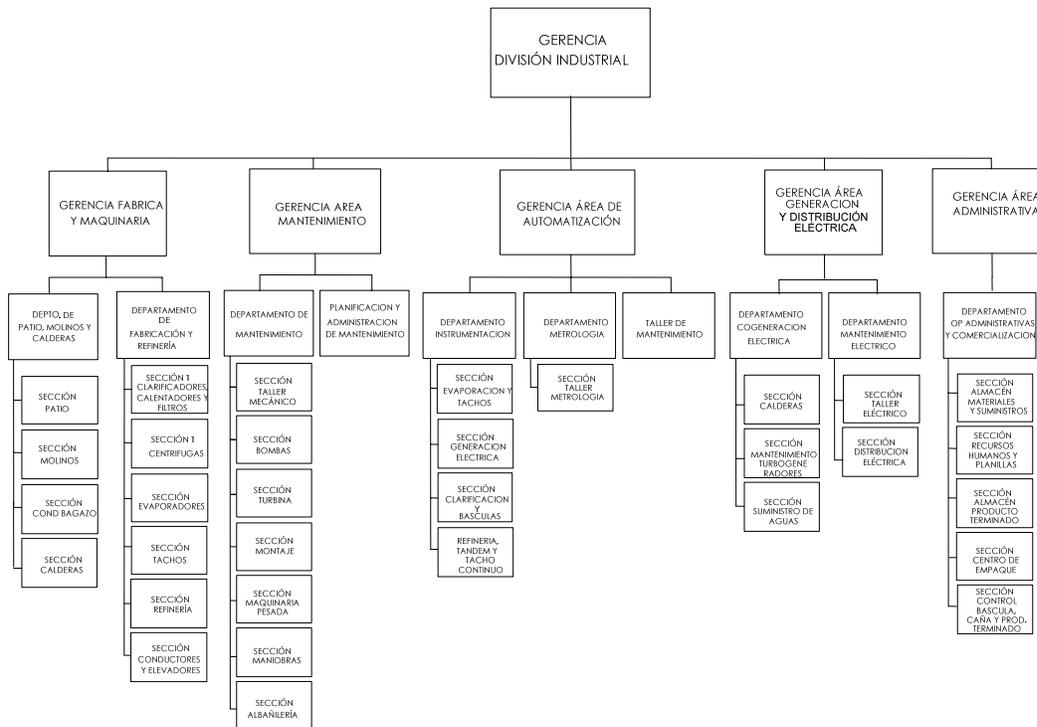
Es una organización estratégica que proporciona soluciones relacionadas con la planificación, comunicaciones, tecnología de la información, comunicaciones, automatizaciones industrial y control de proceso para optimizar la producción y administración, mejorando la competitividad de los clientes, desarrollando la cultura de cambio permanente y los recursos humanos, utilizando eficaz y eficientemente.

g) División financiera

La adecuada administración de los recursos financieros, para la ejecución del proceso productivo, del funcionamiento e inversión generando información financiera confiable y oportuna, a través del desarrollo de recurso humano, de procedimientos y tecnología actualizada, para la adecuada toma de decisiones

de la administración del grupo de empresas de Santa Ana, así como para otros usuarios que permita coadyuvar al logro del objetivo general de la Organización.

Figura 1. Organigrama funcional división industrial.¹



¹ Organigrama Funcional, Fuente Gerencia División Industrial.

Como Grupo Corporativo Santa Ana está compuesta de 24 empresas multidisciplinarias.

A continuación se mencionan.

- Compañía Agrícola Industrial Santa Ana, S. A.
- Talleres Industriales, S. A.
- Agro Mecánica Industrial, S. A. Inversiones Roa, S. A.
- Inversiones Tajo, S. A.
- Inversiones Duero, S.A.
- Maquinaria Agroindustrial, S.A.
- Taller de Reparaciones Automotrices, S.A.
- Transportes Generales, S. A.
- Servicios Cañeros, S. A.
- Asesoría Técnica, S. A.
- Inversiones Delta, S. A.
- Distribuidora Comercial, S. A.
- Inversiones Saturno, S. A.
- Palo Pinta, S. A.
- Río Plata, S. A.
- Inversiones Iguazú, S. A.
- Agrícola La Niña, S. A.
- Agrícola La Pinta, S. A.
- Agrícola Santa Maria, S. A.
- Servicios Triángulo, S. A.
- Ingeniería Civil & Agrícola S. A.
- Servicios Manuales, S. A.
- Paraná, S. A.

1.3. Proceso de producción del azúcar

La caña de azúcar es una planta que pertenece a la familia de las gramíneas, es una planta perenne, que tiene la ventaja de ser la mas eficiente en transformar la energía solar en azúcares y biomasa.

También, genera igual cantidad de oxígeno que cualquier bosque tropical. La caña cuando se planta, produce de 4 a 7 cortes anuales (retoños), sin necesidad de plantarla cada año.

La caña que procesa el ingenio se corta manualmente, hay siete frentes de corte que suministran arriba de 10.000 toneladas de caña diarias.

Aproximadamente existen más de 3.000 hombres dedicados al corte de caña, además de los que se dedican a otras labores de la cosecha, como maquinaria, apuntadores, recogedores de caña, etc.

La caña llega al patio de dos formas: caña maleteada que en su mayoría es verde, sin quemar; y caña a granel, que viene en contenedores, llamados jaulas, para que puedan ser fácilmente descargados.

En el patio, la caña es pesada en las básculas y luego se descarga en las mesas de caña, donde es lavada. Después, la caña pasa por los conductores donde es transportada y preparada para que en el sistema de molienda la extracción del jugo sea fácil.

El sistema de molienda consiste de un tandem de molinos compuestos de cuatro rodillos conocidos con el nombre de mazas. Se agrega agua de imbibición para facilitar la extracción de sacarosa. La finalidad principal de los molinos es conseguir la mayor separación posible de los dos elementos de la

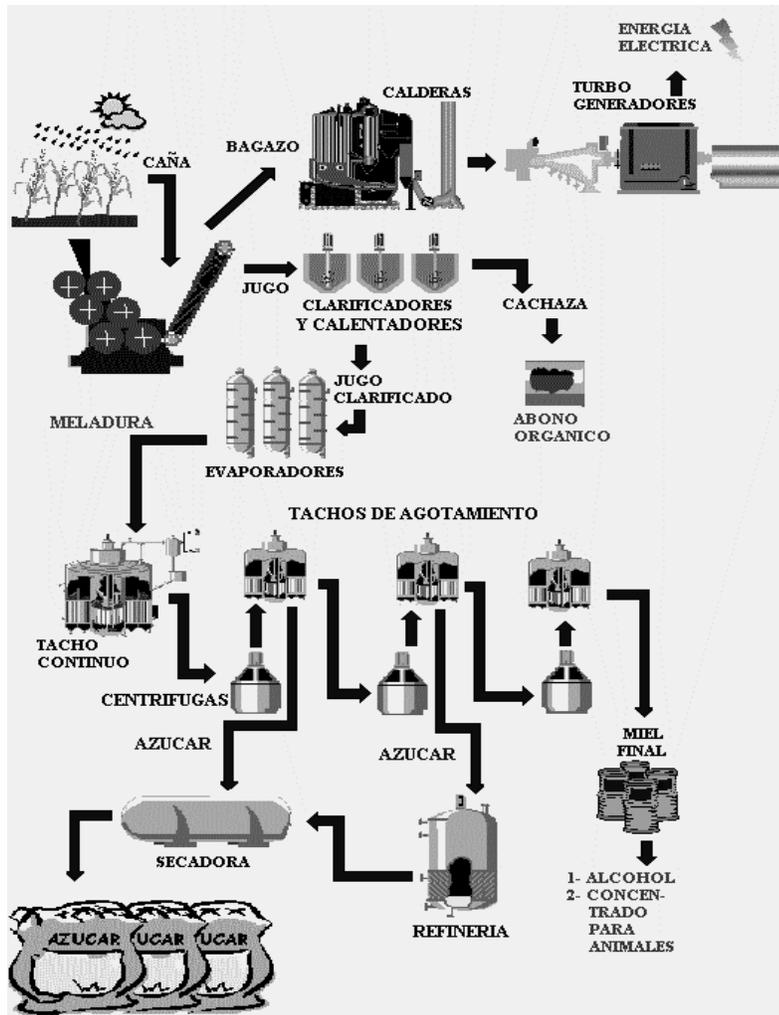
caña: fibra y jugo. El jugo extraído es bombeado a fábrica y el bagazo es conducido a calderas para utilizarse como combustible.

Luego del molino, el jugo es pasado por calentadores para subirle la temperatura, y pasa a clarificación para sacarle los lodos en los clarificadores que trabajan por medio de decantación; el lodo es enviado a los filtros de cachaza para extraer parte del jugo. El jugo del clarificador es enviado a los evaporadores, y luego a los tachos donde se concentra la miel para formar el grano de azúcar.

En las centrifugas se recibe la maza de los tachos, aquí se separa el grano de la miel. El azúcar es enviada a una secadora y enfriadora, luego es transportada al envasado o a bodegas a granel para su distribución.

En las calderas se genera todo el vapor necesario para el funcionamiento de las turbinas, turbogeneradores y cocimientos en el proceso de fabricación. Los hornos de las calderas son alimentados con bagazo, que es transportado por conductores de tablillas o bandas transportadoras.

Figura 2. Proceso de producción de azúcar.



1.4. Ubicación

El Ingenio Santa Ana tiene ubicada su planta productora de azúcar en el Departamento de Escuintla en el kilómetro 64.5 carretera a Santa Lucía Cotz., interior de la finca cerritos, como a continuación se muestra en el plano.

Figura 3. Mapa de ubicación de la empresa



2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Características de operación de una Planta generadora de energía eléctrica con vapor

La generación de energía eléctrica se realiza por medio de un generador eléctrico de corriente alterna, cuyo rotor va acoplado a una turbina de vapor que lo hace girar. En esta configuración la energía mecánica es producida en una turbina mediante la expansión de vapor de alta presión generado en una caldera convencional.

La forma en que se hace girar el rotor de la turbina es por medio de alabes montados al rotor y que al chocar con el flujo de vapor se ponen en movimiento transformándose así la energía cinética del vapor de energía mecánica, que será convertida en energía eléctrica en el generador. A su paso por los alabes de la turbina, el vapor va perdiendo presión hasta llegar a la última etapa, pasa al escape y va al condensador donde se condensa debido al contacto con la tubería adentro de la cual esta circulando agua fría.

Al condensarse el vapor se produce una presión de vacío que hace más eficiente el trabajo de la turbina, pues a la vez que evita la contrapresión permite que el vapor transformado en condensado sea alimentado de nuevo a la caldera para iniciar de nuevo el ciclo.

Generalmente, las plantas generadoras de potencia con vapor emplean el ciclo Rankine. Este ciclo se concibe como un recurso para emplear las características del agua, como fluido de trabajo y manejar el cambio de fase entre líquido y vapor.

Realizando algunas modificaciones al ciclo *Rankine* simple se puede lograr un mejor aprovechamiento del vapor y por consiguiente, aumentar su eficiencia. Una forma consiste en sobrecalentar el vapor que sale de la caldera, mediante la circulación del vapor por tubos expuestos a los gases de combustión calientes o alguna otra fuente con una temperatura superior a la temperatura de saturación de la caldera, por consiguiente, el vapor que entra a la turbina tiene una entalpía superior a la del ciclo de *Rankine* simple.

El sobrecalentamiento del vapor que sale de la caldera tiene el efecto de elevar la calidad a la salida de la turbina hasta un valor superior al del caso de un ciclo con vapor saturado.

Una parte del vapor de la turbina se extrae a presiones diferentes en uno o más sitios de diversas etapas de la tubería y se pasa por uno o más calentadores del agua de alimentación. Esto se realiza para precalentar el agua de entrada a la caldera logrando mejorar la temperatura media termodinámica en la calefacción de la misma. Además, si se emplease todo el vapor, la calidad de la mezcla vapor –líquido que sale de la turbina y se condensa reducirá considerablemente, lo cual es un efecto indeseable.

2.1.1. Descripción de equipos

La planta de generación eléctrica se compone de diferentes equipos que funcionan en conjunto para que pueda funcionar, los cuales se describen a continuación.

2.1.1.1. Caldera

La caldera es del tipo Bigelow con una capacidad de 260,000 lbs/hr de generación de vapor. Opera a una presión de 850 psi, con una temperatura de 900 °F.

La superficie calefactora esta formada principalmente por la superficie de caldeo por radiación que constituyen las cuatro paredes del hogar.

La caldera esta constituida principalmente por domos, el inferior, se le llama recipiente de lodos, es soportado a la caldera exclusivamente por los tubos curvos que están conectados al domo superior.

En el domo superior están montados los separadores de vapor y deflectores, los cuales separan las partículas de agua y el vapor, de la mezcla de ambos elementos que desde los tubos de evaporación llega al domo y sale al colector del sobrecalentador.

El suministro del agua de alimentación está en el mismo domo, que se reparte proporcionalmente a lo largo de él, por medio de una tubería que tiene unos orificios para la salida del agua se encuentra en la posición mas baja del nivel normal de agua de la caldera, con el fin de calentar de antemano el agua de alimentación, antes de hacer contacto con la superficie del domo.

La caldera tiene instalado un equipo de combustión, de tal manera que puede quemar opcionalmente bagazo, diesel o bunker. La combinación de estos combustibles puede utilizarse para el servicio, pero bajo ciertas condiciones.

El suministro del aire para la combustión es a través de un ventilador de tiro forzado, que generalmente lo toma de la atmósfera y lo suministra en cantidades apropiadas según sea la relación, ya que varía ampliamente de acuerdo con los componentes del combustible y el poder calorífico. Sin embargo, la cantidad de oxígeno o aire necesario para producir una libra de vapor, es aproximadamente la misma para un mismo tipo de combustible.

La extracción de gases de combustión se hace por medio de dos ventiladores de tiro inducido y esta en función de la presión del hogar, la cual no varía en cualquier condición de carga manteniéndose una presión de columna estática de 2.5 " H₂O.

2.1.1.2. Turbina

Una turbina de vapor es una máquina que convierte la energía cinética lineal de un flujo de vapor a alta presión en movimiento rotacional transformándolo en trabajo útil mecánico.

Una turbina proporciona un flujo suave e ininterrumpido de potencia a altas velocidades de rotación, y proporciona un mejor uso de la energía calorífica en el vapor puesto que el metal de la turbina puede soportar la alta temperatura del vapor y descargar a una presión muy baja, lo que la incluye dentro de las turbinas de condensación.

La turbina es de 25,000 Kw. de potencia, es de tipo axial y gira a una velocidad de 3,600 RPM. Su presión de operación es de 850 psi a una temperatura de 900 °F.

Cuenta con toberas estacionarias que están situadas a la salida de la caja de vapor y teniendo tal forma que permiten que el vapor se expanda y alcance velocidades relativamente altas, por lo que esta velocidad es aprovechada para producir un movimiento a los alabes del rotor, absorbiendo así toda la energía cinética que lleva el flujo de vapor al salir de las toberas.

2.1.1.3. Re-calentadores

En el circuito del agua de alimentación se encuentran operando los siguientes equipos:

Intercambiadores de calor cerrados del tipo de carcasa y tubos; son calentadores de baja presión, montados horizontalmente en cascada y cuyo drenaje está directamente conectado al condensador, el control se hace por medio de una válvula de acción automática, al aprovechar la diferencia de presiones.

Calentador abierto de contacto directo, que se calienta con una purga de la turbina, se utiliza como desaireador o desgasificador. El repuesto del agua al ciclo es controlado por el nivel del pozo caliente del condensador. El derrame por alto nivel descarga al tanque de agua de repuesto.

Calentadores de alta presión, del mismo tipo de los calentadores de baja presión, con montaje horizontal y sus drenes están conectados directamente al desaireador. Estos además envían el agua caliente al domo de la caldera.

2.1.1.4. Bomba de alimentación

La caldera cuenta con tres bombas centrifugas de alimentación de agua con la capacidad suficiente para soportar la producción máxima de vapor y las pérdidas dada la gran diversidad de intercambiadores de calor que existen en la cabeza dinámica total.

Una de las bombas posee el tipo de lubricación hidrostática, controlada con medidores de nivel; las dos restantes cuentan con un sistema de auto-lubricación, ya que en el eje está instalada una bomba de engranajes.

2.1.1.5. Condensador

El condensador que se utiliza en la central térmica es del tipo de tubos y carcasa. Esta compuesto por una carcasa tubular de gran diámetro. El interior de la carcasa tiene un gran haz de tubos por el interior de los cuales circula agua de refrigeración. El vapor entra por el exterior de la carcasa y rodea el haz de tubos. Como los tubos están más fríos que el vapor, este condensa. Las gotas de condensado que se forman en los tubos van cayendo al fondo de la carcasa. Allí se recolectan en un recipiente que recibe el nombre de “pozo caliente”.

Como la temperatura de condensación es muy inferior a 200 °F y suele estar muy cercana a la temperatura ambiente, la presión dentro del condensador está por debajo de la presión atmosférica y típicamente está por debajo de los 2.95” Hg. absolutos. Esto hace que la máquina que opera entre la caldera y el condensador disponga de un mayor salto de presión utilizable.

El objetivo del condensador es bajar la presión contra la cual descarga la turbina. Esto permite mejorar el rendimiento del ciclo, pues aumenta la diferencia de presiones entre las cuales opera la máquina. Para que esto se logre, el agua de refrigeración que circula por el condensador debe mantener una temperatura fría constante, de tal manera que el vacío que se forma en el condensador se mantenga a una presión de 27" Hg. El condensado con bajo contenido de minerales que se forma se utiliza como agua de alimentación de la caldera.

El condensador esta dividido en dos partes, lo que permite que pueda trabajar con la mitad de su capacidad total, pudiéndose así realizar el mantenimiento por partes sin necesidad de interrumpir la generación de energía eléctrica. Tiene además un sistema de retrolavado que permite su limpieza en caso quedaran partículas sólidas en la tubería.

Tiene una superficie de condensación de 30,000 pie² para una capacidad de 190, 000,000 BTU/h y un condensado de 200,000 lb/h.

2.2. Torre de enfriamiento

En los sistemas de climatización modernos y en ciertos procesos industriales, se generan grandes cantidades de calor que hay que disipar al ambiente, haciendo necesario el empleo de agua para la refrigeración del sistema. Sin embargo, se tendrían grandes pérdidas al desechar el agua caliente.

Una alternativa que permite ahorrar agua y reducir los costos económicos consiste en enfriar el agua mediante una torre de enfriamiento y devolverla de nuevo al circuito. Las torres de enfriamiento son por lo tanto dispositivos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. El proceso es económico comparado con

otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor donde el enfriamiento es a través de una pared.

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura menor a la temperatura del agua, en estas condiciones el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación) originando que la temperatura del aire y su humedad aumenten y la temperatura del agua descienda, la temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura del aire a la entrada de la torre. Parte del agua que se evapora, causa la emisión de más calor, por eso se puede observar vapor de agua encima de la torre de enfriamiento.

Para crear un flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador, estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. Además, para conseguir una mayor eficiencia en estos aparatos se coloca interior un empaque con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que enfría.

Como se mencionó, el enfriamiento de agua en una torre tiene su fundamento en el fenómeno de evaporación, la evaporación es el paso de un líquido a estado de vapor y solo se realiza en la superficie libre de un líquido, un ejemplo es la evaporación del agua de los mares.

Las industrias utilizan agua de enfriamiento para varios procesos. Como resultado, existen distintos tipos de torres de enfriamiento, las cuales mencionaremos a continuación:

2.2.1. Clasificación

En la actualidad se emplean dos tipos de torres; el de tiro natural y el de tiro mecánico, el cual se divide en torres de tiro forzado y de tiro inducido, subdividiéndose este último en flujo a contracorriente y flujo cruzado.

- **Torres de tiro natural**

Estas torres son esencialmente apropiadas para cantidades muy grandes de enfriamiento y las estructuras de concreto reforzado que se acostumbra a usar, llegan a tener diámetros de hasta 25 pies (7.62 m) y alturas de 340 pies (103.7 m).

La conveniencia de diseño obtenida gracias al flujo constante del aire de las torres de tiro mecánico no se logra en un diseño de torre de tiro natural. El flujo de aire a través de la torre de tiro natural se debe en su mayor parte a la diferencia de densidad entre el aire fresco de la entrada y el aire tibio de la salida.

El aire expulsado por la columna es más ligero que el del ambiente y el tiro se crea por el efecto de chimenea, eliminando con ello la necesidad de ventiladores mecánicos. Las torres de tiro natural operan comúnmente a diferencia de presión de aire en la región de 0.2 plg de manómetro de agua, cuando se someten a una carga plena. La velocidad media del aire por encima del relleno de torre es, por lo común de 4 a 6 pies/s (1.83 m/s).

Figura 4. Torres de tiro natural.



- **Torres de tiro mecánico**

En este tipo de torres a diferencia de los de tiro natural, se requiere una serie de componentes, los cuales son necesarios para forzar el flujo de aire entrar al interior de la misma.

El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersoras o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua, a través de unos orificios.

El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas siguientes:

- **Tiro mecánico inducido**

En esta tipo de torres de enfriamiento, el aire es inducido por uno o más ventiladores situados en la parte superior de la torre.

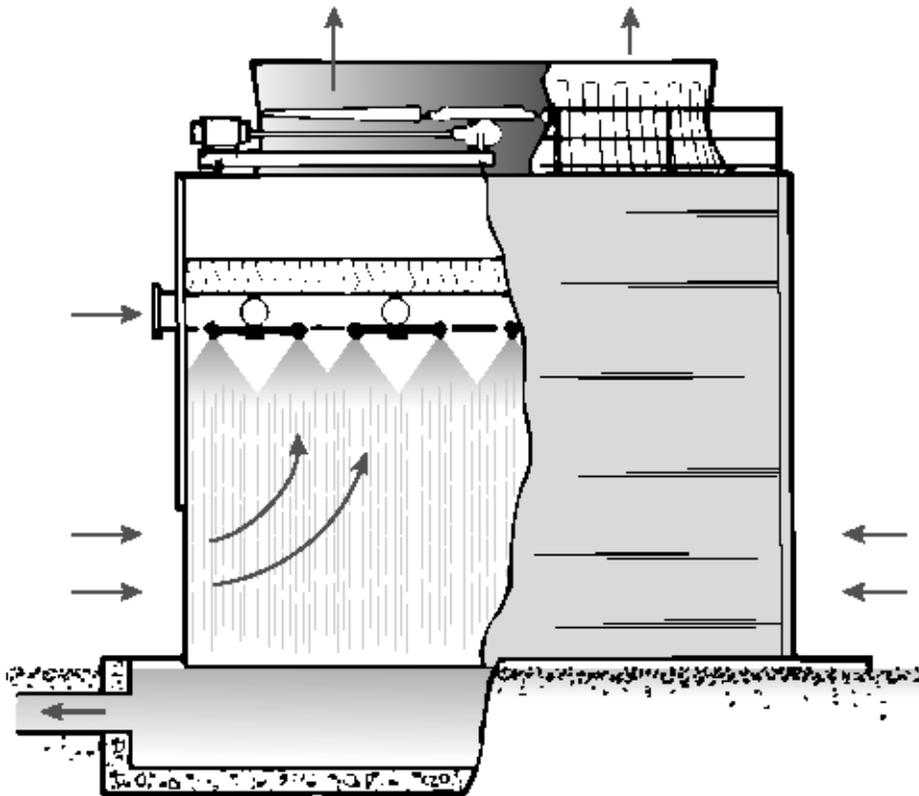
Los ventiladores son movidos por sistemas mecánicos que generalmente incluyen reductores, ejes de transmisión y motor eléctrico.

Este tipo de torres a su vez pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado.

- **Torres de flujo a contracorriente**

El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente, a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto (Figura 5). La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En éstas, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

Figura 5. Torre de flujo a contracorriente



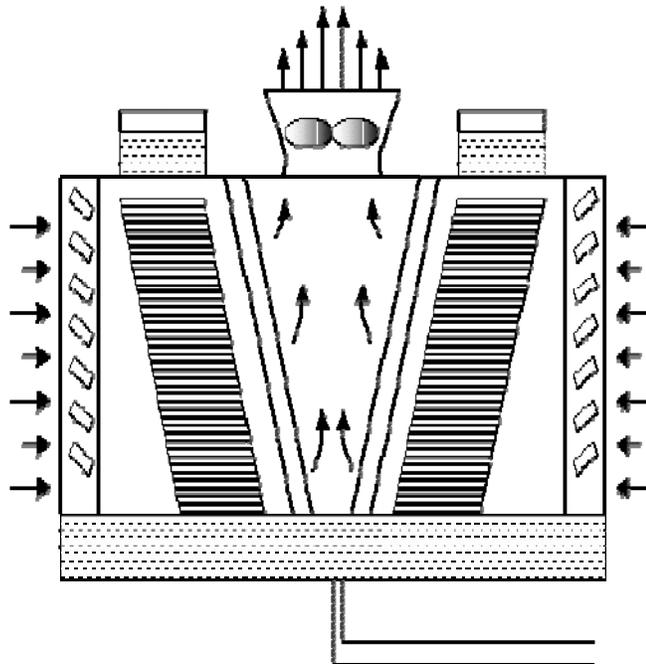
- **Torre de flujo cruzado**

En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende (figura 6). Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno.

El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera

un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.

Figura 6. Torre de flujo cruzado



2.2.2. Componentes

La torre de enfriamiento generalmente se compone de una pileta, de una estructura de madera o de metal, de ventiladores y de empaquetaduras que a continuación se describen:

2.2.2.1. Pileta

Se trata de un recipiente donde se recolecta agua fría que sale de la torre de enfriamiento. Su construcción debe ser de tal manera que elimine el peligro de

que la bomba absorba aire cuando opera con un mínimo de agua; tiene que ser accesible para remover la suciedad acumulada en el fondo.

2.2.2.2. Estructura

Básicamente es el soporte de la torre de enfriamiento. Su forma y solidez dependen de las características de diseño de la torre, la cual tiene que ser con normas específicas que dependen de su capacidad de funcionamiento.

2.2.2.3. Ventiladores

Dispositivo que tienen como objeto mantener el flujo constante de aire, a través de la torre. Esta parte difiere su posición dependiendo el tipo que sea, es decir las torres que son de tipo forzado, el ventilador está ubicado en la parte baja; en cambio las torres de tipo inducido tienen el ventilador en la parte superior.

2.2.2.4. Empaquetadura

Esta parte es una de las importantes de las torres de enfriamiento, ya que su función principal es generar un área mayor de contacto entre el aire y el agua, con una mínima pérdida de presión del aire. Existen dos tipos:

- **De salpicadura**

Este tipo de empaquetaduras están diseñadas para torres de flujo cruzado.

- **De película**

Este tipo es utilizado exclusivamente por las torres de flujo en contracorriente.

2.3. Sistema de circulación

Son todas las partes de la torre de enfriamiento, desde los equipos que envían el agua caliente hacia la parte superior, hasta un sistema de tubería distribuido a lo largo de la torre.

Cada tipo de torre tiene diferente forma de distribuir el agua caliente a través de ella, en este caso mencionaremos dos tipos, el de flujo a contracorriente y el de flujo cruzado.

- En las torres a contracorriente el flujo se dispersa a través de un sistema de distribución de spray a alta presión para lograr cubrir toda el área que cubre la empaquetadura.

El patrón de spray de las boquillas es sensible a los cambios en el flujo del agua y a los cambios de presión.

Este tipo de torres tienen un área de presión menor a las de flujo cruzado pero requieren altura adicional, altura estática y cabeza dinámica para alcanzar el mismo efecto de enfriamiento.

- Las torres a flujo cruzado utilizan un sistema diferente. El agua caliente es distribuida a través de unos pequeños orificios ubicados en el piso de la base de la entrada.

Tal sistema no tiene el mismo funcionamiento como el de los spray. El aire se mueve horizontalmente a través del empaque y se cruza con el agua que cae. En este tipo de torres el componente de presión interna de

la cabeza de bombeo es insignificante debido a que el flujo es principalmente por gravedad.

Comparando las torres de flujo cruzado con las de contracorriente pueden requerir de 5 a 6 psig adicionales de cabeza para alcanzar una distribución adecuada del spray.

2.3.1. Componentes

Las torres de enfriamiento necesitan una serie de componentes que juntos constituyen el sistema de enfriamiento deseado, estos son:

2.3.1.1. Bombas

Es el equipo que adiciona energía al agua, para hacerla recircular a través de todo el sistema. Los elementos que componen la instalación de una bomba son:

- Tubería de aspiración, que incluye prácticamente en la brida de aspiración.
- El impulsor o rodete, formado por un conjunto de alabes que puede adoptar diversas formas, según la misión que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solitariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrifugas) o permanece axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

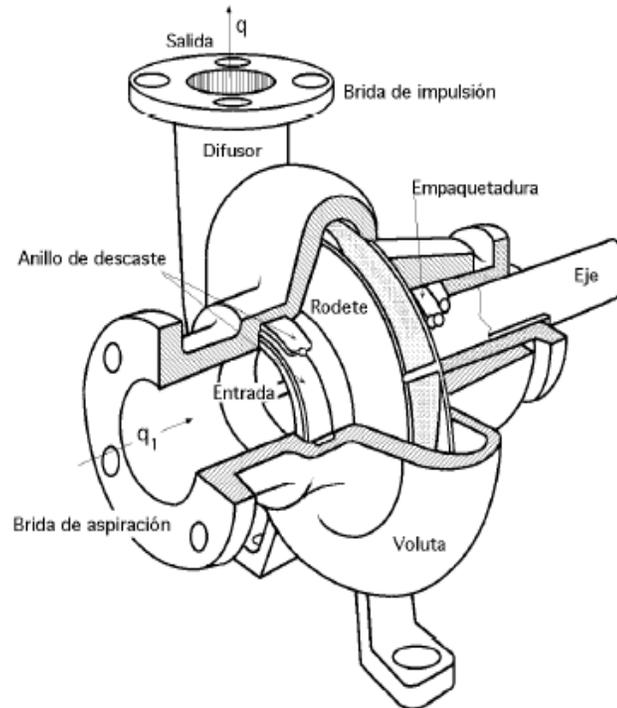
Los alabes del rodete someten a las partículas del líquido a un movimiento de rotación muy rápido. Siendo proyectada al hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandona el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.

- La voluta es un órgano fijo que esta dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentado hasta que las partículas liquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma ala alcanzada por el líquido en el rodete.

- Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y la velocidad creadas en la bomba.

Figura 7. Partes de una bomba centrífuga



2.3.1.2. Válvulas

Dispositivos que sirven para dar pasó al flujo del agua o para retenerlo. Existe una variedad de tipos de válvulas desde manuales hasta automáticas.

La torre de enfriamiento utiliza habitualmente válvulas de compuerta, los cuales están ubicados en el lado de succión y descarga de las bombas de alimentación.

2.3.1.3. Tubería

Son diferentes partes que conforman la torre de enfriamiento, y su función principal comunicar el agua a la parte superior y distribuirlo a unos spray para posterior dosificación.

2.4. Motores eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Cuando la electricidad proveniente de una batería u otra fuente de energía se conectan a un motor y el eje comienza a girar. Algunos motores funcionan con fuentes de corriente continua (DC), por ejemplo con una batería, y otros se abastecen con corriente alterna (AC). Si bien existen muchos diseños de motores eléctricos, los principios de funcionamiento son los mismos.

Existen dos principios de física relacionados, que explican el funcionamiento de los motores. El primero es el principio de la inducción electromagnética, descubierto en 1831, por el científico e inventor británico Michael Faraday, que establece lo siguiente: si un conductor se mueve a través un campo magnético o si se modifica la intensidad de un campo magnético que pasa a través de un circuito estacionario, se produce o "induce" una corriente eléctrica en el conductor. El segundo principio, que se opone al primero, es el de la reacción electromagnética, observado por el físico francés André Marie Ampère en 1820.

De esta forma, cuando una corriente eléctrica es transportada por un conductor, por ejemplo, un alambre de cobre situado en un campo magnético, este alambre experimentará una fuerza. Un conductor enrollado de manera correcta forma una bobina que si se la conecta a una conexión eléctrica, se genera fuerza que hace que la bobina, acoplada al eje del motor, gire y de esta forma se logra el giro del motor.

2.4.1. Clasificación

En cuanto a los tipos de motores eléctricos genéricamente se distinguen motores monofásicos, que contienen un juego simple de bobinas en el estator, y polifásicos, que mantienen dos, tres o más conjuntos de bobinas dispuestas en círculo.

Según la naturaleza de la corriente eléctrica transformada, los motores eléctricos se clasifican en motores de corriente continua, también denominada directa, motores de corriente alterna, que, a su vez, se agrupan, según su sistema de funcionamiento, en motores de inducción, motores sincrónicos y motores de colector. Tanto unos como otros disponen de todos los elementos comunes a las máquinas rotativas electromagnéticas.

- **Motores de corriente continua**

La conversión de energía en un motor eléctrico se debe a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético, que se forma entre los dos polos opuestos de un imán, es una región donde se ejerce una fuerza sobre determinados metales o sobre otros campos magnéticos. Un motor eléctrico aprovecha este tipo de fuerza para hacer girar un eje, transformándose así la energía eléctrica en movimiento mecánico.

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta

alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el medio entre los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de la corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente continua, está formado por dos chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas. Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas. Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra.

Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la armadura empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

El esquema descrito corresponde a un motor de corriente continua, el más simple dentro de los motores eléctricos, pero que reúne los principios fundamentales de este tipo de motores.

- **Motores de corriente alterna**

Los motores de corriente alterna tienen una estructura similar, con pequeñas variaciones en la fabricación de los bobinados y del conmutador del rotor. Según su sistema de funcionamiento, se clasifican en motores de inducción, motores sincrónicos y motores de colector.

- **Motores de inducción**

El motor de inducción no necesita escobillas ni colector. Su armadura es de placas de metal magnetizable. El sentido alterno de circulación, de la corriente en las espiras del estator genera un campo magnético giratorio que arrastra las placas de metal magnetizable, y las hace girar. El motor de inducción es el motor de corriente alterna más utilizado, debido a su fortaleza y sencillez de construcción, buen rendimiento y bajo coste así como a la ausencia de colector y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha a velocidad constante.

- **Motores sincrónicos**

Los motores sincrónicos funcionan a una velocidad sincrónica fija proporcional a la frecuencia de la corriente alterna aplicada. Su construcción es semejante a la de los alternadores. Cuando un motor sincrónico funciona a potencia constante y sobreexcitado, la corriente absorbida por éste presenta, respecto a la tensión aplicada un ángulo de desfase en avance que aumenta con la corriente de excitación. Esta propiedad es la que ha mantenido la utilización del motor sincrónico en el campo industrial, pese a ser el motor de inducción más simple, más económico y de cómodo arranque, ya que con un motor sincrónico se puede compensar un bajo factor de potencia en la instalación al suministrar

aquél la corriente reactiva, de igual manera que un Condensador conectado a la red.

- **Motores de colector**

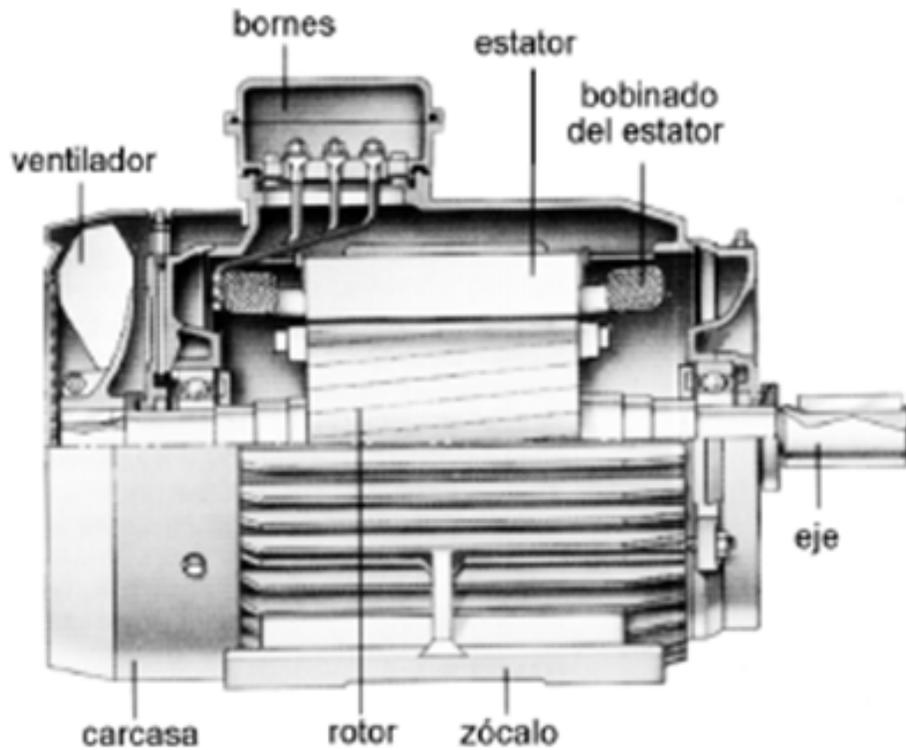
El problema de la regulación de la velocidad en los motores de corriente alterna y la mejora del factor de potencia ha sido resuelta de manera adecuada con los motores de corriente alterna de colector. Según el número de fases de las corrientes alternas para los que están concebidos los motores de colector se clasifican en monofásicos y polifásicos, siendo los primeros los más utilizados. Los motores monofásicos de colector más utilizados son los motores serie y los motores de repulsión.

2.4.2. Componentes

Los componentes básicos de todo motor eléctrico son el inductor o estator y el inducido o rotor (figura 8).

El inductor es el elemento creador de campo y el inducido el elemento de la máquina donde se efectúa propiamente la conversión magnética en los motores, la energía eléctrica a mecánica.

Figura 8. Partes de un motor eléctrico



- **El inductor-estator**

Es la parte fija del motor. Está constituido por una carcasa en la que está fijada una corona de chapas de acero de calidad especial provista de ranuras.

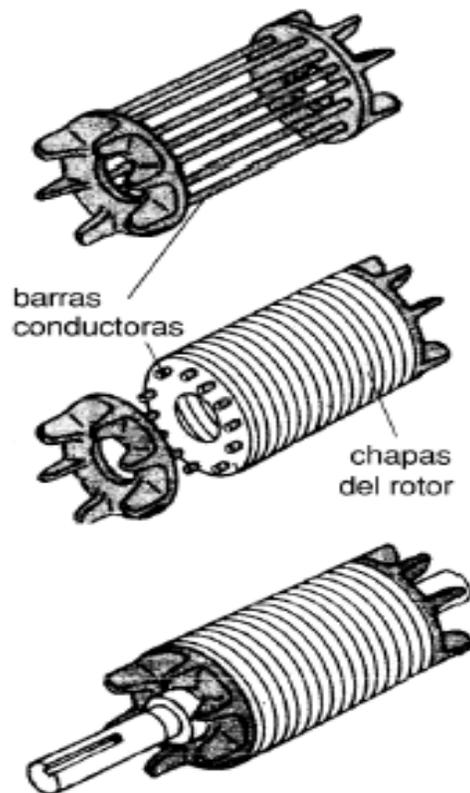
Los bobinados, de sección apropiada, están distribuidos en esta última y forman un conjunto de devanados que contienen tantos circuitos como fases de la red de alimentación.

- **El inducido-rotor**

Es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y constituido por un conjunto de chapas de acero y conductores que crean el campo electromagnético del rotor y que sigue al del estator.

Si el rotor es de jaula (también llamado en cortocircuito), está formado por unos conductores no ferromagnéticos, oblicuos respecto al eje, en los que se crea la corriente rotórica. Esta corriente, con el conjunto de chapas ferromagnéticas, crea el campo del rotor. La denominación de “jaula de ardilla” se debe a la forma del rotor que recuerda de dicha jaula.

Figura 9. Rotor de motor eléctrico



3. FUNCIONAMIENTO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

3.1. Generalidades de una torre de enfriamiento de tiro inducido tipo contracorriente

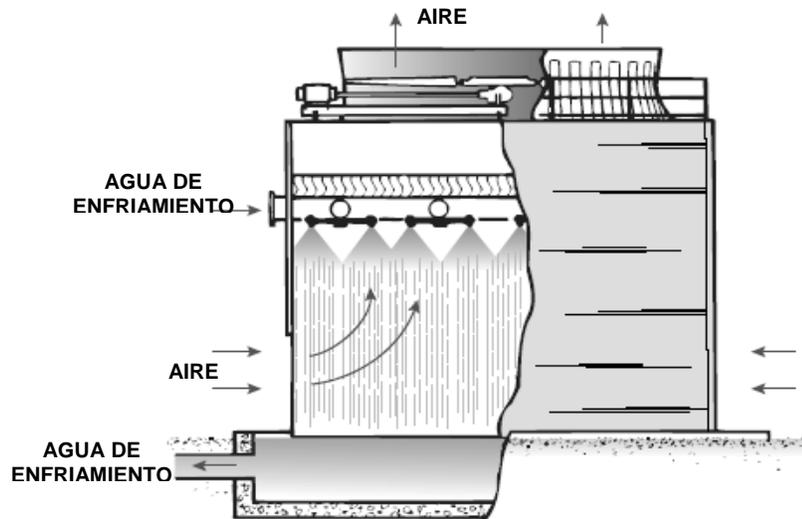
Este tipo de torres de enfriamiento son instalaciones formadas por estructuras de metal, madera o concreto; dichos dispositivos contienen diferentes partes tales como ventiladores, eliminadores de rocío, empaquetaduras, válvulas, etc.

El funcionamiento de este tipo de torres es la siguiente:

La torre de enfriamiento recibe agua a una temperatura elevada y producen la evaporación de una parte de la misma, devolviendo el resto el agua enfriada al circuito. El principio físico en el que se basa se denomina enfriamiento evaporativo, que se logra al pasar una corriente de aire por una región donde se pulveriza agua, donde debido a la baja humedad relativa, parte de la corriente de agua líquida se evapora. Con el fin de conseguir la evaporación, se crea una fuerte corriente de aire mediante el empleo de ventiladores que están instalados en la parte superior de la misma; esta corriente de aire se dirige en dirección contraria a la del agua.

El agua entra siempre por la parte superior y es distribuida de tal forma que establezca el mejor contacto posible con el aire atmosférico que asciende procedente de la parte inferior de la torre. Para lograr este efecto el agua se reparte uniformemente, con ayuda generalmente de unos pulverizadores, sobre un arreglo de láminas que aumenta el tiempo y la superficie de contacto entre ambos fluidos; este contacto conduce a una pequeña evaporación de parte del agua. En la figura 10 se puede observar la operación de la torre de enfriamiento.

Figura 10. Diagrama de operación de la torre de enfriamiento



Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección y la transferencia de vapor desde el agua al aire por conducción, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación. En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos.

En la transmisión de calor por conducción, el agua caliente y el aire seco intercambian calor al entrar en contacto y como resultado se evapora una porción del agua debido a la diferencia de presiones.

Con el fin de evitar que se produzcan pérdidas de agua al arrastrarse gran cantidad de gotas por la corriente de aire, se emplea un dispositivo denominado separador de gotas o eliminador de rocío, situado a la salida de la corriente de

aire. En la parte inferior se sitúa, como es lógico, una bandeja o pileta cuya misión es la de recoger todo el agua que cae, una vez enfriada.

En la bandeja se encuentra instalado un sensor de nivel, con el que se regula el nivel del agua, de tal forma que permite la entrada de agua de renovación a medida que se producen pérdidas en el circuito.

Como ya se mencionó, la torre es de tiro inducido y de flujo a contracorriente. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del arreglo de láminas, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto. Se observa en la figura 10, el aire entra a través de más de una de las paredes de la torre, con lo que se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación.

3.2. Ventajas operativas del equipo

La ventaja que tiene este tipo de torre es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento.

Estos sistemas tienen muchas ventajas en operación, es decir, que guarda algunas características muy especiales que la diferencian de otras torres de tiro mecánico. Una de ellas es, el motor de movimiento del eje de los ventiladores está ubicado fuera del sistema en sí, es decir, no tiene contacto directo con la corriente de aire húmedo que circula dentro de la misma, protegiéndolo así de un corto circuito que se podría provocar por el ambiente húmedo que se mantiene en el sistema.

La empaquetadura que utiliza este tipo de torres está diseñada para que el área de contacto de aire-agua sea más amplia, beneficiando así la transferencia de calor.

Los eliminadores de rocío que contienen este tipo de torres, evita que gotas de agua que son arrastradas por el flujo de aire se pierda.

3.3. Ventajas ambientales

En muchas aplicaciones de las técnicas que requieren la extracción de calor para el confort en recintos determinados o para el desarrollo de procesos industriales se impone la transferencia de esta forma de energía que, cuando no puede aprovecharse como tal, se ha de tirar en sumideros que tradicionalmente se consideran como inocuos e inagotables: normalmente aire atmosférico o los caudales o reservas de agua.

El progreso y rápido avance de los conocimientos medioambientales y del equilibrio térmico de la tierra ha ido poniendo en evidencia que la aparente sencillez y economía de utilizar los sistemas de transferencia directa de calor sensible al aire, además de las limitaciones que imponga su temperatura tiene algunos inconvenientes y elevados costos asociados al consumo energético del proceso, a las consiguientes emisiones de CO₂ a la atmósfera y al posterior efecto invernadero, entre otros.

La utilización de sistemas de enfriamiento evaporativo reduce significativamente estos efectos, por lo que son altamente recomendables en instalaciones idóneas por la forma y cantidad de calor a disipar. Resultan especialmente útiles en procesos de enfriamiento donde se requieran en las épocas más cálidas temperaturas resultantes entre 45° y 25°C, mayormente en zonas de clima

cálido y seco, pudiendo alcanzar en verano niveles inferiores a los 25°C en función de la temperatura húmeda disponible y también trabajar con fluidos recibidos a mayores temperaturas, próximas a 85°C.

Se puede mencionar entre otras ventajas que tienen los sistemas evaporativos como son las torres de enfriamiento, es la gran cantidad de agua limpia que se reintegra a la atmósfera como consecuencia de la evaporación.

La utilización de torres de enfriamiento ha venido a mejorar notablemente las condiciones ambientales que antes no se tomaban en cuenta, con este sistema el agua caliente proveniente de un proceso industrial se recircula nuevamente en el interior de la torre, evitando así verter esta agua a ríos, lagos o mares como habitualmente se hacía. Esta práctica provocaba que las especies acuáticas que vivían en estos sumideros se extinguieran totalmente.

4. OPERACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

4.1. Control de funcionamiento operativo

Actualmente, en el ingenio “Santa Ana” se cuenta con un sistema de monitoreo totalmente automatizado, esto permite que se mantenga un control bastante eficiente de todos los componentes de la torre de enfriamiento.

Se debe de tomar en cuenta los siguientes puntos de control que se numeran a continuación.

- Se debe de mantener un monitoreo constante del amperaje consumido por los motores de los ventiladores y de las bombas de alimentación de la torre.
- Controlar constantemente las vibraciones del conjunto motor y eje de transmisión, debido a que este tipo de torres traen un sistema de monitoreo de vibraciones, el cual está instalado a un costado de cada motor.
- Mantener un nivel apropiado de la pileta receptor de agua fría, el cual debe de ser igual o mayor a 4 pies.
- Revisar que todos los aspersores que componen el sistema de alimentación estén funcionando correctamente y que no tengan ningún tipo de obstrucción.
- Revisar toda la tubería para verificar que no halla ningún tipo de fugas.

- Controlar la temperatura de entrada de agua a la torre, el cual debe de ser menor a 120°F, si se pasa de esta temperatura podría dañar considerablemente la empaquetadura, dicha parte ésta diseñada para temperaturas menores a la indicada.
- Controlar temperatura de agua a la salida de la torre, el cual debe mantener un diferencial de 15°F.
- Controlar la presión de agua a la entrada de la torre, el cual debe de ser de 12 a 13 Psia, si bajara de este rango, tendríamos el problema de no tener una atomización adecuada del agua en la parte superior de la torre.
- Verificar la velocidad de giro del ventilador, el cual debe de ser de 105 RPM.

4.2. Procedimiento para sacar o meter en línea una torre de enfriamiento

En términos generales, la puesta en marcha y pruebas de los equipos que hacen posible el funcionamiento del sistema de enfriamiento, necesitan ser realizados por personas capacitadas y supervisadas por personal calificado.

A continuación se desglosa un procedimiento necesario para la puesta en marcha de una torre de enfriamiento.

- **Limpieza previa y desinfección inicial**

Se debe tener en cuenta que la limpieza y desinfección se ha de realizar no solo en la torre sino en todo el circuito de agua que llega y sale de ella en su

recorrido por la instalación (tubería, depósito, bombas, etc.), asegurando la ausencia de tramos ciegos o puntos muertos de circulación e incluyendo en el tratamiento los equipos o circuitos en by-pass.

- **Comprobaciones elementales en el proceso de puesta en servicio de los equipos**

Sin menospreciar la comprobación de todos los componentes de una torre de enfriamiento, se señalan algunas muy específicas, como son:

- a) Consumo de motores
- b) Secuencia de funcionamiento
- c) Nivel de agua en pileta

a. Consumo de motores

Se debe comprobar el sentido de giro del motor y medir el amperaje, no se deberá poner en marcha los ventiladores sin el funcionamiento previo de las bombas con los caudales normales de circulación.

El funcionamiento en seco (sin circulación de agua) de los ventiladores puede ocasionar un mayor consumo de los motores que cause su recalentamiento o el disparo de sus protecciones.

b. Secuencias de funcionamiento recomendable

Dentro de la programación general del sistema en el que se incluyan, conviene tener en cuenta las siguientes condiciones particulares:

La secuencia de funcionamiento de los equipos de enfriamiento evaporativo debe organizarse frecuentemente de modo que arranque/n en primer lugar la/s bomba/s de recirculación y a continuación los ventiladores; la parada se realiza de orden inverso.

Tal disposición ayuda a evitar la dispersión de gotas en el aire y esporádicas emisiones de aerosoles. Además contribuyen al correcto mojado en toda la superficie de los rellenos o serpentines en los arranques y a su lavado en las paradas, especialmente en los equipos con distribución de agua por gravedad.

Si se pretende una regulación de capacidad del equipo se podrá actuar sobre los ventiladores mediante paradas escalonadas de los mismos o variación de su velocidad.

La pretensión de regulación de capacidad mediante la variación del caudal de la bomba recirculadora puede introducir un funcionamiento inestable al no asegurar un flujo equilibrado por todos los rociadores o dispositivos de distribución del agua sobre la totalidad de la superficie del relleno o del serpentín.

El flujo de agua intermitente sobre las superficies donde debe evaporarse, puede dejar secciones o tramos secos por períodos variables y repetidos, lo que favorece la fijación de las sales y/o productos que llegaran disueltos, iniciando o agravando un proceso de incrustación.

Por estas razones y con mayor motivo, debe evitarse la regulación de capacidad por el procedimiento de parar la bomba de recirculación.

c. Nivel de agua en pileta

Una vez llena hasta el nivel indicado por el fabricante, regularmente se toma 0.3281 ft. o más sobre la parte más elevada de la toma de agua para la bomba de recirculación, se pondrá en marcha la bomba y los ventiladores del equipo con lo que descenderá el nivel a causa de la retención del agua que se produce en el relleno durante el normal funcionamiento. A partir de este punto, puede realizarse la siguiente comprobación:

- **Nivel demasiado bajo**

Se debe observar ese nivel bajo comprobando que no propicia la formación de burbujas de aire en las proximidades de la aspiración de la bomba de agua o de la tubería que lleva hasta ella. Se deberá elevar el nivel hasta corregir ese efecto, pues semejante entrada de aire puede producir deterioro en rodetes y voluta de la bomba llegando incluso a fenómenos de cavitación de efecto perjudicial.

- **Nivel demasiado alto**

Puede manifestarse el inconveniente contrario: que en las paradas del ventilador y bomba, una vez escurrida el agua retenida en relleno o serpentines, el nivel suba excesivamente, con la consiguiente pérdida de agua con productos de los tratamientos de calidad y desinfección disueltos en ella vertiéndose por el rebosadero, en tal caso debe procederse a bajar el nivel para evitar tales pérdidas o reducirlas a tasas aceptables. En algún caso éstas pérdidas, con cierto control, pueden entrar en el cómputo de purgas cuando éstas se requieran para conseguir la adecuada calidad de agua (concentración).

4.3. Tratamiento químico del agua

En el ciclo de enfriamiento se extrae el calor del agua de proceso para su reutilización, sin embargo, una parte de la misma se evapora al ambiente lo que hace necesario que este líquido perdido se reemplace continuamente.

En este proceso, es posible que el agua que se inyecta contenga sólidos en suspensión, que si se añaden a los del agua de la torre y los que puedan provenir del ambiente, pueden ocasionar incrustaciones en el material, que son dañinos para la estructura. Para eliminar estos sólidos se mantiene constantemente una purga del agua en la torre a través de una compuerta de desfogue; el agua perdida se repone con agua de pozo para mantener el nivel en el sistema.

El mantenimiento de la eficiencia del sistema de enfriamiento es de vital importancia para garantizar la correcta operación del condensador; el elemento fundamental de este sistema es el agua, la cual es susceptible a ser afectada por la formación de algas, las bacterias, sólidos en suspensión, etc.

Frente a estas formaciones, el agua recibe tratamiento mediante la adición de cloro y biocida, los cuales sirven para desinfectar el agua, evitando que se formen bacterias y algas. Además, se le adiciona tratamiento anticorrosivo para evitar el desgaste de la tubería y los elementos metálicos que están en contacto con el agua; el antiincrustante se le añade para evitar la formación de capas de material en la estructura, las cuales tienen un efecto dañino sobre la misma.

5. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento, tanto a nivel preventivo como correctivo, resulta esencial para conseguir prolongar en el tiempo las condiciones de funcionamiento eficaz de los equipos y maquinarias en general, pero de manera especial de las torres de enfriamiento por sus condiciones de funcionamiento y situación a la intemperie resultan muy vulnerables a diversos agentes externos muy variables y de difícil control.

La implantación y seguimiento del mantenimiento preventivo tiene una enorme repercusión en el ahorro energético y en la vida útil de los equipos.

Los estudios y consiguientes motivaciones de ahorro energético derivados de la torre de enfriamiento, básicamente se basa en equipos limpios y en buen estado.

Actualmente, se está llevando a cabo el proceso de implementación de un tipo de mantenimiento preventivo en la empresa, por medio de actividades programadas dentro de órdenes de trabajo; este tipo de mantenimiento consiste en planificar las actividades que se le van a asignar a cada trabajador y se le entrega una orden de trabajo para cada una de las tareas que van a realizar. Cada tarea incluye las actividades específicas que deben realizarse dentro de la misma.

Al utilizar un programa de mantenimiento por medio de órdenes de trabajo se puede planificar desde el inicio de la época de no zafra, la fecha en que se va a trabajar el mantenimiento de la torre de enfriamiento, de tal manera que para esta fecha se puedan tener en bodega los repuestos y el material necesario para la realización de las actividades dentro del mantenimiento, así como

también se puede llevar un mejor control de la mano de obra asignada a estas tareas. Con lo anterior se pretende optimizar los recursos y minimizar el tiempo empleado dentro de la reparación.

A continuación se describe el mantenimiento aplicado a cada uno de los componentes de la torre.

5.1. Pileta

La pileta está fabricada de concreto, por lo cual el mantenimiento se basa en la limpieza interior y exterior de ésta, realizando también una inspección minuciosa de las paredes de la misma, buscando algún tipo de fisura que provoque fugas de agua.

La limpieza debe realizarse para eliminar algún tipo de alga, o sales que se hayan formado cuando estaba en operación.

5.2. Estructura de madera

La estructura está formada por tres niveles, comprendida en 19 secciones transversales y 10 longitudinales.

La estructura es la que soporta el peso de todos los componentes del sistema de enfriamiento y esta anclada a la pileta de almacenamiento por medio de pernos.

Todas las uniones que componen la estructura, llevan en la parte interior un separador de hule (ver figura 11), el cual su función es amortiguar cualquier vibración y disminuir la holgura que queda entre madera y madera.

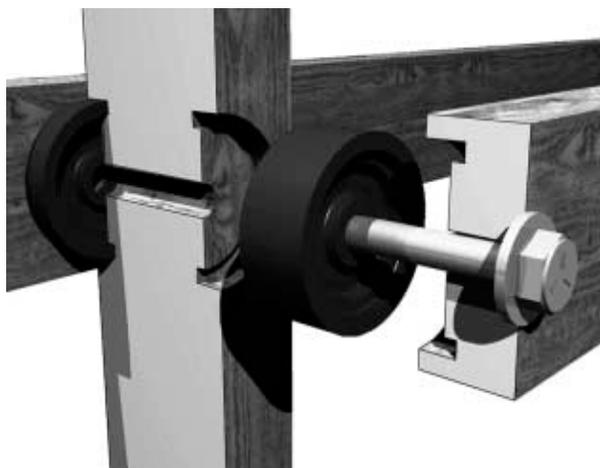
El mantenimiento de esta estructura se compone de los aspectos siguientes:

- Revisar cada una de las uniones anteriormente descritas, revisar cada uno de los tornillos, tuercas y arandelas que lo componen, observando que no tengan indicios de corrosión.

A los componentes metálicos se recomienda untar Anti-seize, el cual es una especie de grasa que evita que las partes metálicas tengan contacto con el agua y la suciedad, impidiendo así el apareamiento de corrosión en éstas.

- Revisar el apriete de todos los tornillos que componen la estructura.

Figura 11. Uniones de estructura



- Lavar y cepillar toda la estructura de madera aplicando jabón neutro.
- Después de haber hecho la limpieza completa de la estructura, aplicar amonio cuaternario, el cual es un químico que sirve para crear una capa protectora contra bacterias y algas.

5.3. Sistema de alimentación de agua

El sistema de alimentación de agua se compone básicamente de motores, bombas, tubería y valvulería en general. A continuación se describe el mantenimiento de cada componente.

5.3.1. Sistema de bombeo

- **Motor**

Los motores son de tipo trifásicos, con ventilación exterior; como todos los equipos, estos motores requieren de un mantenimiento adecuado para garantizar una operación favorable.

Un programa de mantenimiento es basado en tres conceptos:

1. Limpieza
2. Inspección periódica
3. Inspección o cambio de piezas

1. Limpieza

Este aspecto es el más importante, es uno de los problemas más perjudiciales en la vida de los motores eléctricos. La suciedad en éstos puede provocar cortos circuitos y calentamiento dentro del devanado, perjudicando el recubrimiento o barniz que cubre el devanado. Por esta razón, se debe limpiar exteriormente la carcasa, las aspas, el ventilador de enfriamiento, y el cobertor de la misma para mantenerlo con una temperatura adecuada.

En la figura 12 se muestra la ruta propuesta para la limpieza de motores, el cual tendrá una frecuencia de 7 días.

Figura 12. Hoja de la ruta limpieza de motores

TAREA DE MANTENIMIENTO PROGRAMADO					
		Código Tarea	Z045002		
		Nombre tarea	Limpieza Motores Cogeneración		
		Código del equipo	0716-0029		
		Planificador			
Breve Descripción de la tarea					
Limpieza de Componentes					
No.	Código	Descripción del equipo	Actividad	Aspecto Control	observaciones
01	0732-1060	Motor Ventilador #1	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
02	0732-1061	Motor Ventilador #2	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
03	0732-1062	Motor #1 Recirculación de Agua a Torre	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
04	0732-1063	Motor #2 Recirculación de Agua a Torre	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
05	0732-1064	Motor #3 Recirculación de Agua a Torre	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
06	0732-1065	Motor #4 Recirculación de Agua a Torre	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
07	0732-1066	Motor #1 enfriamiento Condensing	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
08	0732-1067	Motor #2 enfriamiento Condensing	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
09	0732-1068	Motor #3 enfriamiento Condensing	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
10	0732-1069	Motor #4 enfriamiento Condensing	Limpieza de Motor	Tapadera y Rejilla	
Mano de Obra					
Actividad	Tipo de Mano de Obra	Código que Efectua Mantenimiento	Duración en Horas		
01	Electricista , ayudante		0.25		
02	Electricista , ayudante		0.25		
03	Electricista , ayudante		0.25		
04	Electricista , ayudante		0.25		
05	Electricista , ayudante		0.25		
06	Electricista , ayudante		0.25		
07	Electricista , ayudante		0.25		
08	Electricista , ayudante		0.25		
09	Electricista , ayudante		0.25		
10	Electricista , ayudante		0.25		
observaciones					
Fecha de Inicio Tarea		Fecha de Final Tarea		Nombre Responsable :	
Firma Conformidad Trabajo _____					

2. Inspección periódica

Los motores eléctricos necesitan que se revisen a intervalos regulares, aproximadamente cada 500 horas de operación o cada 3 meses, según sea necesidad. Es necesario mantener el motor limpio y las aberturas para

ventilación despejadas, en cada inspección se deberán efectuar los siguientes pasos:

- a. Revisar si el motor está limpio. Verificar si el interior y el exterior del motor se encuentran libres de suciedad, aceite, grasa, agua, etc.

Puede haber acumulación de bagazo, polvo, etc., lo que provocará bloqueo de la ventilación del motor. Si el motor no está debidamente ventilado, puede haber recalentamiento, que puede provocar la falla prematura del motor.

- b. Usar periódicamente un “*megger*” (megohmetro) para asegurar que se halla mantenido la integridad del aislamiento en los devanados. Se recomienda registrar las lecturas del *megger* para notar alguna caída significativa en la resistencia del aislamiento.
- c. Chequear todos los conectores eléctricos para asegurar que estén bien apretados.

3. Inspección o cambio de piezas internas

El procedimiento que se debe seguir para realizar un mantenimiento preventivo para este tipo de motor eléctrico se describe a continuación.

Antes de desarmarlo se necesita hacer una prueba inicial, es decir, se debe de meguear para verificar la resistencia del aislamiento, y además se debe de rotar el eje del motor para verificar el estado de los cojinetes.

Después de haber realizado lo anterior, se procede a limpiar la carcasa y desarmar ventilador y la rejilla.

En la figura 13 se muestra la hoja de trabajo de mantenimiento preventivo de un motor eléctrico, el cual contiene descritas las actividades que componen dicho mantenimiento. Contiene también un listado de materiales de los cuales el electricista puede hacer uso de ellos.

Figura 13. Hoja de mantenimiento de un motor eléctrico

TAREAS MANTENIMIENTO PROGRAMADO						
Nombre código:						
Nombre tarea:		Mantenimiento Motor Bomba Recirculacion Torre de Enfriamiento				
Código del equipo:						
Planificador:						
Breve Descripción de la tarea.						
Revisión y mantenimiento						
Definición de Actividades				Texto Extendido		
1	Prueba inicial			1	Meguear y rotar para verificar estado de cojinetes	
2	Limpieza y desarme			2	Exterior	
3	Limpieza de enbobinado			3		
4	Limpieza y revision de partes			4	Revisar cojinetes, eje, tapaderas, etc. Cambiar o rectificar si necesario	
5	Armar y probar			5	Tomar amperaje	
Descripción						
	Diesel				galon	
	Gasolina				galon	
	Wype				libras	1 17402
	Jabon en polvo				libras	1
	Solvente dielectrico				galon	1 63,307
Mano de Obra						
Actividad	nombre	Puesto		Cantidad	T. en hrs	
1						
2						
3						
4						
5						
Disparo (Fecha)				Total Tiempo		
	Fecha Inicialización	fechas Finalización		Días	Horas	
DISPARO:						

- **Bomba**

Básicamente, el mantenimiento de una bomba se compone de las siguientes actividades:

- a. Mantenimiento de rutina
- b. Inspecciones de rutina
- c. Inspecciones trimestrales
- d. Mantenimiento anual

a. Mantenimiento de rutina

Es necesario mantener lubricados los cojinetes, mantener una constante vigilancia en el sello o estopa de la bomba, hacer un análisis de vibraciones, vigilar la presión de descarga y vigilar la temperatura.

b. Inspección de rutina

Debido a que estas bombas realizan un trabajo muy especial, es necesario inspeccionarlas diariamente, ya que con esto logramos detectar si existe un ruido anormal, si existe alta temperatura en los cojinetes, si produce alta vibración o si tiene alguna fuga en la carcasa propiamente o en la tubería.

c. Inspecciones trimestrales

Es necesario verificar la cimentación de la bomba y que los pernos de sujeción estén bien apretados, ya que si la bomba no está bien sujeta podría provocar

desbalance en el acople de la bomba y el motor, y esto podría provocar que sufra rupturas dicha parte.

También resulta muy importante la revisión del aceite de la bomba, por lo menos cada 3 meses o 2,000 horas, exceptuando cuando las condiciones atmosféricas sean muy adversas u otras condiciones que puedan contaminar o descomponer el aceite, o si éste es turbio o está contaminado, esto se puede ver a través del indicador de nivel.

Se debe revisar también la alineación del eje de la bomba y el motor, y si fuera necesario rectificarla.

d. Mantenimiento anual

Es necesario realizar una revisión general de piezas después de un año de uso continuo, es decir, se debe desarmar y revisar las piezas y además se deben soldar partes o piezas que están desgastadas.

En la figura 14 se muestra el diseño de una orden de trabajo para esta bomba, la cual contiene las actividades que se van a realizar, un listado de repuestos y materiales de uso general que necesitaremos para el mantenimiento de las mismas.

Figura 14. Hoja para mantenimiento de una bomba

TAREAS MANTENIMIENTO PROGRAMADO				
Nombre código:				
Nombre tarea:		Mantenimiento Bomba Recirculacion Torre Enfriamiento		
Código del equipo:				
Planificador:				
Breve Descripción de la tarea.				
Revisión de componentes				
Definición de Actividades			Texto Extendido	
1	Limpieza exterior	1	Vaciado de aceite; revision	
2	Desmontaje de piezas	2		
3	Mantenimiento de carcasa	3		
4	Revisión de componentes	4	Camisa, cojinetes, impulsor, retenedores, etc.	
5	Amar Y Montar	5		
6	Acoplar y alinear	6		
Materiales				
Descripción		Unidad	Cantidad	cod. Almacen
Masa acoplamiento	60T10	Unidad	1	715
rejilla p/acoplamiento	60T10	Unidad	1	846
sello de hule p/acoplamiento	60T10	Unidad	1	805
tapadera p/acoplamiento	60T10	Unidad	1	758
Cojinete	6311 SKF	Unidad	1	9168
Cojinete	7309B SKF	Unidad	1	9456
Grasa Beacon	EP-2	lb	1/2	74764
Wippe		lb	1/2	17402
Mano de Obra				
Actividad	Puesto		Cantidad	T. en hrs
1		Mecanico E - Soldador		1.5
2		Mecanico E - Soldador		2.5
3		Soldador 1 - Soldador		5
4		Mecanico E - Soldador		4
5		Mecanico E - Soldador		3
6		Mecanico E - Soldador		1
Disparo (Fecha)			Total Tiempo	
	Fecha Inicio		Días	Horas
	26/07/2004			
DISPARO:				

5.3.2. Tubería y valvulería en general

En este tipo de instalaciones, es muy importante mantener en buenas condiciones todas las partes que lo componen.

Debido a que éstos equipos trabajan constantemente durante varios meses, se necesita que todos estos componentes estén en buenas condiciones, por esta razón es necesario que en cada período de reparación, se debe de dar una revisión general en la tubería y válvulas de todo el sistema.

En la revisión de la tubería, se debe revisar todo el tramo de esta, buscando posibles orificios que se hallan formado y si es necesario cambiar el tramo dañado o repararlo.

En el caso de las válvulas, es necesario desarmarlas completamente y hacerle una prueba hidrostática, si la válvula no pasara dicha prueba, se procede a desarmarla, se debe de asentar con pasta esmeril para lograr un perfecto sello, y además se debe de cambiar la estopa, para evitar contratiempos en la operación de las mismas.

5.4. Tiro inducido

En las torres de enfriamiento todas las partes que lo componen son de total importancia, pero las piezas que están en movimiento como la transmisión y los ventiladores son sin duda los más importantes; éstas partes deben de estar en un cien por ciento de sus condiciones, debido a que el trabajo de este conjunto dependerá de una correcta transferencia de calor al aire que estos inducen dentro del sistema de enfriamiento.

5.4.1. Transmisión

El sistema de transmisión se compone de dos partes muy importantes, eje de transmisión el cual transmite el movimiento del motor y el reductor, el cual recibe y transforma un movimiento giratorio a una velocidad adecuada del ventilador.

- **Reductor**

La función principal de este equipo, es reducir la velocidad del motor eléctrico a una velocidad adecuada para el correcto funcionamiento del ventilador, efectuar el cambio de dirección entre los ejes y además debe de proporcionar el apoyo adecuado al ventilador.

En este caso el mantenimiento de éste se refiere a los siguientes aspectos:

- a) Revisar el nivel de lubricante del reductor (sin duda este es el aspecto que más se debe de cumplir, debido a que las partes internas de los reductores están bañados de aceite y no podrían trabajar en seco porque sufrirían desgaste).
- b) Debido que el reductor es una de las piezas de la torre de enfriamiento que está en contacto directo con el aire cálido y húmedo que sale del equipo, se debe de observar el estado de la pintura de la carcasa, si es deficiente retocarla nuevamente con una pintura que resista las condiciones a que está expuesto el reductor. Se debe de considerar también el estado de los tornillos, si presentan oxidación, untar anti-seize.

- **Barra de transmisión**

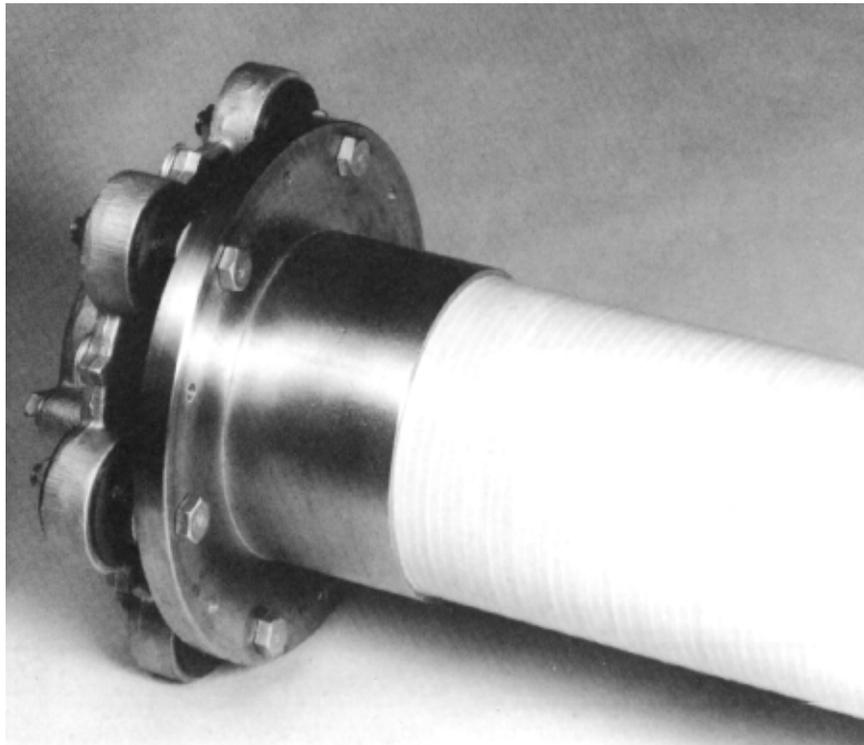
Esta parte es utilizada para prolongar el eje del motor, debido a que éste se encuentra fuera de la corriente de aire húmedo de la torre.

Esta barra está diseñada para recibir poco mantenimiento.

El mantenimiento consiste en los siguientes aspectos:

- a) Limpieza general del eje.
- b) Reapriete de tornillos de unión.
- c) Revisión de copling flexible. Esta parte del eje está compuesta por tornillos que hacen la función de balancear al eje. Es importante revisar esta parte (Figura 15) ya que tiene un componente de caucho y regularmente éste se agrieta y pierde las características para las que fue diseñado.

Figura 15. Copling flexible



5.4.2. Ventilador

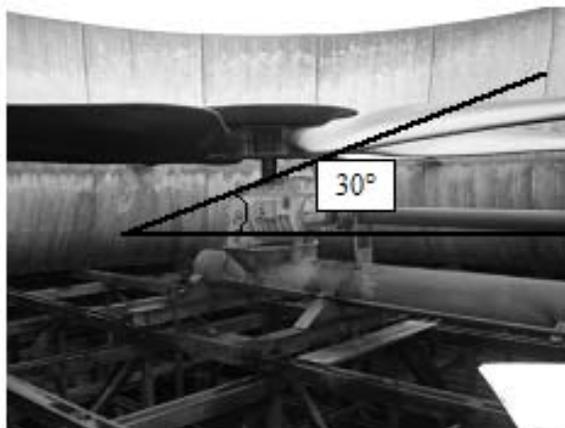
Los ventiladores que están instalados en la torre de enfriamiento son de tipo hélice, éste tipo predominan en la industria de las torres de enfriamiento, debido a su habilidad de mover inmensas cantidades de aire a presiones relativamente bajas.

Este tipo de ventilador es fabricado de fibra de vidrio y está diseñado para resistir las inclemencias que hay dentro de la torre de enfriamiento.

El mantenimiento para éste componente de la torre se define a continuación:

- a. Se debe de limpiar cada aspa del ventilador, ya que éste no debe de tener ningún tipo de suciedad, es decir, no debe de tener incrustado ningún tipo de alga o sales que se hallan formado por exceso de químico o por una mala operación directamente.
- b. Se debe revisar el ángulo de cada aspa del ventilador, ya que éste debe de ser de 30° . (Ver figura 16)

Figura 16. Ángulo de inclinación aspas del ventilador



- c. Se debe de retorquear cada uno de los pernos y tuercas que sujetan las aspas del ventilador con el torque respectivo, según el tornillo que utilizan. (Ver apéndice figura 40)

Figura 17. Coupling apriete de aspas del ventilador



6. COMPARACIÓN DEL CICLO *RANKINE* QUE OPERA CON UN TURBO GENERADOR DE 25 MW ANTES Y DESPUÉS DE UTILIZAR LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

6.1. Eficiencia del Ciclo *Rankine*

Al llevar a cabo la prueba de comportamiento del sistema es indispensable seguir ciertas normas antes de empezar la misma, con el fin de que los resultados sean lo más exactos que se puedan.

Inicialmente se necesita hacer un estudio de la instalación, para poder conocer los equipos y ubicar donde están colocados los instrumentos de medición.

Se traza un diagrama de flujos de la instalación, en donde se van a establecer los puntos en los que es necesario conocer las condiciones de presión y/o temperatura, para encontrar los valores de entalpía, entropía y volumen específico.

Es necesario que todos los instrumentos estén bien calibrados, ya que en el análisis se parte de la suposición de que todas las lecturas tomadas de los instrumentos son reales y reflejan el comportamiento exacto del sistema de vapor.

Para el registro de los datos se va a utilizar un sistema de monitoreo por computadora, de tal manera que se obtenga el promedio de los datos en una determinada cantidad de tiempo y así obtener información más precisa del sistema.

6.1.1. Bases teóricas de la prueba

La ecuación de la energía aplicada a un proceso cíclico estacionario exige que el calor neto que entra (calor suministrado) sea igual al trabajo neto que sale. De ahí que el rendimiento para el sistema esté representado por la expresión

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{sum}}}$$

El trabajo neto se representa como la diferencia de trabajo realizado por la turbina a la salida del sistema y por las bombas para circular el condensado de regreso a la caldera. Entonces, el rendimiento para el ciclo Rankine queda representado como

$$\eta = \frac{W_{T,\text{sal}} - W_{B,\text{ent}}}{q_{\text{sum}}}$$

El trabajo realizado por las bombas está representado como la diferencia de entalpías del fluido entre la entrada y la salida de la misma, $h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}}$. Sin embargo, un método alternativo consiste en calcular el trabajo isentrópico de la bomba con la ecuación de trabajo en régimen estacionario, y si se considera que el volumen específico del agua líquida desde el estado de saturación al estado de líquido comprimido en las condiciones dadas tiene una variación menor al 1%, el trabajo de la bomba se determina a menudo con la precisión deseada mediante la relación

$$W_{B,\text{ent}} = v_{f,\text{ent}} (P_{\text{sal}} - P_{\text{ent}})$$

Siendo $v_{f,i}$ el volumen específico del líquido en la entrada del líquido a la bomba.

El trabajo realizado por la turbina de vapor se considera también como una diferencia de entalpías, sin embargo, como a esta se le extraen fracciones del flujo de vapor para calentar el agua de alimentación de la caldera, el trabajo que efectúa deberá considerar también esta condición.

El calor suministrado al sistema por unidad de masa se puede como la diferencia de entalpías a la entrada y salida del generador de vapor, a presión constante.

$$q_{\text{sum}} = h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}}$$

Según la Comisión Nacional de la Electricidad en México, la eficiencia térmica del sistema de cogeneración con turbina de vapor, es del 52% como se puede observar en la tabla I. Se observa además que este sistema es el que ofrece un mayor aprovechamiento del vapor sobre otros sistemas, y por consiguiente, una generación eléctrica más elevada.

Tabla I. Eficiencias de diferentes tecnologías de cogeneración²

Tecnología de Cogeneración	Eficiencia Térmica
Turbina de vapor	52 %
Turbina de gas sin post combustión.	47 %
Turbina de gas con post combustión.	42 %
Ciclo combinado	33 %
Motor reciprocante (aprovechando calor de gases de combustión y calor del sistema de enfriamiento)	20 – 30 %
Microturbina	50 %

² CONAE. **Tecnologías de cogeneración**
<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp>

6.1.2. Prueba de comportamiento de sistema de vapor

Para el desarrollo de la prueba se obtuvieron los siguientes datos promedio en un reporte efectuado desde el sistema de monitoreo por computadora que maneja la información del comportamiento del ciclo de vapor.

Generación eléctrica 23.5 MWH
Caudal de vapor 232.75 klb/h

Tabla II. Presiones de vapor

Presiones	
Vapor sobrecalentado salida de la caldera	830.34 psia
1ª extracción	291.88 psia
2ª extracción	125.95 psia
3ª extracción	18.32 psia
4ª extracción	6.00 psia
Desaireador	11.75 psia
Bomba de alimentación caldera	941.59 psia
Bomba de condensados	88.69 psia
Atmosférica	29.52 " Hg
Condensador	-27.39 "Hg

Tabla III. Temperaturas de vapor

Temperaturas	
Vapor seco salida de la caldera	899.45 °F
Pozo caliente en el condensador	103.2 °F
Desaireador	240.34 °F
Salida agua calentador 1 de alta presión	403.48 °F
Entrada agua calentador 2 de alta presión	244.70 °F
Entrada agua calentador 1 de alta presión	330.72 °F
1ª extracción	752.81 °F
2ª extracción	669.05 °F
3ª extracción	340.18 °F
4ª extracción	205.27 °F
Condensados calentador de baja presión	109.83 °F
Condensados calentador 1 de alta presión	499.78 °F
Condensados calentador 2 de alta presión	283.78 °F
Salida de agua calentador de baja presión	108.80 °F

La presión absoluta en el condensador es igual a la suma de la presión manométrica medida en el condensador y la presión atmosférica medida, por lo que se tiene

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$$

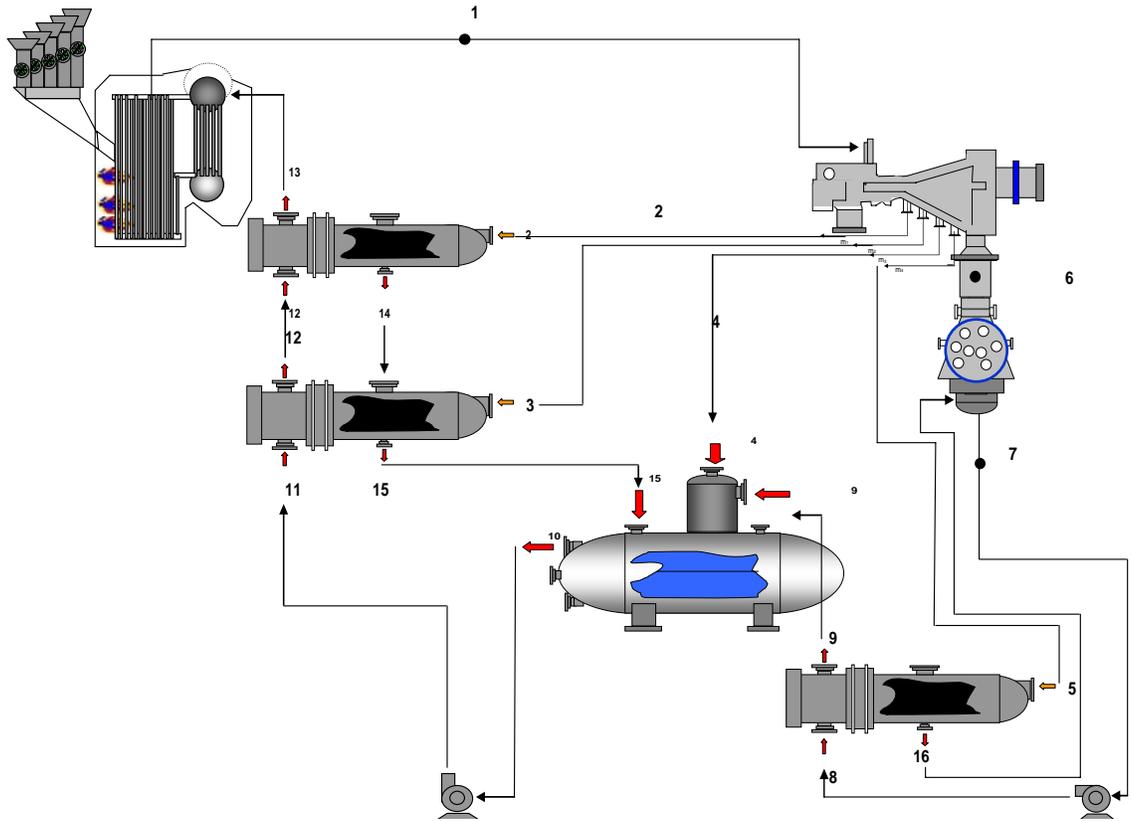
$$P_{\text{abs}} = 29.52 - 27.39 = 2.13 \text{ "Hg (1.05 psia)}$$

Con los datos que se tomaron a la hora de la prueba en los siguientes puntos se encuentran los valores del volumen específico y la entalpía en las tablas correspondientes al estado del vapor en cada punto.

Tabla IV. Volumen específico y entalpías en cada punto

Punto (1) – Salida de la caldera		Punto (2) – 1ª extracción	
T = 899.45 °F		T = 752.81 °F	
P = 830.34 psia		P = 291.88 psia	
h = 1454.52 BTU/lbm		h = 1396.824 BTU/lbm	
Punto (3) – 2ª extracción		Punto (4) – 3ª extracción	
T = 669.05 °F		T = 341.18 °F	
P = 125.95 psia		P = 18.32 psia	
h = 1362.449 BTU/lbm		h = 1211.106 BTU/lbm	
Punto (5) – 4ª extracción		Punto (6) – Condensador	
T = 205.27 °F		T = 110 °F	
P = 6.0 psia		hg = 1109.205 BTU/lbm	
h = 1150.547 BTU/lbm			
Punto (7) – Agua condensada		Punto (8) – Bomba de condensados	
T = 103.2 °F		T = 103.2 °F	
P = 1.05 psia		P = 88.69 psia	
vf = 0.01614 ft ³ /lbm		h = 71.461 BTU/lbm	
Punto (9) – Salida calentador baja presión		Punto (10) – Salida del desaireador	
T = 108.8 °F		T = 240.34 °F	
P = 88.69 psia		P = 88.69 psia	
h = 77.049 BTU/lbm		h = 208.95 BTU/lbm	
vf = 0.017 ft ³ /lbm			
Punto (11) – Bomba alimentación caldera		Punto (12) – Salida calentador 2 de alta presión	
T = 244.7 °F		T = 330.72 °F	
P = 941.59 psia		P = 941.59 psia	
h = 215.161 BTU/lbm		h = 303.005 BTU/lbm	
Punto (13) – Salida calentador 1 alta presión		Punto (14) – Drenaje calentador 1 alta presión	
T = 403.48 °F		T = 499.78 °F	
P = 941.59 psia		hf = 379.625 BTU/lbm	
h = 379.625 BTU/lbm			
Punto (15) – Drenaje calentador 2 alta presión		Punto (16) – Drenaje calentador baja presión	
T = 283.78 °F		T = 109.83 °F	
hf = 253.056 BTU/lbm		hf = 78.02 BTU/lbm	

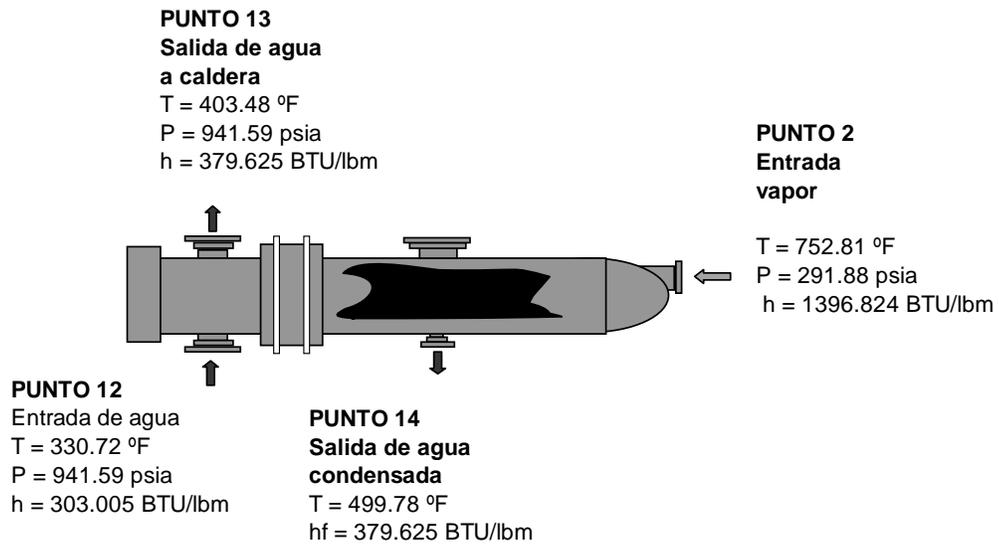
Figura 18. Ciclo rankine



6.1.2.1. Balance térmico de calentadores del ciclo

Este balance de calor está basado en el principio de conservación de la energía, el cual postula que la cantidad de calor que suministra debe ser igual a la cantidad de calor que se aprovecha. De este balance se va a encontrar la fracción de vapor de agua extraída de la turbina en cada una de las purgas.

Figura 19. Calentador #1 de alta presión (cerrado)

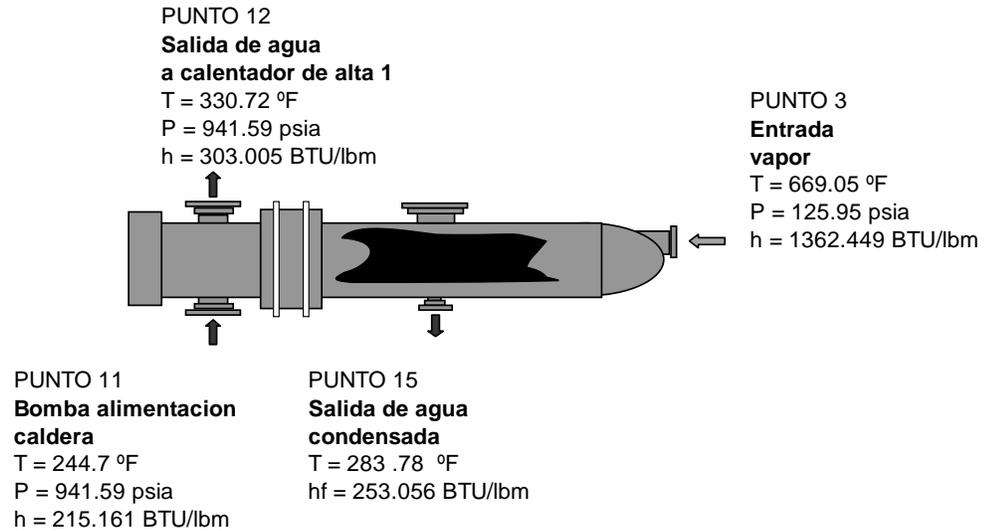


$$m_1 h_2 + h_{12} = m_1 h_{14} + h_{13}$$

$$m_1 = \frac{h_{13} - h_{12}}{h_2 - h_{14}} = \frac{379.625 - 303.005}{1396.824 - 487.7}$$

$$m_1 = 0.075$$

Figura 20. Calentador #2 de alta presión (cerrado)



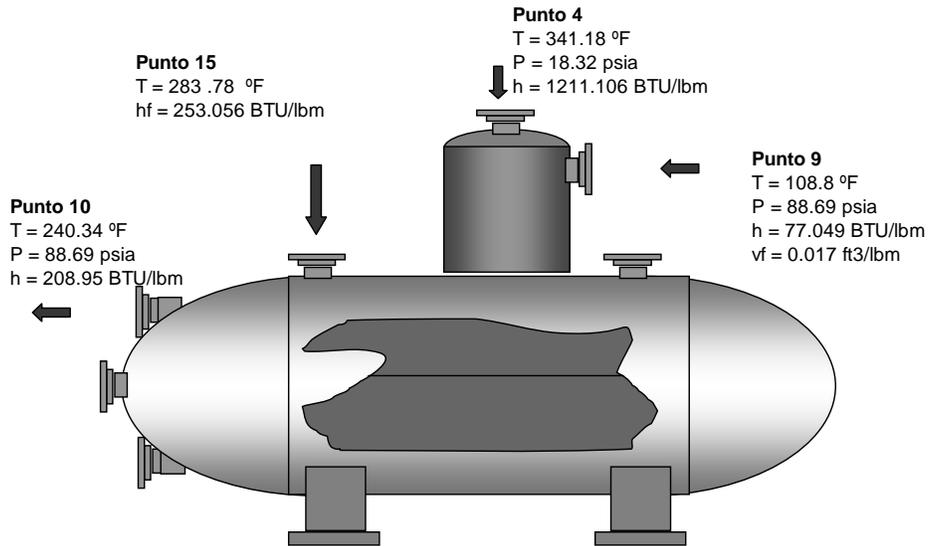
$$m_2(h_3 - h_{15}) = (1 - m_1)(h_{12} - h_{11})$$

$$m_3 = \frac{(1 - m_1)(h_{12} - h_{11})}{h_3 - h_{15}}$$

$$m_3 = \frac{(1 - 0.075)(303.005 - 215.161)}{1362.449 - 253.056}$$

$$m_2 = 0.073$$

Figura 21. Deareador (calentador de contacto directo o calentador abierto)

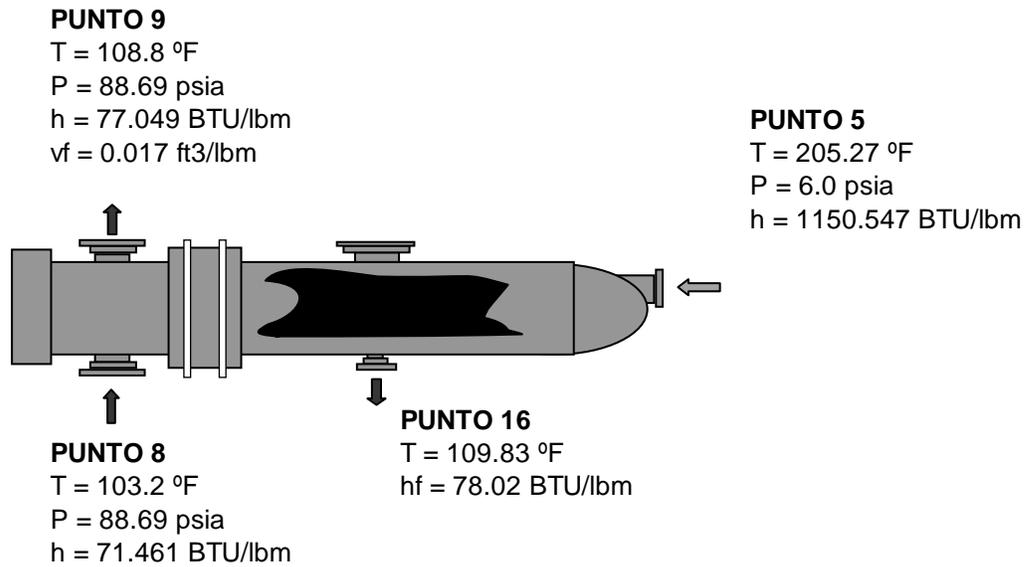


$$m_3 h_4 + (m_1 + m_2) h_{17} + (1 - m_1 - m_2 - m_3) h_9 = h_{10}$$

$$m_3 = \frac{(m_1 + m_2)(h_9 - h_{17}) + (h_{10} - h_9)}{h_4 - h_9} = \frac{(0.075 + 0.061)(77.049 - 253.056) + (208.953 - 77.049)}{1211.106 - 77.049}$$

$$m_3 = 0.094$$

Figura 22. Calentador de baja presión (cerrado)



$$m_4(h_5 - h_{16}) = (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_9 - h_8)$$

$$m_4 = \frac{(1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_9 - h_8)}{(h_5 - h_{16})}$$

$$m_4 = \frac{(1 - 0.075 - 0.073 - 0.094)(77.049 - 71.461)}{(1150.547 - 78.02)}$$

$$m_4 = 0.004$$

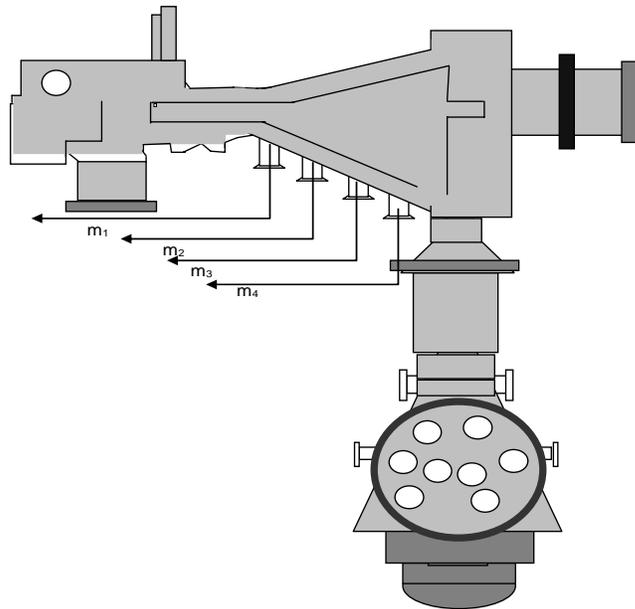
6.1.2.2. Rendimiento térmico del ciclo

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento térmico está dado como la razón entre el trabajo neto efectuado y el calor suministrado del ciclo.

- Trabajo de turbina

El trabajo interno de la turbina está dado por el flujo de vapor que sale de cada extracción multiplicado por la diferencia de entalpías entre la entrada y la salida de la extracción.

Figura 23. Turbina de vapor



$$m_4 = 1(h_1 - h_2) + (1 - m_1)(h_1 - h_3)$$

$$(1 - m_1 - m_2)(h_1 - h_4) +$$

$$(1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_1 - h_5) +$$

$$(1 - m_1 - m_2 - m_3 + m_4)(h_5 - h_6)$$

$$m_4 = 1(1454.528 - 1396.824) + (1 - 0.75)(1454.528 - 1362.449)$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - 0.075 - 0.073)(1454.528 - 1211.106) + \\
 & (1 - 0.075 - 0.073 - 0.096)(1454.528 - 1150.547) + \\
 & (1 - 0.075 - 0.073 - 0.096 - 0.004)(1150.547 - 1109.205)
 \end{aligned}$$

$$W_t = 549.02 \text{ Btu / lbm}$$

- **Trabajo de bombas**

Se calcula ahora el trabajo realizado por las bombas; el valor calculado se debe dividir entre la eficiencia de las bombas, pues en la realidad el trabajo realizado por la bomba no es un proceso adiabático.

Bomba de condensados

$$W_b = v_7 (P_8 - P_7)$$

$$0.016(88.69 - 1.05)$$

$$1.40 \text{ Btu / lbm}$$

Bombas de alimentación calderas

$$W_b = v_{10} (P_{11} - P_{10})$$

$$0.017(941.59 - 88.69)$$

$$14.50 \text{ Btu / lbm}$$

- **Calor suministrado**

El calor suministrado por el generador de vapor está dado como la diferencia de la entalpía a la entrada y la salida.

$$Q_{sum} = h_1 - h_{13}$$

$$1454.52 - 379.625$$

$$1074.90 \text{ Btu / lbm}$$

- **Rendimiento térmico**

El rendimiento térmico de el sistema de vapor será igual a

$$nt = \frac{W_{neto}}{Q_{sum}}$$

$$W_{neto} = W_{turbina} - (W_{bombas_condensados} - W_{bombas_alimentación})$$

$$nt = \frac{549.02 - (1.40 - 14.50)}{1074.90}$$

$$nt = 0.52$$

6.1.2.3. Razón por kilovatio

Está dado por la cantidad de kilovatios que se generan por cada libra de vapor que se produce en la caldera. Para este desarrollo, la cantidad de trabajo que realiza la turbina es

$$w = h_{\text{ent}} - h_{\text{sal}} = 1454.528 - 1109.205$$

$$w = 345.323 \text{ BTU/lbm}$$

Energía producida por la turbina está dada por

$$U_T = w \times \phi_{\text{vap}} = 345.323 \times 232.75 \times 10^3$$

$$U_T = 80.37 \times 10^6 \text{ BTU/h}$$

En función de la energía producida por la turbina se puede calcular la energía eléctrica en el generador, según la relación $1\text{kW} = 3412 \text{ BTU}$.

Por lo tanto, la energía eléctrica producida en el generador es igual a

$$U_{\text{EG}} = U_T / 3412 = 80.37 \times 10^6 / 3412 = 23555.1 \text{ kW/h}$$

Entonces, la razón de vapor por kilovatio generado va a estar dada como el cociente entre el flujo de vapor que se expande en la turbina y la energía eléctrica que se produce con esta cantidad de vapor.

$$RV = \frac{\phi_{\text{vap}}}{E.E_G} = \frac{232.75 \times 10^3}{23555.1} = 9.88 \text{ lb}_{\text{vap}} / \text{kW}$$

6.1.3. Análisis de resultados

- Razón de libras de vapor consumidas por kilovatio generado antes de la implementación de la torre de enfriamiento.

$$RV_{\text{antes}} = 10.8 \text{ lbvapor/Kw.}$$

- Razón de libras de vapor consumidas por kilovatio generado después de la implementación de la torre de enfriamiento.

$$RV_{\text{después}} = 9.88 \text{ lbvapor/Kw.}$$

- Ahorro de libras de vapor por kilovatio.

$$RV_{\text{ahorro}} = RV_{\text{antes}} - RV_{\text{después}}$$

$$RV_{\text{ahorro}} = 10.8 - 9.88$$

$$RV_{\text{ahorro}} = 0.92 \text{ lbvapor/Kw.}$$

CONCLUSIONES

1. La torre de enfriamiento transfiere al ambiente el calor que extrae del agua que re-circula en el condensador, y envía de regreso agua fría a una temperatura constante. Esto permite que la condensación del vapor se realice a la misma temperatura, y se mantenga constante el valor de 27 "Hg de presión de vacío en el *hotwell*; al mejorar la condensación de vapor en el condensador, se beneficia grandemente la producción de energía eléctrica.
2. La correcta operación de la torre de enfriamiento genera grandes beneficios al proceso, como es un menor consumo de combustible en la caldera, una mejor operación del condensador y de la turbina, y un mayor aprovechamiento del vapor generado, que se traduce en el aumento del rendimiento térmico del ciclo.
3. Al proporcionar manuales y datos técnicos se asegura el correcto desempeño del personal que efectúa el mantenimiento de cada componente.
4. Con base en el análisis termodinámico efectuado sobre el ciclo regenerativo de la unidad de 25 MW, se pudo determinar que el rendimiento térmico del ciclo es del 52%, valor similar a lo publicado por la CONAE (52%), lo que indica que el sistema convierte correctamente la energía del vapor en energía mecánica para la generación de energía eléctrica.
5. La razón de libras de vapor consumidas por kilovatio generado disminuye con la operación de la torre de enfriamiento operando dentro del proceso, de un valor estimado de 10.8 a 9.88, que sugiere un

aumento en la eficiencia del ciclo comparada con la operación anterior, donde se utilizaba agua de enfriamiento proveniente del río Guacalate para la re-circulación dentro del condensador.

RECOMENDACIONES

1. Colocar algún tipo de filtro en las entradas de flujo de aire, para evitar el ensuciamiento de sus partes internas, ya que la torre de enfriamiento se encuentra en un ambiente muy sucio.
2. Poner énfasis en el tratamiento químico que se le da al agua de alimentación, debido a que se encontraron sales incrustadas en la empaquetadura, lo cual disminuirá considerablemente el contacto entre el aire y el agua, provocando deficiencia en el trabajo de la torre.
3. Tener disponible equipo de seguridad, como arneses para el personal que realizará el mantenimiento en las partes más altas.
4. Fabricar tarimas para colocarlas en la parte donde está ubicado el ventilador, ya que no existe infraestructura adecuada para que el personal de mantenimiento realice las tareas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Manual de inducción a la cooperación, Grupo Corporativo Santa Ana. División de Recursos Humanos, Departamento de Capacitación y Desarrollo.
2. Ingeniería termo-dinámica, fundamento y aplicación "Francis y F. Huang.
3. Wark, Kenneth. Richards, Donald. Termo-dinámica. Sexta edición. Editorial McGraw Hill, 2001.
4. De León Escobar, Gustavo Adolfo. Experiencia en el montaje de un turbo-generador con condensador. Tesis Ing. Mec. Guatemala, Universidad de San Carlos De Guatemala, Facultad de Ingeniería. Año 1997.
5. Figueroa Vásquez, Francisco Arturo. Optimización de la operación de la unidad de 25 megavatios de la central termo-eléctrica Santa Ana. Tesis Ing. Mec. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Año 1999.
6. Kern, Donald Q. Procesos de transferencia de calor. México: CECSA, 1987.
7. SXP Cooling Technologies. www.marleyct.com/publications.asp. Noviembre de 2005 – febrero del 2006.

APÉNDICE

Figura 24. Esfuerzos de tornillos grado SAE

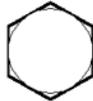
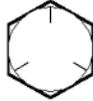
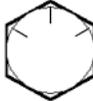
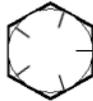
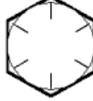
Número de grado SAE	Esfuerzo de ruptura [kpsi]	Material	Marcado de la cabeza
1 2	74	Acero de bajo carbono o acero al carbono	
5	120 105	Acero al carbono, templado y revenido	
5.2	120	Acero de bajo carbono martensítico, templado y revenido	
7	133	Acero al carbono aleado, templado y revenido	
8	150	Acero al carbono aleado, templado y revenido	
8.2	150	Acero de bajo carbono martensítico, templado y revenido	

Figura 25. Tablas de vapor

Vapor saturado

Presión absoluta = presión atmosférica - vacío.

Las columnas barométrica y de vacío pueden corregirse a mercurio a 32°F restando $0.00009 \times (t - 32) \times$ altura de columna, siendo t la temperatura de la columna en grados Fahrenheit.

1 pulg de mercurio a 32°F = 0,4912 lbf/pulg².

EJEMPLO

Lectura barométrica: 30.17 pulg a 70°F.

Lectura de la columna de vacío: 28.26pulg a 80°F.

Presión absoluta = $(30.17 - 0.00009 \times 38 \times 30,17) - (28.26 - 0,00009 \times 48 \times 28.26) = 1.93$ pulgHg a 32°F.

Temperatura de saturación (tomada de la tabla) = 100°F.

V = volumen específico, pie³/lbm

H = entalpía específica, Btu/lbm

S = entropía específica, Btu/lbm·°R

Continúa

Propiedades del vapor sobrecalentado																
presión absoluta (temp.de sat.)	Temperatura, °F															
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
5	v	...	78.14	90.240	102.240	114.210	126.150	138.080	150.010	161.940	173.860	185.780	197.700	209.620	221.53	233.45
	h	...	1148.6	1194.8	1241.3	1288.2	1335.9	1384.3	1433.6	1483.7	1534.7	1586.7	1639.6	1693.3	1748.0	1803.5
	s	...	1.8716	1.9369	1.9943	2.0460	2.0932	2.1369	2.1776	2.2159	2.2521	2.2866	2.3194	2.3509	2.3811	2.4101
10	v	...	38.84	44.980	51.030	57.040	63.030	69.000	74.980	80.940	86.910	92.870	98.840	104.800	110.750	116.720
	h	...	1146.6	1193.7	1240.6	1287.8	1335.5	1384.0	1433.4	1483.5	1534.6	1586.6	1639.5	1693.3	1747.9	1803.4
	s	...	1.7928	1.8593	1.9173	1.9692	2.0166	2.0603	2.1011	2.1394	2.1757	2.2101	2.2430	2.2744	2.3046	2.3337
15	v	...	...	29.899	33.963	37.985	41.986	45.978	49.964	53.946	57.926	61.905	65.882	69.858	73.833	77.807
	h	...	...	1192.5	1239.9	1287.3	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5	1638.4	1693.2	1747.8	1803.4
	s	...	...	1.8134	1.8720	1.9242	1.9717	2.0155	2.0563	2.0946	2.1309	2.1653	2.1982	2.2297	2.2599	2.2890
20	v	...	...	22.356	25.428	28.457	31.466	34.465	37.458	40.447	43.435	46.420	49.405	52.388	55.370	58.352
	h	...	...	1191.4	1239.2	1286.9	1334.9	1383.5	1432.9	1483.2	1534.3	1586.3	1639.3	1693.1	1747.8	1803.3
	s	...	...	1.7805	1.8397	1.8921	1.9397	1.9836	2.0244	2.0628	2.0991	2.1336	2.1665	2.1979	2.2282	2.2572
80	v	...	...	...	6.218	7.019	7.794	8.560	9.319	10.075	10.829	11.581	12.331	13.081	13.829	14.577
	h	...	...	...	1230.5	1281.3	1330.9	1380.5	1430.5	1481.1	1532.6	1584.9	1638.0	1632.0	1746.8	1802.5
	s	...	...	...	1.6790	1.7349	1.7842	1.8289	1.8702	1.9089	1.9454	1.9800	2.0131	2.0446	2.0750	2.1041
100	v	...	...	...	4.935	5.588	6.216	6.833	7.443	8.050	8.655	9.258	9.860	10.460	11.060	11.659
	h	...	...	...	1227.4	1279.3	1329.6	1379.5	1429.7	1480.4	1532.0	1584.4	1637.6	1691.6	1746.5	1802.0
	s	...	...	...	1.6516	1.7088	1.7586	1.8036	1.8451	1.8839	1.9205	1.9552	1.9883	2.0200	2.0502	2.0794

Continúa

120	v	...	...		4.079	4.634	5.164	5.683	6.193	6.701	7.206	7.710	8.212	8.713	9.213	9.713
	h	...	...	...	1224.1	1277.4	1328.2	1378.4	1428.8	1479.8	1531.4	1583.9	1637.1	1691.3	1746.2	1702.0
	s	...	...	...	1.6286	1.6872	1.7376	1.7829	1.8246	1.8635	1.9000	1.9349	1.9680	1.9996	2.0300	2.0592
140	v	...	...	...	3.466	3.953	4.412	4.859	5.300	5.736	6.171	6.604	7.035	7.465	7.895	8.323
	h	...	...	...	1220.8	1275.3	1326.8	1377.4	1428.0	1479.1	1530.8	1583.4	1636.7	1390.9	1745.9	1801.7
	s	...	...	...	1.6085	1.6686	1.7196	1.7652	1.8071	1.8461	1.8828	1.9476	1.9508	1.9825	2.0129	2.0421
250	v	...	...	...	...	2.150	2.466	2.687	2.941	3.191	3.438	3.684	3.928	4.171	4.413	4.625
	h	...	...	...	...	1263.5	1319.0	1371.6	1423.4	1475.3	1527.6	1580.6	1634.4	1688.9	1744.2	1800.2
	s	...	...	...	...	1.5951	1.6502	1.6976	1.7405	1.7801	1.8173	1.8524	1.8858	1.9177	1.9482	1.9776
300	v	...	...	...	...	1.767	2.004	2.226	2.441	2.651	2.859	3.064	3.269	3.472	3.675	3.876
	h	...	...	...	...	1257.7	1315.2	1368.9	1421.3	1473.6	1526.2	1579.4	1633.3	1688.0	1743.4	1799.6
	s	...	...	...	...	1.5703	1.6274	1.6758	1.7192	1.7591	1.7964	1.8317	1.8652	1.8972	1.9278	1.9572
800	v	...	...	...	...	...	0.677	0.783	0.876	0.963	1.047	1.129	1.209	1.289	1.367	1.445
	h	...	...	...	...	...	1271.1	1339.3	1399.1	1455.8	1511.4	1566.9	1622.7	1678.9	1735.7	1792.9
	s	...	...	...	...	...	1.4869	1.5484	1.5980	1.6413	1.6807	1.7175	1.7522	1.7851	1.8164	1.8464
900	v	...	...	...	...	...	0.587	0.686	0.771	0.850	0.926	1.000	1.072	1.143	1.213	1.283
	h	...	...	...	...	...	1260.6	1332.7	1394.4	1452.2	1508.5	1564.4	1620.6	1677.1	1734.1	1791.6
	s	...	...	...	...	...	1.4659	1.5311	1.5822	1.6263	1.6662	1.7033	1.7382	1.7713	1.8028	1.8329
1000	v	...	...	...	...	...	0.514	0.608	0.688	0.760	0.830	0.897	0.962	1.027	1.090	1.153
	h	...	...	...	...	...	1249.3	1325.9	1389.6	1448.5	1504.4	1561.9	1618.4	1675.3	1732.5	1790.3
	s	...	...	...	...	...	1.4457	1.5149	1.5677	1.6126	1.6530	1.6905	1.7256	1.7589	1.7905	1.8207

