



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA ELABORAR UN DIAGNÓSTICO
ENERGÉTICO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO**

**TESINA
PARA OBTENER EL GRADO DE ESPECIALISTA EN
AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA**



**PRESENTA
ING. IVÁN FRANTZ BLANCO HERNÁNDEZ
TUTOR:
DR. EDUARDO MEDINA HERNÁNDEZ
CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2016**

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	2
RESUMEN	5
1 INTRODUCCIÓN	7
2 OBJETIVO	7
2.1 Objetivos particulares.....	7
3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	7
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
4.1 Operación de la torre de enfriamiento	8
4.2 Principio de operación de la torre de enfriamiento	9
4.3 Descripción de las torres de enfriamiento	10
5 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO	17
5.1 Beneficios de un diagnóstico energético	17
5.2 Clasificación de las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía .	17
5.3 Tipos de diagnóstico energéticos.....	18
6 PRINCIPALES ACTIVIDADES QUE SE DEBEN REALIZAR EN UN DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.....	19
6.1 Planear los recursos y el tiempo para su realización	19
6.2 Recopilar información en el sitio	20
6.3 Realizar mediciones puntuales	20
6.4 Analizar los datos recabados	21
6.5 Información que debe arrojar un diagnóstico energético.....	22
6.6 Programa de actividades.....	22
6.7 Contenido mínimo del informe	22
6.8 ¿Qué hacer después de tener un diagnóstico energético?	23
6.9 Pasos para desarrollar un diagnóstico operacional.....	23
7 METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO: CASO DE ESTUDIO.....	24
7.1 Inspección física.....	25
7.2 Mediciones requeridas	27
7.3 Balance general de agua en una torre de enfriamiento.....	30
7.4 Método Merkel	34
7.5 Indicadores Energéticos.....	46
7.6 Evaluación Económica	52
7.7 Propuesta de rehabilitación de la Torre de Enfriamiento CT-100 para ahorro de energía	55
8 Análisis de los resultados.....	57
8.1 Inversión para la propuesta.....	61
8.2 Programa de uso eficiente de energía	61
8.3 Normatividad	63

9	CONCLUSIONES	64
10	BIBLIOGRAFÍA.....	68
11	ANEXO	70
11.1	Curva característica de una torre de enfriamiento	70
11.2	Inspección Física	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Indicadores energéticos promedio	5
Tabla 2.	Indicadores energéticos del centro de refinación de petróleo	6
Tabla 3.	Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento	12
Tabla 4.	Principales componentes de las torres de enfriamiento.....	13
Tabla 5.	Información de la refinería	24
Tabla 6.	Torres de enfriamiento consideradas en el caso de estudio	24
Tabla 7.	Características de las celdas del caso de estudio	25
Tabla 8.	Caso práctico torre de enfriamiento CT-100	25
Tabla 9.	Calidad del agua de recirculación de una torre de enfriamiento	27
Tabla 10.	Balance de materia de una torre de enfriamiento	34
Tabla 11.	Recopilación de información de prueba y diseño	39
Tabla 12.	Variaciones permitidas por el Código Cooling Technology Institute (CTI).	39
Tabla 13.	Datos de diseño y prueba para la utilización del Método de Merkel	43
Tabla 14.	Estructura de indicadores energéticos para torres de enfriamiento..	48
Tabla 15.	Indicadores energéticos promedio.....	51
Tabla 16.	Indicadores energéticos del centro de refinación de petróleo.....	52
Tabla 17.	Condiciones de operación de la propuesta.....	57
Tabla 18.	Balance de materia con la propuesta	58
Tabla 19.	Condiciones de enfriamiento con la propuesta	58
Tabla 20.	Consumos mensuales de insumos	59
Tabla 21.	Desglose de costo de operación.....	60
Tabla 22.	Indicadores energéticos de la propuesta	60
Tabla 23.	Indicadores económicos de la propuesta	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Principio de operación del psicrómetro	9
Figura 2.	Componentes principales de las torres de enfriamiento*	14
Figura 3.	Prueba de comportamiento	29
Figura 4.	Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento .	33
Figura 5.	Diagrama para determinación de L/G_0	45
Figura 6.	Metodología para establecer indicadores	47
Figura 7.	Consumo de energía año 2015	50
Figura 8.	Consumo de energía de la torre de enfriamiento CT-100.....	50
Figura 9.	Distribución de consumo de energía	51
Figura 10.	Perfil de consumo de energía eléctrica.....	59

RESUMEN

Esta metodología tiene el objetivo de proponer las principales actividades para elaborar un diagnóstico energético en torres de enfriamiento de la industria de la refinación de crudo en México.

Presenta los fundamentos teóricos mínimos necesarios para entender el principio de operación, así como, los principales tipos de torres de enfriamiento utilizados en esa industria.

Las ecuaciones que expone para la elaboración del balance de materia en función del intercambio calor, tienen gran uso en el medio industrial para la cuantificación de costos y la toma de decisiones operativas.

La metodología propone el método de Merkel para el cálculo de capacidad de enfriamiento en torres de enfriamiento desglosado paso a paso para llevarlo a cabo sin tener que usar ningún software especializado.

El formato para el desarrollo de la inspección física permite identificar posibles áreas de mejora para el ahorro de energía usando como base una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde a óptimas condiciones y 5 a fuera de operación.

Los indicadores energéticos promedio propuestos para una torre de enfriamiento en el centro de refinación de crudo al sureste de la República Mexicana se realizaron con información de diseño, se resumen en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores energéticos promedio

Valor	Unidades
29.5	kWh/bbl producido
90.0	kWh/MW potencia demandada
0.27	kWh/m ³ de agua recirculada
6.93	kWh/MMBTU calor disipado
68.8	kWh/L tratamiento químico
6.1	kWh/USD costo de operación

Fuente: Propia

De acuerdo a los datos de operación del año 2015 de las 10 torres de enfriamiento revisadas, los indicadores energéticos oscilan de la siguiente manera ver Tabla 2

Tabla 2. Indicadores energéticos del centro de refinación de petróleo

Valor	Unidades
18.6 a 51.4	kWh/bbl producido
32.2 a 235.7	kWh/MW potencia demandada
0.01 a 0.59	kWh/m ³ de agua recirculada
0.3 a 26.9	kWh/MMBTU calor disipado
3.1 a 89.7	kWh/L tratamiento químico
3.34 a 9.22	kWh/USD costo de operación

Fuente: Propia

La diferencia entre los valores operativos y de diseño se debe a diferentes problemas, desde una contaminación en el agua de recirculación que inhibe la transferencia de calor hasta la falla en algún equipo de proceso.

Se identificó que el mayor usuario de energía es el sistema de bombeo con una participación del 80% y 20% los ventiladores, la iluminación e instrumentación es menor al 1 %.

Aplicando la inspección física a la torre de enfriamiento CT-100, se identificaron áreas de oportunidad para reducir consumos innecesarios de energía eléctrica, aumentar transferencia de calor, disminuir carga a los motores de los ventiladores, garantizar el flujo de aire necesario, mejorar el control de la operación, aumentar tiempo de vida de los equipos y seguridad para los operarios.

Cubriendo dichas áreas de oportunidad, aumentó un 20.0% la recirculación de agua de enfriamiento; 48.64% la capacidad de enfriamiento y disminuyó un 24.0% el consumo de energía así como un 10.8% el costo de operación.

Con la aplicación de la propuesta los indicadores energéticos de la torre de enfriamiento CT-100 disminuyen.

Dicha propuesta tiene un costo de 910,000 USD generando un ahorro de 166,908 USD/año resultando un periodo de recuperación de 5.45 años, aunque el análisis de económico a un periodo de 15 años arroja un VPN de 226,778 USD; TIR de 12.88%; TIRM de 12.40%; TREMA real de 12.00% afirmando la rentabilidad de la propuesta.

1 INTRODUCCIÓN

Las torres para enfriamiento de agua son dispositivos cuya finalidad es extraer calor del agua a través del contacto directo con el aire. Estas torres tienen múltiples aplicaciones, que van desde pequeñas instalaciones de aire acondicionado, hasta grandes complejos de generación de energía eléctrica o refinerías de petróleo. El uso de la torres de enfriamiento se justifica en aquellos sistemas que utilizan agua como medio refrigerante, donde sea necesario disipar grandes cantidades de calor.

Cabe mencionar que las necesidades de agua y energía para las industrias del futuro podrían reducirse al mínimo, a través de la planificación y la inversión en sistemas diseñados con un enfoque integrado eficaz (Brendan, 2015).

2 OBJETIVO

Elaborar una metodología para el diagnóstico energético en torres de enfriamiento que permita determinar la capacidad térmica, identificar posibles áreas de mejora, establecer indicadores energéticos y de rentabilidad.

2.1 Objetivos particulares

1. Presentar la metodología para determinar la capacidad de enfriamiento por el Método Merkel.
2. Mostrar la metodología para realizar una inspección física en los principales elementos de las torres de enfriamiento.
3. Proponer indicadores energéticos en torres de enfriamiento.
4. Establecer indicadores de rentabilidad para un proyecto de ahorro de energía.

3 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La industria de la refinación de petróleo en México es un gran consumidor de agua y energía. En dicha industria casi el 70% del agua consumida se utiliza para operaciones de enfriamiento. En las refinerías se cuenta con torres de enfriamiento las cuales son equipos que tienen por objetivo enfriar agua para poder reutilizarla en equipos de proceso. Sin embargo, debido al principio de enfriamiento de agua que consiste principalmente en la transferencia de calor latente, se pierden grandes cantidades de agua por evaporación y arrastre (50-70% del agua de repuesto) y por purgas (30 – 50%). Si aunado a lo anterior se considera que en las refinerías mexicanas la mayoría de las torres de enfriamiento tienen una antigüedad superior a 20 años y que en ocasiones operan a condiciones alejadas de las de diseño, entonces las pérdidas de agua en estos equipos se incrementan sensiblemente (20 – 50% de consumo

adicional de agua con respecto al diseño) así como el desperdicio de la energía eléctrica (Blanco, 2007).

Se ocupa un 10% de la energía eléctrica generada por la refinería para las torres de enfriamiento en sistemas de bombeo, motores eléctricos para ventiladores, instrumentación e iluminación por mencionar los más importantes.

Actualmente, el 90 % de la producción de energía se basa en modelos intensivos y no reutilizables de agua que no son sostenibles (Brendan, 2015).

La evaluación térmica de una torre de enfriamiento permite conocer cuál es su capacidad de enfriamiento de agua con respecto a las condiciones de diseño.

Debido a la gran utilidad de las torres el “Cooling Technology Institute” CTI de los EEUU, se ha dado la tarea de establecer códigos, estándares, generar publicaciones para regular su diseño, construcción y prueba. Como ejemplo, está el CTI-ACT-105-99 para prueba de capacidad de enfriamiento.

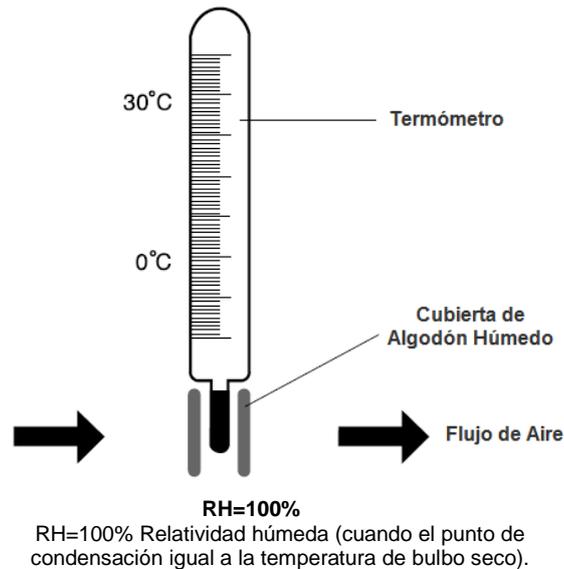
Cabe mencionar que aunque este instituto junto con algunos fabricantes ha desarrollado tecnologías para el ahorro de agua y energía, no existe una metodología que permita diagnosticar una torre de enfriamiento desde el punto de vista energético.

La aplicación de una herramienta como esta metodología propuesta generaría un antecedente para la identificación de áreas de oportunidad en el uso eficiente de la energía en una torre de enfriamiento.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Operación de la torre de enfriamiento

La temperatura de bulbo húmedo es un parámetro esencial para la selección de una torre de enfriamiento por evaporación. Esta temperatura puede ser fácilmente medible con la ayuda de un psicrómetro. Por lo general se trata de un termómetro de mercurio junto con una cubierta de algodón. Está cubierta se empapa con agua destilada y cuando pasa una corriente de aire no saturado, el agua se evapora de la cubierta (Figura 1).



Fuente: Martínez, 2011

Figura 1. Principio de operación del psicrómetro

Cuando se da el balance entre el flujo de calor del aire de la cubierta y el calor requerido para la evaporación del agua de la cubierta húmeda, entonces la temperatura que se obtiene se denomina temperatura de bulbo húmedo. Dicho de otra manera, para la temperatura de bulbo húmedo el aire insaturado que pasa en la cubierta de algodón húmedo disipa suficiente calor sensible para soportar el flujo de calor latente (evaporación) del agua. La temperatura de bulbo húmedo se llama también temperatura de saturación adiabática. (Kelvion, 2015)

Las temperaturas son medidas con un psicrómetro el cual está constituido por dos termómetros uno con una capucha de algodón para poder ser humedecida y el otro termómetro sin capucha.

4.2 Principio de operación de la torre de enfriamiento

El principio de operación de una torre de enfriamiento consiste en circular agua de enfriamiento que se pone en contacto por tiempo prolongado con el aire del medio ambiente y de este modo se enfría. El enfriamiento del agua caliente se lleva a cabo cuando se distribuye finamente sobre un cuerpo de contacto que preferiblemente tenga una gran superficie de intercambio, promoviendo el contacto con el aire.

El flujo de aire insaturado absorbe el agua evaporada y el calor que la integra. La corriente de aire se calienta en contacto con un cuerpo (Relleno de la torre) hasta lograrse un equilibrio de intercambio de calor entre el flujo de aire y el agua que circula.

La disminución de la temperatura del agua y el incremento de calor del aire contenido en la torre de enfriamiento es un proceso gradual. La operación de una torre se basa en el principio combinado de transferencia de calor y masa. Esto es una transferencia de calor sensible entre el agua y el aire que pasa por convección y la transferencia de calor latente por evaporación del agua. (Kelvion, 2015)

4.3 Descripción de las torres de enfriamiento

El objetivo de las torres de enfriamiento es enfriar agua, y es un equipo capaz de enfriar eficientemente grandes volúmenes de agua, poniéndola en contacto con aire atmosférico, expulsando consigo el calor a la atmósfera, como aire caliente y húmedo.

Las torres de enfriamiento regulan el proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida, este proceso se logra cuando la gota de agua que se pone en contacto con el aire, se le evapora la película exterior, requiriendo para este proceso absorción de calor, el cual se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (cambio de temperatura) como por calor latente (cambio de fase).

Las torres se clasifican de acuerdo con los medios por los que se les suministra aire. Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre el aire y el agua. Pueden ser de muchos tipos, aunque es importante mencionar que lo más conveniente en este tipo de sistemas es tener un costo inicial bajo y que el costo de operación también sea reducido siempre y cuando cumpla con las condiciones especificadas. (Kern, 1999)

Los componentes importantes de las torres son:

- Equipo electromecánico: moto bombas y moto ventiladores.
- La estructura, a través de la cual circulan todos los fluidos.
- El relleno, cuya finalidad principal es aumentar la superficie de transferencia por unidad de volumen de la torre.
- El sistema de distribución de agua que incluye los tubos de distribución internos, las charolas de distribución, las espreas y el depósito o bacín de recolección. (ver Figura 2)

4.3.1 Tipos de torres de enfriamiento

Existen varios tipos de torres: Las de tiro mecánico, que obedecen un proceso de convección provistas de ventiladores y motores, son las más comunes, y pueden ser de TIRO FORZADO (con ventiladores inyectando aire en su parte baja), o de TIRO INDUCIDO (con los ventiladores expulsando aire en la parte superior).

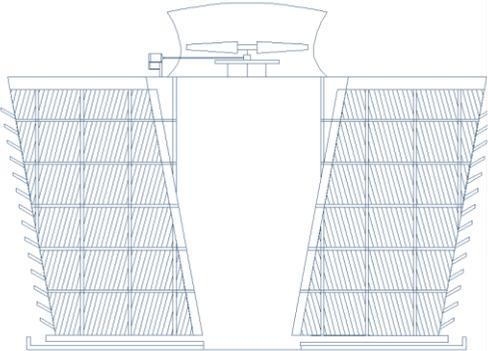
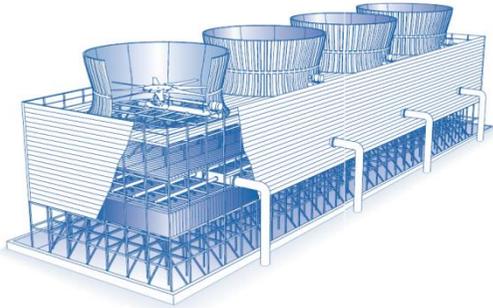
4.3.1.1 Torres de enfriamiento de tiro mecánico

Se clasifican por su arreglo del ventilador situado en la parte superior o inferior de la torre, al arreglo superior se les conoce como tiro inducido y el arreglo inferior como tiro forzado. La característica de estos tipos de torres de enfriamiento es que uno o más ventiladores provocan un flujo de aire al interior de la torre, lo que causa una mayor velocidad de aire y un mejor enfriamiento que las torres de tiro natural por m² de superficie. La desventaja de la energía requerida por los ventiladores es compensada por los bajos costos debido a una construcción más compacta.

Los ejemplos más conocidos de esta categoría son las torres de contraflujo y las de flujo cruzado. En las de contraflujo el agua cae al interior de manera vertical y el aire es suministrado en dirección opuesta, en las de flujo cruzado el agua cae de manera vertical y el flujo de aire en dirección horizontal. (Kelvion, 2015)

La información general de las torres de enfriamiento se muestra en la Tabla 3 la cual contiene sus principales características, así como las ventajas y desventajas.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento

Clasificación	Tipo de operación	Tipo de flujo de aire	Características	Ventajas	Desventajas	Diagrama
Torres de tiro mecánico	Torres de tiro inducido	Flujo Cruzado	<ul style="list-style-type: none"> El ventilador se localizan en la parte superior de la torre desde donde succiona el aire en su interior. Tienen una velocidad de descarga de aire 3 o 4 veces más grande que la velocidad de entrada a la torre. 	<ul style="list-style-type: none"> El ventilador que está después del empaque saca el aire caliente de la torre sin recirculación. Tiene una altura menor que la de contraflujo y ofrece menor costo por consumo de energía en ventiladores y bombas. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiene más pérdidas por arrastre. Requiere de más área de exposición Ocupan mayor área que una torre de flujo a contracorriente aunque sus eficiencias son casi iguales para cualquier capacidad. 	
Torres de tiro mecánico	Torres de tiro inducido	Contra flujo	<p>Las características de las torres a contraflujo son similares, con la diferencia del aire lo induce desde el fondo de la torre y se encuentra cerrado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> El ventilador se encuentra después del empaque sacando el aire caliente hacia arriba con mínima recirculación. La transferencia de calor es más eficiente que las otras además el área efectiva menor que las de tiro inducido de flujo cruzado. 	<ul style="list-style-type: none"> Su altura es mayor que la de una inducida de tiro cruzado. Mayores pérdidas por arrastre que las forzadas Tienen mayor caída de presión lo que aumenta el costo en comparación con las forzadas. 	

Fuente: Martínez, 2011

4.3.2 Componentes generales de las torres de enfriamiento

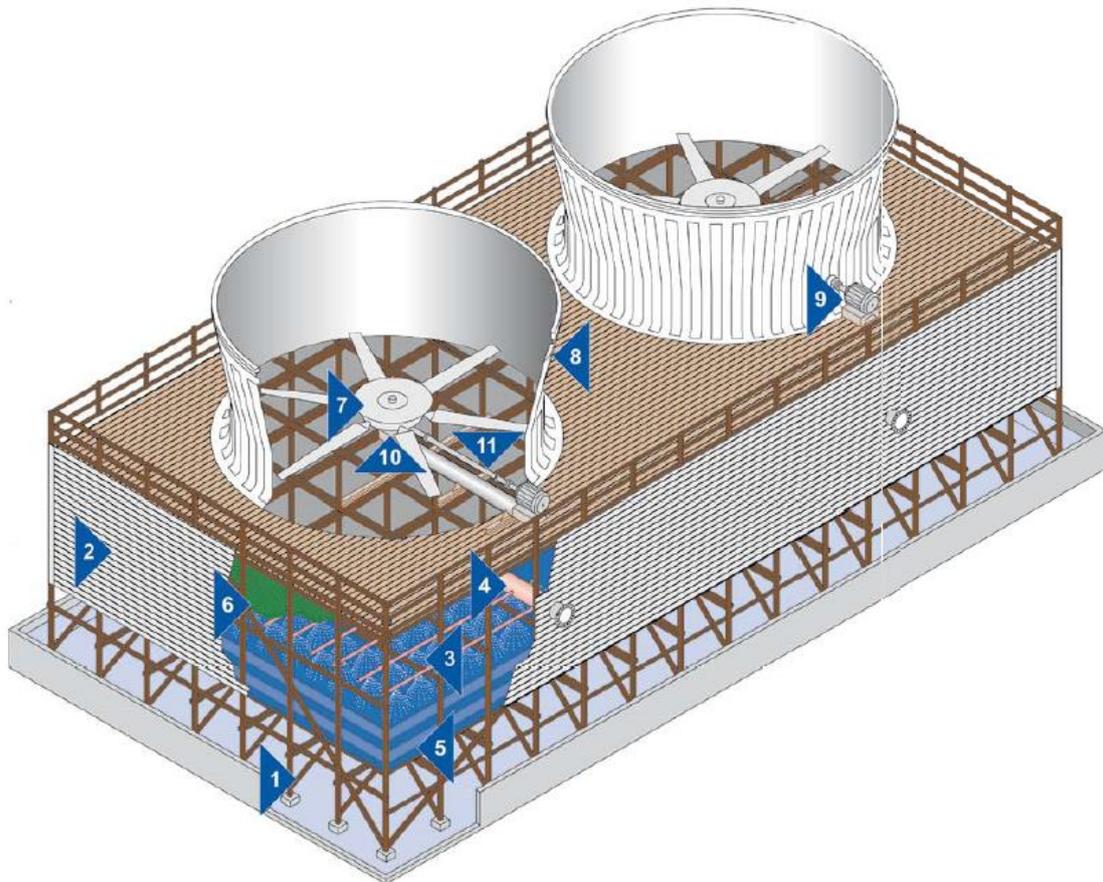
Una torre de enfriamiento se compone o divide en cuatro grupos principales (ver Tabla 4) componentes estructurales, componentes internos, componentes mecánicos y componentes eléctricos.

Tabla 4. Principales componentes de las torres de enfriamiento.

COMPONENTES	
ESTRUCTURAL	Bacín de agua fría
	Estructura general
	Cubierta del ventilador
	Chimeneas
	Persianas
	Canal de llenado
INTERNOS	Sistema de distribución de agua
	Relleno/Soporte (mallas)
	Eliminadores de rocío
MECÁNICO	Ventilador
	Reductor de velocidad
	Válvulas
	Flecha de transmisión
	Bombas de recirculación
ELÉCTRICO	Motores

Fuente: Miranda, 2007

La importancia de conocer los componentes de una torre de enfriamiento permite realizar un diagnóstico y evaluación de las mismas, ya que el problema o problemas en alguno de sus componentes afectará a ésta en su correcta operación, 0.



Fuente: SPX Cooling Technologies, 2006

Figura 2. Componentes principales de las torres de enfriamiento*

*Se describen en los párrafos siguientes de acuerdo al número de identificación.

4.3.2.1 Componentes Estructurales

4.3.2.1.1 Estructura de la torre de enfriamiento (1)

Dependiendo de la aplicación, la estructura es fabricada de concreto, madera tratada químicamente, acero galvanizado, acero inoxidable o resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP).

4.3.2.1.2 Persianas (2)

Presentes en las torres de enfriamiento de flujo cruzado, las persianas tienen dos funciones:

- i) Dejar pasar el aire sin objetos que puedan afectar la operación de la torre
- ii) No permitir la salida de agua por salpicaduras. Para cumplir con los requerimientos, son colocadas en ángulos inclinados y se fabrican de concreto, asbesto, madera tratada químicamente o fibra de vidrio.

4.3.2.1.3 Chimenea (8)

Diseñado para optimizar el rendimiento a través de la recuperación de presión, los cilindros son fabricados de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) y concreto reforzado.

4.3.2.2 Componentes Internos

4.3.2.2.1 Boquillas (3)

Las boquillas diseñadas para la distribución homogénea dentro de la torre de enfriamiento, restringe los desechos para mantener libre el área de aspersión y evitar que se tapen, además algunas cuentan con una placa de difusión para proporcionar una distribución de agua en todas las direcciones.

4.3.2.2.2 Sistema de distribución de agua (4)

Su función es distribuir homogéneamente el agua caliente de alimentación a la torre, y puede clasificarse por el tipo de torre.

Para contraflujo el agua caliente es suministrada a un tubo de distribución principal fabricado básicamente de polipropileno (PP), acero, resina poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP) o polietileno de alta densidad (HDPE) que se encarga de distribuir homogéneamente al interior de la torre.

Para flujo cruzado el mecanismo por presión tiene boquillas que contienen espumas las cuales se encargan de distribuir el agua en forma circular a los empaques.

4.3.2.2.3 Relleno o empaque (5)

La función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas al bacín de agua fría.

Existen los de rellenos tipo película y los de salpiqueo, y su uso depende de la calidad de agua presente en el sitio.

4.3.2.2.4 Eliminadores de arrastre (6)

El funcionamiento de un eliminador de arrastre está basado en la inercia de una gota de agua. Cada eliminador incorpora una curva construida

especialmente, que causa que el aire cambie de dirección. Debido a este cambio de la dirección la gota sale de la curva y es capturada por el eliminador. (Kelvion, 2015).

Se emplean para reducir las gotas de agua por arrastre y son fabricados por paquetes de hojas corrugadas de polipropileno (PP) y Policloruro de vinilo (PVC) que los vuelven más aerodinámicos que con otros materiales.

4.3.2.3 Componentes Mecánicos y Eléctricos.

4.3.2.3.1 Ventiladores (7)

Operan según su configuración, induciendo la salida del aire caliente de la torre o forzando la entrada de aire frío a ésta. Por lo regular son fabricados de acero forjado con aspas de poliéster reforzado con fibra de vidrio, en algunos casos son de hierro galvanizado con aspas de aluminio. Es importante el diseño y operación con un alto rendimiento con respecto al flujo de aire que se suministra a la torre y el uso de menor energía.

4.3.2.3.2 Motor eléctrico (9)

El motor de corriente alterna (CA), a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, es liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, pero tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad, La velocidad del motor asíncrono o de inducción depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

4.3.2.3.3 Reductor de velocidad (10)

Su principal objetivo es el de reducir la velocidad con la que el motor impulsa al ventilador, debido a que la flecha del motor es grande debe de considerarse el buen diseño de este sistema. La lubricación de este sistema es fundamental para su funcionamiento.

4.3.2.3.4 Flecha de transmisión (11)

Comúnmente fabricados con material de fibra de carbono de alta calidad y resistencia, con acoplamientos en fibra de carbono y acero con guardas como protecciones.

4.3.2.3.5 Bombas de recirculación

El tipo de bombas utilizadas son las bombas centrífugas.

Existen curvas características, típicas de las bombas centrífugas, donde se puede interrelacionar la presión de descarga (carga), capacidad, potencia requerida y eficiencia de operación de la bomba (López, 2007)

5 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

El diagnóstico energético es un instrumento imprescindible para saber cuánto, cuándo, cómo, dónde y por qué se consume la energía, así como la forma para establecer el grado de eficiencia en su utilización.

Para ello, se requiere, tanto de una inspección minuciosa de las instalaciones como de un análisis energético detallado de los consumos y la forma en que se usa la energía.

Las medidas que se implementan como resultado del diagnóstico energético, permitirán alcanzar ahorros significativos en el corto, mediano y largo plazo.

5.1 Beneficios de un diagnóstico energético

De manera general cuando se realiza un diagnóstico energético en torres de enfriamiento se debe contar con la siguiente información:

- Conocer el comportamiento y uso de la energía
- Evaluar cuantitativa y cualitativamente la energía que se consume
- Detectar áreas de oportunidad de ahorro y uso eficiente de energía
- Cuantificar los potenciales de ahorro de energía
- Analizar de manera detallada las instalaciones, a fin de estructurar propuestas técnicas viables, para ahorrar energía en los diversos sistemas eléctricos y térmicos.
- Determinar la eficiencia energética de la dependencia o entidad en términos de índices energéticos.
- Establecer un catálogo de acciones y medidas de ahorro
- Estimar la inversión requerida para la aplicación de las medidas de ahorro
- Determinación de beneficios energéticos, ambientales y económicos

5.2 Clasificación de las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía

Las medidas para el ahorro y el uso eficiente de la energía se clasifican en tres tipos:

- i. Medidas operativas
- ii. Medidas educativas
- iii. Medidas tecnológicas o de inversión

Medidas operativas

Son aquellas que no requieren inversión o ésta no es significativa; se basan en el desarrollo y aplicación de medidas operativas y/o administrativas que logren un ahorro de energía.

Medidas educativas

Se refieren a las actividades que promueven la dependencia o entidad para la capacitación y promoción de mejores prácticas, con el objeto de ahorrar y hacer un uso eficiente de la energía, por parte del personal de la dependencia o entidad.

Medidas de inversión

En este rubro se consideran aquellas acciones que requieren de inversiones en equipos o materiales, para alcanzar ahorros importantes de energía.

5.3 Tipos de diagnóstico energéticos

El diagnóstico energético se suele organizar en dos etapas, fases o niveles secuenciales:

- Diagnóstico energético preliminar
- Diagnóstico energético integral

5.3.1 Diagnóstico energético preliminar

Es esencialmente una recolección preliminar de información y el análisis de ésta, con énfasis en la identificación de fuentes evidentes de posible mejora en el uso de la energía, así como medidas de eficiencia energética cuyo costo sea mínimo o nulo. La mayoría de las acciones son operacionales o educativas

En síntesis, el presente estudio tiene como propósito:

- Identificar el consumo de energía eléctrica y combustible en la torre de enfriamiento
- Establecer el nivel de eficiencia de su utilización en términos de índices energéticos
- Proponer las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía, así como establecer la inversión requerida para su aplicación

5.3.2 Diagnóstico energético integral en torres de enfriamiento

Proporciona un análisis completo de toda la parte energética de la torre de enfriamiento tanto de equipos y aparatos como de sistemas auxiliares, así como los detalles operativos de cada uno de ellos y de manera integral.

En un diagnóstico energético integral la medición de los parámetros eléctricos y de combustible de los principales equipos consumidores de energía es fundamental.

El diagnóstico tiene como propósito:

- Identificar el consumo por usos finales de energía eléctrica y combustibles en la torre de enfriamiento
- Establecer el nivel de eficiencia de su utilización por equipos, aparatos, sistemas y procesos, en términos de índices energéticos
- Proponer las medidas de uso eficiente de la energía de forma integral; determinar los beneficios energéticos, económicos, ambientales, así como establecer la inversión requerida para su aplicación

6 PRINCIPALES ACTIVIDADES QUE SE DEBEN REALIZAR EN UN DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

Para llevar a cabo con éxito un diagnóstico energético se deben realizar al menos las siguientes acciones:

- i. Planear los recursos y el tiempo para su realización
- ii. Recopilar información (en el sitio)
- iii. Realizar mediciones puntuales
- iv. Análisis de datos

6.1 Planear los recursos y el tiempo para su realización

- Revisión y comentarios generales de las condiciones de la torre de enfriamiento (iluminación exterior si existe, motores de bombas, motores de los ventiladores, e instrumentos de medición y control) su mantenimiento y el diseño.
- Identificación y selección de la instrumentación que será utilizada en las mediciones, asegurándose que operen adecuadamente (¿proporciona la información requerida?, ¿cuenta con la precisión y exactitud requerida?)
- Elaborar un cronograma de trabajo en el que indique las fechas en que se reportarán avances al responsable.

6.2 Recopilar información en el sitio

- Revisión de la facturación eléctrica mensual de por lo menos un año anterior (demanda máxima de potencia, consumo de energía, factor de potencia, facturación)
- Revisión de la facturación y consumo de combustibles si aplica, de por lo menos un año
- Recabar de la torre de enfriamiento, los siguientes planos: diagrama unifilar general, diagrama de tubería e instrumentación, censo de equipos usuarios, hojas de datos de la torre y equipos usuarios, así como aquellos que se consideren necesarios para el análisis energético integral; en el caso de no estar disponibles, se deberán elaborar esquemas simplificados de ellos.
- Documentación de horarios típicos de operación en las diferentes áreas de trabajo (lunes a viernes, sábado, domingo, mensuales y anuales)
- Identificación y verificación de los principales equipos consumidores de energía (eléctrica y térmica)
- Recopilación de los datos de los equipos consumidores de energía en la torre de enfriamiento, planta usuaria, indicando los principales equipos consumidores de energía para los siguientes sistemas de la torre de enfriamiento.
 - Iluminación
 - Instrumentación
 - Bombas
 - Motores de las bombas
 - Ventiladores
 - Motores de los ventiladores
 - Cualquier otro sistema que consuma energía y que considere como importante (equipos de dosificación de químicos o filtros laterales)

6.3 Realizar mediciones puntuales

- Se deberán realizar mediciones que permitan conocer la demanda de potencia y el consumo de electricidad, y el de consumo de combustible, en la torre de enfriamiento
- Se recomienda, por seguridad, que estas mediciones sean a baja tensión después de los equipos de medición del centro de trabajo, se harán también en la medida de lo posible y a criterio del consultor, mediciones de potencia en los principales circuitos de alimentación y derivados
- Para el análisis de las mediciones, deberán contar con equipo adecuado para presentar en los reportes un conjunto de gráficas de potencia, tensión y corriente:

- Medición y registro por hora y para días completos del consumo de energía y demanda eléctrica en la acometida de la torre de enfriamiento, y en su caso directamente en sistemas o equipos
- Medición puntual de nivel de temperatura y de nivel de iluminación para las distintas áreas en las que se divide la torre de enfriamiento (torre, sistema de bombeo y cuarto de operadores)
- Complementar los datos recopilados para que se tenga un mejor respaldo técnico en áreas donde la información de la planta y/o torre de enfriamiento no esté disponible
- Comprobar la operación de equipos importantes, logrando una mejor base para las estimaciones de ahorro potenciales y proporcionando una idea objetiva de la eficiencia de la planta.
- Realizar una inspección visual de la torre de enfriamiento para identificar áreas de mejora
- Medir el flujo de recirculación del lado suministro (agua fría) y retorno (agua caliente)
- Medir las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire de entrada a la torre de enfriamiento en cada celda durante el periodo de mayor temperatura ambiental
- Medir las temperaturas del agua caliente y agua fría de todas las celdas durante el periodo de mayor temperatura ambiental

6.4 Analizar los datos recabados

- Organizar datos de diseño recabados
- Organizar históricos de consumo
- Organizar los archivos fotográficos (si se dio permiso para realizarlo)
- Analizar formatos del levantamiento de datos
- Realizar análisis y cálculos complementarios a partir las mediciones de flujos (agua de retorno y suministro a plantas usuarias)
- Realizar análisis y cálculos complementarios a partir las mediciones de temperaturas (agua fría, agua caliente, bulbo húmedo, bulbo seco)
- Realizar balance de materia (mediciones de flujos y temperaturas)
- Determinar capacidad de enfriamiento (mediciones de flujo, temperaturas y consumos eléctricos)
- Establecer índices de consumo de energía
- Establecer medidas para el ahorro de energía
- Cuantificar ahorros estimados
- Evaluación económica de las medidas propuestas
- Establecer recomendaciones

6.5 Información que debe arrojar un diagnóstico energético

Al término del diagnóstico energético, la dependencia o entidad deberán contar con un informe que proporcione al menos la siguiente información:

- Eficiencia energética en los sistemas y equipos
- Potenciales de ahorro de energía eléctrica
- Catálogo de medidas de eficiencia energética (mejores prácticas, educativas, sistemas, equipos, aparatos, por mencionar algunos), su impacto y beneficios, energéticos y ambientales.
- Estimación de la eficiencia energética posterior a la implementación de medidas
- Estimación de la inversión requerida para la implantación de medidas
- Tiempo de recuperación de la inversión a valor presente
- Estrategia de implementación de medidas

6.6 Programa de actividades

Con base en la información que arroje el diagnóstico energético, la dependencia o entidad deberán realizar un programa para los próximos cinco años, el cual detalle:

- Acciones operativas
- Acciones educativas
- Acciones de inversión
- Acciones de seguimiento (supervisión y mantenimiento)

6.7 Contenido mínimo del informe

El informe deberá contener como mínimo los siguientes puntos:

- Antecedentes
- Datos básicos de la torre de enfriamiento
- Área construida (cuarto de operadores)
- Año de construcción de la torre de enfriamiento
- Datos de consumo de energía eléctrica
- Datos del consumo de combustibles (si aplica)
- Mediciones
- Propuestas de acciones de eficiencia energética
- Bases técnicas (se refiere a la documentación primordial sobre los equipos, materiales, procedimientos e información para la implantación y desarrollo de las medidas de ahorro de energía; se podrán anexar catálogos e información de proveedores)
- Evaluación económica de cada una de las propuestas técnicas

- Normatividad específica a la que debe sujetarse el sistema o equipos
- Índices e indicadores de eficiencia. (Teóricos y genéricos)
- Programa de trabajo y plan de acción para los próximos años
- Información complementaria (entregar en anexos: cálculos, desarrollos, tablas, gráficas, fotografías, por mencionar los más importantes)

6.8 ¿Qué hacer después de tener un diagnóstico energético?

Es recomendable que la dependencia o entidad instrumente un programa permanente de ahorro, uso eficiente de la energía, seguimiento y control en sus instalaciones, el cual, debe formar parte del trabajo cotidiano de todos los operadores.

El programa permanente debe estar soportado con la infraestructura tecnológica administrativa y financiera para llevar a cabo con éxito las medidas de conservación, uso eficiente y sustitución energética y, como resultado, el ahorro de energía.

6.9 Pasos para desarrollar un diagnóstico operacional

Como parte de un diagnóstico energético se requiere realizar un diagnóstico operacional el cual comienza de la siguiente manera:

1. Identificar la torre de enfriamiento a analizar (ubicación en el centro de trabajo) para planear inspección física y mediciones requeridas
2. Recopilar toda la información de diseño (hojas de datos, planos, especificaciones, entre otros) para tener una base de comparación con la operación actual
3. Realizar una inspección física de los principales componentes (utilizar formatos como guía) e identificar de manera sencillas las áreas de oportunidad
4. Calcular el balance de materia para determinar consumos de agua
5. Determinar el calor disipado por la torre para verificar el servicio a las planta usuarias
6. Calcular la capacidad de enfriamiento de la torre por medio del método Merkel para establecerlo como parte de la línea base
7. Establecer indicadores energéticos para establecer el seguimiento de los ahorros energéticos del sistema

7 METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO: CASO DE ESTUDIO

Con el fin de que la metodología propuesta sea más clara, la implementación de la misma se planteará aplicándola directamente y con todo detalle en un caso de estudio. Para este fin, se decidió utilizar las instalaciones de una planta de refinación de petróleo crudo, ubicada en el sureste de la República Mexicana. La información base se resume en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7. El análisis detallado del diagnóstico operativo se realizó sobre una de las torres del complejo petroquímico, esto es la torre CT-100 descrita en la tabla 6.

Tabla 5. Información de la refinería

Refinería	
Industria	Refinación de petróleo crudo
Ubicación	Sureste de la República Mexicana
Capacidad de producción	285,000 bbl/día
Plantas de proceso	34
Torres de enfriamiento	10
Celdas de enfriamiento	53

Fuente: Propia

En la Tabla 6 se muestran las diez torres de enfriamiento consideradas para la determinar los indicadores energéticos

Tabla 6. Torres de enfriamiento consideradas en el caso de estudio

Torre	Capacidad (gpm)	Celdas	Servicio
CT-100	60,000	6	Catalítica 1, Primaria 3, Preparadora de carga 2/3, Isomerizadora
CT-100A	50,000	5	Hidrosulfuradora de Nafta, Reformadora de Nafta,
CT-101	50,000	5	Servicios Auxiliares 1
CT-101A	50,000	5	Servicios Auxiliares 1
EF-601	60,000	6	Primaria 1/2/3, Preparadora de carga 1
EF-200	10,000	1	Deisobutanizadora
CT-2000	80,000	8	Combinada Maya, Aguas Amargas
CT-2001	80,000	8	Catalítica 2
CT-2002	80,000	8	Alquilación
CT-2003	10,000	1	Servicios auxiliares 2

Fuente: Pemex Refinación

Las 53 celdas de enfriamiento que operan en la refinería presentan las siguientes características, ver Tabla 7

Tabla 7. Características de las celdas del caso de estudio

Diseño	
Capacidad de enfriamiento	10,000 gpm (37.85 m ³ /min)
Temperatura promedio de agua caliente	107.6 °F (42 °C)
Temperatura promedio de agua fría	89.6 °F (32 °C)
Temperatura promedio de bulbo húmedo	82.4 °F (28 °C)
Intervalo de enfriamiento	18 °F (10 °C)
Aproximación	7.2 °F (4 °C)
Ciclos de concentración	5
Ventiladores por celda	1
Potencia del motor del ventilador	125 HP (93.2 kW)

Fuente: Propia

En la Tabla 8 se muestra los valores de la operación actual de la torre de enfriamiento CT-100.

Tabla 8. Caso práctico torre de enfriamiento CT-100

Celdas CT-100 Operación o Prueba	
Capacidad de enfriamiento	7,500 GPM (28.39 m ³ /min)
Temperatura promedio de agua caliente	100.6 °F (38.11 °C)
Temperatura promedio de agua fría	93.7 °F (34.28 °C)
Temperatura promedio de bulbo húmedo	81.2 °F (27.33 °C)
Intervalo de enfriamiento	6.9 °F (3.83 °C)
Aproximación	12.5 °F (6.95 °C)
Ciclos de concentración	3
Ventiladores por celda	1
Potencia del motor del ventilador	60.12 HP (44.83 kW)
Sílice en agua de recirculación	200 ppm
Sílice en agua de repuesto	66.67 ppm

Fuente: Propia

7.1 Inspección física

Antes de empezar la inspección física en la torre de enfriamiento es importante considerar la seguridad ya que existen equipos que no cuentan con las protecciones necesarias o por los daños estructurales es riesgoso trabajar en ellas. Es importante identificar todos los peligros potenciales asociados al trabajo y cómo planear las actividades para eliminar o controlar las situaciones de riesgo.

Al plantear al trabajador los peligros potenciales en el trabajo es necesario tomar las acciones preventivas necesarias para realizar dichos trabajos con seguridad, tomar en cuenta las recomendaciones e indicaciones del personal de seguridad de la planta, así como de los operadores del equipo, estas indicaciones ayudan a identificar los riesgos ya que ellos conocen los detalles del equipo. Mantener informado al personal operativo de la planta y operadores de los trabajos que se van a realizar.

La inspección física es la actividad previa para la medición de variables ya que para medir hay que seleccionar el sitio más apropiado para realizarlo.

Partiendo de lo general a lo específico se deben examinar cada una de las partes de una torre de enfriamiento, lo que se busca es que el personal encargado del trabajo tenga una herramienta de apoyo en la inspección de la torre, ya que por tiempos o espacios se dificultan los trabajos en campo y por medio de formatos lograr que el trabajo sea más eficiente sin olvidar detalles importantes para la evaluación del equipo, reportando el estado general de la instalación tomando nota de cuáles son los principales problemas que se pueden notar. En los formatos propuestos, están recopiladas las observaciones de esta tarea (ver anexo 11.2)

7.1.1 Tratamiento químico

El tratamiento químico en el agua de una torre de enfriamiento, es esencial junto con todas las actividades pertinentes para el ahorro de energía; ya que mantener el pH y las concentraciones de sales ayuda a controlar la incrustación o la corrosión de los equipos usuarios, así como la torre de enfriamiento.

Si los equipos usuarios presentan incrustaciones o corrosión el proceso va a requerir mayor cantidad de agua, que significa mayor consumo de energía eléctrica para el sistema de bombeo y/o mayor diferencia de temperaturas que conlleva mayor consumo de energía para los motores de los ventiladores.

Para tener una operación segura se recomienda mantener la operación de una torre de enfriamiento en la industria de la refinación de petróleo de acuerdo con los valores de los parámetros de la misma mostrados en la Tabla 9

Tabla 9. Calidad del agua de recirculación de una torre de enfriamiento

Parámetro	Valor	Unidad
pH	6.9 a 7.8	Adim
Ciclos de concentración	3.0 a 5.0	Adim
Sílice total	≤200	ppm
Hierro total	≤1.0	ppm
Cobre total	≤0.1	ppm
Sólidos suspendidos	≤40	ppm
Acumulación de lodos en bacín	≤10	%
Velocidad de corrosión (acero al carbón)	≤3.0	mm/año
Velocidad de corrosión (Admiralty)	≤0.3	mm/año
Residual de halógeno libre	0.2 a 0.5	ppm
Cuenta total bacteriana	≤10,000	UFC/ml
Bacterias sulfatoreductoras total	Ausencia	NMP/100ml

Fuente: Química Apollo "Minatitlán", 2016

7.2 Mediciones requeridas

En los contratos de construcción o rehabilitación se establecen una serie de parámetros garantizados para unas determinadas condiciones junto con unas curvas de corrección para corregir los valores de la prueba y evaluarlos con respecto a las condiciones de diseño, condiciones a las cuales se han garantizado los parámetros de funcionamiento. Además de los valores garantizados, los contratos suelen llevar adjunto una serie de cláusulas (liquidated damages y make good), que son multas por desviaciones del buen funcionamiento y una desviación máxima a partir de la cual no se acepta el producto (Del Olmo, 2013).

Se recomienda para evaluar la torre se lleve a cabo la prueba de comportamiento, basada en los criterios establecidos por CTI-ATC-105 y ASME-PTC-23, que detallan la preparación, la instrumentación, el procedimiento de toma de datos y el cálculo de resultados.

Las condiciones de diseño son, generalmente, diferentes a las de operación durante la prueba, por lo que se preparan una serie de curvas de corrección para comparar la medida durante la prueba con las garantías para las condiciones de diseño.

Se recomienda que la prueba de la torre de enfriamiento debe estar certificada y acorde al CTI standard STD-201RS-15, sello que garantiza el funcionamiento, revisión, evaluación y prueba.

7.2.1 Preparación de la torre para la prueba

Los elementos deben estar limpios y los instrumentos acordes a los códigos.

7.2.2 Parámetros e instrumentos de la prueba:

Para la prueba se deben de verificar los puntos de medición, que no se encuentren interferencias y las mediciones deben de durar por lo menos una hora, para identificar posibles anomalías.

Las mediciones del flujo de agua no se deben de realizar cerca de accesorios como son codos, válvulas, reducciones, té; se recomiendan realizar en el cabezal de entrada a la celda de enfriamiento.

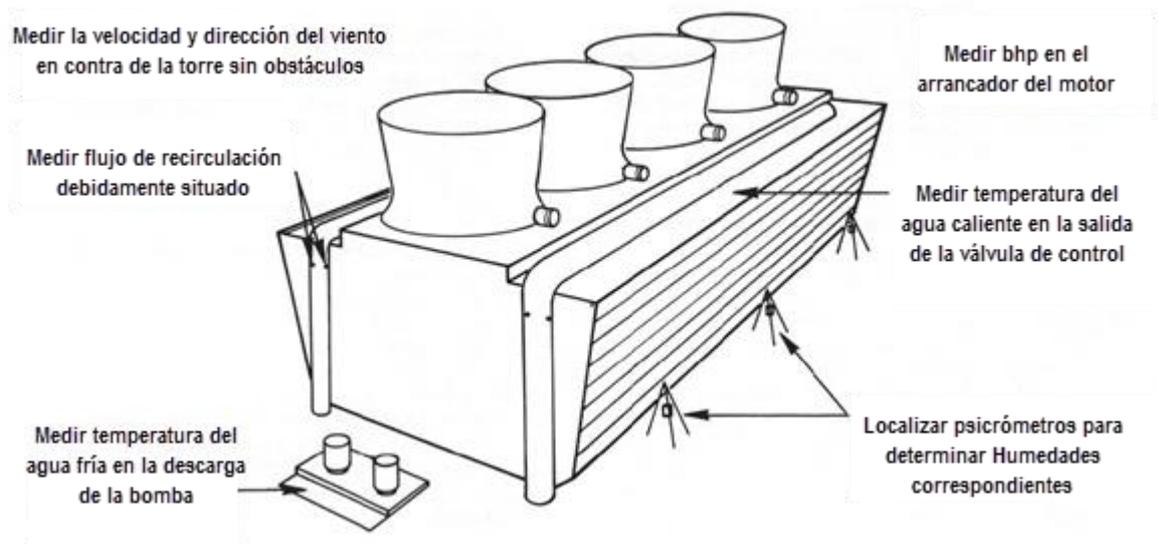
La medición de la temperatura del agua caliente se debe de hacer en la parte superior de la torre, en la salida del agua asegurándose que el termómetro se encuentre en todo momento sumergido.

La medición de temperatura de agua fría se recomienda realizar en la descarga de la bomba o en el cárcamo de bombeo, asegurándose que el termómetro se encuentre en todo momento sumergido.

La velocidad del viento y la temperatura de bulbo húmedo se deben realizar a un metro de la entrada de aire a la torre de enfriamiento.

Otros valores que se incluyen normalmente son la presión de descarga de la bomba, las medidas del flujo y temperatura del agua de repuesto y del agua purgada.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se esquematiza donde se podrían realizar las mediciones necesarias



Fuente: CTI-STD-201RS-15

Figura 3. Prueba de comportamiento

7.2.2.1 Medición de temperatura del aire:

Se utilizan psicrómetros de aspiración mecánica. Las zonas de medida de la temperatura deben estar incluidas en el contrato y acuerdos a los códigos de prueba.

7.2.2.2 Medición de temperatura del agua:

Se utilizan termómetros de mercurio o sensores de resistencia (detectores de temperatura resistivos) o termistores. La temperatura del agua caliente se toma en el canal de distribución (en torres en contraflujo) o en la tubería que lleva el agua a la torre y la temperatura de agua fría se toma en la descarga de la bomba.

7.2.2.3 Medición del flujo de agua:

Se mide con equipo que opere bajo el principio de tiempo en tránsito en tuberías cerradas.

7.2.2.4 Medición de potencia:

Se utiliza un multímetro o un conjunto voltímetro y amperímetro (aplicando el factor de potencia y las eficiencias a los resultados).

7.2.2.5 Altura total dinámica:

Se mide con manómetros diferenciales.

Los códigos recomiendan desviaciones límites de los parámetros de diseño. Los instrumentos deben estar calibrados para la prueba, cuyas hojas de calibración deben adjuntarse a la prueba para su revisión y verificación.

Las mediciones utilizadas en este trabajo, solo son estimaciones del centro de trabajo solo se ocupan para el cálculo de los balances y la proyección de ahorro.

7.2.2.6 Medición de consumo de energía eléctrica

Uno de los aspectos más relevantes para realizar el diagnóstico energético en torres de enfriamiento es medir el consumo de energía eléctrica en la subestación.

Con ayuda del diagrama unifilar identificar si los equipos se encuentran conectados juntos o separados, es decir, si la misma línea de alimentación sirve para las bombas y los ventiladores o dan servicio a otros equipos más.

Ya identificado el punto de medición, se recomienda instalar el analizador de redes eléctricas al menos por una semana para el registro de los datos de consumo de energía.

Es importante mencionar que la facturación de la energía eléctrica es global para todo el centro, y que no existe una distinción, por área o planta en específico, por tal razón la medición es el único parámetro para la estimación de los indicadores energéticos ver Tabla 16 y el anexo 11.2.

7.3 Balance general de agua en una torre de enfriamiento

El flujo de agua de enfriamiento que es suministrado a diferentes plantas de proceso, es un aproximado de la capacidad total de una torre de enfriamiento. Este concepto es llamado recirculación (R) y es un aproximado debido a que existen pérdidas de agua.

Existen tres maneras en las cuales se consume el agua de una torre de enfriamiento evaporativa: las pérdidas por evaporación, por arrastre y las pérdidas de agua por las purgas.

7.3.1 Pérdidas por evaporación (E)

El principio de operación de una torre de enfriamiento evaporativa se basa en la evaporación de una pequeña parte de la recirculación de la torre.

El intercambio de calor latente entre el aire y el agua en una torre evaporativa es de 95% máximo, el intercambio de calor sensible es por lo menos de 5%. El calor contenido en 1 kg de agua es 2491 kJ, por lo que por kg de agua de enfriamiento evaporada se extrae 2491 kJ de energía de la recirculación.

El agua evaporada con el correspondiente calor es absorbido en la corriente de aire a través de la torre de enfriamiento, con lo anterior se puede deducir que por cada kW de energía que descarga una torre se evapora un máximo de 1.37 kg/seg de agua. La rapidez de evaporación es de 1.2% de la rapidez del flujo de recirculación de agua que pasa a través de la torre por cada 10 °F de disminución en la temperatura alcanzada por la torre. (Martínez, 2009).

Debido a lo anterior para el cálculo de las pérdidas por evaporación (E) utilizamos la ecuación (1).

$$E = \frac{R * \Delta T}{1000} = (GPM) \quad (1)$$

Fuente: Nalco, 1979

Dónde:

R : Flujo de agua de recirculación (gpm)

ΔT : Diferencia de temperatura de agua caliente menos fría (°F)

1000 : Factor de conversión aplica solamente para unidades inglesas (flujo en GPM, temperaturas en °F)

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 1 resulta:

$$E = \frac{7,500 * (100.6 - 93.7)}{1000} = 51.75 \text{ GPM}$$

7.3.2 Pérdidas por arrastre (A)

El Arrastre (A) es una pérdida de agua en forma de pequeñas gotas de agua en forma de niebla debido a la alta velocidad del aire, al contacto directo con el agua, un rango típico va de 0.05 %, 0.02 %, 0.005, 0.002% y también de 0.0001% de pérdida con respecto al gasto total que circula” (Industrial Torres Marmex, 2006).

La reducción del arrastre a través de eliminadores de arrastre ayuda a conservar agua, retiene los tratamientos químicos en el sistema y mejora la eficiencia de operación.

Para el cálculo de las pérdidas por arrastre (A) utilizamos la ecuación (2).

$$A = 0.02\% * R = (GPM) \quad (2)$$

Fuente: Empírica

Dónde:

R : Recirculación (gpm)

0.0002 : Factor de correlación

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 2 resulta:

$$A = 0.0002 * 7,500 = 1.5 \text{ GPM}$$

7.3.3 Ciclos de concentración. (C.C)

Se denominan Ciclos de concentración a la relación entre la calidad del agua de recirculación y la calidad del agua de repuesto. Se determina a partir de un elemento que no se descomponga, volatilice o precipite. Como se muestra en la ecuación (3).

$$C.C = \frac{x_R}{x_r} \quad (3)$$

Fuente: Nalco, 1979

Dónde:

x_R = Sólidos totales en la recirculación

x_r = Sólidos totales en el repuesto

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 3 resulta:

$$C.C = \frac{200.00 \text{ ppm Si}}{66.66 \text{ ppm Si}} = 3$$

7.3.4 Pérdidas por purga (P)

La purga es un término que se usa para indicar el agua que es removida de la recirculación de agua de enfriamiento para reducir los contaminantes acumulados en la torre, esto se debe a que la evaporación, y los contaminantes del agua, tales como los sólidos disueltos se acumulan. Al remover las purgas y agregar agua de repuesto el nivel de los sólidos disueltos en el agua se puede mantener para reducir las incrustaciones minerales acumuladas y otros contaminantes en la torre. La eficiencia térmica, la correcta operación, y la vida de la torre están relacionadas directamente a la calidad del agua que recircula.

La calidad del agua en la torre depende de la calidad del agua de repuesto, el tratamiento de agua y el flujo de las purgas. Además, las purgas contribuyen a regular los ciclos de concentración en la torre.

Para el cálculo de las pérdidas por purga (P) utilizamos la (4).

$$P = \frac{E}{(c.c - 1)} - A = (GPM) \quad (4)$$

Fuente: Nalco, 1979

Dónde:

A : Arrastre (gpm)

E : Evaporación (gpm)

c.c : Ciclos de concentración (adimensional)

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 4 resulta:

$$P = \frac{51.75}{(3 - 1)} - 1.5 = 14.75 \text{ GPM}$$

7.3.5 Agua de repuesto (Ar)

Para cubrir las pérdidas por arrastre, purga y evaporación se utiliza el Agua de repuesto (Ar) suministrada a las torres de enfriamiento. En su cálculo utilizamos la ecuación (5).

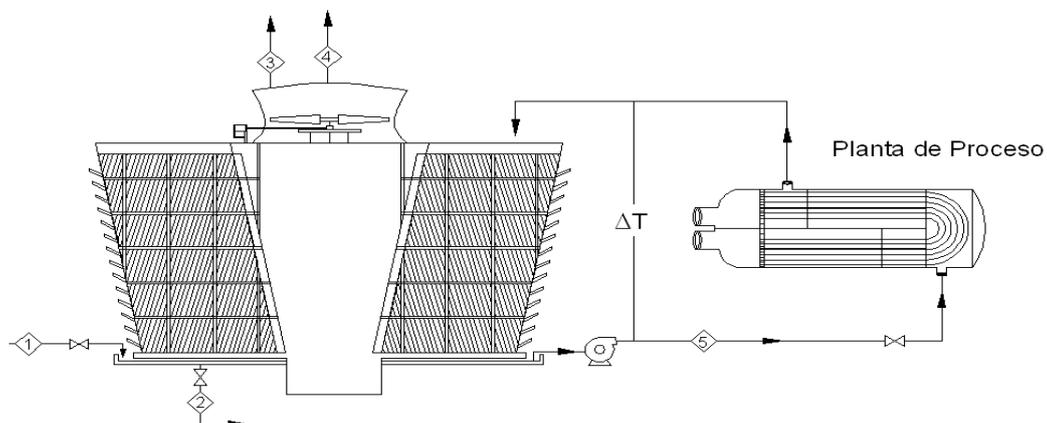
$$Ar = E + A + P = (GPM) \quad (5)$$

Fuente: Empírica

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 5 resulta:

$$Ar = 51.75 + 1.5 + 14.75 = 68.00 \text{ GPM}$$

En la Figura 4 se muestra un esquema resumido con las variables y en la Tabla 10 las ecuaciones del balance de agua en las torres de enfriamiento.



Fuente: Martínez, 2011

Figura 4. Variables de operación en un sistema de torres de enfriamiento

Tabla 10. Balance de materia de una torre de enfriamiento

Corriente	Nombre	Abreviatura	Ecuación	Balance Diseño (GPM)	Balance Prueba (GPM)
1	Repuesto	Ar	$P + A + E$	215	68
2	Purga	P	$\frac{E}{(C.C - 1)} - A$	33	14.75
3	Arrastre	A	$0.02\% * R$	2	1.5
4	Evaporación	E	$\frac{R * \Delta T}{1000}$	180	51.75
5	Recirculación	R	Recirculación	10,000	7,500

Fuente: Propia, 2016

7.3.6 Carga térmica disipada

Carga térmica disipada (QD): También conocida como el calor disipado en una torre de enfriamiento, se determina para comparar las condiciones de diseño y determinar la eficiencia térmica en la que opera la torre y depende de los requerimientos de la planta de proceso. El cálculo del calor disipado (QD) se obtiene con la ecuación (6).

$$QD = R * (TAC - TAF)Cp * 8.35 = (BTU/min) \quad (6)$$

Donde

R= Recirculación de la torre en (GPM)

TAC= Temperatura de agua caliente (°F)

TAF= Temperatura de agua fría (°F)

Cp= Calor Específico de agua equivale a 1(kcal/kg °C)

8.35 = Factor de conversión

Sustituyendo los valores de la Tabla 8 en la ecuación 6 resulta:

$$QD = 7,500 * (100.6 - 93.7) * 1 * 8.35 = 432,112 \text{ BTU/min}$$

Para el caso de diseño corresponde a 1,503,000 BTU/min

7.4 Método Merkel

Es un método aprobado por el Código CTI TAC- 105 (Cooling Tower Institute Acceptance Test Codes, 1982.).

El por ciento de capacidad de una torre de enfriamiento por el método de Merkel, está dado por la ecuación (7).

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{\left(\frac{L}{G}\right)_0}{\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}} \times 100 \quad (7)$$

$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}$ = Proporcionado por el fabricante.

$\left(\frac{L}{G}\right)_0$ = función $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}}$ y $\left(KaV/L\right)_{\text{PRUEBA}}$

(evaluada posteriormente en la gráfica correspondiente, ver anexo 11.1) = [lb_agua/lb_aire_seco]

En donde:

$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}}$ = Relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, en [lb_agua/lb_aire_seco]

$\left(\frac{L}{G}\right)_0$ = Relación corregida del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, este valor se determina en una gráfica que posteriormente se determina con los valores de $\left(\frac{L}{G}\right)$ y $\left(KaV/L\right)$ de diseño y prueba [lb_agua/lb_aire_seco]

% de capacidad = % de capacidad de una celda de la torre

A continuación se desarrolla completamente la memoria de cálculo para determinar el % de capacidad de la torre de enfriamiento de agua, por el método de Merkel.

7.4.1 Obtención del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$

Para calcular el $\left(\frac{L}{G}\right)_0$, se necesita primero obtener el $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}}$ y $\left(KaV/L\right)_{\text{PRUEBA}}$

7.4.2 Cálculo del $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}}$

El cálculo del $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}}$ se determina mediante la ecuación (8):

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{PRUEBA}} = \left(\frac{L_{\text{PRUEBA}}}{L_{\text{DISEÑO}}}\right) \times \left(\frac{BHP_{\text{DISEÑO}}}{BHP_{\text{PRUEBA}}}\right)^{1/3} \times \left(\frac{L}{G}\right)_{\text{DISEÑO}} \quad (8)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = [lb_agua/lb_aire_seco]$$

En donde:

L_{PRUEBA} = Flujo de agua de prueba, este valor se mide, (GPM).

$L_{DISEÑO}$ = Flujo de agua de diseño, este valor se toma, (GPM).

BHP_{PRUEBA} = Es la potencia al freno del ventilador de prueba de la celda, determinada a partir del voltaje y amperaje y factor de potencia del motor del ventilador en (HP).

BHP diseño = Es la potencia al freno del ventilador de diseño, proporcionada por el fabricante, o calculada a partir de datos de diseño o nominal, en (HP).

$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ = Relación de diseño de flujo de agua con respecto al flujo de aire seco

7.4.3 Cálculo de “BHP prueba”

Cálculo de la potencia al freno del ventilador “BHP de prueba”

La potencia al freno del ventilador “BHP de prueba” se calcula mediante las ecuaciones (9) y (10)

$$BHP_{PRUEBA} = \frac{\sqrt{3}xVxAxF.P.}{0.7457 x1000} \text{ para un motor trifásico} \quad (9)$$

$$BHP_{PRUEBA} = \frac{VxAxF.P.}{0.7457 x1000} \text{ para un motor monofásico} \quad (10)$$

En donde:

$\sqrt{3}$ = valor para el motor trifásico del ventilador (adimensional).

V = Voltaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Volts).

A = Amperaje del motor del ventilador, este valor se toma, (Ampere).

F.P. = Factor de potencia del motor del ventilador, este valor es adimensional.

0.7457 = Factor de conversión de Watts a HP (1 HP = 0.7457 kW).

1000 = Valor para convertir watts a kilowatts (1 kW = 1000 W).

BHP de prueba = Potencia al freno del ventilador de prueba BHP, (HP).

7.4.4 Cálculo del “BHP de diseño”

El “BHP de diseño”, se obtiene de la hoja de datos de la torre, en caballos de potencia (HP). En caso de que no se cuente con este valor se deberá calcular mediante la ecuación (11)

$$BHP_{DISEÑO} = \frac{ACFM * \Delta P_{TOTAL}}{6356 * \eta^{RED} * \eta^{VENT}} \quad (11)$$

En donde:

ACFM = Cantidad de aire real incluyendo agua evaporada, en pies por minuto (ft/min).

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total que tiene que vencer el ventilador. Es decir, incluye la presión estática total (pérdidas a través de la torre, más la presión de velocidad), (pulg H₂O).

η^{RED} = Eficiencia del reductor de velocidad, (%).

η^{VENT} = Eficiencia del ventilador, (%).

6356 = Factor de conversión, para obtener potencia.

BHP diseño = Potencia al freno de diseño a la entrada del motor, (HP).

Datos que deben de ser proporcionados por el fabricante

Normalmente los fabricantes proporcionan la siguiente información

η^{REC} = Eficiencia de recuperación en la chimenea, (%).

η^{RED} = Eficiencia del reductor de velocidad, (%).

η^{VENT} = Eficiencia del ventilador, (%).

ACFM = Cantidad de aire real incluyendo agua, (ft/min).

P_{est.tot.} = Caída de presión total que tiene que vencer el ventilador. Incluye la presión estática total (pérdidas a través de la torre, más la presión de velocidad), (pulg de H₂O).

Vg = Velocidad del aire, (ft/min).

ρ = Densidad del aire saliente, (lb/ft³).

Ds = Diámetro de la chimenea en la parte superior, (ft).

7.4.5 Cálculo de velocidad del aire en el ventilador

Esta velocidad será calculada en la salida de la chimenea con ayuda de las ecuaciones (12) y (13).

$$A_s = \pi * D_s^2 / 4 = (\text{ft}^2) \quad (12)$$

$$V_s = ACFM / A_s = (\text{ft}/\text{min}) \quad (13)$$

En donde:

π = Constante 3.1415

A_s = Área de flujo de aire a la salida de la chimenea, en pies cuadrados (ft²)

V_s = Área de flujo de aire a la salida de la chimenea, en pies cuadrados (ft²).

7.4.6 Cálculo de presión de velocidad

Cálculo de presión de velocidad en la salida del ventilador (PVS) y (PVG) se realizan con ayuda de las ecuaciones (14) y (15)

$$PVS = \left| \frac{Vs^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad (14)$$

$$PVG = \left| \frac{Vg^2}{1096.5 / (\rho)^{1/2}} \right| = (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad (15)$$

En donde:

ρ = Densidad del aire saliente de la torre, (lb/ft³)

PVS = Presión de velocidad a la salida, (pulg de H₂O).

PVG = Presión de velocidad en la garganta, (pulg de H₂O).

Cálculo de la presión total se obtiene con ayuda de las ecuaciones (16), (17) y (18)

$$REC = \eta^{REC} (PVG - PVS), (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad (16)$$

$$PVREC = PVG - REC, (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad (17)$$

$$\Delta P_{TOTAL} = P_{est.tot} + PVREC, (\text{pulg H}_2\text{O}) \quad (18)$$

Con el valor obtenido de ΔP_{TOTAL} y los valores proporcionados por el fabricante (ACFM, η^{RED} , η^{VENT}), se sustituyen en la ecuación (11) para obtener el BHP de diseño.

En donde:

REC = Recuperación de velocidad, (pulg H₂O).

PVREC = Presión de velocidad recuperada, (pulg H₂O)

ΔP_{TOTAL} = Caída de presión total en la torre de enfriamiento, (pulg H₂O).

En caso de no contar con el BHP del fabricante de la torre de enfriamiento, se puede obtener un valor preliminar del BHP de diseño, utilizando la potencia nominal del motor del ventilador.

7.4.7 Cálculo del $(L/G)_0$

Para el cálculo del $(L/G)_0$, se necesita primero obtener el $(L/G)_{PRUEBA}$ y $(KaV/L)_{PRUEBA}$ los resultados de la prueba de comportamiento de la torre utilizada como ejemplo se pueden observar dichos datos en las Tabla 11 y Tabla 12

Tabla 11. Recopilación de información de prueba y diseño

Variable	Símbolo	Unidad	Diseño	Prueba
Flujo de agua	A _T	GPM	10,000	7,500
Temperatura de agua caliente	TAC	° F	107.6	100.6
Temperatura de agua fría	TAF	° F	89.6	93.7
Temperatura de bulbo húmedo	TBH	° F	82.4	81.2
Intervalo de enfriamiento (TAC-TAF)	-	° F	18	16.9
Aproximación (TAF-TBH)	-	° F	7.2	12.5
Potencia al freno del ventilador	BHP	HP	125	60.12
Relación característica de la torre	(KaV/L)	adimensional	2.47	0.42
Relación de flujo	(L/G)	lb agua / lb aire seco	1.8	1.60

Fuente: Propia

Tabla 12. Variaciones permitidas por el Código Cooling Technology Institute (CTI).

Variable	Desviación permitida por código CTI	Desviación entre Diseño y Prueba
TBH	± 15 °F	-1.20 °F
Intervalo	± 20 %	-6.11 %
Flujo	± 30 %	-25.00 %

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 12, la desviación en los valores diseño respecto a los de la prueba en los parámetros de la TBH, intervalo y flujo de agua, están en los límites de aceptación marcados por CTI, por lo que la prueba de comportamiento se da cómo valida y puede seguirse con los cálculos para determinar el % de capacidad de la celda.

7.4.8 Cálculo del $(L / G)_{prueba}$

El $(L / G)_{prueba}$ se determina con la ecuación (8), sustituyendo los valores de la Tabla 11.

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{L_{PRUEBA}}{L_{DISEÑO}}\right) \times \left(\frac{BHP_{DISEÑO}}{BHP_{PRUEBA}}\right)^{1/3} \times \left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO} \quad (8)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{7500}{10000}\right) \times \left(\frac{100}{60.21}\right)^{1/3} \times (1.8)$$

= 1.60 lb agua /lb aire seco

7.4.9 Cálculo del $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$

Este se calcula de acuerdo a la ecuación (19). La solución de la integral está dada por la ecuación (20)

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \int_{TAF}^{TAC} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad (19)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{TAC - TAF}{4}\right) \times \left(\left(\frac{1}{\Delta h1}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h2}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h3}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h4}\right)\right) \quad (20)$$

En donde:

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \text{Valor característico de la torre, (adimensional)}$$

$\int \frac{dT}{h_w - h_a}$ Representa el perfil de temperaturas, en la torre para calcular la transferencia de calor, la integral se resuelve por el criterio de Merkel, evaluando por incrementos, y se estiman cuatro temperaturas en la torre; a estas temperaturas se calcula la entalpía de la mezcla de aire agua y posteriormente se calcula la entalpía de la corriente de aire, evaluando así a la integral, el procedimiento es el siguiente:

7.4.10 Determinación del perfil de las cuatro temperaturas.

El perfil de temperatura se determina con las ecuaciones (21), (22), (23) y (24)

$$T1^* = TAF + 0.1 (TAC - TAF) \quad (21)$$

$$T2^* = TAF + 0.4 (TAC - TAF) \quad (22)$$

$$T3^* = TAC - 0.4 (TAC - TAF) \quad (23)$$

$$T4^* = TAC - 0.1 (TAC - TAF) \quad (24)$$

En donde:

T1* = Temperatura estimada en el punto 1, del perfil de temperatura (°F).
 T2* = Temperatura estimada en el punto 2, del perfil de temperatura (°F).
 T3* = Temperatura estimada en el punto 3, del perfil de temperaturas (°F)
 T4* = Temperatura estimada en el punto 4, del perfil de temperaturas (°F)

Sustituyendo los valores de la Tabla 11, tenemos:

$$T1^* = 93.7 + 0.1 (100.6 - 93.7) = 94.39 \text{ } ^\circ \text{ F}$$

$$T2^* = 93.7 + 0.4 (100.6 - 93.7) = 96.46 \text{ } ^\circ \text{ F}$$

$$T3^* = 100.6 - 0.4 (100.6 - 93.7) = 97.84 \text{ } ^\circ \text{ F}$$

$$T4^* = 100.6 - 0.1 (100.6 - 93.7) = 99.91 \text{ } ^\circ \text{ F}$$

A estas 4 temperaturas se obtiene la entalpía de la mezcla de aire - agua

También se determina la entalpía de la mezcla aire – agua con la gráfica del Anexo, para la temperatura de bulbo húmedo de prueba (TBH), en grados (°F).

$$hw1 \text{ (@ } 94.39 \text{ } ^\circ \text{ F)} = 62.5 \text{ BTU / lb}$$

$$hw2 \text{ (@ } 96.46 \text{ } ^\circ \text{ F)} = 66 \text{ BTU / lb}$$

$$hw3 \text{ (@ } 97.84 \text{ } ^\circ \text{ F)} = 68 \text{ BTU / lb}$$

$$hw4 \text{ (@ } 99.91 \text{ } ^\circ \text{ F)} = 72 \text{ BTU / lb}$$

$$hgi \text{ (@ } 81.2 \text{ } ^\circ \text{ F)} = 45 \text{ BTU / lb}$$

En donde:

hw1 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T1*, en (BTU / lb aire seco).
 hw2 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T2*, en (BTU / lb aire seco).
 hw3 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T3*, en (BTU / lb aire seco).
 hw4 = Entalpía de la mezcla aire - agua a T4*, en (BTU / lb aire seco).
 hgi = Entalpía del TBH de prueba, en (BTU / lb aire seco).

7.4.11 Cálculo de la entalpía del aire

La entalpía del aire se determina mediante la ecuación (25)

$$hg2 = (L / G)_{\text{prueba}} \times (TAC - TAF) + hgi \text{ [BTU / lb aire húmedo]} \quad (25)$$

También se calcula el perfil de entalpías del aire en los cuatro puntos de la torre (Criterio de Merkel), mediante las ecuaciones (26), (27), (28) y (29)

$$ha1 = hgi + 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad (26)$$

$$ha2 = hgi + 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad (27)$$

$$ha3 = hg2 - 0.4 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad (28)$$

$$ha4 = hg2 - 0.1 (TAC - TAF) * (L/G)_{\text{PRUEBA}} \quad (29)$$

En donde:

$(L / G)_{\text{prueba}}$ = Relación de prueba del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco (lb agua / lb aire seco).

TAC = Temperatura de agua caliente, en (°F).

TAF = Temperatura de agua fría, en (°F).

hgi = Entalpía del aire a la temperatura de bulbo húmedo, en unidad térmica inglesa por libra de aire húmedo (BTU / lb aire seco).

hg2 = Entalpía del aire, en (BTU / lb aire seco).

ha1 = Entalpía del aire en el punto 1, en (BTU / lb aire seco).

ha2 = Entalpía del aire en el punto 2, en (BTU / lb aire seco).

ha3 = Entalpía del aire en el punto 3, en (BTU / lb aire seco).

ha4 = Entalpía del aire en el punto 4, en (BTU / lb aire seco).

Sustituyendo los valores de las ecuaciones (26) a la (29)

$$hg2 = 1.60 * (100.6 - 93.7) + 45 = 56.03 \text{ BTU / lb}$$

$$ha1 = 45.00 + 0.1 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 46.10 \text{ BTU / lb}$$

$$ha2 = 45.00 + 0.4 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 49.41 \text{ BTU / lb}$$

$$ha3 = 56.03 - 0.4 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 51.62 \text{ BTU / lb}$$

$$ha4 = 56.03 - 0.1 * (100.6 - 93.7) * 1.60 = 54.93 \text{ BTU / lb}$$

Calculamos la diferencia de entalpía de la mezcla aire - agua y la entalpía del aire, mediante las ecuaciones (30), (31), (32) y (33):

$$\Delta h1 = hw1 - ha1 \quad (30)$$

$$\Delta h2 = hw2 - ha2 \quad (31)$$

$$\Delta h3 = hw3 - ha3 \quad (32)$$

$$\Delta h4 = hw4 - ha4 \quad (33)$$

En donde:

$\Delta h1$ = Diferencia de entalpías para el punto 1 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h2$ = Diferencia de entalpías para el punto 2 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h3$ = Diferencia de entalpías para el punto 3 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

$\Delta h4$ = Diferencia de entalpías para el punto 4 (criterio de Merkel), entre la entalpía de la mezcla de agua - aire y la entalpía del aire, en (BTU / lb aire)

Sustituyendo los valores obtenidos tenemos:

$$\Delta h1 = 62.5 - 46.10 = 16.40 \quad \text{BTU / lb}$$

$$\Delta h2 = 66 - 49.41 = 16.59 \quad \text{BTU / lb}$$

$$\Delta h3 = 68 - 51.62 = 16.38 \quad \text{BTU / lb}$$

$$\Delta h4 = 72 - 54.93 = 17.07 \quad \text{BTU / lb}$$

Calculo de $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$, sustituimos los valores obtenidos en la ecuación (34).

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \int_{TAF}^{TAC} \frac{dt}{h_w - h_a}$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{TAC - TAF}{4}\right) x \left(\left(\frac{1}{\Delta h1}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h2}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h3}\right) + \left(\frac{1}{\Delta h4}\right) \right) \quad (34)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = \left(\frac{100.6 - 93.7}{4}\right) x \left(\left(\frac{1}{16.40}\right) + \left(\frac{1}{16.59}\right) + \left(\frac{1}{16.38}\right) + \left(\frac{1}{17.07}\right) \right)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = 0.42$$

En la Tabla 13 se resumen los datos obtenidos.

Tabla 13. Datos de diseño y prueba para la utilización del Método de Merkel

Variable	Valores de Diseño	Valores de Prueba
(L/G)	1.8	1.6
(KaV/L)	2.47	0.42
Aproximación (TAF-TBH) °F	7.2	12.5

Fuente: Propia

7.4.12 Obtención gráfica del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$

En caso de no tener él $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ o el de $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ se puede utilizar lo siguiente:

En lugar de usar $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ se puede usar la aproximación de diseño para la lectura de la curva característica.

El valor de diseño $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ se puede obtener de dividir el flujo de agua de diseño por celda, y el flujo de aire de diseño para una celda.

La obtención del $\left(\frac{L}{G}\right)_0$ (relación de flujo de agua y líquido corregido), se hace gráficamente mediante el uso de la curva característica de la torre de enfriamiento, la Figura 5 se utiliza como guía para obtener los datos y el anexo 11.1 que es la curva aplicable a la torre de enfriamiento analizada.

Con los valores obtenidos de $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO} = 1.8$ y con cualquiera de los dos siguientes datos $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO} = 2.47$ o la aproximación de diseño = 7.2 y con $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA} = 1.6$ y $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA} = 0.42$ se sigue el procedimiento, en la curva característica.

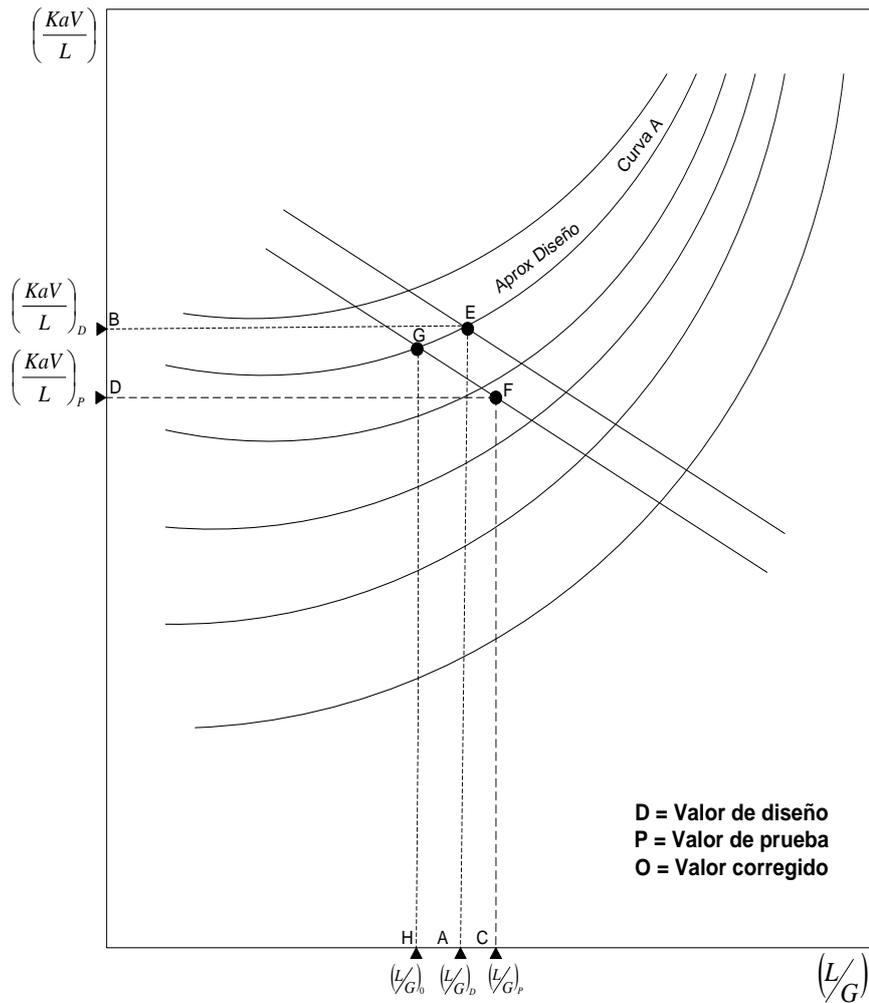
Ejemplificando en la Figura 5 y utilizando la anexo 11.1, se debe de localizar en la curva característica $\left(\frac{L}{G}\right)_{DISEÑO}$ (**punto A**) y con $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{DISEÑO}$ o la curva característica con la aproximación de diseño (**punto B** o curva A), con esto se localiza el punto de diseño (**punto E**), se traza una tangente al **punto E** con pendiente - 0.6 (valor propuesto por Merkel en su metodología de cálculo).

Se localizan ahora los valores de $\left(\frac{L}{G}\right)_{PRUEBA}$ (**punto C**) y con $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{PRUEBA}$ (**punto D**) localiza el punto de prueba (**punto F**), se traza una tangente al **punto F** y paralela a la curva característica con pendiente -0.6 del **punto E**.

Moverse sobre esta a tangente al **punto F**, hasta interceptar a la curva característica con la aproximación de diseño = 7.2 ° F, localizando el punto corregido de la torre (**punto G**)

Moverse del **punto G** perpendicularmente al eje $\left(\frac{L}{G}\right)$ localizando el **punto H**, este punto corresponde al valor corregido $\left(\frac{L}{G}\right)_0$ ver Figura 5

El valor de $\left(\frac{L}{G}\right)_0$ que se obtiene es 0.55



Fuente: Propia

Figura 5. Diagrama para determinación de L/G_0

7.4.13 Cálculo de la capacidad actual de la torre.

Sustituimos los valores obtenidos en la ecuación (7)

$$\% \text{ de Capacidad} = \frac{0.55}{1.8} \times 100 = 30.56\%$$

Este valor indica que a los valores de diseño; la temperatura de agua caliente (TAC = 100.6 °F); temperatura de agua fría (TAF = 93.7 °F); temperatura de bulbo húmedo (TBH = 81.2 °F) y con una potencia de ventilador de 125 HP, la torre es capaz de enfriar:

$$7500 \times 0.3056 \times 6 = 13,752 \text{ GPM.}$$

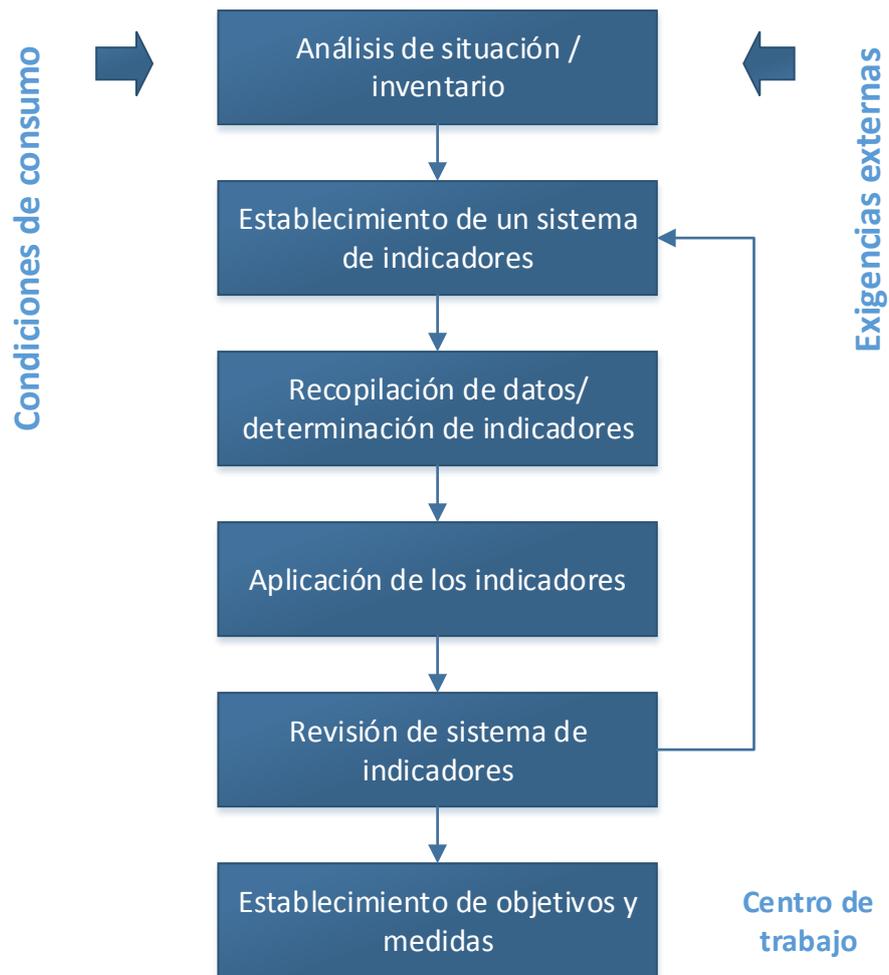
7.5 Indicadores Energéticos

Los indicadores son muy valiosos para registrar, comentar y analizar periódicamente, y el análisis de sus comportamientos históricos es el que permite descubrir las oportunidades de mejora.

Los indicadores son parámetros de medición que integran generalmente más de una variable básica que caracteriza un evento, a través de formulaciones matemáticas sencillas, permitiendo una fácil comprensión de las causas, comportamiento y resultados de una actividad.

Usualmente la Eficiencia Energética se evalúa a través de los llamados Indicadores de Eficiencia Energética que permiten medir “cuán bien” se utiliza la energía para producir una unidad de producto (Pérez, 2012). Los Indicadores de Eficiencia Energética adoptan diferentes formas dependiendo de los objetivos buscados, de modo que existen indicadores económicos, tecno-económicos o indicadores de ahorro energético.

Las características básicas que deben tener los indicadores son, que sean confiables, periódicos, desagregados, que cubran los parámetros básicos, de manera que faciliten la evaluación del sector y evalúen los resultados frente a objetivos y/o metas. Para garantizar esto, se debe tener una metodología para establecer los indicadores, ver Figura 6.



Fuente: Pérez, 2012

Figura 6. Metodología para establecer indicadores

7.5.1 Indicador energético para las torres de enfriamiento

Para el caso particular de las torres de enfriamiento se propone el uso de 6 diferentes indicadores que relacionan la energía utilizada con los principales productos consumidos y generados. Ver Tabla 14

Tabla 14. Estructura de indicadores energéticos para torres de enfriamiento

Indicador	Energía consumida	Producto	
		Generado	Consumido
IE 1	Iluminación Bombeo Ventiladores (kWh/mes)	Producto de la planta usuaria (barril/mes)	NA
IE 2		Potencia demandada (MW/mes)	NA
IE 3		Agua de enfriamiento (gpm)	NA
IE 4		Calor disipado (BTU/min)	NA
IE 5		NA	Químicos para tratamiento (kg/mes)
IE 6		NA	Costo de operación (\$/mes)

Fuente: Propia

Los indicadores energéticos aplicables a las torres de enfriamiento en la industria de la refinación se pueden estimar de la siguiente manera

Indicador energético por producto (planta usuaria) ver ecuación (35)

$$IE_1 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{mes} \right]}{\text{producto generado} \left[\frac{bbl}{mes} \right]} = \left[\frac{kWh}{bbl} \right] \quad (35)$$

Indicador energético por producto (planta usuaria) ver ecuación (36)

$$IE_2 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{mes} \right]}{\text{potencia demandada} \left[\frac{kW}{mes} \right]} = \left[\frac{kWh}{kW} \right] \quad (36)$$

Indicador energético por agua de enfriamiento recirculada ver ecuación (37)

$$IE_3 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{mes} \right]}{\text{agua recirculada} \left[\frac{gal}{min} \right] * 163.53} = \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \quad (37)$$

Indicador energético por calor disipado por la torre de enfriamiento ver ecuación (38)

$$IE_4 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{\text{mes}} \right]}{\text{calor disipado} \left[\frac{BTU}{\text{min}} \right] * 0.0432} = \left[\frac{kWh}{MMBTU} \right] \quad (38)$$

Indicador energético por tratamiento químico en la torre de enfriamiento ver ecuación (39)

$$IE_5 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{\text{mes}} \right]}{\text{tratamiento químico} \left[\frac{L}{\text{mes}} \right]} = \left[\frac{kWh}{L} \right] \quad (39)$$

Indicador energético por costo de operación de la torre de enfriamiento ver ecuación (40)

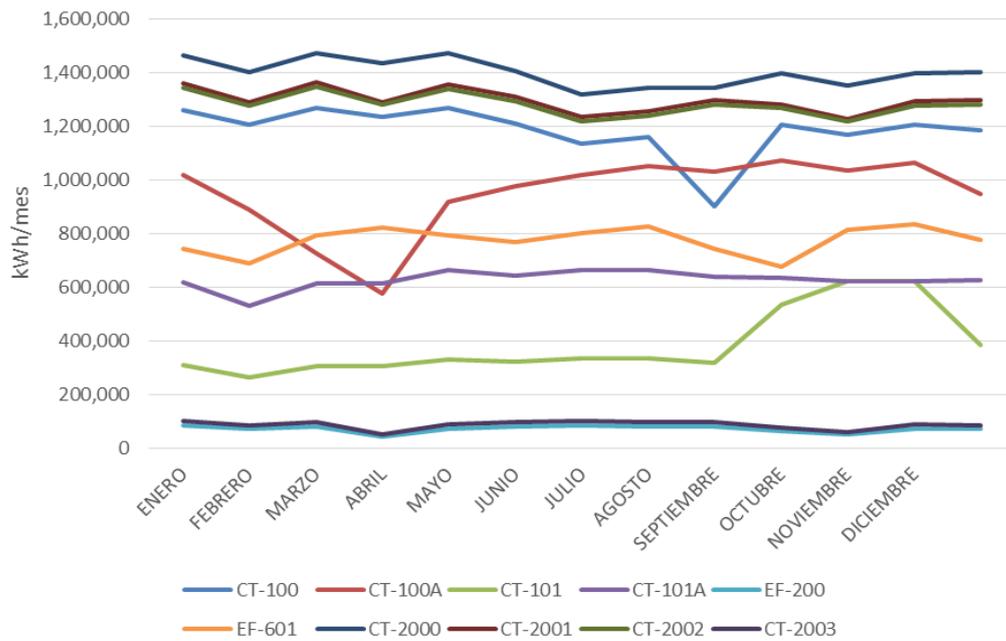
$$IE_6 = \frac{\text{energía consumida} \left[\frac{kWh}{\text{mes}} \right]}{\text{costo de operación} \left[\frac{USD}{\text{mes}} \right]} = \left[\frac{kWh}{USD} \right] \quad (40)$$

7.5.2 Indicadores en un centro de refinación de petróleo (caso de estudio)

Tomando como base un centro de refinación de petróleo al sureste de la República Mexicana, este centro procesa alrededor de 161,580 barriles de petróleo crudo al día en sus 34 plantas utilizando sus 53 celdas de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento consideradas solamente son las que cuentan con celdas de 10,000 gpm, cabe mencionar que existen torres de enfriamiento en el centro de refinación con diferentes capacidades que no fueron consideradas en este trabajo.

En la Figura 7 se presenta el consumo de energía eléctrica de cada torre de enfriamiento durante el año 2015.

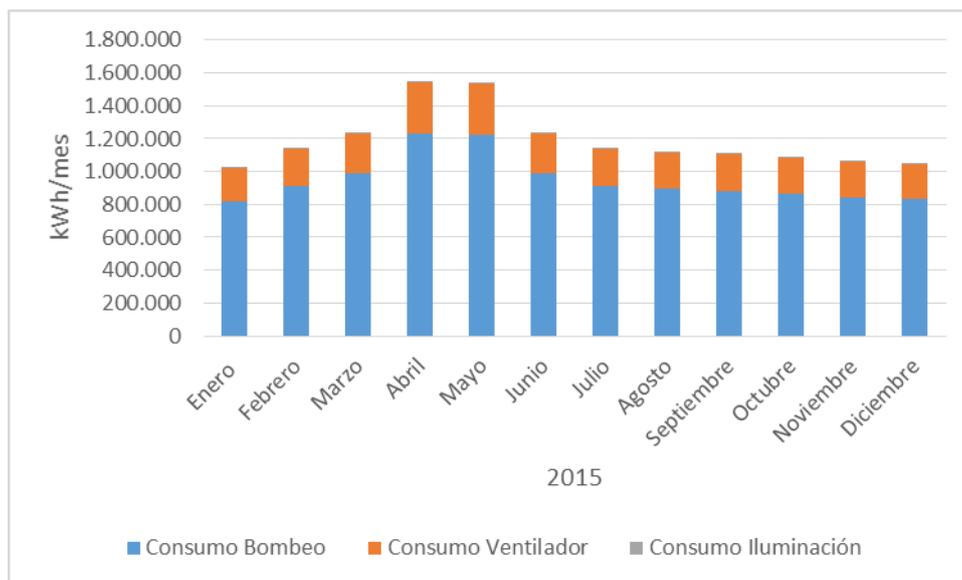


Fuente: Propia, estimados promedio del año 2015 del caso de estudio

Figura 7. Consumo de energía año 2015

Como se puede observar en la Figura 7 no se tiene un comportamiento constante debido a cambios en las cargas de producción de las plantas, y al mantenimiento de las plantas.

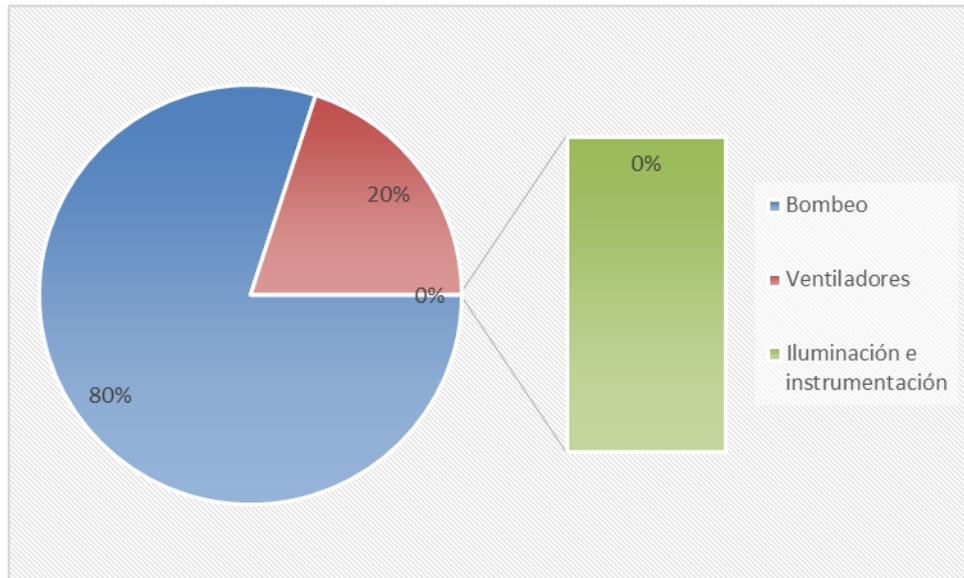
En la Tabla 8 se muestra el perfil de consumo de energía de la torre de enfriamiento CT-100 correspondiente al año 2015.



Fuente: Propia, estimados promedio del año 2015 del caso de estudio

Figura 8. Consumo de energía de la torre de enfriamiento CT-100

En la Figura 9 se muestra el consumo de energía eléctrica estimada promedio reportado durante el 2015 en las torres de enfriamiento del centro de refinación. En éstas, el 79.97 % corresponde al bombeo de agua de enfriamiento, el 19.99 % pertenece al uso de los ventiladores y por último la iluminación e instrumentación el 0.04 %.



Fuente: Propia, consumos promedio del año 2015 del caso de estudio

Figura 9. Distribución de consumo de energía

En la Tabla 15 se muestran los indicadores energéticos promedio teórico por celda, en los cuales, se consideraron celdas de capacidad de 10,000 gpm con un diferencial de 10 °C en las 12 diferentes torres existentes del centro de refinación.

Tabla 15. Indicadores energéticos promedio

Indicador Energético	Valor	Unidades	Interpretación
IE ₁	29.5	kWh/bbl	Energía consumida por barril procesado
IE ₂	90.0	kWh/MW	Energía consumida por potencia generada
IE ₃	0.27	kWh/m ³	Energía consumida por agua de enfriamiento recirculada
IE ₄	6.93	kWh/MMBTU	Energía consumida por calor disipado
IE ₅	68.8	kWh/L	Energía consumida por tratamiento químico
IE ₆	6.1	kWh/USD	Energía consumida por costo de operación

Fuente: Propia valores de diseño del caso de estudio

La Tabla 16 muestra los indicadores energéticos de las 10 torres de enfriamiento estudiadas del centro de refinación de petróleo.

Tabla 16. Indicadores energéticos del centro de refinación de petróleo

Indicador Energético	CT-100	CT-100A	CT-101	CT-101A	EF-200	EF-601	CT-2000	CT-2001	CT-2002	CT-2003
IE ₁ [kWh/bbl]	51.4	49.3	NA	NA	18.6	33.6	45.2	42.4	41.7	NA
IE ₂ [kWh/MW]	NA	NA	144.1	235.7	NA	NA	NA	NA	NA	32.2
IE ₃ [kWh/m ³]	0.16	0.12	0.05	0.11	0.01	0.59	0.12	0.10	0.14	0.08
IE ₄ [kWh/MMBTU]	14.7	5.7	2.3	5.0	0.3	26.9	5.5	4.7	6.4	3.7
IE ₅ [kWh/l]	42.6	35.6	30.8	52.5	3.1	89.7	46.9	83.9	46.2	3.8
IE ₆ [kWh/USD]	9.22	8.84	3.58	5.86	3.34	6.03	8.16	7.56	7.48	4.00

NA: No aplica

Fuente: Propia valores promedio de consumo del año 2015

Los indicadores energéticos de la Tabla 16 no se pueden comparar entre si ya que cada torre de enfriamiento presta servicio a diferentes plantas de proceso y presentan diferentes problemáticas que van desde contaminaciones por fugas de proceso o de agua, hasta sobrecarga o bajas de carga de la planta.

Los indicadores energéticos que se podrían comparar para cada torre son los de la Tabla 15 con los de la Tabla 16, ya que la Tabla 16 son valores de operación del año 2015 y la Tabla 7 son valores de diseño promedio de las torres de enfriamiento del centro de trabajo.

7.6 Evaluación Económica

Una evaluación económica siempre requiere determinar los costos de operación.

7.6.1 Costos de operación

Para determinar el costo de operación de una torre de enfriamiento debemos de realizar un balance de materia (agua) para saber el volumen de agua de repuesto y de recirculación.

Realizar mediciones o consultar registros de energía consumida en motores de las bombas y de los ventiladores.

Revisar bitácoras de operación para saber los volúmenes de lubricantes para piezas móviles y de químicos para el tratamiento del agua.

Hacer entrevistas a jefes de operación y operadores para estimar el personal necesario para la operación y mantenimiento y conocer el tiempo de operación de la torre de enfriamiento.

Con las facturaciones calcular los costos unitarios del agua, de la energía eléctrica, de los lubricantes, de los químicos, de las horas hombre (para cada tipo de operador).

Usando toda la información se calcula el costo asociado por unidad de tiempo, de acuerdo al análisis de costos operación en las 53 celdas de capacidad de 10,000 gpm cada una. Durante el año 2015 en el centro de refinación de petróleo crudo en el sureste de la República el cálculo da como promedio un costo de operación por celda mensual de 328,400 USD.

Se destaca que el mayor costo corresponde al bombeo para recircular el agua de enfriamiento, con un 92.5 %; en segundo lugar, el costo por consumo de energía de los ventiladores, con un 3.2 %, seguido por el costo de agua de repuesto con el 2.5 %, y el restante 1.8 % corresponde al tratamiento químico, operadores y mantenimientos.

Con el costo de operación y los siguientes métodos de evaluación de la rentabilidad se puede cuantificar el Proyecto de ahorro de energía.

7.6.2 Valor Presente Neto

Este método consiste en transformar a su equivalente en valor presente, vía una tasa de descuento, todos los componentes del flujo de fondos de un proyecto. Si la inversión total (S_0) se realiza en el tiempo cero ($t=0$ normalmente representa momento del inicio de operaciones), el valor presente neto es la diferencia entre dicha inversión y el flujo futuro de fondos actualizado. El VPN representa, en valor presente, la magnitud absoluta en que los ingresos equivalentes de un flujo de caja superan a, o son superados por, los egresos equivalentes de dicho flujo.

La ecuación (41) se ocupa para calcular el Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = -S_0 + \sum_i^n \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (41)$$

En éste y otros métodos que toman en cuenta el valor del dinero en el tiempo, cabe destacar que la tasa de descuento o de actualización (i) apropiada debe determinarse externamente al proyecto, tomando como referencia el uso alternativo que se le puede dar al dinero y el riesgo de realizar la inversión. Es decir, representa el costo de oportunidad para el inversionista y comúnmente se le denomina Tasa de Rendimiento Mínima Atractiva (TREMA).

Esta tasa puede calcularse como la tasa que se ganaría en una inversión sin riesgo (instrumentos de deuda soberana de largo plazo, del gobierno), más una prima (o primas) por el nivel de riesgo del proyecto.

$TREMA = \text{Tasa sin riesgo} + \text{Primas por riesgo}$

Si el valor presente neto es positivo significa que los beneficios son mayores que los costos y, también, que el rendimiento que se espera obtener del proyecto de inversión es mayor que el rendimiento mínimo atractivo requerido por la empresa. En este caso, el proyecto debe emprenderse. (Fernández, 2015)

7.6.3 Tasa Interna de Retorno

La TIR es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Se define como la tasa de rendimiento “i” que reduce a cero el valor presente de una serie de ingresos y egresos.

La regla de decisión sería emprender el proyecto si TIR es mayor o igual que TREMA y rechazarlo en caso contrario. Por último, es evidente que la TIR no se puede calcular si se tiene para un proyecto de inversión con un flujo de efectivo formado en su totalidad por costos, o bien por ingresos. En cambio, es posible aplicar la TIR al comparar tecnologías para ahorro de energía mediante el análisis incremental.

En algunos proyectos, tales como reemplazo de equipos o ahorro de energía, es posible encontrar que la TIR es muy superior a TREMA. Debido al supuesto antes mencionado, cuando no tenemos más proyectos tan atractivos, debe utilizarse la tasa interna de retorno modificada (TIRM), como una medida más realista de rendimiento, que supone que los beneficios del proyecto se reinvierten a tasas razonables de lograr, por ejemplo TREMA. (Fernández, 2015)

Cabe notar que $TREMA < TIRM < TIR$.

7.6.4 Periodo de recuperación

En su versión simple, este método consiste en medir el tiempo que se tarda para recuperar la cantidad invertida inicialmente, mediante los ingresos netos que produce el proyecto (Fernández, 2015)

El periodo de recuperación se determina según la ecuación (42)

$$PR = \frac{S_0}{t} \quad (42)$$

7.7 Propuesta de rehabilitación de la Torre de Enfriamiento CT-100 para ahorro de energía

La propuesta está basada en el resultado de la inspección física.

Para reducir los consumos innecesarios de energía eléctrica

- Instalar variador de frecuencia enlazado con el motor del ventilador y un indicador transmisor de temperatura
- Instalar variador de frecuencia enlazado con el motor de la bomba para suministrar el flujo de agua requerido
- Reemplazar las 19 luminarias fluorescentes por luminarias tipo led

Para aumentar la transferencia de calor

- Reemplazo completo de las boquillas por boquillas de baja presión de polipropileno de alta densidad con orificio de 1 pulgada
- Sustituir el relleno por relleno tipo salpiqueo de polipropileno de alta densidad y con soporte de malla de acero y clips de sujeción de polipropileno
- Reemplazar caja de salpiqueo y de desborde de concreto por FRP

Para disminuir carga a los motores de los ventiladores

- Adquirir e instalar 80 persianas nuevas de FRP, limpiar 120 y acomodar 13
- Sustituir los eliminadores de rocío por eliminadores de alta eficiencia de polipropileno de alta densidad con sistema de soporte del mismo material
- Reemplazar puertas de lámina del pasillo central por puertas de FRP
- Cambiar material de la chimenea de concreto por FRP
- Acortar altura de la chimenea de 4.8 m a 3.7 m

Para garantizar el flujo de aire necesario

- Sustituir motor eléctrico estándar del ventilador por motor eléctrico Premium
- Reemplazar las 6 flechas de transmisión de fibra de carbono con diámetro de 8 pulgadas por otras nuevas de las mismas especificaciones
- Limpieza del reductor de velocidad
- Ajustar el ángulo de ataque de las aspas del ventilador a 23° (Tower Tech, 2010)

Para tener un mejor control de la operación

- Reemplazar válvulas de agua de repuesto de 6 pulgadas y de purga de 4 pulgadas por nuevas con las mismas especificaciones
- Sustituir el medidor de flujo por un medidor de caudal de disco oscilante para el agua de repuesto
- Mantenimiento a las válvulas de 24 pulgadas del agua de retorno
- Instalar indicadores de presión y temperatura en la tubería del agua de retorno

Para evitar incrustaciones, crecimiento bacteriano y aumentar la transferencia de calor

- Aumentar la dosificación de químicos para eliminar incrustaciones, crecimiento bacteriano y espumas

Para elevar el tiempo de vida del sistema mecánico

- Instalar interruptores de vibración en el motor del ventilador

Para aumentar el tiempo de vida del sistema de bombeo

- Eliminar fugas de agua en las bombas BA-100 B/C
- Eliminar vibración en la bomba BA-100 B

Para aumentar el tiempo de vida de la estructura de la torre de enfriamiento

- Rehabilitación de las paredes divisorias, tapando grietas.
- Mantenimiento de limpieza y pintura a la estructura exterior.
- Limpieza a las traveses, columnas, bacín de agua fría, cárcamo de bombeo y techo de la torre, eliminando crecimiento bacteriano e incrustaciones.

Para seguridad de los operarios

- Sustituir los barandales metálicos del pasillo central por unos de FRP
- Rehabilitar las escaleras de acceso tapando grietas

8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Al modificar variables en un sistema, éstas pueden aumentar o disminuir el valor de otras variables.

En la Tabla 17 se presenta la comparación de condiciones de la torre de enfriamiento CT-100

Tabla 17. Condiciones de operación de la propuesta

Condiciones	Prueba	Propuesta	Diferencia
Capacidad de enfriamiento (GPM)	7,500	9,000	20.0%
Temperatura promedio de agua caliente (°F)	100.6	100.6	0.0%
Temperatura promedio de agua fría (°F)	93.7	89.6	-4.3%
Temperatura promedio de bulbo húmedo (°F)	81.2	82.4	1.5%
Intervalo de enfriamiento (°F)	6.9	11	59.4%
Aproximación (°F)	12.5	7.2	-42,4%
Ciclos de concentración	3	5	66,7%
Ventiladores por celda	1	1	0.0%
Potencia del motor del ventilador (HP)	60.12	70.00	16.4%

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Tabla 17 el aumento de la capacidad de enfriamiento se debe a los cambios en el sistema de distribución de agua; no existe cambio en la temperatura de agua caliente ya que depende de los usuarios; al cambiar el sistema de relleno se disminuye la temperatura del agua fría; la temperatura de bulbo húmedo depende del clima del lugar, para diseño se considera como regla heurística el promedio de los tres meses más calurosos (abril, mayo y junio) por tal razón por eso sufre un pequeño aumento; el intervalo de enfriamiento aumenta considerablemente ya que se genera menor temperatura en el agua fría; la aproximación baja ya que la torre es eficiente y se puede enfriar más fácil; el aumento de los ciclos de concentración se debe al aumento en la calidad del agua; no se recomendó cambio de configuración en el número de ventiladores por celda; la potencia aumenta ya que se rehabilita un motor de ventilador faltante en la torre.

En la Tabla 18 se presenta la diferencia entre el balance de materia de la prueba y la propuesta

Tabla 18. Balance de materia con la propuesta

Nombre	Balance Prueba (GPM)	Balance Propuesta (GPM)	Diferencia
Repuesto	68	117.8	73.2%
Purga	14.7	17.0	15.6%
Arrastre	1.5	1.8	20.0%
Evaporación	51.7	99.0	91.5%
Recirculación	7,500	9,000	20.0%

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Tabla 18 existe un aumento general en los flujos, aunque cabe enfatizar que al realizar cambios en el relleno se favorece la evaporación y se aumenta el flujo de agua de repuesto.

En la Tabla 19 se presenta la diferencia que existe entre la prueba y la propuesta de rehabilitación de la torre de enfriamiento CT-100.

Tabla 19. Condiciones de enfriamiento con la propuesta

Parámetro	Prueba	Propuesta	Diferencia
Calor disipado BTU/min	432,112	826,650	91.3%
Capacidad de enfriamiento %	30.56	79.2	48.64%

Fuente: Propia

El aumento del calor disipado es producto de la disminución de la temperatura de agua fría debido al cambio del relleno.

La capacidad de enfriamiento aumenta de manera importante ya que este parámetro engloba todas las variables involucradas en el proceso de enfriamiento.

En la Tabla 20 se establecen los consumos mensuales de insumos de la torre de enfriamiento.

Tabla 20. Consumos mensuales de insumos

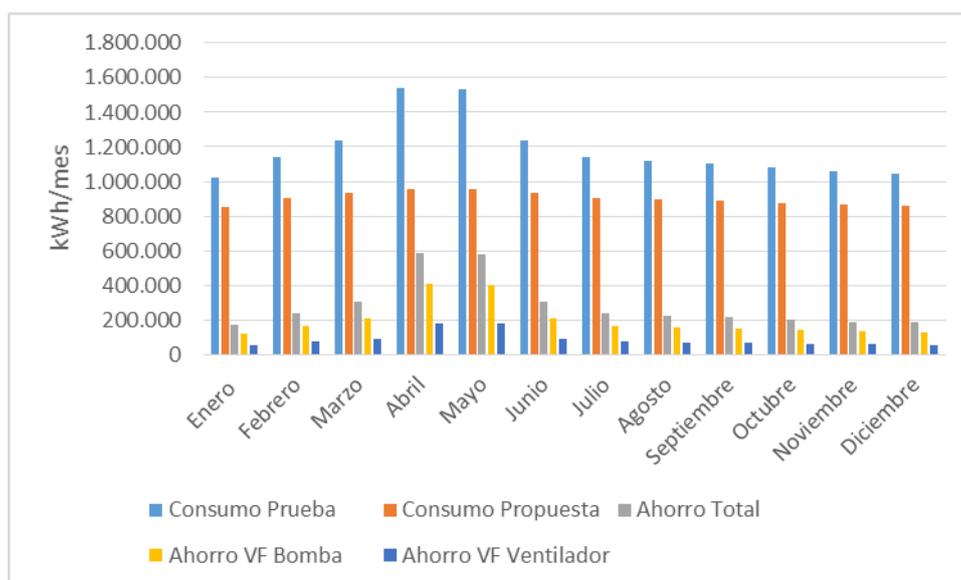
Insumos	Prueba	Propuesta	Diferencia
Energía kWh/mes	1,187,049	901,452	-24.0%
Producción bbl/mes	23,083	23,083	0.0%
Recirculación m ³ /mes	7,358,839	8,830,607	20.0%
Calor disipado MBTU/mes	1,866,715	3,571,026	91.3%
Tratamiento químico L/mes	27,881	33,458	20.0%
Costo de operación USD/mes	128,783	114,874	-10.8%

Tipo de cambio \$ 18.23 = 1 USD (22 de mayo de 2016); 0.89 \$/kWh (Pemex, 2015)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Tabla 20 el uso de los variadores de frecuencia en los motores de los ventiladores y las bombas disminuyen un 24% el consumo de energía eléctrica (285,597 kWh/mes) esto se refleja en un ahorro del 10.8% costo de operación mensual.

En la Figura 10 se observa el perfil de consumo de energía eléctrica así como el ahorro de la misma, cabe destacar que el uso del variador de frecuencia en los motores de las bombas contribuye a un ahorro promedio del 16.6% y en los motores de los ventiladores un 7.4%.



Fuente: Propia

Figura 10. Perfil de consumo de energía eléctrica

De manera general el costo de operación de la torre de enfriamiento CT-100 se consideró como energía 45%, tratamiento químico 35%, mantenimiento y personal operativo 20%; cabe destacar que el tratamiento químico genera beneficios como aumento de vida útil de los equipos y favorece la transferencia de calor en los equipos usuarios.

En la Tabla 21 se presenta es desglose de los costos mencionados

Tabla 21. Desglose de costo de operación

Concepto	Prueba (USD/mes)	Propuesta (USD/mes)
Energía	57,952	44,009
Tratamiento Químico	45,074	54,089
Mantenimiento y personal	25,757	16,776
Operación	128,783	114,874

Tipo de cambio \$ 18.23 = 1 USD (22 de mayo de 2016); El tratamiento químico 29.5 \$/L considera biocidas, anti incrustantes, anti espumantes, pruebas de laboratorio (Pemex, 2015)

Fuente: Propia

En la Tabla 22 se muestra la diferencia entre los indicadores energéticos de la propuesta

Tabla 22. Indicadores energéticos de la propuesta

Indicador Energético	Prueba	Propuesta	Diferencia
IE ₁ [kWh/bbl]	51.4	39.1	-24.1%
IE ₂ [kWh/MW]	NA	NA	NA
IE ₃ [kWh/m ³]	0.16	0.10	-36.7%
IE ₄ [kWh/MMBTU]	14.7	5.8	-60.3%
IE ₅ [kWh/l]	42.6	26.9	-36.7%
IE ₆ [kWh/USD]	9.22	7.85	-14.8%

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 22 la tendencia es a la baja, el indicador energético referente al costo de operación tiene una baja de 14.8 %.

8.1 Inversión para la propuesta

La propuesta de rehabilitación de la torre de enfriamiento CT-100 requiere una inversión de 910,000 USD para las 6 celdas, esto generará un ahorro de 166,908 USD/año, y tiene un periodo de recuperación de 5.45 años.

En la Tabla 23 se presentan los indicadores económicos calculados para determinar si la propuesta es rentable o no.

Tabla 23. Indicadores económicos de la propuesta

Año	USD
0	-910,000
1	166,908
2	166,908
3	166,908
...	166,908
...	166,908
14	166,908
15	166,908
VPN	226,778
TIR	12.88%
TIRM	12.40%
TREMA real	12.00%

Fuente: Propia

De acuerdo a los indicadores económicos, la propuesta es rentable ya que el VPN es positivo, la TIR es mayor que la TIRM está a su vez es mayor que la TREMA real.

8.2 Programa de uso eficiente de energía

Recomendaciones que se deben tener en cuenta para un correcto funcionamiento de las torres de enfriamiento y para un óptimo aprovechamiento de la energía empleada en su operación.

- Verificar que las bombas estén operando en el punto de mayor eficiencia.
- Evitar al máximo la regulación de flujo en los sistemas a través del uso de válvulas, placas de orificio o elementos similares. Se obtienen resultados mucho más eficientes cuando la velocidad de rotación del motor puede variar de manera continua. La economía de energía es tanto mayor cuanto más frecuentemente se marche en régimen de agua parcial.
- Instalar controles automáticos de temperatura que manejen las bombas y ventiladores de las torres de enfriamiento, para que éstos no operen sino durante los períodos estrictamente necesarios.
- Instalar controles de nivel en todos los bacines de agua fría para evitar pérdidas de agua por los reboses.

- Bombear únicamente la cantidad de agua requerida por el sistema de enfriamiento y evitar el sobredimensionamiento (coordinar los ajustes con los encargados de planta de proceso).
- Utilizar filtros que den baja caída de presión y alta densidad de filtración; realizar estudio para verificar su viabilidad, no en todos los casos aplica.
- Mantener en óptimo estado los eliminadores de rocío.
- Mantener los sistemas de intercambio de calor libres de incrustaciones y depósitos aislantes.
- Instalar elementos de medición en cada sistema para poder mantener bajo control los índices de consumo.
- Hasta donde sea posible utilizar los retornos y transportes por gravedad.
- Utilizar torres de enfriamiento con rellenos de salpiqueo por la calidad del agua presente en el sistema y boquillas que dren de baja caída de presión.
- Mantener en buenas condiciones físicas el relleno.

Si se piensa en un cambio a gran escala puede considerarse lo siguiente:
Conversión de torre de flujo cruzado a torre de flujo en contracorriente.

La importancia de llevar a cabo todas estas actividades se puede reflejar en disminuir 1°C la temperatura del agua fría de suministro a las plantas usuarias y se disminuye el consumo de energía para el bombeo de agua en 100 kWh por cada celda, esto aplica para torres de 50,000 gpm (Martínez, 2011)

8.2.1 Variador de frecuencia

Se recomienda verificar las condiciones meteorológicas de la zona donde se encuentre la torre de enfriamiento ya que a menor temperatura ambiente y menor humedad relativa mayor es el beneficio puede generar el variador de frecuencia.

Como las condiciones ambientales no son cambiantes la mayoría del año el lugar donde se encuentra la torre de enfriamiento se recomienda el sistema (encendido / apagado) para mantener la temperatura de agua fría.

Los ventiladores de flujo axial con variador de velocidad, cuando operan al 50% de la velocidad, se producirá el 50% de flujo de aire, generarán 25% de la presión y consumirán 12.5% de la potencia nominal (CTI-ESG-151-13, 2013).

8.2.2 Mantenimiento

Durante la puesta en marcha de una torre de enfriamiento deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Efectuar una inspección visual en los ventiladores, motores, flechas de transmisión y reductores de velocidad, para realizar una correcta lubricación de los elementos mecánicos.

- Debe controlarse el sentido de giro y las vibraciones del ventilador, ajustar el ángulo de los álabes si es necesario.
- Inspeccionar los rellenos, comprobar el buen estado, la correcta colocación y la posible formación de algas que obstruya el paso del aire.

Durante la operación pueden aparecer algunos problemas comunes que se describen a continuación:

- **Una distribución irregular del agua.**
Puede deberse a obstrucciones en el sistema de distribución, rellenos deteriorados o caudal de agua excesivo.
- **Temperatura elevada a la salida de la torre.**
Puede deberse a un excesivo flujo de agua, rellenos mal colocados o en mal estado o aire insuficiente. Se recomienda comparar las condiciones de operación con las condiciones de diseño y comprobar el estado de los rellenos.
- **Agua de repuesto excesiva.**
Puede deberse a eliminadores de rocío mal ubicados o rotos, excesivo flujo de agua o demasiada inclinación de las palas del ventilador.

En cuanto al mantenimiento periódico que debe efectuarse sobre una torre cabe anotar lo siguiente:

- Cada 6 meses se recomienda una inspección de los rellenos, evaluar su posición y programar y realizar limpieza manual para retirar algas, hongos y demás incrustaciones.
- Puede realizarse una limpieza anual del bacín de agua fría.
- Cada 6 meses se debe evaluar el rendimiento de las bombas y de los ventiladores, se recomienda contar con las curvas características de dichos elementos y realizar mediciones eléctricas que permitan conocer la eficiencia de la operación.
- Debe realizarse diariamente el control químico del agua de recirculación y del agua de repuesto.

8.3 Normatividad

Cada propuesta de ahorro de energía debe de estar de acuerdo a la normatividad aplicable, en este caso en particular de la industria de la refinación del petróleo se recomienda usar primero las normas de referencia Pemex:

- NRF-048-PEMEX-2007 Diseño de Instalaciones Eléctricas
- NRF-050-PEMEX-2012 Bombas Centrífigas
- NRF-095-PEMEX-2013 Motores Eléctricos

Por supuesto las NOM ya que tienen un carácter obligatorio en el país.

- NOM-025-STPS-2008 Condiciones de Iluminación en los Centro de Trabajo
- NOM-028-ENER-2010 Eficiencia Energética de Lámparas para Uso General. Límites y Método de Prueba

Por último, pero no de menor importancia del Instituto de la Especialidad de las Torres de Enfriamiento.

- ATC-105-00 Acceptance Test Code for Water Cooling Tower
- ESG-151-13 Variable Frequency Drive Application Guidelines for Cooling Towers
- STD-111-09 Gear Speed Reducers
- STD-163-15 Standard for Vibration Limits in Water Cooling Towers
- STD-201RS-15 Standard for the Certification of Water Cooling Tower Thermal Performance

9 CONCLUSIONES

La presente metodología para elaborar un diagnóstico energético en torres de enfriamiento de la industria de la refinación de crudo en México presenta los fundamentos teóricos mínimos necesarios para entender el principio de operación, así como, los principales tipos de torre de enfriamiento utilizados en esa industria.

Las ecuaciones que se exponen para la elaboración del balance de materia en función del intercambio calor, son una herramienta sencilla y de gran uso en el medio industrial que permite la cuantificación de costos hasta la toma de decisiones operativas.

La presente metodología propone primero aplicar el método de Merkel para el cálculo de capacidad de enfriamiento en torres de enfriamiento, para posteriormente identificar posibles medidas de ahorro de energía, lo anterior apoyándose en el formato para el desarrollo de la inspección física.

Entre los resultados relevantes del presente trabajo se encuentran Los indicadores energéticos propuestos para las torres de enfriamiento de un caso de estudio (centro de refinación de crudo ubicado en el sureste del país), los cuales se obtuvieron con información histórica, asimismo se determinaron los indicadores energéticos promedio basados en la información de diseño de los equipos de las torres.

Se espera que la aplicación de las actividades recomendadas sobre los diagnósticos energéticos en torres de enfriamiento en la industria de la refinación, conlleve a la generación de ahorros energéticos.

Los indicadores energéticos promedio para una torre de enfriamiento en función de la información de diseño del centro de refinación de crudo al sureste de la República Mexicana se encuentran en la Tabla 15 de este documento, que se reproduce nuevamente aquí:

Tabla Indicadores energéticos promedio

Valor	Unidades
29.5	kWh/bbl producido
90.0	kWh/MW potencia demandada
0.27	kWh/m ³ de agua recirculada
6.93	kWh/MMBTU calor disipado
68.8	kWh/L tratamiento químico
6.1	kWh/USD costo de operación

Fuente: Propia

De acuerdo a la operación del año 2015 de las 10 torres de enfriamiento revisadas los indicadores energéticos oscilan de la siguiente manera (extracto de la Tabla 16 de este documento)

Tabla Indicadores energéticos del centro de refinación de petróleo

Valor	Unidades
18.6 a 51.4	kWh/bbl producido
32.2 a 235.7	kWh/MW potencia demandada
0.01 a 0.59	kWh/m ³ de agua recirculada
0.3 a 26.9	kWh/MMBTU calor disipado
3.1 a 89.7	kWh/L tratamiento químico
3.34 a 9.22	kWh/USD costo de operación

Fuente: Propia

Dichas variaciones son provocadas por las diferentes condiciones de operación ya que los indicadores energéticos pueden ser afectados por diversas causas, desde una contaminación en el agua de recirculación que inhibe la transferencia de calor, hasta una falla en algún equipo de proceso.

Entre los hallazgos relevantes en el caso de estudio se encontró que de los consumos de energía registrados en el centro de trabajo el mayor usuario de la energía es el sistema de bombeo con 80% y los ventiladores con 20%, la iluminación e instrumentación no llega ni al 1 % en el uso de energía.

Actualmente no existe una tecnología innovadora para el bombeo del agua de enfriamiento, dicha tecnología puede impactar directamente en el ahorro de energía; en el área de ventiladores existe una tecnología que desplaza el uso del motor eléctrico y usa la presión hidráulica remanente de la llegada del agua de retorno, pero no se ha probado a gran escala ni cuantificado sus beneficios

netos; a diferencia de la iluminación y control existen muchas tecnologías para el ahorro, pero su impacto es mínimo (Green Cooling Tower Solutions, 2016).

Por lo que respecta a la evaluación económica, para modificar o actualizar las diferentes tecnologías e implementar metodologías para el ahorro de energía en torres de enfriamiento los indicadores económicos deben estar dentro de los siguientes rangos: el VPN debe de ser mayor o igual a cero, la TIR debe de tener un valor mínimo de 12% y el PR debe ser menor del tiempo de vida de los equipos propuestos para que sea rentable la propuesta de ahorro de energía en un centro de refinación en México.

Se deben de mantener en buenas condiciones físicas el relleno, usar relleno de tipo de salpiqueo, boquillas dren de baja caída de presión para poder disminuir 1°C la temperatura del agua fría de suministro a las plantas usuarias, esto disminuye el consumo de energía eléctrica para el bombeo de agua en 100 kWh/d por cada celda.

Las torres de enfriamiento con ventiladores de flujo axial y variador de velocidad al operar al 50% de la velocidad del ventilador, producirán el 50% del flujo de aire, generarán el 25% de la presión y solo consumirán el 12.5% de la potencia nominal.

Para que sea factible una metodología de ahorro de energía se debe de integrar la operación de la torre de enfriamiento con la de proceso para poder hacer paros de manera conjunta y no dejar recirculando el agua de manera ineficiente.

La aplicación de la inspección física en la torre de enfriamiento CT-100, ayudó a identificar áreas de oportunidad para reducir consumos innecesarios de energía eléctrica, aumentar transferencia de calor, disminuir carga a los motores de los ventiladores, garantizar el flujo de aire necesario, mejorar el control de la operación, aumentar tiempo de vida de los equipos y seguridad para los operarios.

Subsanando las áreas de oportunidad se proyecta el aumento del 20.0% la recirculación de agua de enfriamiento; 48.64% la capacidad de enfriamiento y la disminución de un 24.0% el consumo de energía así como un 10.8% el costo de operación.

Los indicadores energéticos de la torre de enfriamiento CT-100 disminuyen con la aplicación de la propuesta.

La propuesta tiene un costo de 910,000 USD genera un ahorro de 166,908 USD/año resultando un periodo de recuperación de 5.45 años

El análisis de económico afirma la rentabilidad de la propuesta ya que se realizó en un periodo de 15 años el cual arroja un VPN de 226,778 USD; TIR de 12.88%; TIRM de 12.40%; TREMA real de 12.00%.

10 BIBLIOGRAFÍA

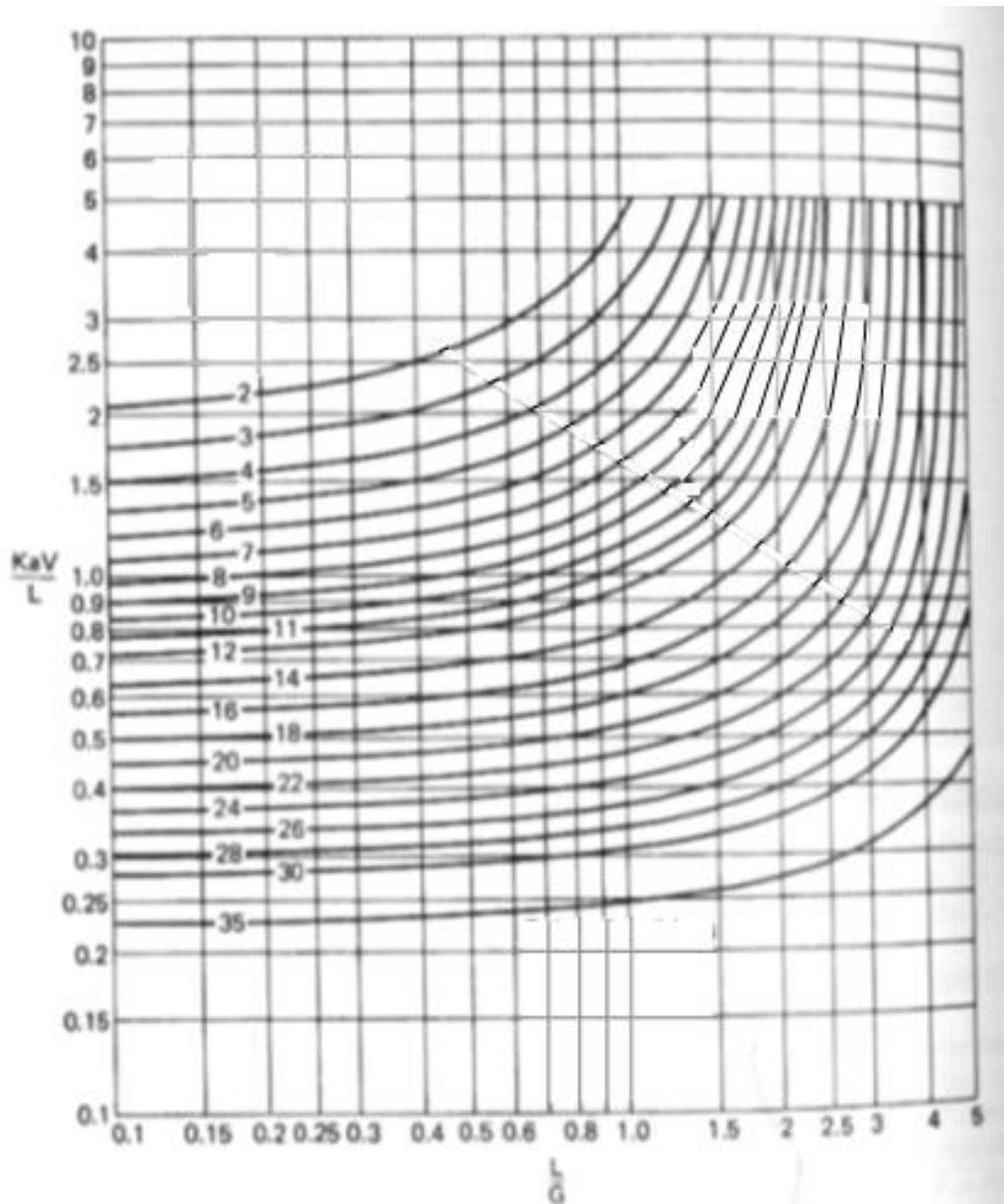
1. Baena A. 2010 “Funciones y modelos de contratación de una empresa de servicios energéticos” Garrigues España
2. Blanco H, I. 2007 “Propuesta de ahorro de agua en torres de enfriamiento mediante la evaluación y mejora de la eficiencia térmica “, Facultad de Química. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
3. Brendan P. Walsh, 2015, “The water energy nexus, an ISO50001 water case study and the need for a water value system” Elsevier.
4. Coss Bu 2005 “Análisis y evaluación de proyectos de inversión” departamento de ingeniería industrial Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2 edición, Limusa México
5. Del Olmo D. V. 2013, “Diseño y simulación de torres de refrigeración húmeda” Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid
6. CTI-ATC-105-00 Acceptance Test Code for Water Cooling Tower
7. CTI-STD-201RS-15 Standard for the Certification of Water Cooling Tower Thermal Performance
8. CTI-ESG-151-13 Variable Frequency Drive Application Guidelines for Cooling Towers
9. Fernández G, L. 2015 “Apuntes de la asignatura” “Evaluación económica e proyectos de ahorro de energía” Facultad de Ingeniería.
10. Kern Donald Q. 1999 “Transferencia de calor” México CECSA
11. López V, R. 2007 “Uso eficiente de la energía en torres de enfriamiento”, Facultad de Ingeniería. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica
12. Martínez M. J. 2011 “Propuesta de ahorro de agua en una torre de enfriamiento disminuyendo la temperatura de agua de suministro en función del uso de diferentes tipos de empaques”, Facultad de Química. Tesis en Ingeniería Química.
13. Miranda H. R. 2007 “Evaluación de opciones para optimizar el uso de agua en las torres de enfriamiento de una refinería” FES Zaragoza Tesis en Ingeniería Química.
14. Nalco Chemical Company, 1979, “The Nalco Water Handbook” McGraw-Hill, segunda edición. USA.
15. Pérez T. C., 2012 “Fundamentos para la administración energética en la industria Colombiana a través de indicadores de gestión”, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ibagué, Colombia.
16. Química Apollo Minatitlán 2016 “Bases de licitación del servicio tratamiento químico integral para la Refinería “Gral. Lázaro Cárdenas” Minatitlán Veracruz.
17. SPX Cooling Technologies 2006. Cooling Tower Fundamentals, SPX Cooling Technologies, Inc. Balcke/Hamon/Marley, Kansas USA.
18. Tower Tech, 2010, “Manual de instalación y mantenimiento” Tower Tech Inc, USA.

Páginas web

1. Comisión Nacional para Uso Eficiente de la Energía, Disponible en <http://www.conuee.gob.mx/wb/> (10 de noviembre de 2015)
2. CTI Cooling Technology Institute Disponible en <http://www.cti.org/> (15 de noviembre de 2015)
3. Precio del Dólar, Disponible en <http://www.eldolar.info/es-MX/mexico/dia/> (22 de mayo de 2016)
4. FiberTower, 2015 Ingeniería y tecnología para la industria “Tower Ltda” Disponible en <http://www.fibertower.cl/torres.htm> (29 de noviembre de 2015)
5. Green Cooling Tower Solutions, 2016 Disponible en <http://greencooling.co/> (20 de Julio de 2016)
6. Kelvion, 2015 Experts in heat Exchange “Disponible en <http://www.kelvion.com/products/modular-cooling-towers/> (20 de diciembre de 2015)
7. LTT RWTH AACHEN University disponible en <http://www.ltt.rwth-aachen.de/en/homepage/> (9 de enero de 2016)
8. PEMEX, 2016 Petróleos Mexicanos, Disponible en <http://www.pemex.com/Paginas/default.aspx> (3 de enero de 2016)

11 ANEXO

11.1 Curva característica de una torre de enfriamiento



11.2 Inspección Física

Proyecto: Tesina Fecha: Mayo 2016
 Cliente: Personal Lugar: Sur este de México
 Requerimiento: Determinar áreas de oportunidad para el ahorro de energía
 Responsable: Ing. Frantz Blanco

Torre: CT-100 Inspeccionada por: Ing. Frantz Blanco
 Ubicación de la Torre: Dentro del centro de Trabajo
 Fecha de inspección: Mayo 2016 Torre construida por: HAMON
 Material de la torre: Concreto Fecha de inicio de operación: 1981
 Condiciones de diseño 10,000 GPM TAC: 42 °C TAF: 32 °C TBH: 28 °C
 Numero de celdas: 6 Numero de ventiladores por celda: 1

Condición: 1.-Óptima 2.-Buena 3.-Regular 4-Mala 5- Fuera de Operación

Estructura en General

Material de la estructura de la TE: Concreto
 Material de la trabes y columnas de la TE: Concreto
 Material bacín de agua fría: Concreto
 Material del canal de llamado y carcomo de bombeo Concreto
 Material de las paredes laterales: Concreto
 Material de la paredes divisorias: Concreto
 Material del techo de la TE: Concreto

1	2	3	4	5	Comentarios
		X			Requiere mantto
	X				Requiere mantto
	X				Requiere mantto
	X				Requiere mantto
		X			Requiere mantto
			X		Rehabilitación
	X				Requiere mantto
1	2	3	4	5	Comentarios
				X	Reemplazo
			X		Reemplazo
			X		Reemplazo
			X		Reemplazo
			X		Reemplazo

Relleno

Tipo de distribución del agua a través del relleno: Boquillas de baja presión
 Relleno Polipropileno/Salpiqueo/Optibar
 Material de soporte del relleno: Mallas de acero inoxidable
 Arreglo de relleno: Perpendicular /(8 X 8)
 Soporte del relleno: Polipropileno/Clip

Dibujo del arreglo

	Relleno		Relleno	
Relleno		Relleno		Relleno
	Relleno		Relleno	
Relleno		Relleno		Relleno
	Relleno		Relleno	
Relleno		Relleno		Relleno
	Relleno		Relleno	
Relleno		Relleno		Relleno

Dimensiones zona de relleno Largo(L):9.6 m Ancho(W):9.6 m Alto(H):8.5 m

Persianas

Material de las persianas: FRP
 Inclinación de las persianas: 65°

1	2	3	4	5	Comentarios
		X			Presenta incrustaciones
X					No presenta escurrimiento externo

Condiciones Físicas de las persianas

Lado	No. Persianas Alto X Largo	Dañadas / Fracturadas	Incrustadas Sales / Algas	Desacomodadas / Desalineadas	Faltantes / Huecos
Norte	10 X 4 X celda	23	57	5	10
Sur	10 X 4 X celda	32	63	8	15
Este	NA	NA	NA	NA	NA
Oeste	NA	NA	NA	NA	NA

Eliminadores de Rocío

Eliminadores de rocío: Polipropileno/Salpiqueo
 Soportes de los eliminadores de rocío Polipropileno
 Rocío en el pasillo central: Existe ligera brisa
 Rocío en los alrededores de la TE: No existe
 Rocío arriba en la TE: Existe ligera brisa

Accesos, pasillos y escaleras

Puerta de entrada al pasillo central: Lamina
 Puertas de las paredes divisorias: Lamina
 Barandales en el pasillo central: Metálicos
 Puerta en el acceso al ventilador: Metálicos
 Plataforma del equipo mecánico: Concreto
 Barandales en el acceso al ventilador: FRP
 Escaleras de acceso al techo de la TE: Concreto, escaleras con descansos
 Barandales de las escaleras de acceso al techo: Concreto
 Barandales del techo de la TE: FRP
 Escaleras de acceso al bacín de agua caliente: FRP

Equipo Dinámico

Motor del ventilador: Estándar, 125 HP
 Vibración en el motor: Vertical
 Ruido en el motor: Molesto
 Flecha de transmisión: Fibra de carbono
 Reductor de velocidad: Amarillo, 14:1
 Tipo de ventilador: Axial
 No. De aspas del ventilador: 8
 Marca de las aspa de ventilador: Hudson
 Variador de Frecuencia: No existe

1	2	3	4	5	Comentarios
				X	Reemplazo
			X		Reemplazo
				X	Eliminar
			X		Eliminar
			X		Eliminar
1	2	3	4	5	Comentarios
			X		Reemplazo
				X	Reemplazo
				X	Reemplazo
			X		Reemplazo
	X				Mantto
X					Son Nuevos
		X			Mantto
		X			Mantto
X					Son Nuevos
X					Son Nuevos
1	2	3	4	5	Comentarios
			X		Operando
				X	Eliminar
				X	Eliminar
			X		Reemplazar
	X				Mantto
		X			Mantto
		X			Mantto
		X			Mantto
					No existe

Sistema de Distribución

No. De boquillas por charola: 15 X 18 por charola
 Caja de salpiqueo: Concreto
 Caja de desborde: Concreto
 Altura del tirante del bacín de agua caliente: 5 cm

Chimeneas

Altura de la chimenea de la TE: 4.2 m
 Material de la chimenea: Concreto
 Diámetro de la chimenea: 4.8 m

1	2	3	4	5	Comentarios
				X	Reemplazo
			X		Reemplazo
			X		Reemplazo
				X	Aumentar
1	2	3	4	5	Comentarios
		X			Reemplazo
				X	Reemplazo
X					S/C

Agua

Apariencia del agua dentro del bacín de agua fría: Contiene hidrocarburo

Apariencia del agua dentro del canal de llamado: Turbia

Apariencia del agua a lado del pasillo central: Contiene hidrocarburo

Apariencia del agua dentro del bacín de agua caliente: Limpia

Instrumentación

Válvulas de agua de repuesto: Compuerta / Φ 6"

Medidor de flujo de agua de repuesto: Tiempo en transito

Válvulas de agua de retorno: Compuerta / Φ 24"

Indicador de temperatura del agua de retorno: No existe

Indicador de presión del agua de retorno: No existe

Indicador de temperatura del agua de suministro: Termopar

Indicador de presión del agua de suministro: Manómetro

Válvulas del sistema de purga: Compuerta / Φ 4"

Arrancador del motor de la bomba: TECO

Arrancador del motor del ventilador: TECO

Interruptor de vibración del motor del ventilador: No existe

Variador de frecuencia: No existe

1	2	3	4	5	Comentarios
				X	Limpiar
			X		Limpiar
				X	Limpiar
X					S/C
1	2	3	4	5	Comentarios
			X		Reemplazo
				X	No funciona
		X			Mantto
					No existe
					No existe
		X			Solo cabezal general
		X			Solo en descarga de bombas
			X		Reemplazo
	X				Opera
	X				Opera
					No existe
					No existe

Celdas en operación

Número	Chimenea	Motor	Flecha	Reductor	Ventilador
1	OP	OP	OP	OP	OP
2	OP	OP	OP	OP	OP
3	FOP	FOP	FIN	M	FIN
4	OP	OP	OP	OP	OP
5	OP	OP	OP	OP	OP
6	OP	OP	OP	OP	OP

OP : Operación, FOP: Fuera de operación, M: Mantenimiento, FIN : Falta instalar

Sistema de bombeo

Número	Tag Bomba	Fugas visibles de agua (donde)	Vibración excesiva	Presión de descarga
1	BA-100-A	No	No	5.0 kg/cm ²
2	BA-100-B	En los sellos	Si	4.9 kg/cm ²
3	BA-100-C	Válvula check	No	4.8 kg/cm ²
4	BA-100-D	No	No	Reserva

Luminarias

Tipo de luminaria: Florecentes, aprueba de explosión

Número de luminarias en la parte superior de la torre: 10

Número de luminarias en las escaleras de acceso: 14

Número de luminarias en el cárcamo de bombeo: 5

Número de luminarias en buen estado: 12

Número de luminaria en mal estado: 3

Número de luminarias faltantes: 14

1	2	3	4	5	Comentarios
				X	Reemplazo

Motor eléctrico del ventilador

Tag	CT-100-A	CT-100-B	CT-100-C	CT-100-D	CT-100-E	CT-100-F
Fabricante	US Motors					
Potencia (HP)	125	125	125	125	125	125
Voltaje (V)	460	460	460	460	460	460
Amperaje (A)	148	148	148	148	148	148
Frecuencia (Hz)	60	60	60	60	60	60
Polos	4	4	4	4	4	4
Factor de servicio	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15

Reductor de velocidad

Tag	CT-100-A	CT-100-B	CT-100-C	CT-100-D	CT-100-E	CT-100-F
Fabricante	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Amarillo
Tipo	Doble reducción					
Relación	14:1	14:1	14:1	14:1	14:1	14:1

Ventilador

Tag	CT-100-A	CT-100-B	CT-100-C	CT-100-D	CT-100-E	CT-100-F
Fabricante	Hudson	Hudson	Hudson	Hudson	Hudson	Hudson
Aspas	8	8	8	8	8	8
Angulo de ataque	13.2°	13.2°	13.2°	13.2°	13.2°	13.2°

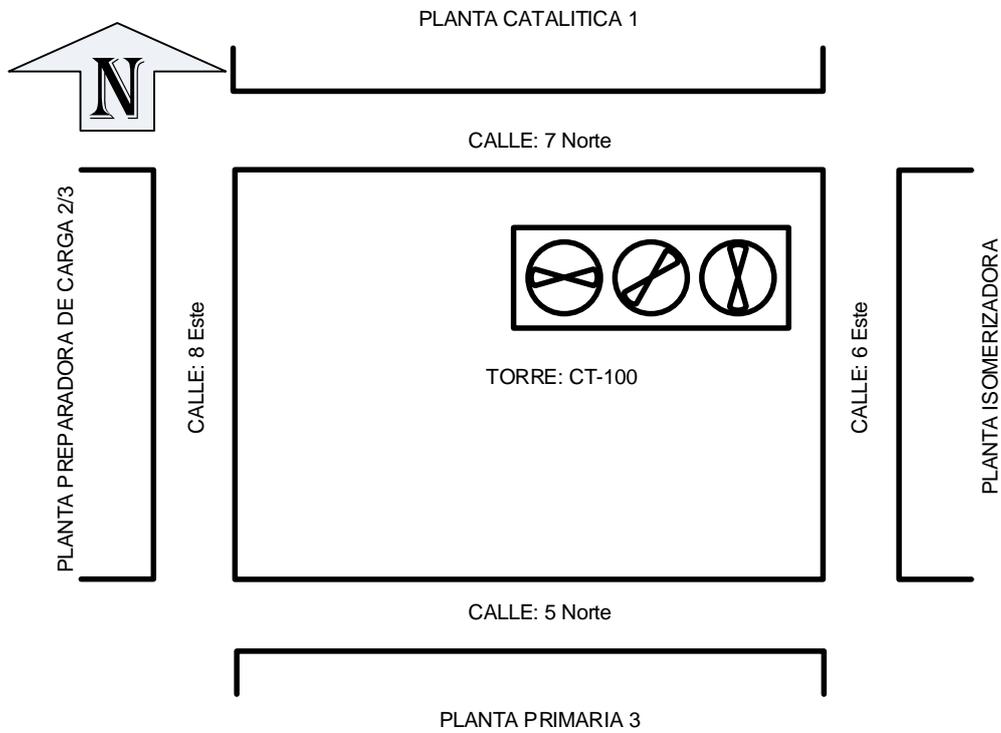
Motor eléctrico de las bombas

Tag	BA-100-A	BA-100-B	BA-100-C	BA-100-D
Fabricante	Hitachi	Hitachi	Hitachi	HITACHI
Potencia (HP)	1000	1000	1000	1000
Velocidad (RPM)	1180	1180	1180	1180
Voltaje (V)	4160	4160	4160	4160
Amperaje (A)	127	127	127	127
Frecuencia (Hz)	60	60	60	60
Fases	3	3	3	3
Factor de servicio	1.15	1.15	1.15	1.15

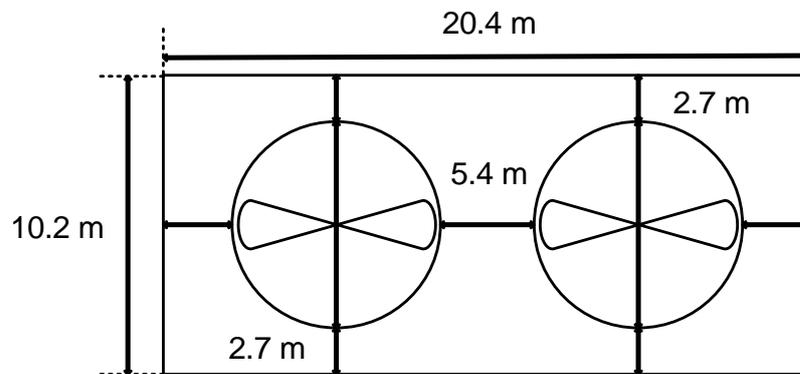
Bombas

Tag	BA-100-A	BA-100-B	BA-100-C	BA-100-D
Fabricante	Sulzer	Sulzer	Sulzer	Sulzer
Tipo	Centrifuga Horizontal	Centrifuga Horizontal	Centrifuga Horizontal	Centrifuga Horizontal
Capacidad (gpm)	20,000	20,000	20,000	20,000
Descarga (kg/cm ²)	6.0	6.0	6.0	6.0

UBICACIÓN DE LA TORRE



DIMENSIONES DE LA TORRE



No. CELDAS: 6
No. VENT. X CELDAS: 1

