



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO PARA
CENTRALES TERMOELÉCTRICAS**

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

PABLO ABRAHAM HEREDIA HURTADO

Asesor de Tesis

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

Morelia Michoacán, Agosto del 2013

Agradecimientos

A mis padres:

Quienes han sido y son quienes me han apoyado en todas las etapas de mi vida, siempre me han impulsado en todo momento para seguir adelante y de quienes recibo día a día el mejor de los regalos cariño y amor.

A mi novia:

Victoria tu eres mi gran motivo para salir adelante y ser cada día mejor en mi vida. Eres quien me brinda respaldo en momentos difíciles, que ante todo lo adverso dibuja una sonrisa en mi rostro y me motiva para lograr todo lo que me propongo.

A mis hermanas:

Ustedes que son parte importante de mi vida y han impulsado en todos los momentos y por el cariño que me han dado siempre.

A mis abuelos:

Quienes con su gran cariño y apoyo me han motivado siempre, siempre con la gran experiencia en la vida y cada una de sus palabras están repletas de sabiduría.

A mis tíos y primos:

Que aunque se encuentran lejos siempre han estado pendientes apoyando y motivándome a seguir adelante.

A mis maestros:

Agradezco a todos mis maestros, en especial al Dr. Gilberto González Avalos y en general a toda la Facultad de Ingeniería Eléctrica, que gracias a sus conocimientos y capacidad para transmitirlos forjaron en mi mente una sólida estructura de conocimientos.

Resumen

En este trabajo se muestra de manera general el funcionamiento de las centrales termoeléctricas, la problemática que estas representan, las partes que conforman una central térmica y en específico la torre de enfriamiento.

Enfocándonos en el análisis de la torre de enfriamiento y los beneficios que esta trae consigo para la central termoeléctrica, se analiza esta instalación a detalle partiendo desde su funcionamiento, tipos de torres de enfriamiento que existen, la planeación para su construcción e instalación de la torre.

Para mostrar de una manera clara y explícita se dan a conocer las partes que conforman a una torre de enfriamiento y cuál de los tipos de torres es el más apto para nuestro proyecto en cuestión.

Por último se analiza la torre de enfriamiento que se encuentra situada en la planta de generación Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México, para mostrar su funcionamiento y eficiencia para la instalación.

NOMENCLATURA

Símbolo	Nombre	Unidades
E	Flujo de energía	kW
S	Flujo de entropía	kJ/K
A	Flujo de exergía	kW
R	Constante de los gases	kJ/kg K
$\bar{R}$	Constante universal de los gases	kJ/kmol K
Q	Flujo de calor	kJ/kg
W	Trabajo	J
T	Temperatura absoluta	K
C_p	Calor específico a presión constante	kJ/kg K
A_d	Destrucción de exergía	kW
h	Entalpía	kJ/kg
p	Presión	bar
s	Entropía específica	kJ/kg K
t	Temperatura	°C
a	Exergía específica	kJ/kg
m	Flujo másico	kg/s
c	Velocidad	m/s
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
z	Altura	m
$\bar{g}$	Función de Gibbs de formación	kJ/kmol
M	Masa molar	kg/kmol
y	Fracción molar	
Letras griegas.		
ω	Humedad específica	kg _{vapor} /kg _{aire seco}
ϕ	Humedad relativa	%
σ	Generación de entropía	kJ/kg K
η_t	Eficiencia energética	%
η_D	Eficiencia exergética	%
Subíndices.		
e	Entrada	No aplica
s	Salida	No aplica
as	Aire seco	No aplica
ag	agua	No aplica
vc	Volumen de control	No aplica
ah	Aire húmedo	No aplica
v	Vapor	No aplica
f	Física	No aplica
q	Química	No aplica
c	Cinética	No aplica
p	Potencial	No aplica
t	Total	No aplica
bs	Bulbo seco	No aplica
bh	Bulbo húmedo	No aplica

Contenido

Agradecimientos	I
Resumen	II
Lista de Símbolos y Abreviaciones (Nomenclatura)	III
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Problemática de las centrales termoeléctricas.....	2
1.1.1. Impactos ambientales potenciales.....	3
1.1.2. Temas especiales.....	4
1.1.3. Efectos globales y regionales.....	5
1.1.4. Agua de enfriamiento y calor residual.....	6
1.1.5. Impactos sobre la comunidad.....	7
1.2. Objetivo.....	8
1.3. Justificación.....	8
1.4. Metodología.....	9
Capítulo 2. Centrales termoeléctricas convencionales	10
2.1. Componentes principales de una central térmica convencional.....	10
2.1.1. Funcionamiento de una central termoeléctrica convencional.....	12
2.2. Central de combustión de carbón o carboeléctrica.....	13
2.2.1. Funcionamiento de una central carboeléctrica.....	14
2.3. Central termoeléctrica combustión de petróleo.....	15
2.4. Central termoeléctrica gas natural.....	16
Capítulo 3. Torres de enfriamiento (refrigeración)	20
3.1. Introducción.....	20
3.2. Tipos de torres de enfriamiento.....	24

3.2.1 Torres de enfriamiento tiro inducido.....	24
3.2.2. Torres de enfriamiento tiro forzado.....	30
3.2.3. Torres de enfriamiento tiro natural.....	31
Capítulo 4. Análisis energético de torres de enfriamiento	33
4.1. Introducción.....	33
4.2. Calculo de cambio de calor.....	34
4.3. Selección de una torre de enfriamiento.....	41
4.4. Balance de masa.....	47
4.5. Balance de energía.....	59
4.6. Balance de entropía.....	51
4.7. Balance de exergía.....	54
4.8. Eficiencia energética y exegética.....	57
4.9 Torre de enfriamiento de una central termoeléctrica de 550 MW.....	58
4.9.1. Descripción de la central termoeléctrica.....	58
4.9.2. Descripción del Ciclo Híbrido.....	59
4.9.3. Descripción de la torre de enfriamiento.....	62
4.9.4. Torre de enfriamiento.....	63
4.9.5. Bombas de agua de circulación.....	65
4.9.6. Condensador principal.....	66
4.9.7. Parámetros termodinámicos de la torre de enfriamiento.....	67
4.9.8. Modelo matemático y aplicación.....	67
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	76
5.1. Conclusiones.....	76
5.2. Recomendaciones.....	77
Referencias	78

Capítulo 1

Introducción

Una **central termoeléctrica** es una instalación empleada a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica.

Algunas centrales termoeléctricas contribuyen al efecto invernadero emitiendo dióxido de carbono. No es el caso de las centrales de energía solar térmica que, al no quemar ningún combustible, no lo hacen. También hay que considerar que la masa de este gas emitida por unidad de energía producida no es la misma en todos los casos: el carbón se compone de carbono e impurezas. Casi todo el carbono que se quema se convierte en dióxido de carbono -también puede convertirse en monóxido de carbono si la combustión es pobre en oxígeno-. En el caso del gas natural, por cada átomo de carbono hay cuatro de hidrógeno que también producen energía al convertirse en agua, por lo que contaminan menos por cada unidad de energía que producen y la emisión de gases perjudiciales procedentes de la combustión de impurezas -como los óxidos de azufre- es mucho menor.

Cuando el calor se obtiene mediante la fisión controlada de núcleos de uranio la central se llama central nuclear. Este tipo de central no contribuye al efecto invernadero, pero tiene el problema de los residuos radioactivos que han de ser guardados durante miles de años y la posibilidad de accidentes graves.

La primera central termoeléctrica fue construida por Sigmund Schuckert en la ciudad de Ettal en Baviera y entró en funcionamiento en 1878. Las primeras centrales comerciales fueron *Pearl Street Station* en Nueva York y la *Edison Electric Light Station*, en Londres, que entraron en funcionamiento en 1882. Estas primeras centrales utilizaban motores de vapor de pistones. El desarrollo de la turbina de vapor permitió construir centrales más grandes y eficientes por lo que hacia 1905 la turbina de vapor había reemplazado completamente a los motores de vapor de pistones en las grandes centrales eléctricas.

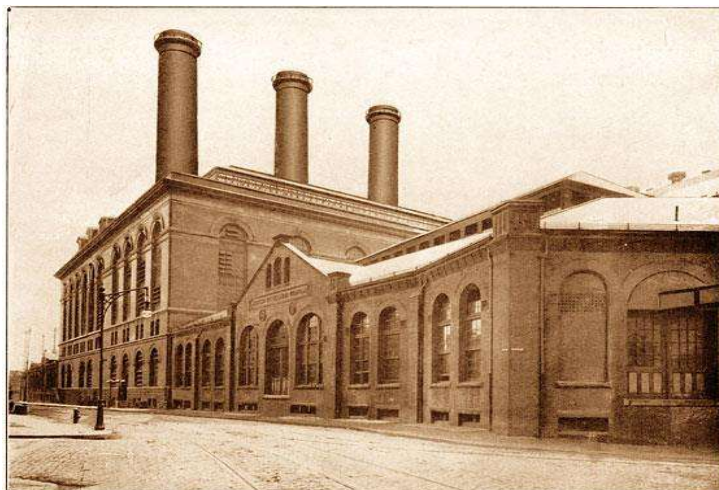


Figura 1.1 Central *Pearl Street Station*, Nueva York.

1.1 Problemática de las centrales termoeléctricas

Prácticamente todas las centrales eléctricas de carbón, nucleares, geotérmicas, energía solar térmica o de combustión de biomasa, así como algunas centrales de gas natural son centrales termoeléctricas. El calor residual de una turbina de gas puede usarse para producir vapor y a su vez producir electricidad en lo que se conoce como un ciclo combinado lo cual mejora la eficiencia. Las centrales termoeléctricas no nucleares, particularmente las de combustibles fósiles se conocen también como centrales térmicas o centrales termoeléctricas convencionales.

Se llaman centrales clásicas o de ciclo convencional a aquellas centrales térmicas que emplean la combustión del carbón, petróleo (*aceite*) o gas natural para generar la energía eléctrica. Son consideradas las centrales más económicas y rentables, por lo que su utilización está muy extendida en el mundo económicamente avanzado y en el mundo en vías de desarrollo, a pesar de que estén siendo criticadas debido a su elevado impacto medioambiental.

1.1.1 Impactos ambientales potenciales

Los impactos negativos pueden ocurrir durante la construcción, así como la operación de las plantas termoeléctricas. Los impactos de la construcción son causados, principalmente, por las siguientes actividades de la preparación del sitio: desbroce, excavación, movimiento de tierras, drenaje, dragado o embalse de los ríos y otras extensiones de agua, establecimiento de las áreas de colocación, de préstamo y de relleno. Se emplea un gran número de trabajadores en la construcción de las centrales energéticas, y esto puede causar impactos socioculturales importantes en las comunidades locales.

Las plantas termoeléctricas son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas y pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional. La combustión que ocurre en los proyectos termoeléctricos emite dióxido de sulfuro (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y partículas (que pueden contener metales menores). Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y el tamaño de la instalación y del tipo y calidad del combustible, y la manera en que se queme. La dispersión y las concentraciones de estas emisiones, a nivel de la tierra, son el resultado de una interacción compleja de las características físicas de la chimenea de la planta, las cualidades físicas y químicas de las emisiones, las condiciones meteorológicas en el sitio, o cerca del mismo durante el tiempo que se requiere para que las emisiones se trasladen desde la chimenea hasta el receptor a nivel de la tierra, las condiciones topográficas del sitio de la planta y las áreas circundantes, y la naturaleza de los receptores (p.ej., seres humanos, cultivos y vegetación nativa).

Típicamente, el agua de enfriamiento limpia constituye el efluente más importante que proviene de las plantas termoeléctricas. Puede ser reciclada o descargada a la extensión de agua superficial, sin causar efectos mayores en cuanto a su calidad química. Sin embargo, debe ser considerado el efecto del calor residual sobre la temperatura del agua ambiental, durante la evaluación de las plantas que contemplen utilizar, sin reciclaje, el agua de enfriamiento. Un aumento pequeño en la temperatura del agua ambiental puede alterar, radicalmente, las comunidades de las plantas y la fauna. Los otros efluentes que producen los proyectos termoeléctricos son menos abundantes, pero pueden alterar, grandemente, la

calidad del agua. Por ejemplo, los efluentes de las plantas termoeléctricas a carbón contienen el agua de lavado del sistema de enfriamiento, de la caldera, del desmineralizado, del regenerador de resinas, del eliminador de ceniza y el escurrimiento de los montones de carbón, ceniza y del patio, así como otras descargas de bajo volumen causadas por los accidentes o derrames. Se encuentran diferentes combinaciones de metales y otros químicos en estos efluentes. En las plantas a petróleo los derrames de combustible tienen un impacto negativo sobre la calidad del agua.

Como algunos de los impactos pueden ser evitados completamente, o mitigados más exitosamente, a menor costo, si el sitio se escoge, prudentemente.

1.1.2 Temas especiales

El uso de combustibles calientes genera emisiones de gases de efecto invernadero y de lluvia ácida a la atmósfera, junto a partículas volantes que pueden contener metales pesados.

Los combustibles fósiles son una fuente de energía finita, por lo tanto su uso está limitado por la disponibilidad de las reservas y/o por su rentabilidad económica. Sus emisiones térmicas y de vapor pueden alterar el microclima local.

Afectan negativamente a los ecosistemas fluviales debido a los vertidos de agua caliente en éstos.

Su rendimiento (en muchos casos) es nulo (comparado con el rendimiento ideal), a pesar de haberse realizado grandes mejoras en la eficiencia.



Figura 1.2 Central carboeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles, Petacalco, Guerrero.

En la figura 1.2 se muestra la Central carboeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles, Petacalco, Guerrero, como podemos observar en las chimeneas se muestran las emisiones atmosféricas que esta central genera al ambiente.

1.1.3 Efectos globales y regionales

Las emisiones de las centrales termoeléctricas pueden provocar lluvia ácida, especialmente si el combustible es carbón con un alto contenido de azufre. La precipitación ácida acelera el deterioro de los edificios y monumentos; altera, radicalmente, los ecosistemas acuáticos de ciertos lagos y daña la vegetación de los ecosistemas forestales. Además, el uso de los combustibles fósiles en las plantas termoeléctricas genera CO_2 y NO_x , y el calentamiento mundial ha sido atribuido al aumento de la concentración de CO_2 y NO_x en la atmósfera. Sin embargo, es imposible, actualmente, predecir la contribución exacta de las emisiones específicas de un proyecto termoeléctrico en particular, a estos problemas regionales y globales.



Figura 1.3 Proceso de formación de la lluvia ácida

En la figura 1.3 se muestra el esquema del proceso de formación de la lluvia ácida.

Los óxidos de azufre y nitrógeno se pueden convertir en ácidos sulfúrico y nítrico, causantes de las lluvias ácidas. La contaminación se produce y cae con la lluvia. Afecta a la vegetación y puede producir la muerte de bosques enteros.

1.1.4 Agua de enfriamiento y calor residual

Muchas plantas de generación que emplean vapor tienen sistemas de enfriamiento sin reciclado. Si el alto volumen de agua que requieren las grandes plantas de este tipo, se toma de las extensiones de agua naturales, como ríos y bahías, existe el riesgo de mortandad para los organismos acuáticos, porque se arrastran y se chocan con el sistema de enfriamiento. Esto puede reducir grandemente la población de peces y moluscos, de los cuales algunos pueden tener importancia comercial.

Las descargas de agua caliente pueden elevar la temperatura del agua ambiental, alterando radicalmente, las comunidades de plantas y animales acuáticos, favoreciendo a los organismos que se adapten a temperaturas más altas. Entonces, las nuevas comunidades son vulnerables al efecto opuesto, a saber, una reducción brusca de la temperatura ambiental, después de la paralización de la planta, debido a las fallas o el mantenimiento programado.

Al utilizar torres de enfriamiento por evaporación, se reduce la cantidad de agua que debería ser empleada para enfriamiento, y se requiere, sólo una cantidad suficiente para compensar la evaporación. Las torres eliminan la descarga térmica, pero producen agua de

purgación, que deberá ser eliminada. En los climas más fríos hay otra alternativa: se puede reducir la temperatura mediante el uso beneficioso del calor residual en la forma de agua caliente o vapor, por ejemplo, para calentar los edificios o piscinas de acuicultura.

Cualquiera de los métodos de enfriamiento implica algún consumo de agua. En las áreas donde es escasa, esto reduce el volumen de agua que está disponible para consumo humano, riego, navegación y otros usos.

1.1.5 Impactos sobre la comunidad

Uno de los impactos más importantes de las plantas termoeléctricas se relaciona con la afluencia de trabajadores durante el período de construcción. Pueden ser necesarios varios miles de trabajadores durante algunos años para la construcción de una planta grande (700 MW), y cientos de trabajadores para su operación. Sin embargo, luego de construidas operan con no más de 40 trabajadores aproximadamente.

En su fase de construcción existe potencial para mucha tensión si la comunidad receptora es pequeña. Se puede producir una condición de "crecimiento rápido" o desarrollo inducido. Esto puede tener efectos negativos importantes en la infraestructura existente de la comunidad: las escuelas, política, prevención de incendios, servicios médicos, etc. Asimismo, la afluencia de trabajadores de otros lugares o regiones cambiará los modelos demográficos locales y alterará los valores socioculturales locales, así como las costumbres de vida de los residentes.

Otro impacto potencial es el desplazamiento de la población local debido a las necesidades de terreno para la planta y las instalaciones relacionadas con la misma. Pueden haber serias alteraciones en el tráfico local a raíz de la construcción y operación de la planta termoeléctrica. Finalmente, las grandes plantas eléctricas producen impactos visuales y mucho ruido.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis se concentra en dar a conocer la importancia que tienen las torres de enfriamiento (refrigeración), que son una parte muy importante para el buen funcionamiento, optimización, eficiencia y un mayor aprovechamiento de recursos en las centrales termoeléctricas.

Se pretende que mediante el estudio a fondo acerca de las centrales termoeléctricas y en específico de las torres de refrigeración, se logre realizar un aporte para futuras investigaciones y en su virtud lograr el desarrollo de algún proyecto.

Los enfoques de esta tesis van más allá de realizar una investigación a fondo, si no que se tiene como finalidad aportar beneficios a la sociedad en general, plasmar conocimientos que puedan ser utilizados posteriormente.

1.3 Justificación

En la actualidad la energía eléctrica es uno de los pilares fundamentales que constituyen el desarrollo de la sociedad ya que es de suma importancia tanto en la industria, la ciencia, la tecnología, en general es parte de nuestra vida diaria.

En México la mayor parte de la energía eléctrica es generada mediante plantas generadoras termoeléctricas de combustibles fósiles, es por eso que debemos prestar atención en realizar nuevas investigaciones que puedan aportar algún beneficio para un mayor aprovechamiento de los recursos utilizados en la producción de energía.

Es importante saber que las plantas termoeléctricas son instalaciones que tienen la desventaja de ser poco eficientes ya que al ser máquinas térmicas representan bastantes pérdidas en el proceso de producción de energía eléctrica, es por eso que debemos optimizar los recursos al máximo.

Las plantas de generación termoeléctricas, en específico las plantas termoeléctricas convencionales o de combustibles fósiles (carbón, fuel-oíl y gas natural), consumen grandes cantidades de hidrocarburos en el proceso de generación, también consumen una gran cantidad de agua, otro de los recursos importantes que debemos considerar en especial para aquellas plantas que no se encuentran cerca de un suministro de gran capacidad de este recurso, el resultado de estos consumos a gran escala genera una serie de inconvenientes, representando un gran impacto económico y ambiental entre otros. Como

podemos ver la optimización de estos recursos trae grandes beneficios al ambiente y a la economía, además como sabemos los combustibles utilizados en este proceso de generación son una fuente finita de energía así que es necesario extremar el buen aprovechamiento de los mismos.

1.4 Metodología

La metodología a seguir en esta tesis consiste en el método histórico que consiste en realizar investigaciones de las torres de enfriamiento consultando diversas fuentes de información que puedan ser de utilidad para la investigación del tema.

Posteriormente al haber estudiado los antecedentes y datos necesarios podemos pasar de una metodología histórica a metodología de modelación del proyecto, claro está que se pretende llegar a un modelo teórico; con este modelo podemos designar las propiedades del sistema real de una torre de enfriamiento. Tiene la capacidad de representar las características y relaciones fundamentales del fenómeno, proporcionar explicaciones y sirve como guía para generar hipótesis teóricas.

El modelo se interpreta en la teoría científica, la teoría establece el significado de las variables, relaciones y constantes del modelo; explicita y desarrolla todas las propiedades y relaciones implícitas del modelo, representándolas de manera sistematizada e ideal y destacando la estructura, dinámica y leyes de desarrollo del fenómeno.

Capítulo 2

Centrales termoeléctricas convencionales

Existen diferentes formas de clasificar las instalaciones o centrales termoeléctricas con turbina de vapor, pudiendo ser de acuerdo a la forma de producir el vapor que usan. A este respecto a las centrales termoeléctricas de vapor permiten prácticamente el uso de todo tipo de fuente de calor hoy día disponible, de manera que se tienen tres tipos principales de centrales termoeléctricas de vapor:

- Con combustibles tradicionales o convencionales (sólidos, líquidos o gaseosos).
- Con combustibles nucleares.
- Con fuentes geotérmicas.

En las centrales térmicas convencionales (o termoeléctricas convencionales) **se produce electricidad a partir de combustibles fósiles** como carbón, petróleo (fuel-oíl) o gas natural, mediante **un ciclo termodinámico de agua-vapor**. El término ‘convencionales’ sirve para diferenciarlas de otras centrales térmicas, como las nucleares, geotérmicas o las de ciclo combinado.

2.1 Componentes principales de una central térmica convencional

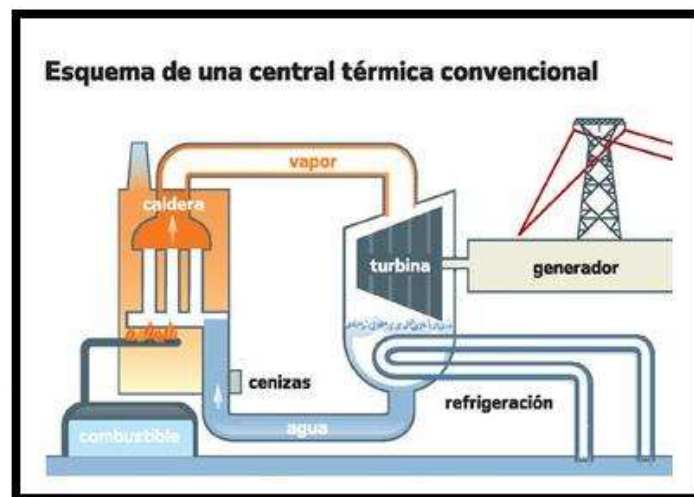
Los elementos principales de una central termoeléctrica convencional son:

1. **Caldera.** En este espacio el agua se transforma en **vapor**, cambiando su estado. Esta acción se produce gracias **a la combustión del gas natural** (o cualquier otro combustible fósil que pueda utilizar la central), con la que se generan gases a muy alta temperatura que al entrar en contacto con el agua líquida la convierten en vapor. El agua que se transforma en vapor circula por unas cañerías llamadas **serpientes**, donde se produce el intercambio de calor entre los gases de la combustión y el agua.
2. **Turbina de vapor.** Máquina que recoge el vapor de agua y que, gracias a un complejo **sistema de presiones y temperaturas, consigue que se mueva el eje que la atraviesa**. Esta turbina normalmente tiene varios cuerpos, **de alta, media y baja**

presión, para aprovechar al máximo el vapor de agua. El eje que atraviesa los diferentes cuerpos está conectado con el generador.

3. **Generador.** Máquina que recoge la energía mecánica generada en el eje que atraviesa la turbina y la transforma en eléctrica mediante inducción electromagnética. Las centrales eléctricas transforman la energía mecánica del eje en una **corriente eléctrica trifásica y alterna**.
4. **Sistema de agua de enfriamiento.** Existen tres sistemas principales para proveer el rechazo de calor del condensador de la planta:
 - Circuitos abiertos en los cuales el agua se toma del mar, ríos o lagos grandes y se regresa con un mínimo de recirculación.
 - Estanques de enfriamiento.
 - Torres de enfriamiento o refrigeración.

Un esquema de una central termoeléctrica convencional se muestra en la figura 2.1.



2.1 Esquema de principio de funcionamiento de una central termoeléctrica convencional.

2.1.1 Funcionamiento de una central térmica convencional

El funcionamiento de las centrales termoeléctricas convencionales es el mismo **independientemente del combustible que se utilice.**

Sin embargo, sí hay diferencias en el **tratamiento previo que se hace al combustible y del diseño de los quemadores de las calderas** de las centrales.

1. **Centrales de carbón.** Donde el combustible debe ser **triturado** previamente.
2. **Centrales de petróleo.** Donde el combustible se **calienta** para una utilización más fácil.
3. **Centrales de gas natural.** Que no precisa almacenaje, llegando así directamente por **gaseoductos.**
4. **Centrales mixtas.** Que pueden utilizar diferentes combustibles, siendo necesarios los tratamientos previos anteriormente citados.



Figura 2.2 Central termoeléctrica “Altamira”, ubicada en Altamira, Tamaulipas, tomada en 2003.

Una vez el combustible está en la caldera, se quema. Esto provoca que se produzca energía calorífica que se utilizará para **calentar agua** y así transformarla en vapor a una presión muy elevada.

A partir de este vapor **se hace girar una turbina y un alternador** para que este produzca electricidad.

La electricidad generada pasa por un **transformador** para aumentar su tensión y así transportarla reduciendo las pérdidas por Efecto Joule.

El vapor que sale de la turbina se envía a un elemento llamado **condensador** para convertirlo en agua y así retornarlo a la caldera para empezar un **nuevo ciclo de producción de vapor**.

2.2 Central de combustión de carbón o carboeléctrica

Una central térmica de carbón es aquella que genera energía eléctrica por medio de turbinas accionadas a partir de la combustión del carbón.



Figura 2.3 Diagrama esquemático de una central térmica de carbón convencional.

En la figura 2.3 se muestra un diagrama esquemático generalizado de las partes que conforman una central carboeléctrica.

2.2.1 Funcionamiento de una central carboeléctrica

Tomando como referencia la figura 2.3 podemos explicar de mejor manera el funcionamiento de una central térmica de carbón.

El carbón almacenado en el parque (1) cerca de la central es conducido mediante una cinta transportadora hacia una tolva (2) que alimenta al molino (3). Aquí el carbón es pulverizado finamente para aumentar la superficie de combustión y así mejorar la eficiencia de su combustión. Una vez pulverizado, el carbón se inyecta en la caldera (4), mezclado con aire caliente para su combustión.

La caldera está formada por numerosos tubos por donde circula agua, que es convertida en vapor a alta temperatura. Los residuos sólidos de esta combustión caen al cenicero (5) para ser posteriormente transportados a un vertedero. Las partículas finas y los humos se hacen pasar por los precipitadores (6) y los equipos de desulfuración (7), con el objeto de retener un elevado porcentaje de los contaminantes que en caso contrario llegarían a la atmósfera a través de la chimenea (8).

El vapor de agua generado en la caldera acciona los álabes de las turbinas de vapor (9), haciendo girar el eje de estas turbinas que se mueve solidariamente con el rotor del generador eléctrico (12). En el generador, la energía mecánica rotatoria es convertida en electricidad de media tensión y alta intensidad. Con el objetivo de disminuir las pérdidas del transporte a los puntos de consumo, la tensión de la electricidad generada es elevada en un transformador (13), antes de ser enviada a la red general mediante las líneas de transporte de alta tensión (14).

Después de accionar las turbinas, el vapor de agua se convierte en líquido en el condensador (10). El agua que refrigera el condensador proviene de un río o del mar, y puede operar en circuito cerrado, es decir, transfiriendo el calor extraído del condensador a la atmósfera mediante torres de refrigeración (11) o, en circuito abierto, descargando dicho calor directamente a su origen.

2.3 Central de termoelectrica combustión de petróleo

De forma general, puede decirse que el poder calorífico de un combustible está directamente asociado a sus contenidos en carbono e hidrógeno. Los restantes componentes del combustible (muy variables según la naturaleza de la materia prima) contribuyen a reducir esa potencia calorífica, a complicar el proceso de combustión y a generar una serie de subproductos cuya incidencia ambiental es frecuentemente negativa.

Una central térmica que de petróleo consume fundamentalmente el fuelóleo y el gasóleo, obtenidos en el proceso de refinado del crudo como se muestra en la figura 2.4. Sus características responden a especificaciones adaptadas a los requerimientos de las centrales térmicas. Tienen sin embargo una composición y un contenido en azufre que dan lugar a residuos de carácter contaminante (óxidos de azufre y nitrógeno, hollines, etc.).

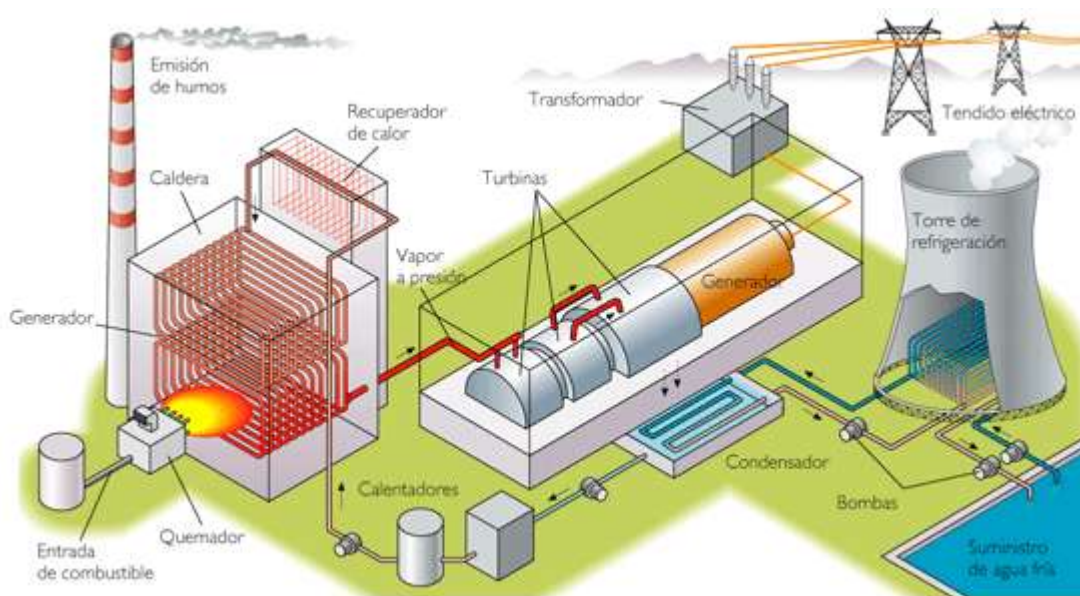


Figura 2.4 Diagrama esquemático de una central térmica de derivados del petróleo convencional.

El funcionamiento de este tipo de centrales es básicamente el mismo que el de las centrales carboeléctricas, a diferencia de que estas consumen combustóleo que en algunos casos es precalentado para favorecer la combustión del mismo.

El combustóleo se transporta en grandes barcos o en conductos de gran longitud (oleoductos). La situación de muchas centrales eléctricas viene determinada por la fuente de energía que emplean como materia prima (combustible). Así, muchas centrales térmicas de petróleo se sitúan junto al mar para que el transporte del crudo desde petroleros sea sencillo.

2.4 Central de termoelectrica gas natural

Las Centrales Térmicas de Gas son tantas plantas de ciclo simple, usando como combustible únicamente gas natural, como combinado, usando el ciclo de la turbina de gas junto con una unidad de combustión de carbón. En la mayoría de los casos, las plantas de combustión de gas, operan en un ciclo combinado usando una turbina de gas y vapor para generar electricidad. Por lo tanto, muchas aplicaciones son similares a las de las plantas de combustión de carbón, por ejemplo, circuitos de refrigeración, bombas de refrigeración y turbinas de vapor.

Las centrales que de gas natural constituido en su mayor parte por metano (CH_4) y algunos otros hidrocarburos ligeros, es un combustible esencialmente limpio cuyo uso genera muy pocos productos residuales.

Sería redundante hablar del funcionamiento de este tipo de centrales ya que es básicamente el mismo ya sea de petróleo o carbón, en esencia todas las centrales térmicas convencionales utilizan el mismo esquema de funcionamiento.

Cuando son combustibles gaseosos (y en algunos casos también con los líquidos), los gases de combustión accionan directamente las turbinas (turbina de gas).

En México existen diversas fuentes de generación de energía eléctrica y una gran parte está constituida por plantas térmicas convencionales.

De acuerdo con la Comisión Fedérela de Electricidad las cifras en cuanto a generación hasta septiembre de 20|12 son las siguientes:

- Desarrollo de la capacidad instalada y de la generación sin zona centro

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*	
Capacidad (MW)	CFE	36971	38422	37325	37470	38397	38474	38927	39704	39270	39307
	PIE's	6756	7265	8251	10387	11457	11457	11457	11907	11907	12213
	Total	43727	45687	45576	47857	49854	49931	50384	51611	51177	51510
Generación (TWh)	CFE	169.32	159.53	170.07	162.47	157.51	157.16	154.14	160.37	170.42	135.59
	PIE's	31.62	45.85	45.56	59.43	70.98	74.23	76.5	78.44	84.26	61.72
	Total	200.9	205.3	215.6	221.9	228.4	231.4	230.6	238.8	254.6	197.31

- Capacidad efectiva instalada por tipo de generación al mes de septiembre de 2012

Tipo de generación	Capacidad efectiva en MW	Porcentaje
Termoeléctrica	22 596.33	44.56%
Hidroeléctrica	11 241.22	21.82%
Carboeléctrica	2 600.00	5.05%
Ge termoeléctrica	811 .60	1.58%
Eolo eléctrica	86.75	0.17
Nucleoeléctrica	1 610.00	3.13%
Fotovoltaica	1.00	0.002%
Termoeléctrica (Productores Independientes)	11 906.9	23.11%
Eólica (Productores Independientes)	306.00	0.59%
Total	51 519.81	100%

- Generación por fuente

Tipo de generación	Porcentaje
Geotermia	2.00%
Carbón	6.16%
Nuclear	3.41%
Eólica	0.05%
Fotovoltaica	0.0005%
Productores independientes	29.66%
Hidráulica	11.69%
Hidrocarburos	47.03%

- Para el cierre de septiembre de 2012, la capacidad efectiva instalada y la generación de cada uno de estos tipos de generación termoeléctrica, es la siguiente:

Tipo	Capacidad en MW*	Generación GWh*
Vapor	11 698.60	40 052.20
Dual	2 778.36	10 964.35
Carboeléctrico	2 600.00	12 812.23
Ciclo Combinado	18 029.28	89 282.21
Geotermoeléctrica	811.60	4 161.74
Turbogas	2 146.06	1 510.20
Combustión Interna	210.92	796.18
Nucleoeléctrica	1 610.00	7 090.16
Total	39 922.33	166 669.27

*Al mes de septiembre 2012

- Total de centrales de CFE sin tomar en cuenta Zona Centro

Tipo	Cantidad de centrales	Capacidad efectiva instalada (MW)
Termoeléctricas	26	11 698.60
Turbogas	30	2 146.06
Geotermoeléctricas	7	811.60
Diesel	9	210.92
Nucleoeléctricas	2	1 610.00 MWe
Ciclo Combinado	13	6 122.38
Dual	1	2 778.36
Carboeléctricas	2	2 600.00
Hidroeléctricas	64	11 241.22
Eoloeléctricas	3	86.75
Fotovoltaica	1	1.00
Total:	157	39 306.89

- Total de Centrales en Zona Centro

Tipo	Cantidad de unidades	Capacidad efectiva instalada (MW)
Vapor (combustóleo y/o gas)	4	224
Turbogas	25	822
Hidroeléctricas	38	288.33
Total:	67	1 334.33

Las 67 unidades se tienen en 32 centrales generadoras.

Capítulo 3

Torres de enfriamiento (refrigeración)

3.1 Introducción

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

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

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

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

Las industrias utilizan agua de refrigeración para varios procesos. Como resultado, existen distintos tipos de torres de enfriamiento. Existen torres de enfriamiento para la producción de agua de proceso que sólo se puede utilizar una vez, antes de su descarga, así como torres de enfriamiento de agua que puede reutilizarse en el proceso.

El uso principal de grandes torres de refrigeración industriales es el de rebajar la temperatura del agua de refrigeración utilizada en plantas de energía, refinerías de petróleo, plantas petroquímicas, plantas de procesamiento de gas natural y otras instalaciones industriales.

Con relación al mecanismo utilizado para la transferencia de calor los principales tipos son:

- ***torres de refrigeración húmedas*** funcionan por el principio de evaporación.
- ***torres de refrigeración secas*** funcionan por transmisión del calor a través de una superficie que separa el fluido a refrigerar del aire ambiente.

En una torre de refrigeración húmeda el agua caliente puede ser enfriada a una temperatura inferior a la del ambiente, si el aire es relativamente seco.

Con respecto al tiro del aire en la torre existen tres tipos de torres de refrigeración:

- ***Tiro natural***, que utiliza una chimenea alta.
- ***Tiro inducido***, en el que el ventilador se coloca en la parte superior de la torre (impulsan el aire creando un pequeño vacío en el interior de la torre).
- ***Tiro mecánico*** (o tiro forzado), que utiliza la potencia de motores de ventilación para impulsar el aire a la torre (colocándose en la base).

Bajo ciertas condiciones ambientales, nubes de vapor de agua (niebla) se pueden ver que salen de una torre de refrigeración seca.

En la figura 3.1 se muestra una fotografía de las torres de refrigeración de la central nuclear de Cofrentes, España, expulsando vapor de agua.



Figura 3.1 Torres de refrigeración de la central nuclear de Cofrentes, España, expulsando vapor de agua.

Las torres de enfriamiento usan la evaporación del agua para rechazar el calor de un proceso tal como la generación de energía eléctrica. Las torres de enfriamiento varían en tamaño desde pequeñas a estructuras muy grandes que pueden sobrepasar los 220 metros de altura y 100 metros de longitud. Torres más pequeñas son normalmente construidas en fábricas, mientras que las más grandes son construidas en el sitio donde se requieren.

El aire contiene un 21% de O_2 (oxígeno) y un 78% de N_2 (nitrógeno) y una parte de H_2O , en forma de vapor, que queda reflejada por el porcentaje de humedad relativa.

Un estado termodinámico de aire húmedo queda siempre parametrizado por tres variables, por ejemplo:

***ts* temperatura seca °C**

***HR* humedad relativa %**

***p* presión atmosférica Pa (Pascal)**

(También puede caracterizarse un estado termodinámico por: t_s , t_h temperatura del bulbo húmedo y P , de entre otras posibles ternas).

Para valorar los parámetros de un estado termodinámico de aire húmedo se emplea el diagrama de Möllier.

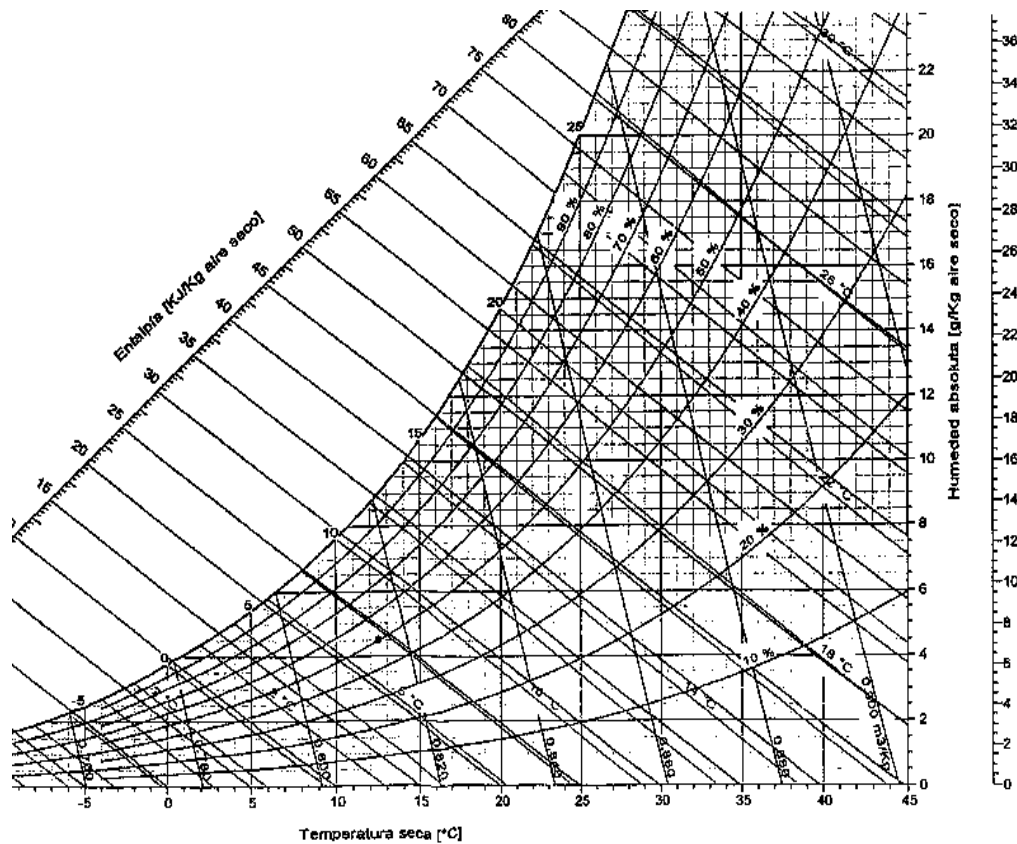


Figura 3.2 Diagrama de Möllier.

La temperatura y la humedad del aire (la carga que contiene de agua) influyen sobre la sensación de confort. Dicho sea de paso, a más humedad ambiental, menor es la posibilidad de generación de corriente estática.

Si se tiene un aire cálido y seco es posible, mediante el empleo de diferentes ingenios, proporcionarle una carga de humedad mediante métodos mecánicos: pulverización, riego,

extensión de superficie en gotas, como ocurre con las torres de enfriamiento evaporativo adiabático.

Con la técnica evaporativa adiabática se puede enfriar agua o aire.

3.2 Tipos de torres de enfriamiento

Siempre que es posible, una planta de generación de energía se prefiere utilizar un sistema de refrigeración en circuito abierto, tomando el agua fría de un cauce público (mar o río) y devolviéndolo a mayor temperatura después de refrigerar los circuitos necesarios (normalmente, el condensador de la turbina de vapor).

Cuando por razones técnicas o legislativas no se puede disponer de un cauce público del que extraer el agua fría y devolverla a mayor temperatura, se emplea un circuito semiabierto con torres de refrigeración. La principal ventaja es que el aporte de agua es mucho menor, y por tanto, el impacto medioambiental de las plantas que evacúan el calor sobrante utilizando torres de refrigeración, también lo es. La refrigeración con torre evaporativa es con diferencia el sistema más empleado para la evacuación de calor sobrante en centrales termosolares, plantas de cogeneración y centrales de ciclo combinado. Existen tres tipos de torres de enfriamiento:

- Torres de tiro inducido
- Torres de tiro forzado
- Torres de tiro natural

3.2.1 Torres de enfriamiento tiro inducido

En la torre de tiro inducido el agua caliente procedente de la refrigeración se deja caer por el interior de la torre mediante un sistema de distribución de agua, que debe caer uniformemente sobre el relleno. En la parte superior hay unos ventiladores que hacen que el aire circule a contracorriente del agua. El fenómeno de cesión de calor se debe a que al entrar en contacto el agua caliente con el aire se forma una película de aire húmedo alrededor de cada gota. El agua que pasa al aire, y por tanto se evapora, extrae el calor

necesario para la evaporación del propio líquido y produce por tanto un enfriamiento del mismo. Por la parte superior sale el aire húmedo, visible si las condiciones ambientales dificultan la dispersión de este vapor en el aire (frío intenso o humedad relativa alta). Este vapor visible se denomina penacho o pluma, y aunque es vapor de agua (más que vapor es niebla, es decir gotas finas de agua) y por tanto no es contaminante, tiene cierto impacto visual.

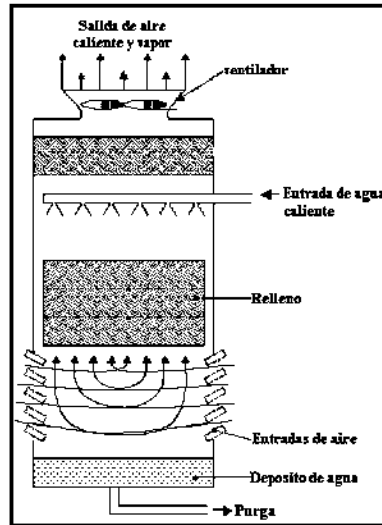


Figura 3.3 Torre de flujo a contracorriente (tiro inducido).

En la figura 3.3 se muestra el esquema básico de estructura y funcionamiento de una torre de refrigeración de tiro inducido.

Una de las principales ventajas de este tipo de torre es que puede ser bastante baja, disminuyendo así la energía requerida para el bombeo de agua a las partes altas de la torre.

Los elementos que compone una torre de refrigeración son prácticamente los mismos para las de tipo forzado e inducido. Los más importantes son los siguientes:

- **Separador de gotas:** El separador de gotas tiene la finalidad de detener las gotas de agua que arrastra la corriente de aire al salir de la torre. Este objetivo se consigue mediante un cambio brusco de la dirección (60 grados es la más efectiva) del aire al salir. Esta variación

provoca que el agua arrastrada se deposite sobre la superficie del separador de gotas, cayendo posteriormente al relleno. La existencia del separador tiene tres ventajas:

1. La reducción de pérdidas de agua.
2. Evitar daños en el entorno de la torre, y sobre todo si el agua de torre es agua salada.
3. Limitar la formación de neblinas.

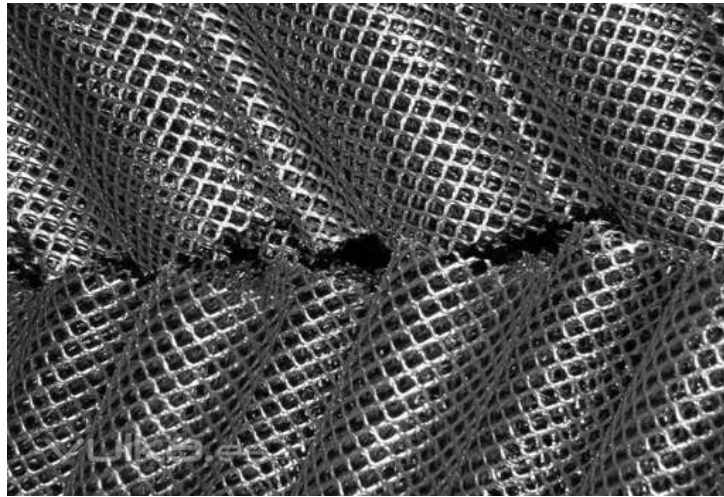


Figura 3.4 Separador de gotas para una torre de enfriamiento.

En la figura 3.4 se muestra un modelo de separador de gotas para una torre de enfriamiento.

• **Sistema de distribución de agua a enfriar:** Este sistema de tuberías y conducciones tiene la finalidad de repartir uniformemente el flujo de agua por encima del relleno. Existen dos métodos de reparto: por gravedad o por presión. En el primero el agua caliente cae sobre el relleno por su propio peso. Su funcionamiento consiste en llevar hasta una balsa colocada sobre el relleno el agua caliente y una vez allí se reparte por unos canales que dejan caer el agua por gravedad sobre unas piezas en forma de herradura que sirven de enlace entre los canales y el relleno. En el segundo, la tubería que contiene el agua con cierta presión (suministrada por las bombas de impulsión del circuito de refrigeración) se conduce por tuberías hasta unos aspersores, que rocían el relleno con pequeñas gotas.

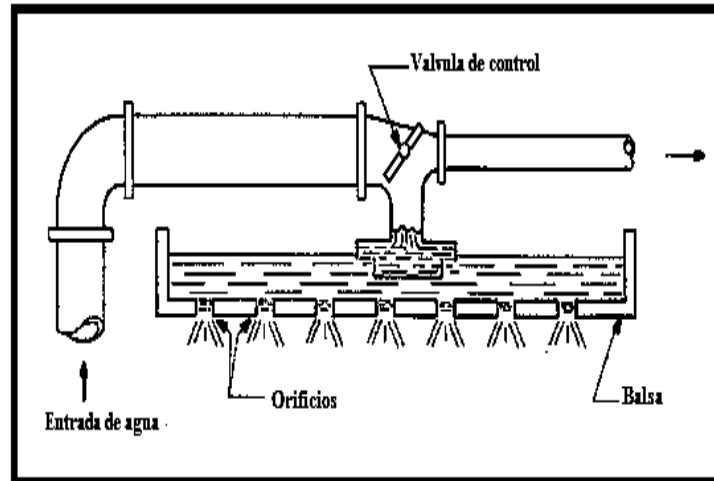


Figura 3.5 Sistema de distribución de agua con tubería reparto por gravedad.

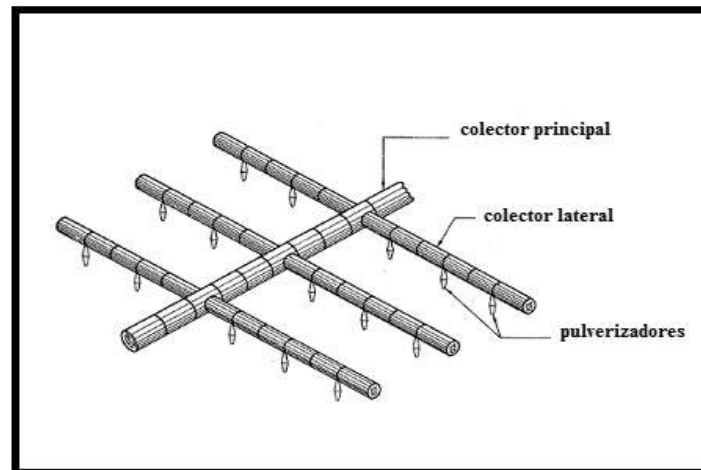


Figura 3.6 Sistema de *distribución de agua con tubería a presión*.

En la figura 3.5 se muestra un esquema de tubería de reparto de agua con el principio de gravedad, mientras que en la figura 3.6 se hace referencia a una tubería de reparto de agua a presión.

- **Relleno:** Tiene una vital importancia para el intercambio de calor ya que debe proporcionar:

1. Una superficie de intercambio lo más grande posible entre el agua que cae y el aire que asciende.

2. Retardar el tiempo de caída del agua, asegurando una mayor duración del proceso de intercambio.



Figura 3.7 Panel de relleno de torre de enfriamiento con señales de corrosión.

En la figura 3.7 se muestran paneles de relleno de una torre de enfriamiento retirados para su limpieza y mantenimiento.

Las características de un relleno deben ser:

1. Se debe de realizar con un material de bajo coste debido a la cantidad que se emplea, y debe ser de fácil colocación.
2. La superficie del mismo debe ser la mayor posible en relación con su volumen.
3. Su diseño debe permitir fácilmente el paso del aire entre él, de forma que ofrezca la menor resistencia y pérdida de carga. Así mismo debe distribuir uniformemente el aire y el agua.
4. Debe ser resistente al deterioro ambiental, químico y térmico y debe ser fácil de limpiar.

Existen tres formas distintas de realizar el reparto de agua a través del relleno: por salpicadura o goteo, de película o laminares y de tipo mixto. Cada uno tiene sus inconvenientes y sus ventajas por lo que se tiende a utilizar cada tipo de relleno dependiendo de las características de uso y diseño de la torre. Los más habituales son los de película o laminados. Este relleno distribuye el agua en una fina película que fluye por su

superficie y por consiguiente pone una gran superficie de agua en contacto con la corriente de aire. La película de agua debe de ser muy delgada y cubrir la mayor superficie posible del relleno, y debe procurarse que el agua descienda adherida a la superficie del relleno evitando que la corriente del aire separe el agua del relleno. Para conseguir estos objetivos se realiza grupos de láminas onduladas de PVC o PP colocadas de forma paralela y a cierta distancia formando cubos para favorecer su apilado.

- **Ventiladores.** Estos equipos trabajan en condiciones duras, debido a que están continuamente en funcionamiento, en un clima de elevada humedad y temperatura. Son los encargados de crear el flujo de aire. El equipo completo se compone de motor, transmisión y aspas.

Los motores de las torres de refrigeración deben de estar convenientemente protegidos de la humedad (protección IP55 o IP65 contra polvo y chorros de agua), y de la atmósfera contaminada por los aditivos del agua. Suelen llevar un aislamiento de tipo B (aislado para temperaturas de hasta 120 grados) o F (aislado para temperaturas de hasta 140 grados), y siempre que es posible el motor se coloca resguardado de las corrientes de aire caliente y saturado, mediante su correspondiente sistema de transmisión. Existen diferentes sistemas de transmisión dependiendo de las necesidades de construcción (cardan, acoplamientos flexibles y reductores).



Figura 3.8 Ventilador de una torre de refrigeración tiro inducido.

En la figura 3.8 se muestra una fotografía tomada de la parte superior del ventilador de una torre de refrigeración de tipo tiro inducido.

Las aspas suelen ser de plástico o aluminio, por su ligereza y resistencia a la corrosión. El número de aspas influye directamente sobre la presión que se ejerce en ellas: a mayor número de aspas menor presión se ejerce en ellas. Igualmente, un número mayor de aspas supone facilidades para un óptimo equilibrado, para evitar posibles problemas de vibraciones (se recomienda cada tres o cuatro años un equilibrado del ventilador debido a la posible erosión de las aspas, corrosión o a la deposición de suciedad). Se puede variar el ángulo de ataque en parada de éstas, fácilmente.

- **Bombas de impulsión.** Las bombas se utilizan para que el agua ya enfriada alcance presión suficiente como para llegar a los diferentes elementos a enfriar y posteriormente subir el agua ya calentada a la parte superior de la torre, cerrando el circuito. El conjunto de bombas deben cumplir con los requerimientos de la instalación (caudal y altura manométrica).
- **Balsa.** Situada en la parte inferior de la torre, es el depósito de agua fría de la torre.
- **Sistema de agua de aporte.** La evaporación de agua en la torre provoca una disminución del volumen de agua en ésta.

3.2.2 Torres de enfriamiento de tiro forzado

Las torres de enfriamiento de tiro forzado están generalmente dotadas de un ventilador con su eje horizontal en el lado de la torre el cual descarga aire hacia atrás. El flujo de aire es dirigido después hacia arriba por mamparas, haciéndolo pasar a través de la corriente descendente del agua, después de lo cual es descargado por la parte superior a través de un sistema que elimina la mayor parte de las gotas arrastradas. Ya que la totalidad de la superficie de la parte superior de la torre es usada para la descarga de aire, la velocidad del aire de salida es más baja que las velocidades de descarga de la torres de tiro inducido.

Los elementos que componen estas torres son prácticamente los mismos que los que componen las torres de tiro inducido.

La ventaja de estas torres es que el ventilador es más fácilmente accesible y está sometido a condiciones menos rigurosas, por el contrario estas torres tienen peor distribución del aire a lo largo del relleno, suelen ser más elevadas y tienen más consumo eléctrico en ventiladores.

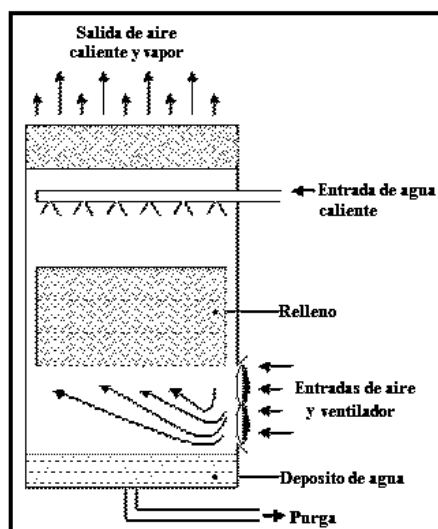


Figura 3.9 Torre de tiro forzado.

En la figura 3.9 se muestra el esquema básico de estructura y funcionamiento de una torre de refrigeración de tiro forzado, básicamente el funcionamiento es el mismo que la torre de enfriamiento tiro inducido, sólo cambia la ubicación del ventilador.

3.2.3 Torres de enfriamiento de tiro natural

En las torres de tiro natural el aire se mueve por el efecto chimenea. No se consume ningún tipo de energía para efectuar el movimiento de este aire. Son particularmente seguras en su funcionamiento y generalmente se emplean para el enfriamiento de grandes caudales de agua. Ocupan un volumen mayor a igualdad de capacidad de enfriamiento que las torres de tiro inducido o forzado; esto se debe a que las velocidades del aire son bajas. No son muy habituales en plantas de cogeneración y por el contrario es el sistema más común en grandes centrales eléctricas.

En la figura 3.10 se muestra el esquema de una torre de enfriamiento de tiro natural.

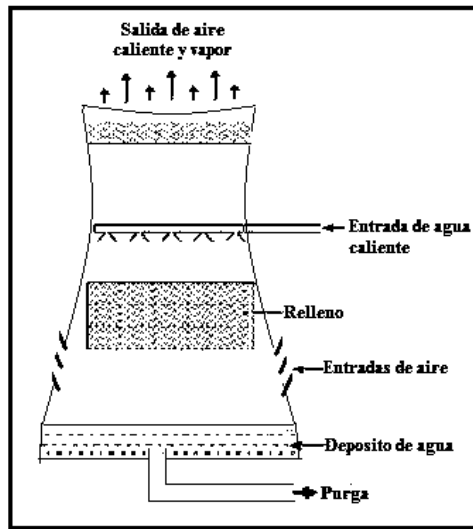


Figura 3.10 Torre de tiro natural.

Si bien las torres de enfriamiento de tiro natural no son las que cuentan con la mayor tecnología, son de igual manera eficientes y generalmente son utilizadas para la mayoría de las plantas de generación en donde se requieren enfriar grandes cantidades de agua.

Capítulo 4

Diseño de torres de enfriamiento (refrigeración)

4.1 Introducción

Como sabemos las torres de enfriamiento son dispositivos de enfriamiento artificial de agua. Se clasifican como cambiadores de calor entre un volumen en circuito cerrado de agua y aire atmosférico.

Básicamente las torres de enfriamiento son cambiadores de calor de mezcla, efectuando la transmisión de calor por cambio de sustancia y convección entre los medios. El agua cede calor al aire sobre todo por evaporación, lo hace también por convección de forma secundaria. La convección interviene más cuando el ambiente es frío y la diferencia de temperatura entre el agua y el aire es más marcada.

La torre de enfriamiento ideal, de dimensiones infinitas, limita la temperatura de enfriamiento del agua t_2 , a la temperatura del bulbo húmedo del aire t_{bh} , que físicamente está definida por:

$$t_{bh} = f(t_{as}, \varphi_a) \quad (4.1)$$

En donde:

t_{as} = temperatura seca del aire

φ_a = humedad relativa del aire

Para las torres de enfriamiento de dimensiones finitas, la temperatura de enfriamiento del agua t_2 es menor que la teórica, de acuerdo con la ecuación:

$$t_2 = t_{bh} + \delta t \quad (4.2)$$

En donde δt es la aproximación a la temperatura del bulbo húmedo.

La aproximación es una característica de calidad termodinámica en el funcionamiento de una torre de enfriamiento y depende de:

- La cara térmica e hidráulica de la torre
- Flujo de aire que pasa por la torre

- Valor del coeficiente de cambio de calor en la torre
- Arreglo y disposición de la torre

En el movimiento del aire en la torre de enfriamiento puede darse mediante ventiladores o una chimenea alta que produzca un tiro natural.

4.2 Cálculo de cambio de calor

Las ecuaciones fundamentales del cambio de calor en la torre de enfriamiento, son las siguientes:

$$G_L c_L dt = G_a [\alpha (t_{as} - t_L) dS + \sigma r (X_{sa} - X) dS] \quad (4.3)$$

En donde:

L se refiere a líquido (agua)

a Se refiere al aire

G_L = flujo de líquido en kg/s

G_a = flujo de aire, en kg/s

α = coeficiente de cambio de calor por convección

σ = coeficiente de cambio de sustancia (evaporación)

c_L = calor específico del agua

X_{sa} = humedad absoluta de saturación del aire a la temperatura del agua

X = humedad absoluta del aire a la entrada de la torre

r = calor de vaporización

La siguiente relación se utiliza con frecuencia en el cálculo de las torres de enfriamiento.

$$\lambda = \frac{G_a}{G_L} \quad (4.4)$$

Si se da por válida la hipótesis Lewis:

$$\frac{\sigma c_p}{\alpha} = 1 \quad (4.5)$$

y se utiliza el valor de la entalpía del aire:

$$h_a = C_p t + rX \quad (4.6)$$

La ecuación fundamental queda:

$$G_L c_L dt = G_a \frac{\alpha}{c_p} (h_x - h) dS \quad (4.7)$$

Integrando la relación anterior, conocida como la ecuación fundamental de Merkel, se obtiene la superficie necesaria de cambio de calor:

$$S = \frac{G_L c_L}{\sigma} \int_{t_{r1}}^{t_{r2}} \frac{dt}{h_{sa} - h} \quad (4.8)$$

En donde h_{sa} es la entalpía del aire saturado a la temperatura del agua de la torre y el coeficiente de Merkel K_v :

$$K_v = \frac{\sigma S}{G_L} \quad (4.9)$$

Resolviendo la integral por el método de aproximaciones, se determina el valor medio de la diferencia:

$$(h_x - h)_{med,y}$$

$$S = \frac{G_L \cdot C \Delta t}{(h_{sa} - h)_{med}} \quad (4.10)$$

En forma semejante se puede definir al volumen de las instalaciones de enfriamiento de una torre.

Para una temperatura dada de aire se obtiene una temperatura de agua t_2 más baja por la cantidad de calor evacuada en la torre de $(h_{sa} - h)_{med}$ y de la superficie de enfriamiento de la torre.

Si el flujo de agua G_L se refiere a la superficie proyectada de la base de la torre S_b , se obtiene la carga específica q , expresada en ms^{-1} o más prácticamente, en $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{h}$:

$$q = \frac{G_L}{S_B} \quad (4.11)$$

Para una torre a temperatura de aire exterior, la temperatura del agua fría es una función de la siguiente forma:

$$t_s = f(q, t) \quad (4.12)$$

La carga específica q se define por las condiciones técnico-económicas, que comúnmente tienen los siguientes valores:

- Para una T.E. de tiro natural: $1.6 - 2.2 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1} (6 - 8 \text{m}^3/\text{m}^2 \text{h})$
- Para una T.E. de tiro mecánico: $2^2 - 3^3 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1} (10 - 15 \text{m}^3/\text{m}^2 \text{h})$

La entalpía del aire a la salida de la torre h_2 se determina mediante un balance de calor que toma en cuenta la cantidad de flujo de agua que se evapora; en estas condiciones, adoptando un factor de corrección K como coeficiente de flujo evaporado, se tiene que :

$$KG_a(h_2 - h_1) = G_L \cdot C_L(t_2 - t_2) \quad (4.13)$$

$$y, h_2 = h_1 + \frac{G_L C_L \Delta t}{K \lambda} \quad (4.14)$$

El valor de K puede aproximarse a:

$$K = 1 - 0.015 t_2$$

El enfriamiento en la torre es mayor paralelamente al flujo del aire, es decir:

$$t_2 = f(\lambda)$$

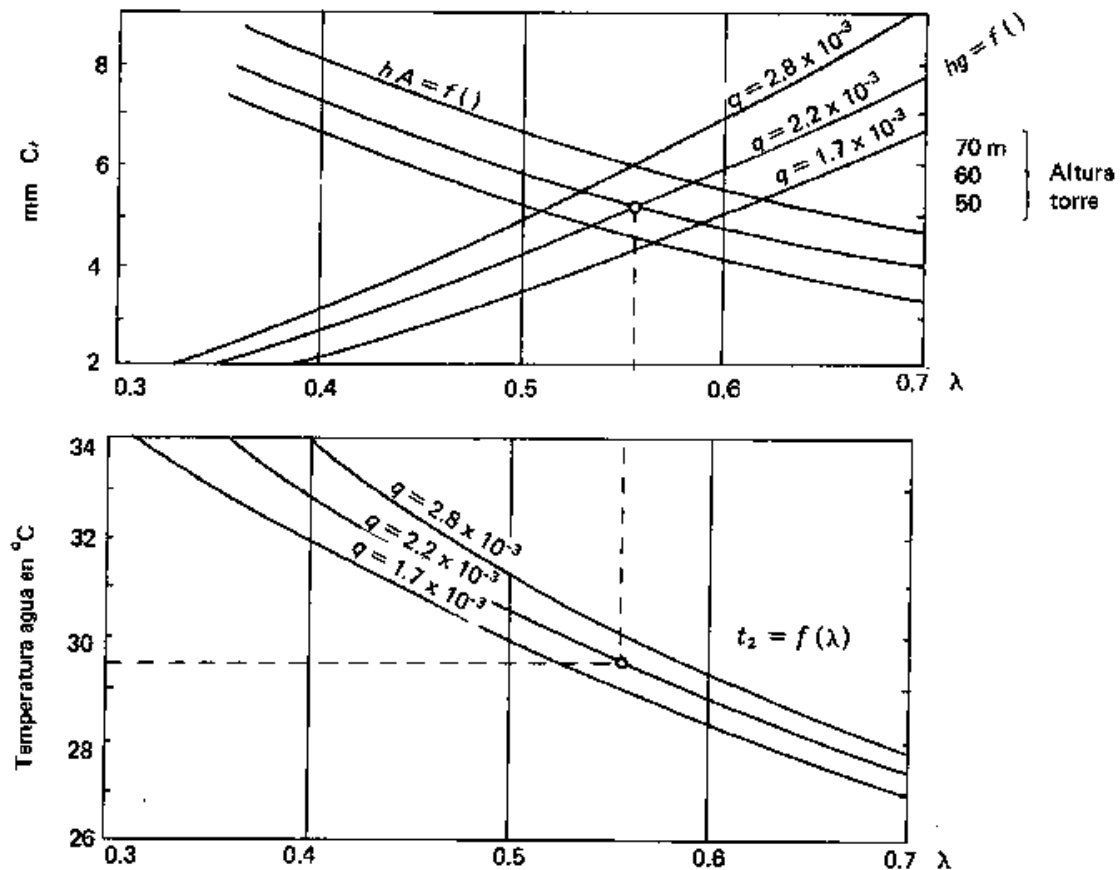


Figura 4.1 Características de una torre de enfriamiento tiro natural

La figura 4.1 muestra esta relación. Cuando el aire alcanza el 100% de humedad a la salida de la torre se da la relación teórica λ teórica. En la de tiro mecánico este depende de las características del ventilador; y en las de tiro natural, se da por la diferencia de peso entre la columna de aire en el interior de la torre y el aire exterior.

Debido a las limitaciones constructivas de las torres (alturas de 100 a 150 metros), la relación λ lambda es menor a las de tiro natural que en las de tiro mecánico. Generalmente, su valor es $\lambda < \lambda$ teóricamente.

La temperatura del agua de enfriamiento en las torres de tiro natural es más alta que en las de tiro mecánico y la temperatura del aire exterior provoca una variación mayor.

El funcionamiento de las torres de tiro natural es mejor cuando el aire es frío y húmedo. Las de tiro mecánico funcionan mejor a temperaturas exteriores mayores, como se observa en la figura 4.2.

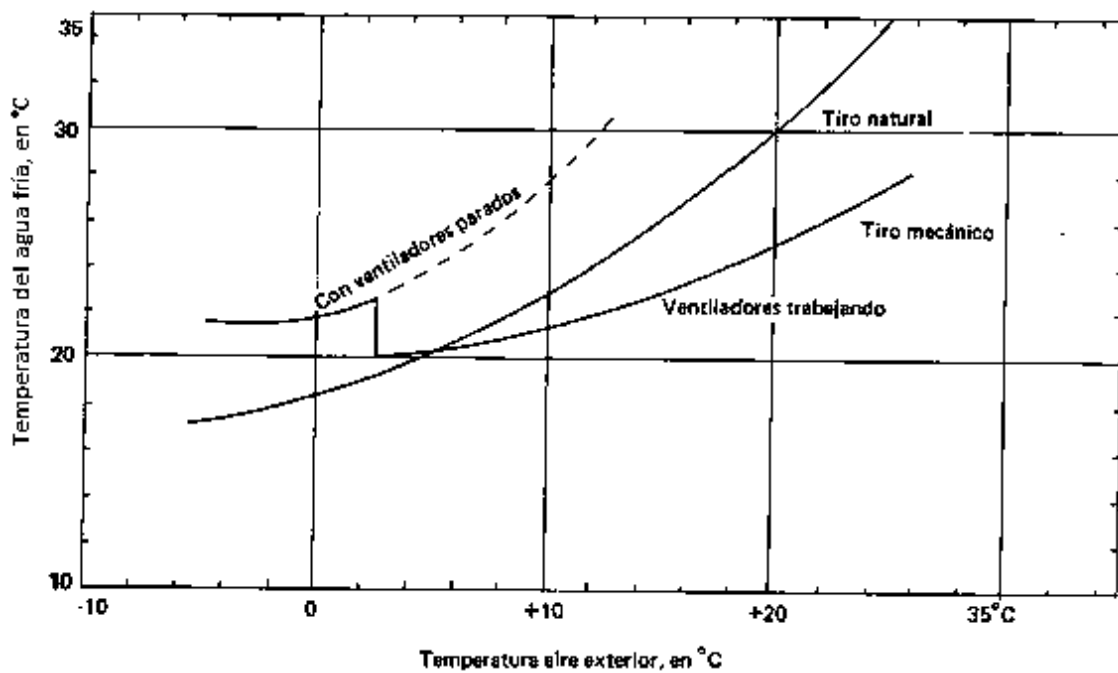


Figura 4.2 Curvas de comportamiento de torres de enfriamiento

Los fabricantes de torres de enfriamiento proporcionan curvas de temperaturas de agua de enfriamiento t_2 garantizadas, que dependen de la temperatura y humedad ($t_{sa} \phi_a$) del aire exterior, de la carga específica y el intervalo (rango) de enfriamiento. En la figura 4.3 se da el ejemplo de un diagrama de enfriamiento de una torre de tiro mecánico

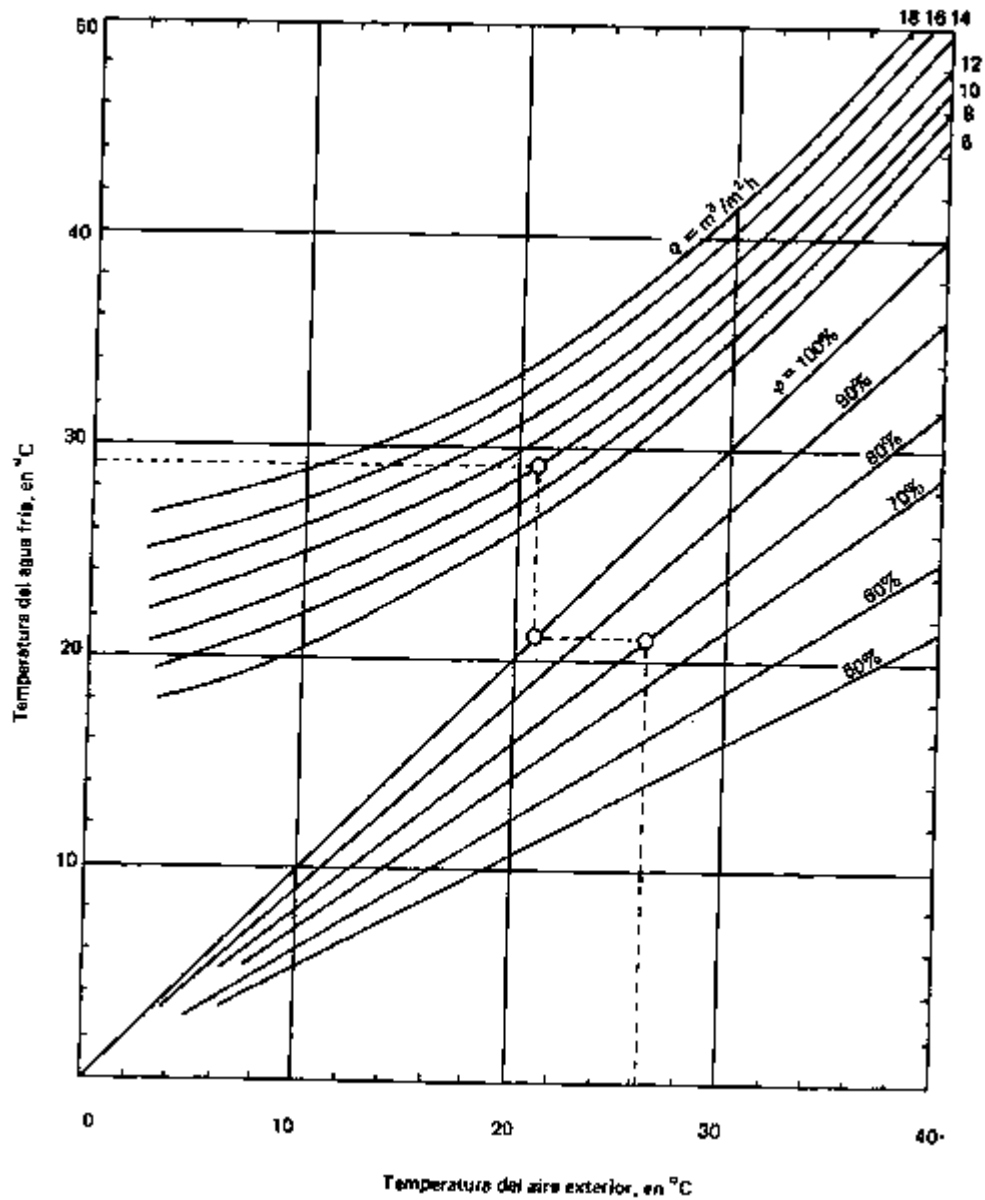


Figura 4.3 Diagrama de una torre de enfriamiento tiro mecánico

Las principales ventajas y desventajas de las torres de tiro natural y tiro mecánico son las siguientes:

a) Ventajas de tiro natural:

- Al no existir partes móviles, su funcionamiento es seguro

- Al descargarse el aire húmedo a una altura grande, no hay problema de recirculación.

b) Desventajas de tiro natural:

- Inversión inicial más grande
- Mayor superficie de la base (terreno más grande)
- Temperatura de agua de enfriamiento más elevada; al ser la aproximación δt 12 a 14 °C, se reduce la potencia de la turbina y aumenta el consumo de combustible.

a') Ventajas de tiro mecánico:

- Enfriamiento mayor, con aproximación de 5 a 10 °C por lo que turbina obtiene mayor potencia
- Mayor flexibilidad en su operación, buen comportamiento a cargas parciales y a intervalos (rangos) de enfriamiento reducidos
- Menor inversión.

b') Desventajas de tiro mecánico:

- Consumo adicional de energía de los ventiladores
- Mantenimiento más costoso; necesidad de paro anual por las partes en movimiento
- Descarga del aire húmedo a una altura cerca del suelo, con problemas de recirculación.

El sistema de enfriamiento o relleno de la torre se clasifica en 2 tipos: por salpicado y por película. En la figura 4.4 se muestran ambas.

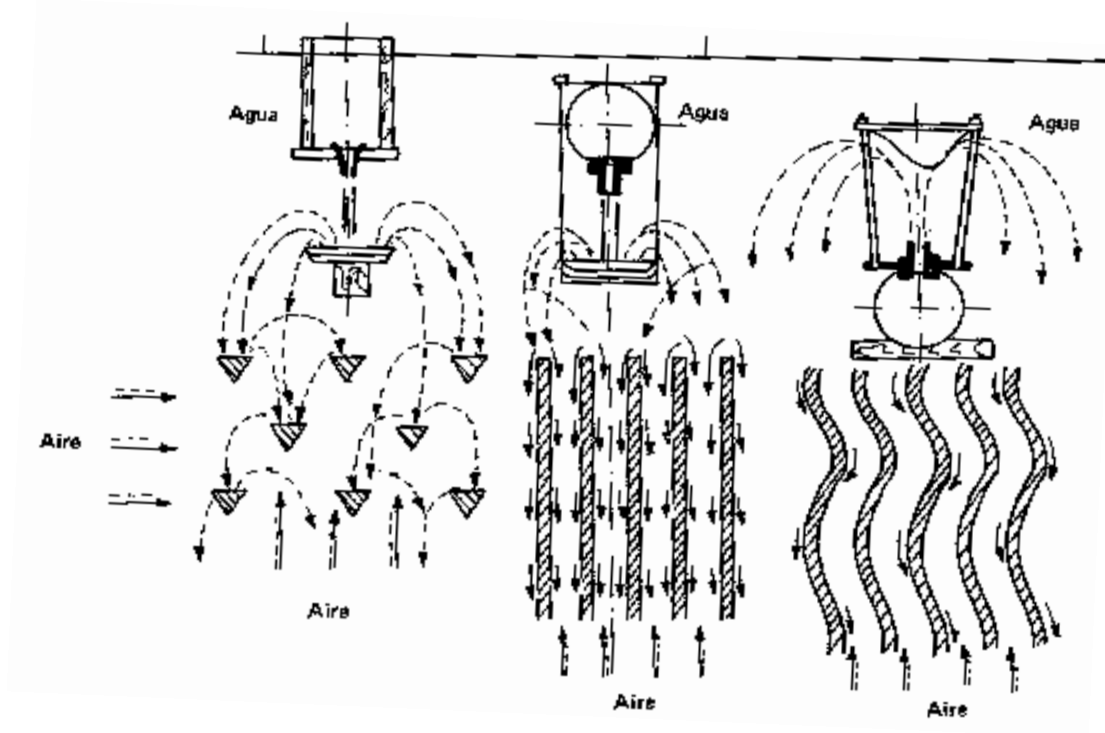


Figura 4.4 Sistema de relleno y enfriamiento de torre

La elección de tipo de torre de enfriamiento es un problema de optimización técnico-económico que depende las condiciones climáticas, la curva de utilización anual la variación de la potencia de la turbina en función de la temperatura de agua de enfriamiento y demás partes del sistema de enfriamiento.

Las necesidades cada día mayor de agua de enfriamiento y la escases de esta han obligado a utilizar torres de enfriamiento secas. Actualmente, estas torres no son competitivas en lugares donde existe agua, pues su costo es mucho mayor que el de las torres húmedas y las presiones de escape de las turbinas también son altas, con lo que se pierde potencia y se consume más combustible.

4.3 Selección de una torre de enfriamiento

De acuerdo con las características mencionadas, en México las torres de tiro natural se hallan en desventaja económica. En las plantas termoeléctricas únicamente se utilizan las de tiro mecánico.

Para seleccionar la torre óptima, se necesita conocer costos e información de variables proporcionados por los fabricantes. También se debe tomar en cuenta la relación para con las demás partes del sistema de agua de enfriamiento.

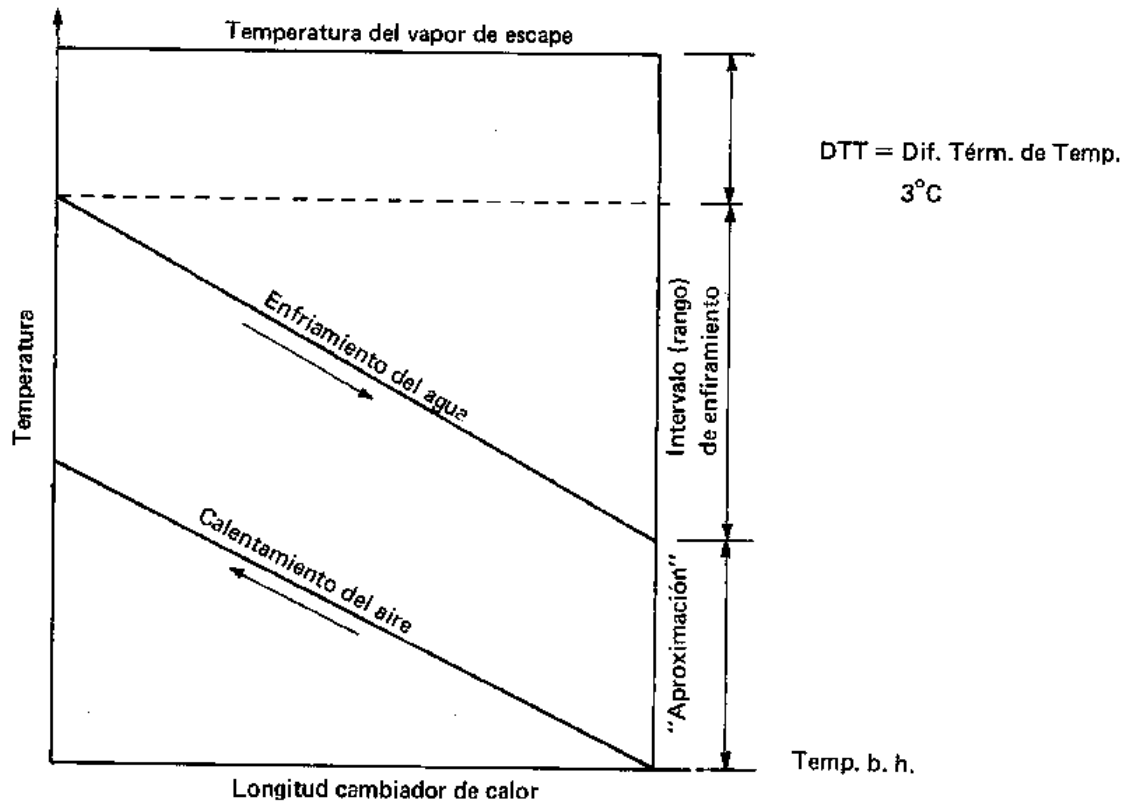


Figura 4.5 Diagrama de transferencia de calor

En la figura 4.5 se muestra un diagrama de transferencia de calor de una torre; de acuerdo con el estado del arte, se han encontrado los siguientes valores más económicos.

- La diferencia terminal de temperatura (DTT), debe ser igual o mayor de 3°C. la temperatura del vapor de escape se determina de acuerdo con la selección y optimización del ciclo de vapor.
- La temperatura del diseño del bulbo húmedo (TDBH) debe ser 5% más alta que el promedio mensual de los meses de verano. El promedio mensual mayor es menor que la máxima temperatura, que coincide normalmente con la carga eléctrica

máxima; por ello, no puede darse la capacidad de la turbina, en caso de seleccionarse el promedio, a dicha hora.

- La aproximación debe ser entre 4 y 8°C.
- La eficiencia térmica η_t , definida por:

$$\eta_t = \frac{\text{intervalo (rango)}}{\text{intervalo} + \text{aproximacion}} \quad (4.15)$$

Deberá estar entre 40 y 70% para mejores costos de la torre y componentes.

Para determinadas condiciones (y con la información anterior) se procede a elaborar el diagrama de transferencia de calor de la figura 4.6 que muestra varias torres de enfriamiento; para su evaluación, se utiliza como base la gráfica de la figura 4.7, que muestra los costos (1979) y potencia de ventiladores de torres en función del intervalo de enfriamiento (rango) y del flujo de agua. En la figura 4.8 a), b), c) se muestran las variaciones en el tamaño y costos de las torres en función de la aproximación, intervalo (rango) y flujo de agua de enfriamiento, respectivamente. Esta información, conjuntamente con los demás componentes del sistema de agua de enfriamiento, se evalúa en la forma mostrada en la tabla 4.1. El costo menor de inversión y operación a valor presente será la solución óptima.

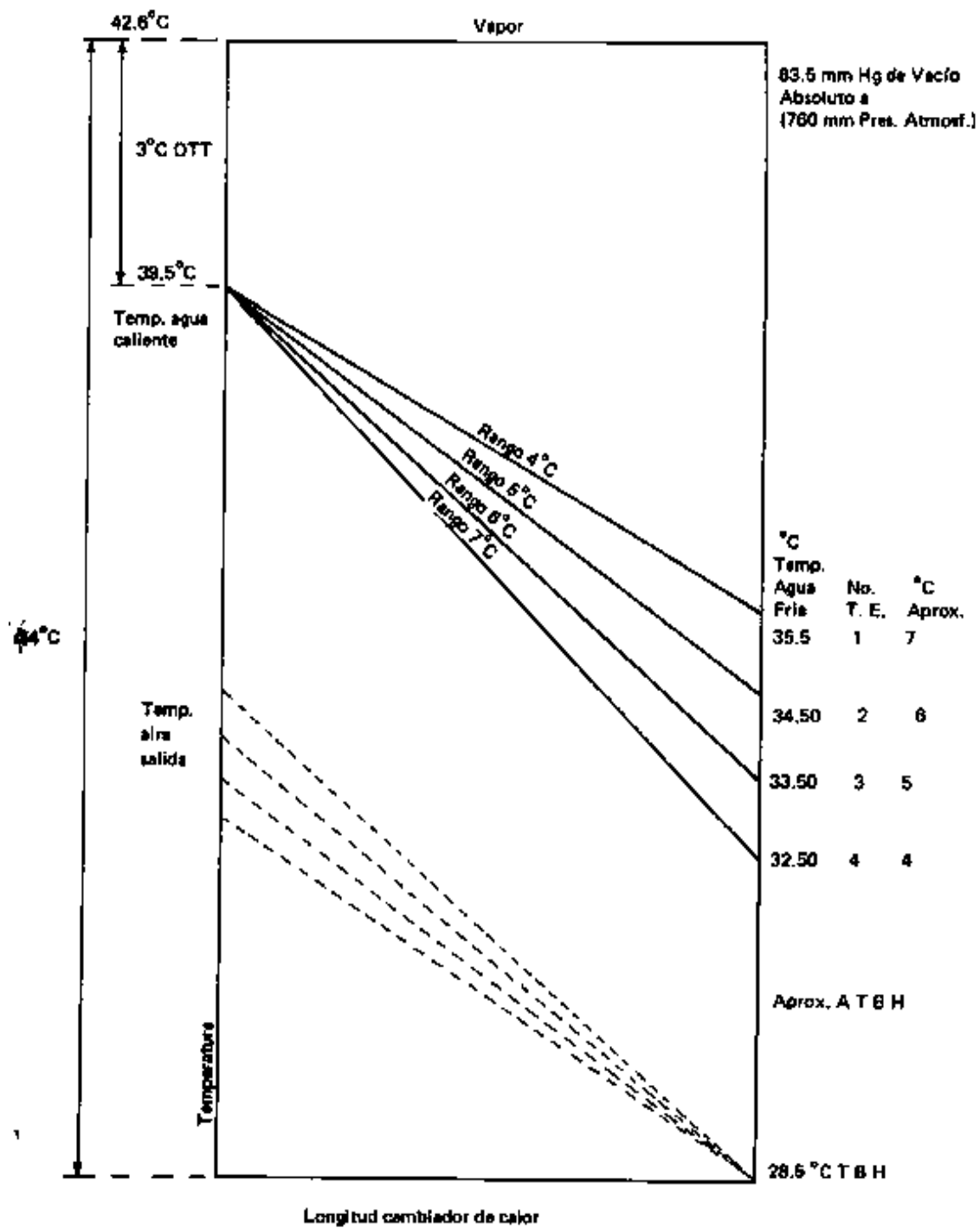


Figura 4.6 Diagrama de transferencia de calor para selección

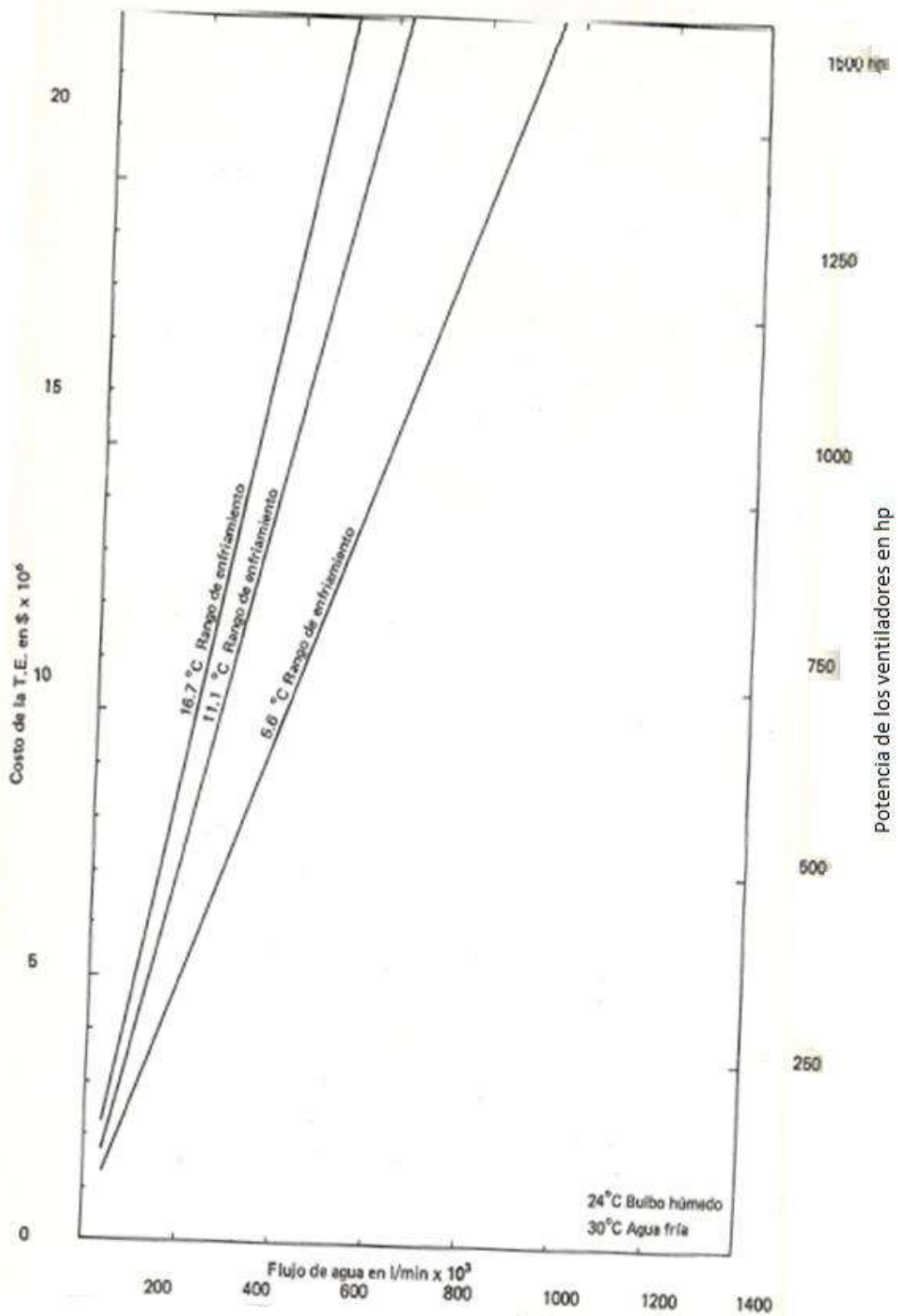


Figura 4.7 Costo y potencia de ventiladores de torres de enfriamiento

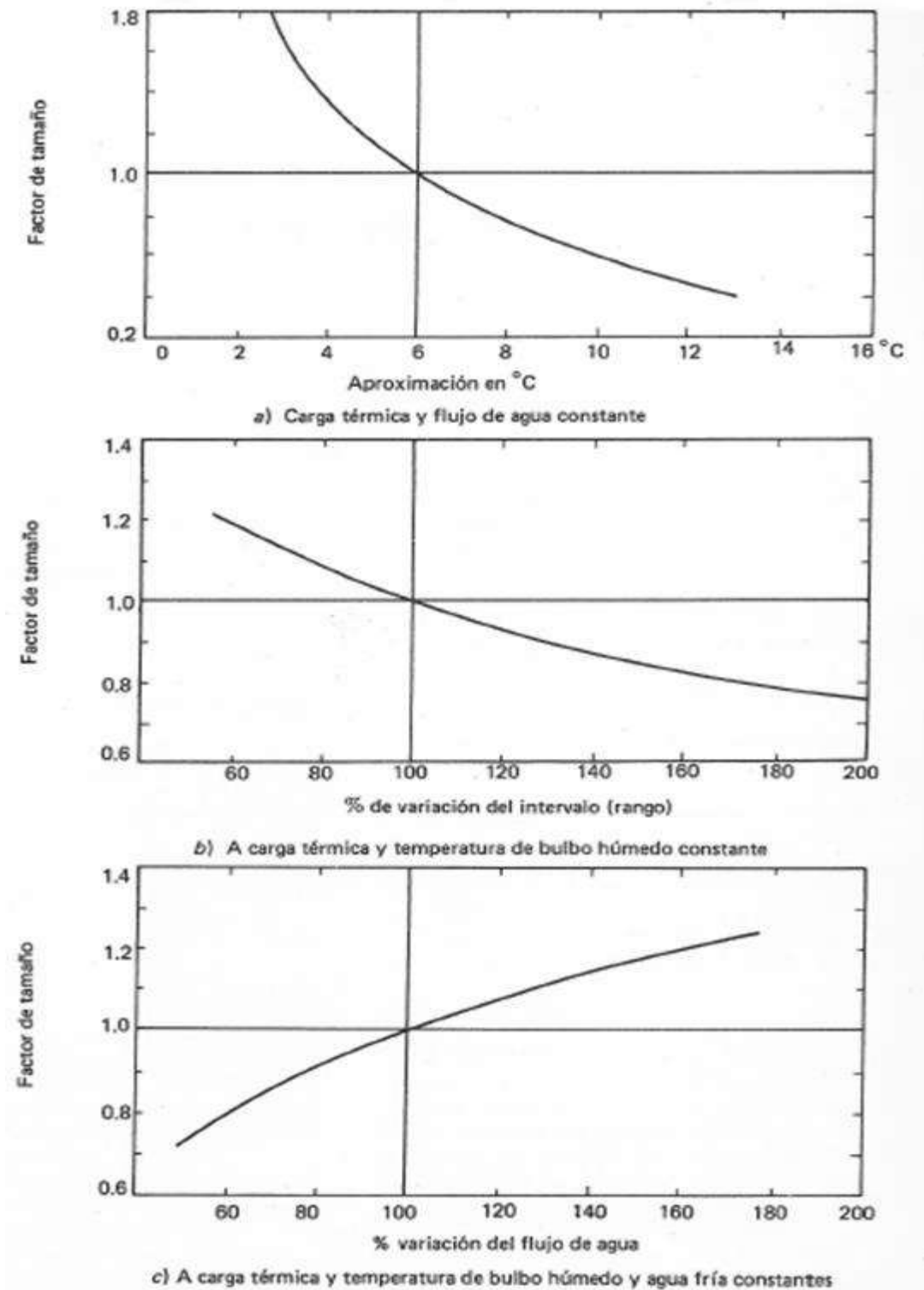


Figura 4.8 Variación de tamaño de las torres de enfriamiento

	Parte/torre núm.	1	2	3	4	5
1	Intervalo de enfriamiento rango					
2	Aproximación					
3	Flujo de agua de enfriamiento					
4	Potencia de ventiladores					
5	Potencia bombas de agua de enfriamiento					
6	Costo de operación de ventiladores					
7	Costo de bombas de agua de enfriamiento					
8	Costo de operación bombas a. de c.					
9	Costo T.E. tiro mecánico					
10	Costo T.E. tiro natural					
11	Penalización por capacidad					
12	Penalización por combustible					
13						
14	Totales					
15	Torre de enfriamiento tiro mecánico					
16	Torre de enfriamiento tiro natural					

Tabla 4.1 Evaluación de una torre de enfriamiento

4.4 Balance de masa.

El principio de conservación de la masa para un volumen de control en estado permanente se expresa como: “El cambio neto (incremento o disminución) de la masa total contenida dentro del volumen de control durante el mismo intervalo de tiempo, Δt , es igual a cero”. Esto se expresa como

$$\left(\text{Masa total que entra} \right) - \left(\text{Masa total que sale} \right) = 0$$

(4.16)

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0$$

En la figura 4.9 se muestra esquemáticamente un volumen de control que cuenta con varias entradas y salidas de masa, y que se usa para describir el balance de masa en un volumen de control en estado permanente.

Para este volumen de control, la ecuación de balance de masa expresada en la ecuación 4.16 queda como:

$$\dot{m}_{e,1} + \dots + \dot{m}_{e,i} + \dots + \dot{m}_{e,n} - (\dot{m}_{s,1} + \dots + \dot{m}_{s,i} + \dots + \dot{m}_{s,n}) = 0 \quad (4.17)$$

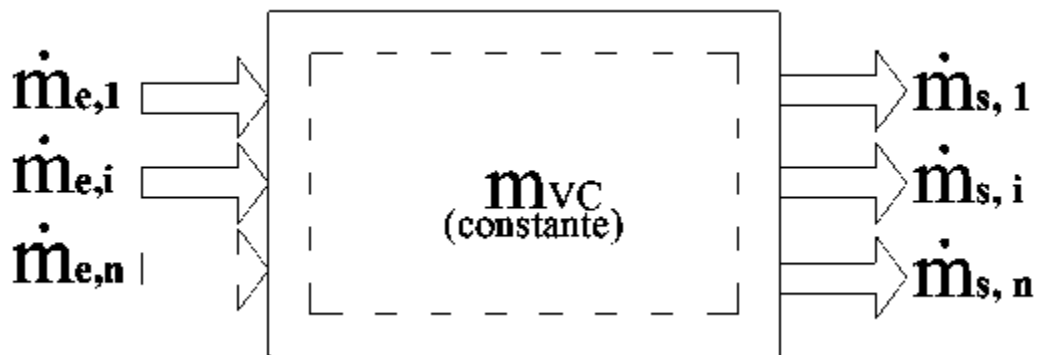


Figura 4.9 Flujo de masa en un volumen de control.

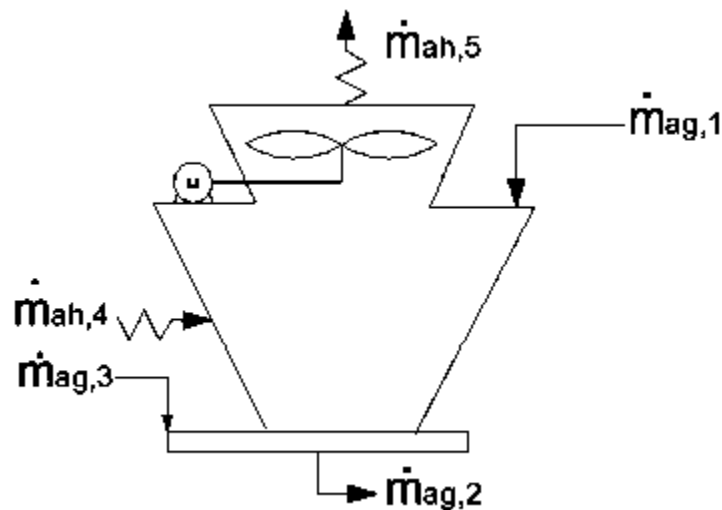


Figura 4.10 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de masa.

En el caso de las torres de enfriamiento, los flujos de masa están compuestos por agua y aire. En el caso particular del aire, este está compuesto por aire seco y vapor de agua. La representación esquemática de los flujos de masa en la torre de enfriamiento se muestra en la figura 4.10.

El flujo másico de aire húmedo se expresa como la suma de flujo de aire seco más el flujo de vapor de agua contenido:

$$\dot{m}_{ah} = \dot{m}_{as} + \dot{m}_v$$

La aplicación del balance de masa para la torre de enfriamiento en estado permanente, se describe a continuación:

- a) Balance de masa para el aire seco:

$$\dot{m}_{as4} = \dot{m}_{as5} = \dot{m}_{as} \quad (4.18)$$

- b) Balance de masa para el agua:

$$\dot{m}_{ag1} + \dot{m}_{ag3} + \dot{m}_{v4} = \dot{m}_{ag2} + \dot{m}_{v5} \quad (4.19)$$

- c) Debido a que:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{as}\omega \quad (4.20)$$

- d) Por lo tanto la ecuación (4.20) se reescribe de la forma siguiente:

$$\dot{m}_{ag1} + \dot{m}_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4 = \dot{m}_{ag2} + \dot{m}_{as5}\omega_5 \quad (4.21)$$

4.5 Balance de energía.

Este balance corresponde al principio de conservación de energía (primera ley de la termodinámica). Para un volumen de control, en estado permanente como se muestra en la figura 4.18 en donde se indican los diferentes flujos de energía, se tiene:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \dot{W}_{vc} - \sum \dot{E}_s = 0 \quad (4.21)$$

Los flujos de energía que entran y salen con los flujos de masa son:

$$\dot{E} = \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right) \quad (4.22)$$

Por lo que la ecuación (4.21) se escribe como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{W}_{vc} - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (4.23)$$

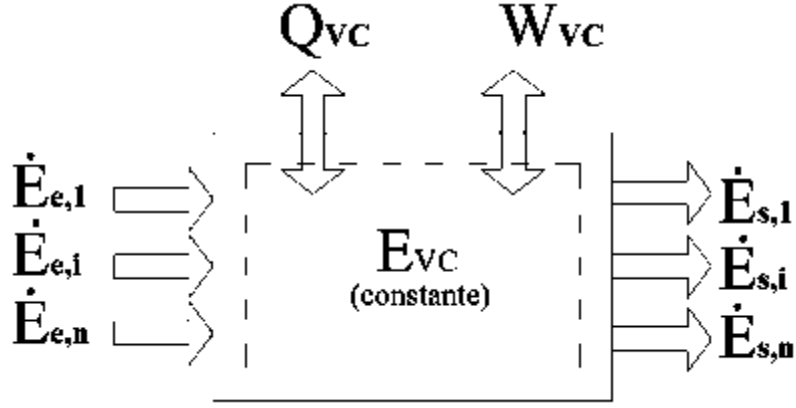


Figura 4.11 Flujos de energía en volumen de control.

Y de forma alternativa, esta misma expresión se escribe:

$$\underbrace{\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{flujo de energía de entrada}} = \underbrace{\dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{flujo de energía de salida}} \quad (4.24)$$

Aplicando el balance de energía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura 4.11, en la que no hay intercambio de calor y trabajo con el exterior,

$$\dot{Q}_{vc} = 0, \dot{W}_{vc} = 0 \quad (4.25)$$

e ignorando la variación de energía cinética y potencial tanto para la corriente de aire seco como para el agua, se obtienen las siguientes expresiones:

e) Balance para el aire seco.

$$\dot{m}_{as4} h_{as4} = \dot{m}_{as5} h_{as5} \quad (4.26)$$

f) Balance para el agua.

$$\dot{m}_{ag1} h_{ag1} + \dot{m}_{ag3} h_{ag3} + \dot{m}_{v4} h_{v4} = \dot{m}_{ag2} h_{ag2} + \dot{m}_{v5} h_{v5} \quad (4.27)$$

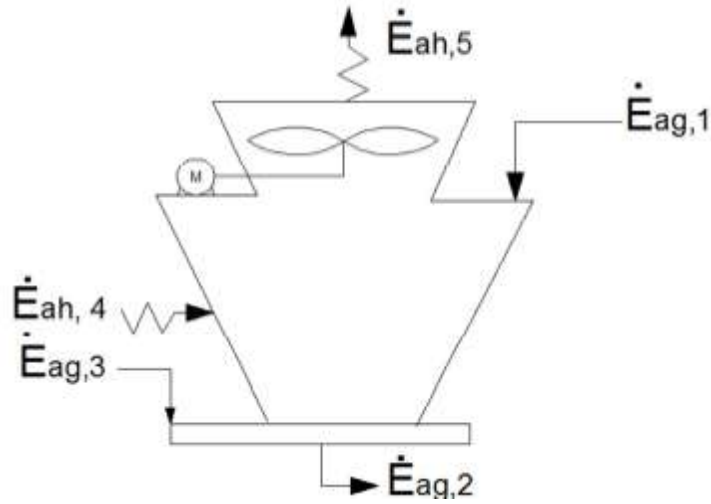


Figura 4.12 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de energía.

Combinando los balances de energía para las corrientes de agua y de aire (ecuaciones 4.26 y 4.27) se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ag1}h_{ag1} + \dot{m}_{ag3}h_{ag3} + \dot{m}_{v4}h_{v4} + \dot{m}_{as4}h_{as4} - \dot{m}_{ag2}h_{ag2} - \dot{m}_{v5}h_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} = 0 \quad (4.28)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}h_{ag1} + \dot{m}_{ag3}h_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4h_{v4} + \dot{m}_{as4}h_{as4} - \dot{m}_{ag2}h_{ag2} - \dot{m}_{as5}\omega_5h_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} = 0 \quad (4.29)$$

En la figura 4.12 se ilustra esquema de una torre de enfriamiento con flujo de energía.

4.6 Balance de entropía.

Un balance de energía por sí sólo no permite predecir la dirección en la que un proceso se desarrolla, ni permite distinguir los procesos que son posibles de los que no lo son. Para resolver esta situación se utiliza la segunda ley de la termodinámica, para complementar la información proporcionada por la primera ley.

Los enunciados más comunes de la segunda ley de la termodinámica son:

1. Enunciado de Clausius.- Es imposible la existencia de un sistema que pueda funcionar de modo que su único efecto sea una transferencia de energía mediante calor de un cuerpo frío a otro más caliente.
2. Enunciado de Kelvin-Planck.- Es imposible construir un sistema que, operando según un ciclo termodinámico, ceda una cantidad neta de trabajo a su entorno mientras recibe energía por transferencia de calor procedente de un único reservorio térmico.

Otra información valiosa que proporciona la segunda ley de la termodinámica es la evaluación de las irreversibilidades que se presentan en los procesos y que son evaluadas a través de la generación de entropía. La segunda ley de la termodinámica se puede expresar a través de un balance de entropías, que para un volumen de control en estado estacionario como se muestra en la figura 4.10, se expresa por la ecuación siguiente:

$$\sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{S}_e - \sum \dot{S}_s = 0 \quad (4.30)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{vc} \quad (4.31)$$

En la ecuación (4.31) aparecen los términos de transferencia de entropía por transferencia de calor y por transferencia de masa, así como la generación de entropía, debido a las irreversibilidades que ocurren en el volumen de control.

Aplicando el balance de entropía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura 4.13, para la corriente de aire seco como para el agua, se obtienen las siguientes expresiones:

g) Balance para el aire seco.

$$\dot{S}_{as4} - \dot{S}_{as5} + \dot{\sigma}_{gen,as} = 0 \quad (4.32)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$\dot{m}_{as4}S_{as4} - \dot{m}_{as5}S_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (4.33)$$

h) Balance para el agua.

$$\dot{S}_{ag1} + \dot{S}_{ag3} + \dot{S}_{v4} - (\dot{S}_{ag2} + \dot{S}_{v5}) + \dot{\sigma}_{gen,ag} = 0 \quad (4.34)$$

En función de las entalpías específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}S_{ag1} + \dot{m}_{ag3}S_{ag3} + \dot{m}_{v4}S_{v4} - (\dot{m}_{ag2}S_{ag2} + \dot{m}_{v5}S_{v5}) + \dot{\sigma}_{gen,ag} = 0 \quad (4.35)$$

Combinando los balances de entropía para las corrientes de agua y de aire (ecuaciones 4.34 y 4.35) se obtiene la siguiente expresión

$$\dot{m}_{ag1}S_{ag1} + \dot{m}_{ag3}S_{ag3} + \dot{m}_{v4}S_{v4} + \dot{m}_{as4}S_{as4} - \dot{m}_{ag2}S_{ag2} - \dot{m}_{v5}S_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (4.36)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}S_{ag1} + \dot{m}_{ag3}S_{ag3} + \dot{m}_{sa4}\omega_4S_{v4} + \dot{m}_{as4}S_{as4} - \dot{m}_{ag2}S_{ag2} - \dot{m}_{sa5}\omega_5S_{v5} - \dot{m}_{as5}h_{as5} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (4.37)$$

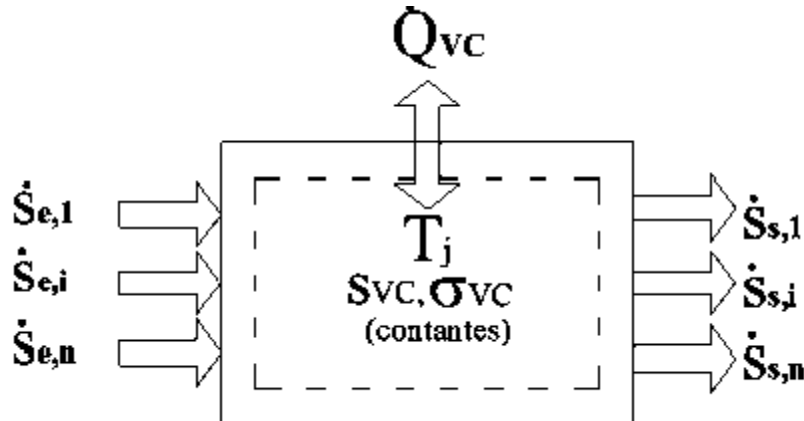


Figura 4.13 Flujos de entropía para un volumen de control.

La figura 4.13 ilustra la dirección de los flujos de entropía en una torre de enfriamiento.

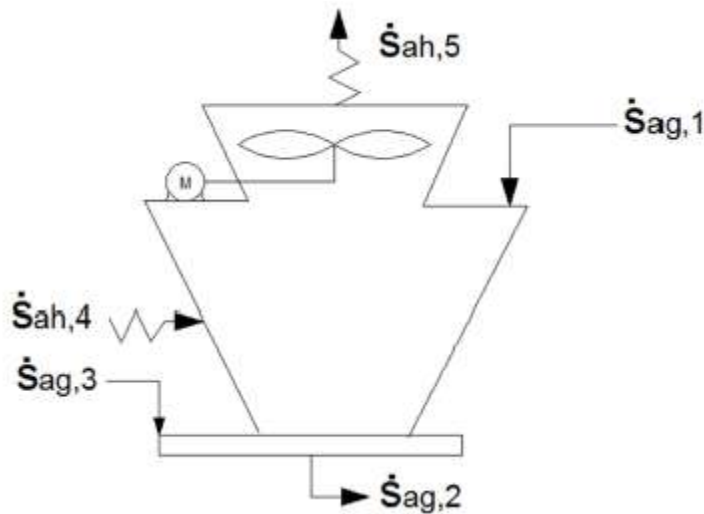


Figura 4.14 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de entropía.

La figura 4.14 muestra los flujos de entropía finales con una torre de enfriamiento

4.7 Balance de exergía.

La exergía es el trabajo máximo teórico que puede desarrollar un sistema, al pasar de su estado termodinámico inicial al estado de equilibrio con sus alrededores o medio ambiente de referencia.

Mientras que la energía es una medida de la cantidad, la exergía es una medida de la calidad de la energía. La exergía como la energía, puede ser transportada a través del límite de un sistema. Para cada transferencia de energía, existe una correspondiente transferencia de exergía.

El balance de exergía es una herramienta que sirve para identificar el tipo, localización, y magnitud de las pérdidas de energía. La identificación y cuantificación de estas pérdidas permite la evaluación y la propuesta de mejoras a los sistemas termodinámicos.

El balance exergético es un método que emplea los principios de conservación de la masa y la energía junto con el segundo principio de la termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos.

Para un volumen de control en estado permanente como se muestra en la figura 4.14 el balance de exergía queda expresado por:

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \sum_s \dot{m}_s a_{fs} - \dot{A}_d = 0 \quad (4.38)$$

La ecuación (4.35) establece que la destrucción de exergía es igual a la diferencia entre la suma de las exergías de entrada y la suma de las exergía de salida.

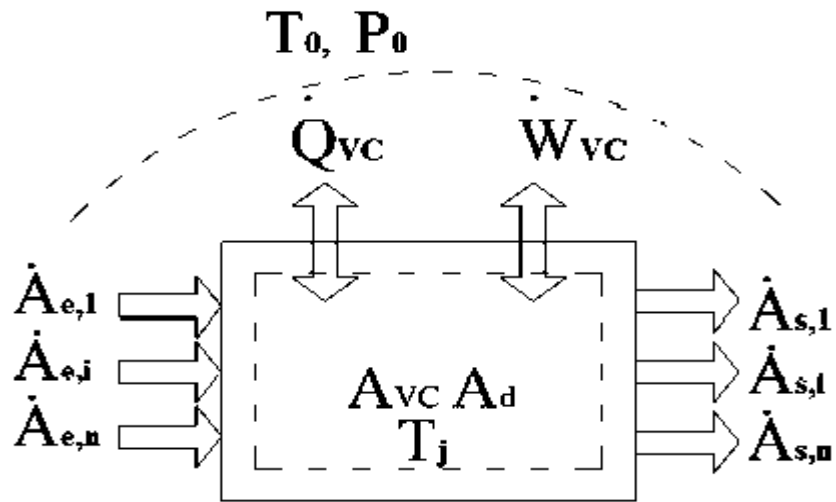


Figura 4.15 Flujos de exergía en un volumen de control.

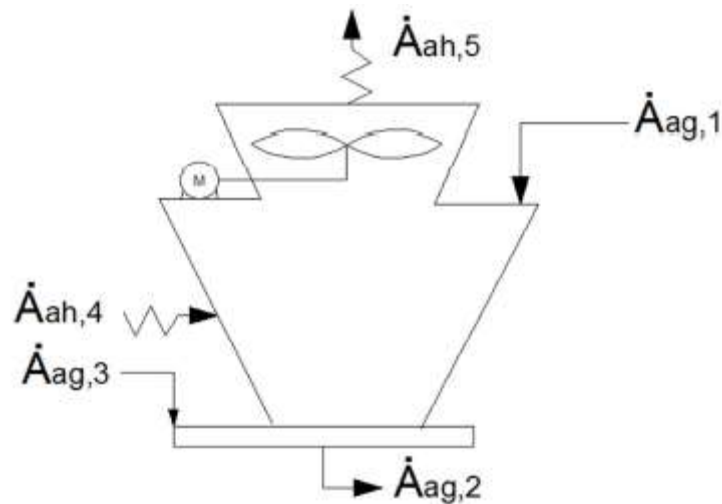


Figura 4.16 Esquema de la torre de enfriamiento, indicando los flujos de exergía.

Para un flujo de masa, la exergía total se expresa por la ecuación siguiente.

$$A_t = A_c + A_p + A_f + A_q \quad (4.40)$$

Ignorando los cambios de energía cinética y potencial, la exergía total se expresa por la ecuación siguiente:

$$A_t = A_f + A_q \quad (4.41)$$

Considerando solo la exergía específica total, esta queda como:

$$a_t = a_f + a_q \quad (4.42)$$

Donde

$$a_f = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (4.43)$$

$$a_q = \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \quad (4.44)$$

Aplicando el balance de exergía a la torre de enfriamiento mostrada en la figura 4.15, se obtienen las siguientes expresiones:

i) Balance para el aire seco.

$$\dot{m}_{as4}a_{as4} - \dot{m}_{as5}a_{as5} - \dot{A}_{d,as} = 0 \quad (4.45)$$

j) Balance para el agua.

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{v4}a_{v4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{v5}a_{v5} - \dot{A}_{d,ag} = 0 \quad (4.46)$$

Combinando los balances de exergía para las corrientes de agua y de aire (ecuaciones 4.45 y 4.46) se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{v4}a_{v4} + \dot{m}_{as4}a_{as4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{v5}a_{v5} - \dot{m}_{as5}a_{as5} - \dot{A}_d = 0 \quad (4.47)$$

En función de las humedades específicas se tiene:

$$\dot{m}_{ag1}a_{ag1} + \dot{m}_{ag3}a_{ag3} + \dot{m}_{as4}\omega_4a_{v4} + \dot{m}_{as4}a_{as4} - \dot{m}_{ag2}a_{ag2} - \dot{m}_{as5}\omega_5a_{v5} - \dot{m}_{as5}a_{as5} - \dot{A}_d = 0 \quad (4.48)$$

4.8 Eficiencia energética y exergética

Las irreversibilidades acompañan siempre a las corrientes dentro de los dispositivos de un volumen de control y degradan el comportamiento de estos dispositivos. Es por esta razón que es útil disponer de parámetros para comparar el comportamiento real con el que se alcanzaría en condiciones ideales. En el desarrollo de estos parámetros es necesario reconocer que el flujo real a través de muchos dispositivos de ingeniería es prácticamente adiabático. El comportamiento ideal de los equipos tiene lugar cuando el flujo es también internamente reversible y, por tanto, isoentrópico. Así una medida para ver si se consigue es comparar el comportamiento real con el comportamiento a condiciones isoéntropicas, dicha comparación es conocida como eficiencia energética.

Dado que la exergía tiene su origen en la segunda ley de la termodinámica, un parámetro de comportamiento de un volumen de control basado en el concepto de exergía, se conoce como eficiencia de segunda ley (eficiencia exergética). La eficiencia energética mide la forma en que se usa la energía, mientras que la eficiencia exergética indicara la forma en que se utilizara la exergía.

a) Eficiencia energética

La eficiencia energética es una medida del desempeño de una maquina térmica, y es la fracción del calor de entrada que es convertido a la salida en el trabajo neto. Para las máquinas térmicas la salida deseada es el trabajo neto, mientras que la entrada que se requiere es la cantidad de calor suministrado al fluido. En términos generales, la eficiencia energética se expresa como la relación entre la salida deseada entre la entrada requerida, quedando así:

$$\eta_I = \frac{\text{Salida Deseada}}{\text{Entrada Requerida}} \quad (4.49)$$

La eficiencia energética de la torre de enfriamiento se define como la relación entre la transferencia real de energía y la máxima transferencia de energía posible.

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{m_{ag} C_{p,ag} \Delta T_{ag}}{q_{t,max}(T_{ag,e} - T_{e,ah})} \quad (4.50)$$

Por otra parte la eficiencia energética para una torre de enfriamiento se obtiene de la siguiente expresión:

$$\eta_I = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{bh,e}} \quad (4.51)$$

Aplicando la ecuación (4.51), a la torre de enfriamiento de la figura 4.16, se tiene:

$$\eta_I = \frac{T_{ag,1} - T_{ag,2}}{T_{ag,1} - T_{bh,e}} \quad (4.52)$$

b) Eficiencia exergética.

La eficiencia de segunda ley, es la medida de las pérdidas por irreversibilidades que se dan en el proceso, y se expresa como:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (4.53)$$

La eficiencia de segunda ley, puede ser expresada en términos de destrucción de energía y exergía suministrada:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{\Sigma A_s} \quad (4.54)$$

Aplicado la ecuación (4.54) a la torre de enfriamiento de la figura 1.8, la eficiencia de segunda ley se expresa como sigue:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ag,e} + A_{ag,rep}} = 1 - \frac{A_d}{A_{ag,1} + A_{ag,3} - A_{ag,2}} \quad (4.55)$$

La eficiencia exergética mide la fracción de exergía total que entra al sistema que no se pierde por la irreversibilidad de los procesos que se efectúan en el sistema.

Si el proceso fuera ideal, es decir sin destrucción de exergía (sin irreversibilidades), la eficiencia exergética sería del 100%.

4.9 Torre de enfriamiento de una central termoeléctrica de 550 MW

4.9.1 Descripción de la central termoeléctrica

La Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México se encuentra ubicada en el municipio de Acolman Estado de México.

Esta central es una de las principales fuentes de generación de energía eléctrica de México y forma parte del “sistema interconectado nacional”, integrándose a éste con las líneas de

transmisión de 85 y 230 kV, aportando el 2.13 % de la energía eléctrica a nivel nacional y el 14% de la energía que necesita el DF y su Zona Metropolitana.

La central tiene una capacidad instalada de 1 115.5 MW y está constituida por siete unidades generadoras, con las capacidades, ciclo de operación y tipo de turbina indicadas en la Tabla 4.2.

Unidad	Inicio operación comercial	Tipo de ciclo	Tipo de turbina	Capacidad (MW)
1	15 Abril 1963	Vapor (Rankine regenerativo con recalentamiento)	Turbina de vapor	150
2	12 Febrero 1971	Vapor (Rankine regenerativo con recalentamiento)	Turbina de vapor	158
3	1 Diciembre 1970	Vapor (Rankine regenerativo con recalentamiento)	Turbina de vapor	158
4	3 Febrero 1974	Vapor (Rankine regenerativo con recalentamiento)	Turbina de vapor	300
5	27 Abril 2002	Gas (Joule-Brayton)	Turbina de gas	116.5
6	27 Mayo 2002	Gas (Joule-Brayton)	Turbina de gas	116.5
7	27 Mayo 2002	Gas (Joule-Brayton)	Turbina de gas	116.5

Tabla 4.2 Capacidades de las Unidades de la CTVM.

4.9.2 Descripción del Ciclo Híbrido

El ciclo híbrido está conformado por las unidades 4, 5, 6 y 7. Las turbinas de gas y los recuperadores de calor (HRSG) están conectados con la unidad 4, formando lo que se denomina como “Ciclo Híbrido”. Este arreglo permite cuatro tipos de operaciones: a) ciclo convencional, b) ciclo híbrido, c) ciclo combinado y d) ciclo abierto. Como el modo de operación híbrido es el de mayor generación y eficiencia, se convierte en el modo predominante de operación, y su diagrama se muestra en la figura 4.17.

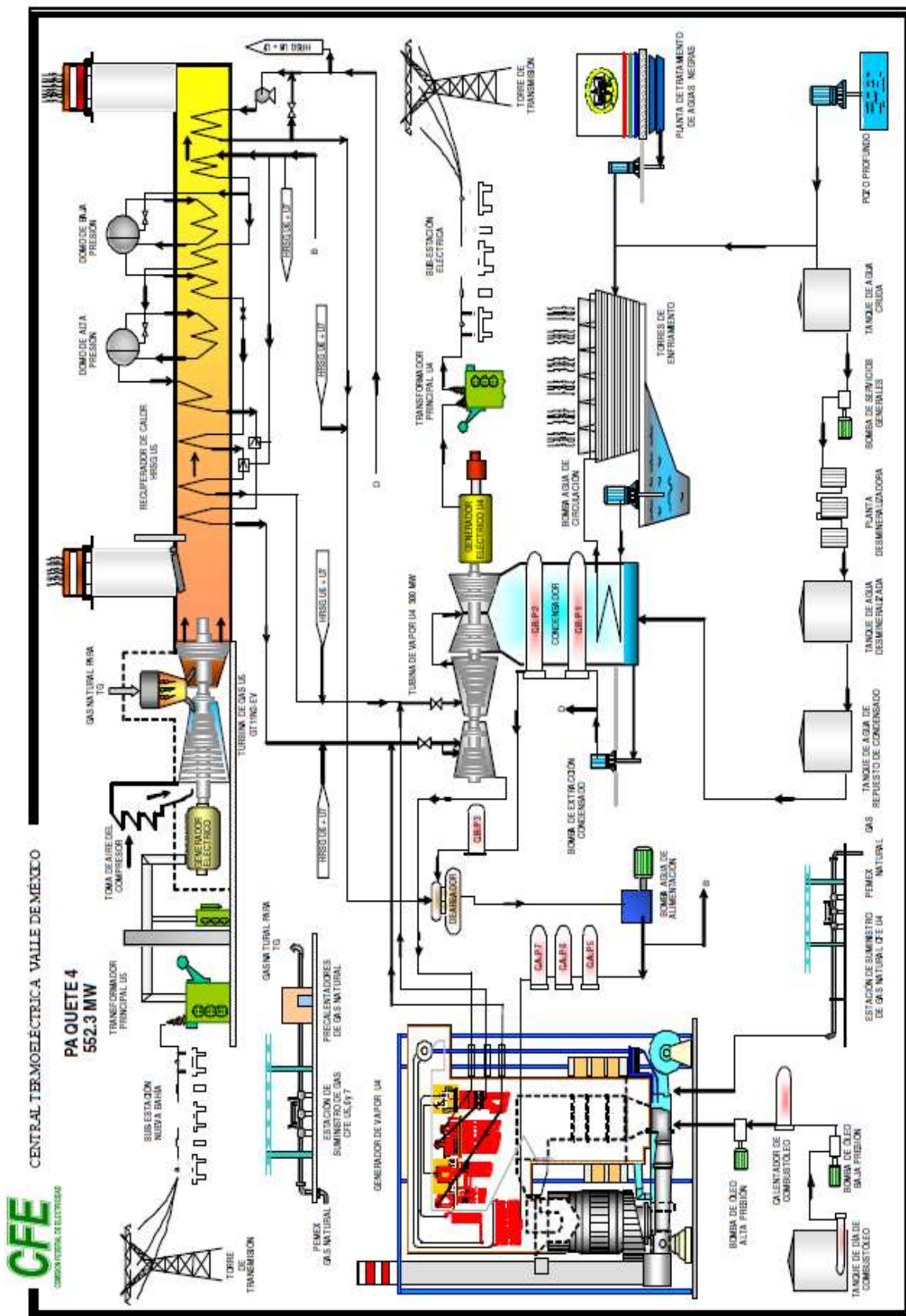


Figura 4.17 Diagrama del proceso de generación de energía eléctrica de la Central Termoeléctrica Valle de México de Ciclo Híbrido.

El proceso de generación de ciclo híbrido, inicia con la transformación de la energía química del combustible en energía calorífica tanto en el generador de vapor como la cámara de combustión de las turbinas de gas. Por una parte la energía producida en el generador de vapor es utilizada para producir vapor de agua de alta presión y alimentar a la turbina de vapor, la cual transforma esta energía en energía mecánica.

Por otra parte la energía calorífica de la cámara de combustión se utiliza primeramente en la turbina de gas, para convertir esta energía en energía mecánica, las turbinas de gas están conectadas con un generador eléctrico donde se transforma esta energía mecánica de giro en energía eléctrica. Posteriormente los gases de combustión son aprovechados en los recuperadores de calor para producir vapor de alta presión, el vapor generado en los recuperadores de calor se mezcla con el vapor del generador de vapor para alimentar a la turbina de vapor en la sección de alta presión, donde se transforma la energía química en energía mecánica de giro, para posteriormente transformarse en energía eléctrica en el generador eléctrico.

Luego que el vapor sale de la turbina de alta presión, es regresado al generador vapor para recalentarlo a su temperatura original, esta etapa se conoce como recalentado frío, este vapor regresa a la sección de presión intermedia de la turbina como vapor recalentado caliente, para expandirse en las secciones de intermedia y baja presión de la turbina hasta el nivel de presión del condensador.

El vapor recalentado frío se divide en dos flujos uno que alimenta al recalentador del generador de vapor y otro para los tres HRGS.

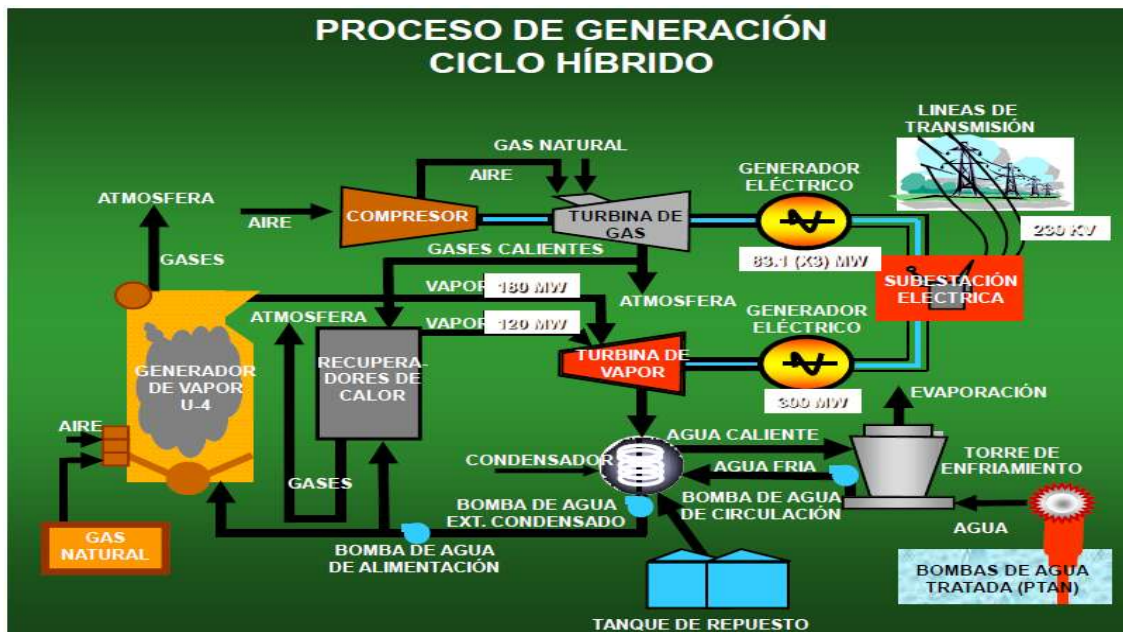


Figura 4.18 Diagrama simplificado del proceso de generación ciclo híbrido.

En la figura 4.18 se muestra el esquema generalizado del proceso de generación de una planta de ciclo híbrido.

4.9.3 Descripción de la torre de enfriamiento

El sistema de enfriamiento o sistema de agua de circulación tiene la función de proporcionar el agua para el enfriamiento y condensación del vapor, así como el enfriamiento de los equipos auxiliares como son ventiladores, bombas etc., y para que estos se mantengan a temperaturas adecuadas que les permitan a estos operar en condiciones normales. Este sistema tiene la particularidad de operar con agua tratada, la cual proviene de la planta de tratamiento de la planta.

Se necesita un gran volumen de agua para la condensación del vapor, siendo proporcional a la cantidad de potencia generada, en aproximadamente 1 l/s de agua por cada MW generado, por lo que la unidad 4, que tiene una capacidad de generación 300 MW requiere 300 l/s de agua de repuesto.

Los equipos principales del sistema de enfriamiento son:

- Torre de enfriamiento.
- Bombas de agua de circulación.
- Condensador principal.

En este sistema, el vapor que escapa de la turbina de vapor fluye sobre la parte exterior de los tubos del condensador, condensándose y transfiriendo calor al agua de circulación a través de los tubos, es decir, cediendo calor latente del vapor a calor sensible del agua de circulación. El agua caliente de circulación que abandona el condensador va a la torre de enfriamiento donde fluye hacia la parte inferior a través del relleno de la misma, donde se fracciona el agua en pequeñas gotas para aumentar la superficie de contacto entre el agua y el aire, logrando así una mejor transferencia de calor (el flujo de aire es suministrado por los ventiladores de la torre). El agua de circulación después de haber sido enfriada llega a la pileta donde se colecta, y de ahí se bombea al condensador para cerrar el ciclo de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento del Ciclo Híbrido se muestra en la figura 4.19.

4.9.4 Torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica Valle de México de Ciclo Híbrido es una torre húmeda, de tiro inducido y flujo cruzado. Tiene la función de enfriar el agua que retorna del condensador, siendo la temperatura de esta mayor a la que entró a todo el equipo. La torre de enfriamiento dispone de 10 ventiladores de 8 aspas regulables cada uno, para dar servicio a sus respectivas celdas de enfriamiento, y sus conos de descarga, localizados en la parte superior de la torre; 2 charolas de distribución y 2 cabezales de descarga de agua caliente proveniente del condensador localizadas en la parte superior de la misma. El agua enfriada es recuperada en la pileta de descarga.

En la figura 4.20 se muestra un diagrama de la torre de enfriamiento y sus partes principales.

La torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México fue diseñada para enfriar el agua de una temperatura de 39.44 °C a 25.5°C, (rango de enfriamiento 13.94 °C) a una temperatura ambiental de bulbo húmedo de 14.89 °C, una temperatura de bulbo seco de 25 °C y una presión barométrica de 586 mmHg (0.78051) , con una humedad relativa del 24.63%, con una aproximación de enfriamiento de 10.62°C ($T_{eag}-T_{bh}$) y un flujo másico de agua de enfriamiento de 7.192 m³/s.

El agua de circulación caliente que es descargada en la parte superior de la torre se pone en contacto con el aire que es succionado por los ventiladores de la misma, a través del relleno

de la torre que retarda la caída del agua caliente, para aumentar así el tiempo y la superficie de contacto entre el agua y el aire, antes que esta sea recolectada en la pileta de descarga y el agua regrese al ciclo nuevamente.

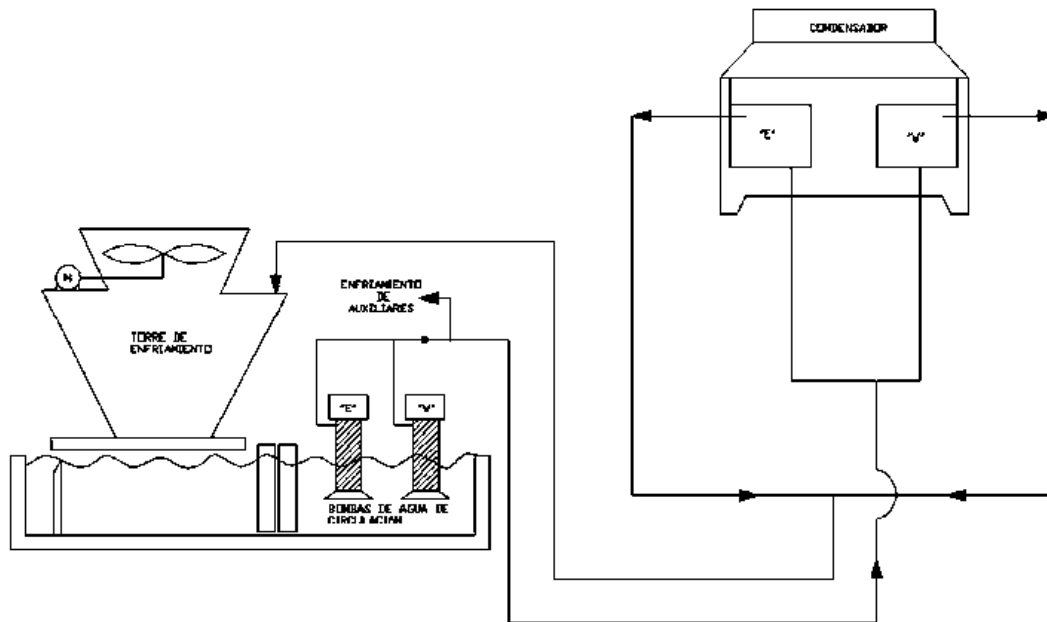


Figura 4.19 Esquema del sistema de enfriamiento de Ciclo Híbrido.

El sistema de enfriamiento del Ciclo Híbrido se muestra en la figura 4.19.

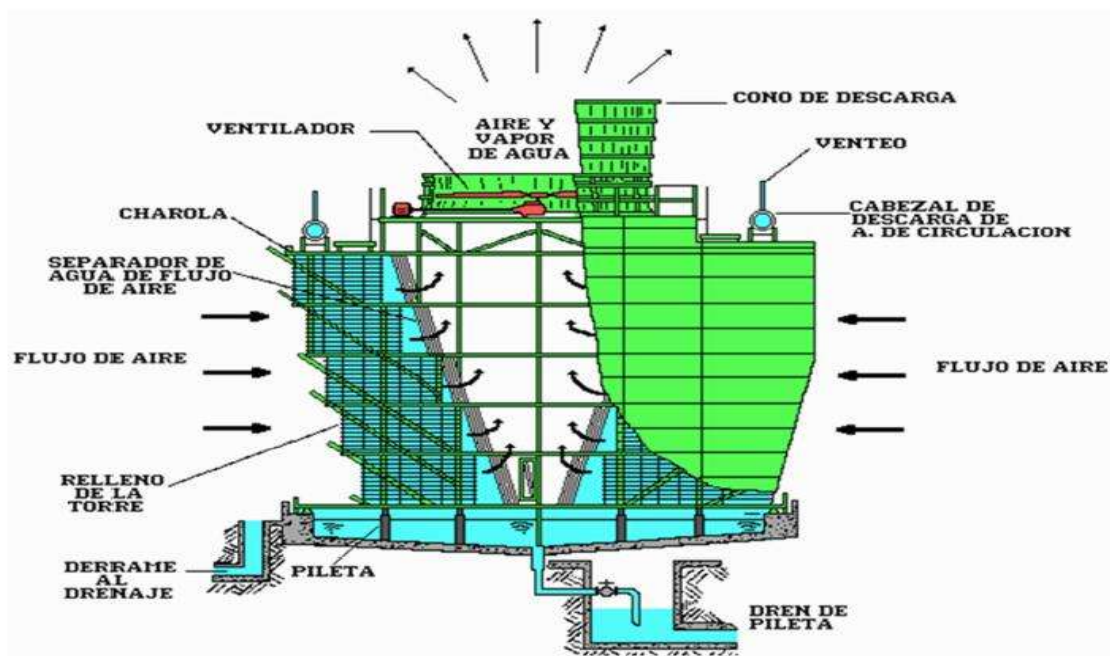


Figura 4.20 Esquema de una torre de enfriamiento.

En la figura 4.20 se muestra un diagrama de la torre de enfriamiento y sus partes principales.

Alrededor del 75% del enfriamiento que se tiene en esta torre húmeda es provocado por evaporación y debido a esto, se va incrementando la cantidad de sólidos en el agua del circuito, por lo que es necesario purgarla continuamente en aproximadamente 35% del agua de repuesto (agua evaporada).

Los ventiladores extraen el aire húmedo del interior de la torre, introduciendo al mismo tiempo aire del medio ambiente con un menor contenido de humedad, estableciendo un flujo ascendente que entra en contacto con el agua que desciende. Los ventiladores instalados en la torre de enfriamiento tienen un consumo total de potencia de 1500 HP y giran a una velocidad de 1750 rpm. La Figura 4.21 muestra un arreglo de los ventiladores de la torre de enfriamiento.

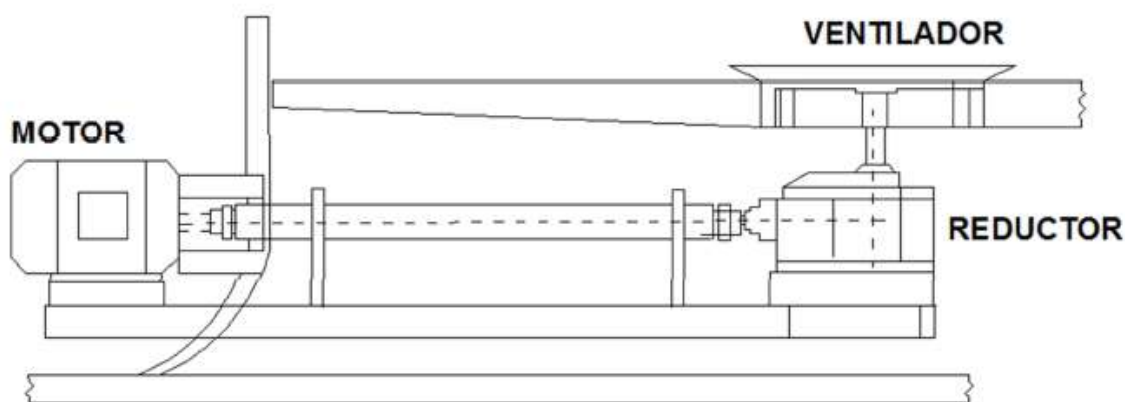


Figura 4.21 Arreglo de los ventiladores de la torre de enfriamiento.

4.9.5 Bombas de agua de circulación

La central termoeléctrica de ciclo híbrido de Valle de México, cuenta con 2 bombas de agua de circulación del tipo centrífuga y vertical de flujo mixto (radial-axial) con un 50% de capacidad cada una y un flujo de 26,800 GJO/ de agua tratada. La potencia total de diseño con que operan las bombas es 2,090kW.

Cada bomba es impulsada por un motor de inducción-trifásico de 4 000 VCA y 202AMP de corriente con 440 rpm de velocidad.

La función de las bombas de agua de circulación, es succionar el agua de la pileta de la torre de enfriamiento (cárcamo de succión) para enviarla a las cajas del condensador principal a través de las líneas de conducción (descarga de las bombas), para entregarla a las cajas del condensador a la presión necesaria de *1.98 bar* y vencer las pérdidas por fricción a través del sistema, así como la altura estática de la torre de enfriamiento.

4.9.6 Condensador principal

El condensador principal de la central termoeléctrica Valle de México, es un condensador de superficie horizontal, de coraza simple, de dos cajas separadas de dos pasos de agua de circulación en cada una de estas, este condensador tiene una superficie de transferencia de $12\,626\text{ m}^2$ y consta de 15, 276 tubos de Material Admiralty tipo B 18 BWG, los cuales están repartidos en cada caja, el condensador fue diseñado para una cantidad de calor cedido de $1,425 \times 10^6\text{ kJ/h}$, una temperatura de saturación de condensado de 42.88°C , un flujo de vapor saturado de 635.494 kg/h .

La función del condensador es la de condensar el vapor que ya se expandió en la turbina, cediendo el calor latente del vapor a calor sensible del agua de circulación, para posteriormente descender al pozo caliente como líquido, lográndose con esto la transferencia de calor hacia el agua de circulación, la cual fluye por el interior de los tubos de las cajas del condensador.

Por lo que el condensador fue diseñado para operar con un flujo de agua de enfriamiento $7.192\text{ m}^3/\text{s}$, con una temperatura de entrada y salida de la misma de 26.11°C y 39.27°C respectivamente, y así lograr un incremento de la temperatura (T) de 13.16°C , una presión de entrada y salida de 1.9809 bar y 1.177 bar respectivamente y una velocidad del agua de enfriamiento de 2.2866 m/s .

En la figura 4.22 se muestra el diagrama del condensador principal de la Central Termoeléctrica de Ciclo híbrido Valle de México.

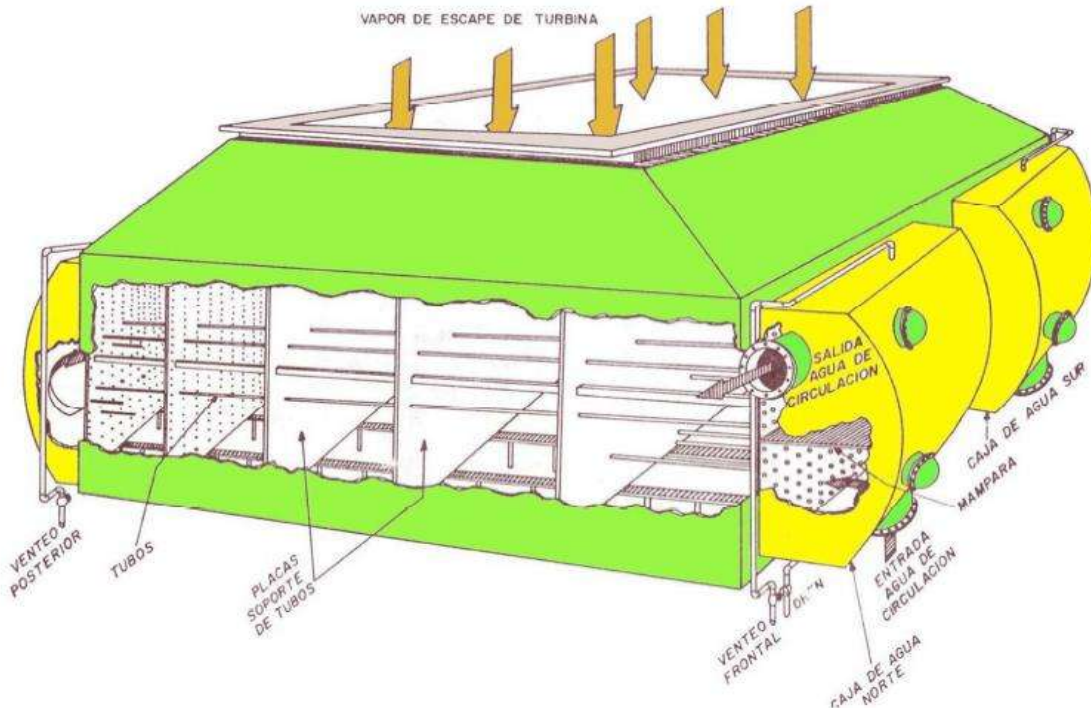


Figura 4.22 Esquema del condensador principal del ciclo híbrido.

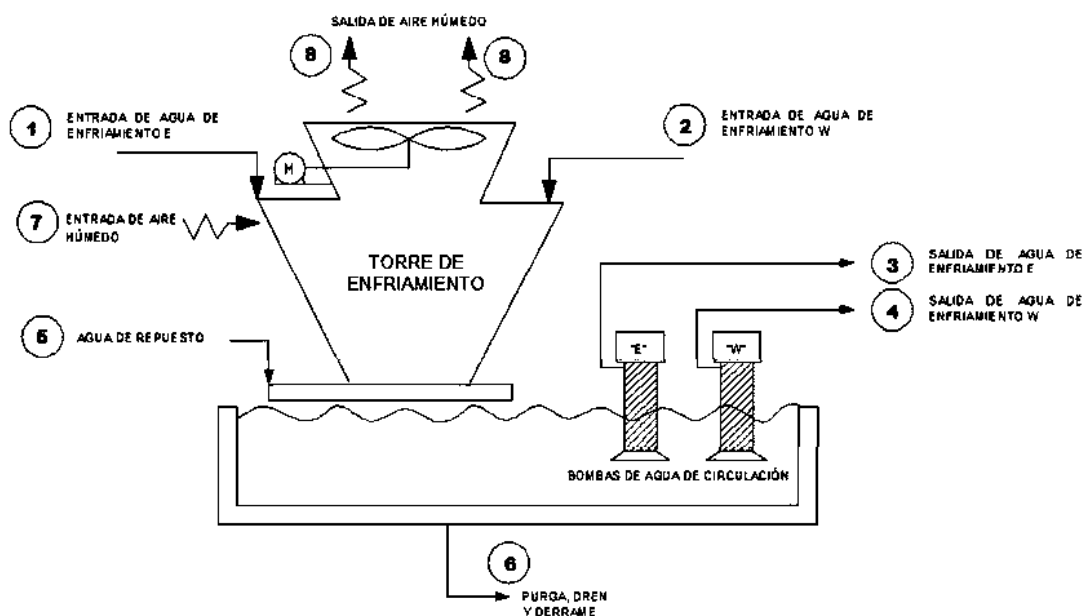
4.9.7 Parámetros termodinámicos de la torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento de la Unidad 4 de la CT Valle de México es una Torre BAC PRITCHARD modelo 10W 3632-16 serie 1174, la torre de enfriamiento fue diseñada para operar las siguientes condiciones:

- d) Temperatura ambiente (T) = 25 °C.
- e) Presión atmosférica (p) = 586 mm Hg (0.78051 bar)
- f) Flujo másico (m) = 7.192 m³/s.
- g) Temperatura de bulbo seco (TBS) = 25 °C
- h) Temperatura de bulbo húmedo (TBH) = 14.88 °C
- i) Rango de enfriamiento (R) = 13.94 °C
- j) Aproximación (A) = 10.62 °C
- k) Humedad relativa (f) = 24.63 %
- l) Temperatura de agua caliente ($T_{W,C}$) = 39.44 °C
- m) Temperatura de agua fría ($T_{W,f}$) = 25.5 °C

4.9.8 Modelo matemático y aplicación

En la figura 4.23 se muestra el esquema de la torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México, con la identificación de las corrientes involucradas en la misma.



4.23 Esquema de la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido.

Número	Nomenclatura	
1	Entrada de agua de enfriamiento E	$\dot{m}_{ageE}$
2	Entrada de agua de enfriamiento W	$\dot{m}_{ageW}$
3	Salida de agua de enfriamiento E	$\dot{m}_{agsE}$
4	Salida de agua de enfriamiento W	$\dot{m}_{agsW}$
5	Agua de repuesto	$\dot{m}_{ag5}$
6	Purga, dren y derrame.	$\dot{m}_{ag6}$
7	Entrada de aire húmedo	$\dot{m}_{ahe} = (\dot{m}_{ase} + \dot{m}_{ve})$
8	Salida de aire húmedo.	$\dot{m}_{ahs} = (\dot{m}_{ass} + \dot{m}_{vs})$

Tabla 4.3 Corrientes de la torre de enfriamiento.

En la torre de enfriamiento, que opera a contraflujo, el flujo de agua desciende, mientras que el flujo de aire asciende. Se asume que las condiciones del aire y del agua sólo cambian con su posición vertical en la torre. Las condiciones e hipótesis importantes para el modelo son las siguientes:

1. La torre de enfriamiento opera de modo permanente.
2. La transferencia de calor y masa con el medio ambiente son despreciables.
3. La transferencia de calor entre el ventilador de la torre y el agua son despreciables.
4. El calor específico del agua y el aire son constantes.
5. Los coeficientes de transferencia de calor y masa son constantes a través de la torre.
6. Las pérdidas de agua por arrastre del aire son despreciables.
7. Las temperaturas del agua y el aire son uniformes en cualquier sección de la torre.

Partiendo de la ecuación de las corrientes de aire húmedo de entrada y salida de la torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México se obtienen las siguientes expresiones.

$$\omega_e = \frac{0.622\phi_e p_{ge}}{p - \phi_e p_{ge}} \quad (4.56)$$

$$p_{ve} = \phi_e p_{ge} \quad (4.57)$$

$$p_{ase} = p - p_{ve} \quad (4.58)$$

$$\omega_s = \frac{0.622\phi_s p_{gs}}{p - \phi_s p_{gs}} \quad (4.59)$$

$$p_{vs} = \phi_s p_{gs} \quad (4.60)$$

$$p_{ass} = p - p_{vs} \quad (4.61)$$

Para el balance de masas tenemos que:

Partiendo de las ecuaciones de balance de masa, desarrollada en este capítulo y aplicando estas al volumen de control de la torre de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo híbrido Valle México se obtiene lo siguiente.

- Balance de masa para el aire seco:

$$\dot{m}_{ase} = \dot{m}_{ass} = \dot{m}_{as} \quad (4.62)$$

- Balance de masa para el agua está dado por:

$$\dot{m}_{ageE} + \dot{m}_{ageW} + \dot{m}_{ag5} + \dot{m}_{ve} = \dot{m}_{agsE} + \dot{m}_{agsW} + \dot{m}_{ag6} + \dot{m}_{vs} \quad (4.63)$$

El balance de masa para la torre de enfriamiento se obtiene sumando miembro a miembro las ecuaciones (4.63) y (4.62):

$$\dot{m}_{ageE} + \dot{m}_{ageW} + \dot{m}_{ag5} + \dot{m}_{ve} + \dot{m}_{ase} = \dot{m}_{agsE} + \dot{m}_{agsW} + \dot{m}_{ag6} + \dot{m}_{vs} + \dot{m}_{ass} \quad (4.64)$$

Como:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{as}\omega; \dot{m}_{ve} = \dot{m}_{as}\omega_e; \dot{m}_{vs} = \dot{m}_{as}\omega_s \quad (4.65)$$

El balance de masa de la torre de enfriamiento queda como:

$$\dot{m}_{ageE} + \dot{m}_{ageW} + \dot{m}_{ag5} + \dot{m}_{ase}\omega_e + \dot{m}_{ase} = \dot{m}_{agsE} + \dot{m}_{agsW} + \dot{m}_{ag6} + \dot{m}_{ass}\omega_s + \dot{m}_{ass} \quad (4.66)$$

Como en esta torre de enfriamiento se cumplen las siguientes igualdades:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{ageE} &= \dot{m}_{agsE} \\ \dot{m}_{ageW} &= \dot{m}_{agsW} \\ \dot{m}_{ase} &= \dot{m}_{ass} = \dot{m}_{as} \\ \dot{m}_v &= \dot{m}_{as}\omega \end{aligned} \right\} \quad (4.66 \text{ a})$$

Reagrupando los términos de la ecuación (4.66) se obtiene lo siguiente:

$$\dot{m}_{ag5} = \dot{m}_{as}(\omega_s - \omega_e) + \dot{m}_{ag6} \quad (4.67)$$

Donde para el flujo de másico $\dot{m}_{ag6}$ se tiene la siguiente expresión.

$$\dot{m}_{ag6} = (\dot{m}_{ageE} + \dot{m}_{ageW}) * \% \text{ purga} \quad (4.68)$$

El porcentaje de purga se calcula en función del rango de enfriamiento, de acuerdo a la tabla 4.4.

Rango de enfriamiento °C	% de Purga
5	0.7
8	1.1
11	1.5

Tabla 4.4 Relación de purga.

Aplicando la ecuación de balance de energía para las torres de enfriamiento (4.17), a la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México y tomando en cuenta las hipótesis 1 y 2 se obtiene la siguiente expresión.

$$\dot{m}_{ageE}h_{ageE} + \dot{m}_{ageW}h_{ageW} + \dot{m}_{ag5}h_{ag5} + \dot{m}_{ve}h_{ve} + \dot{m}_{ase}h_{ase} - [\dot{m}_{agsE}h_{agsE} + \dot{m}_{agsW}h_{agsW} + \dot{m}_{ag6}h_{ag6} + \dot{m}_{vs}h_{vs} - \dot{m}_{ass}h_{ass}] = 0 \quad (4.69)$$

Tomando en consideración las igualdades (4.66 a) la ecuación (4.67) se reduce a la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{ageE}(h_{ageE} - h_{agsE}) + \dot{m}_{ageW}(h_{ageW} - h_{agsW}) + \dot{m}_{ag5}h_{ag5} + \dot{m}_{as}[(\omega_e h_{ve} - \omega_s h_{vs}) + (h_{ase} - h_{ass})] - \dot{m}_{ag6}h_{ag6} = 0 \quad (4.70)$$

Relacionando el balance de masa con el balance de energía para el cálculo del flujo másico de aire seco se tiene la expresión siguiente:

$$\dot{m}_{ageE}(h_{ageE} - h_{agsE}) + \dot{m}_{ageW}(h_{ageW} - h_{agsW}) + [\dot{m}_{ag6} + \dot{m}_{as}(\omega_s - \omega_e)]h_{ag5} + \dot{m}_{as}(\omega_e h_{ve} - \omega_s h_{vs}) + \dot{m}_{as}(h_{ase} - h_{ass}) - \dot{m}_{ag6}h_{ag6} = 0 \quad (4.71)$$

Despejando $\dot{m}_{as}$, y reagrupando los términos se tiene la expresión siguiente.

$$\dot{m}_{as} = \frac{\dot{m}_{ag6}h_{ag6} - \dot{m}_{ageE}(h_{ageE} - h_{agsE}) - \dot{m}_{ageW}(h_{ageW} - h_{agsW}) - \dot{m}_{ag6}h_{ag5}}{[(\omega_s - \omega_e)h_{ag5}] + (\omega_e h_{ve} - \omega_s h_{vs}) + (h_{ase} - h_{ass})} \quad (4.72)$$

Para el balance de entropías:

Aplicando el balance de entropías indicado en la ecuación (4.36), a la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México, se obtiene la ecuación siguiente:

$$\dot{m}_{ageE}s_{ageE} + \dot{m}_{ageW}s_{ageW} + \dot{m}_{ag5}s_{ag5} + \dot{m}_{ve}s_{ve} + \dot{m}_{ase}s_{ase} - [\dot{m}_{agsE3}s_{agsE3} + \dot{m}_{agsW}s_{agsW} + \dot{m}_{ag6}s_{ag6} + \dot{m}_{vs}s_{vs} + \dot{m}_{ass}s_{ass}] + \dot{\sigma}_{gen} = 0$$

Tomando en consideración las igualdades (4.66a), el balance de entropía se reduce a la ecuación siguiente:

$$\dot{m}_{ageE}(s_{ageE} - s_{agsE}) + \dot{m}_{ageW}(s_{ageW} - s_{agsW}) + \dot{m}_{ag5}s_{ag5} + \dot{m}_{as}[(\omega_e s_{ve} - \omega_s s_{vs}) + (s_{ase} - s_{ass})] - \dot{m}_{ag6}s_{ag6} + \dot{\sigma}_{gen} = 0 \quad (4.73)$$

Para el balance de exergía:

Aplicando el balance exergético indicado en la ecuación (4.47), a la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido Valle de México, se obtiene la expresión siguiente.

$$\sum \dot{A}_e - \sum \dot{A}_s - \dot{A}_d = 0 \quad (4.74a)$$

$$\sum \dot{m}_e a_{te} - \sum \dot{m}_s a_{ts} - \dot{A}_d = 0 \quad (4.74b)$$

$$\dot{m}_{ageE}a_{tageE} + \dot{m}_{ageW}a_{tageW} + \dot{m}_{ag5}a_{ag5} + \dot{m}_{ve}a_{tve} + \dot{m}_{ase}a_{tase} - [\dot{m}_{agsE}a_{tagsE} + \dot{m}_{agsW}a_{tagsW} + \dot{m}_{vs}a_{tvs} - \dot{m}_{ass}a_{tass}] - \dot{A}_d = 0 \quad (4.75)$$

En la ecuación (4.40), la exergía específica total es la suma de la exergía física y la química:

$$a_t = a_f + a_q$$

Con esta consideración el balance de exergía se expresa con la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ageE}[(a_{fageE} + a_{qageE}) - (a_{fagsE} + a_{qagsE})] + \dot{m}_{ageW}[(a_{fageW} + a_{qageW}) - \\ (a_{fagsW} + a_{qagsW})] + \dot{m}_{ag5}(a_{fag5} + a_{qag5}) + \dot{m}_{as}(a_{fe} - a_{fs}) + \dot{m}_{ve}(a_{fve} + \\ a_{qve}) - \dot{m}_{ag6}(a_{fag6} + a_{qag6}) - \dot{m}_{vs}(a_{fvs} + a_{qvs}) = \dot{A}_d \end{aligned} \quad (4.76)$$

Donde para el aire seco se tiene:

$$(a_{fe} - a_{fs}) = h_{ase} - h_{ass} - T_0(s_{ase} - s_{ass}) \quad (4.77)$$

$$(s_{ase} - s_{ass}) = C_{pas} \ln \frac{T_{ase}}{T_{ass}} - R_{as} \ln \frac{P_{ase}}{P_{ass}} \quad (4.78)$$

y para el agua y el vapor de agua se tiene:

$$a_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (4.79)$$

$$a_q = \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \quad (4.80)$$

$$y_{H_2O}^a = \frac{P_{ve}}{P_{ref}} \quad (4.81)$$

Desarrollando la ecuación (4.75), a partir de las ecuaciones (4.77), (4.78), (4.79), y (4.80) tomando las condiciones del estado muerto para el aire y el agua, la ecuación (4.76) se reescribe de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
& \dot{m}_{ageE} \left[\langle [h_{ageE} - h_0 - T_0(s_{ageE} - s_0)] + \right. \\
& \left. \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \right] - \langle [h_{agsE} - h_0 - T_0(s_{agsE} - s_0)] + \\
& \left. \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \right] + \dot{m}_{ageW} \left[\langle [h_{ageW} - h_0 - T_0(s_{ageW} - \right. \\
& \left. s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \right] - \langle [h_{agsW} - h_0 - T_0(s_{agsW} - \\
& s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \right] + \dot{m}_{ag5} \langle [h_{ag5} - h_0 - \\
& T_0(s_{ag5} - s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \rangle + \dot{m}_{ve} \langle [h_{ve} - h_0 - \\
& T_0(s_{ve} - s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \rangle + \dot{m}_{ase} [h_{ase} - h_{0,as} - \\
& T_0(s_{ase} - s_{0,as})] - \dot{m}_{ag6} \langle [h_{ag6} - h_0 - T_0(s_{ag6} - s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \right. \\
& \left. \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \rangle - \dot{m}_{vs} \langle [h_{ve} - h_0 - T_0(s_{ve} - s_0)] + \frac{1}{M} \left\{ [\bar{g}_{H_2O(l)} - \bar{g}_{H_2O(g)}] + \right. \\
& \left. \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \rangle - \dot{m}_{as} \left[h_{ass} - h_{ase} - T_0 \left(C_{pas} \ln \frac{T_{ase}}{T_{ass}} - R_{as} \ln \frac{P_{ase}}{P_{ass}} \right) \right] = \dot{A}_d
\end{aligned}
\tag{4.82}$$

Con la ayuda de tablas de vapor de agua y aire se determinan las propiedades termodinámicas de las corrientes que intervienen en la torre de enfriamiento. En las tablas 4.4 y 4.5 se proporcionan los valores de diseño del fabricante.

No.	t (°C)	p (bar)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	ϕ (%)
Agua						
1	39.44	1.777	3596	165.20	0.5650	
2	39.44	1.777	3596	165.20	0.5650	
3	25.5	1.981	3596	106.93	0.3743	
4	25.5	1.981	3596	106.93	0.3743	
5	25	0.7805	-	104.84	0.3673	
6	25.5	0.7805	-	106.93	0.3743	
Vapor						
7	25	-	-	2546.54	8.5568	
8	34	-	-	2562.79	8.3715	
Aire						
7	25	-	-	298.33	-	24.63
8	34	-	-	307.38	-	90

Tabla 4.5 Propiedades de las corrientes a condiciones de diseño

Eficiencias

Para el cálculo de las eficiencias de energética y exergética, se parte de las ecuaciones (4.78) y (4.79) se tiene lo siguiente:

Eficiencia energética.

$$\eta_I = \frac{T_{age}-T_{ags}}{T_{age}-T_{bhe}} = \frac{39.44-25.5}{39.44-14.89} = 56.78 \%$$

Eficiencia exergética.

$$\eta_{II} = 1 - \frac{Ad}{A_{ageE}+A_{ageW}+A_{ags}-A_{agsE}+A_{agsW}} =$$
$$1 - \frac{16776.40}{551539.20+551539.20+39763.37-546458.77+546458.77} = 66.39 \%$$

En condiciones de operación tenemos que:

Eficiencia energética.

$$\eta_I = \frac{T_{age}-T_{ags}}{T_{age}-T_{bhe}} = \frac{\left(\frac{46.35+45.18}{2}\right)-\left(\frac{26.49+26.55}{2}\right)}{\left(\frac{46.35+45.18}{2}\right)-7.93} = \frac{45.76-26.52}{45.76-7.93} = 50.85 \%$$

Eficiencia exergética.

$$\eta_{II} = 1 - \frac{Ad}{A_{ageE}+A_{ageW}+A_{ags}+A_{agsE}+A_{agsW}} =$$
$$1 - \frac{18197.53}{564251.14+577823.36+48019.90-545577.73-560297.32} = 78.39 \%$$

Como podemos observar la eficiencia energética en condiciones de operación se ve disminuida en un 6% aproximadamente, mientras que la eficiencia exergética aumenta cuando las condiciones de operación están presentes, observando un rango de entre 50.85% en condiciones de operación y 56.78% en condiciones normales para la eficiencia energética y de 66.39% en condiciones normales a 78.39% en condiciones de operación para la eficiencia exergética.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado de forma estructurada y análisis para el diseño de una torre de enfriamiento, desde su funcionamiento, tipos de torres, selección adecuada, materiales utilizados para la planeación y construcción de una torre de enfriamiento, y por ultimo su análisis y funcionamiento en general.

En el caso de estudio la energía perdida se encuentra localizada básicamente en el calor desechado al medio ambiente, por medio del aire húmedo. Mientras que con el análisis exegético fue posible identificar y cuantificar las pérdidas por irreversibilidades ocasionadas por la generación de entropía al interior de la Torre de Enfriamiento.

Con la evaluación exergética realizada a la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido de Valle de México, a las condiciones de diseño y operación, se concluye que la Torre de Enfriamiento está operando fuera de sus condiciones de operación, esto es provocado principalmente por el condensador principal de la Central, ya que el agua de enfriamiento entra a una temperatura mayor a la de diseño, esto a raíz de que esta Central sufrió una modificación en el año 2003, al pasar de Ciclo Convencional a Ciclo Híbrido.

Un aumento en la temperatura de salida del agua de la torre de enfriamiento traerá como consecuencia, que no se elimine la carga térmica del desfogue la turbina de baja presión, provocando un aumento en la temperatura del pozo caliente del condensador principal, lo que trae como consecuencia una pérdida de vacío que afectara la eficiencia de la turbina y las desviaciones al régimen térmico incrementando los costos de generación.

5.2 RECOMENDACIONES.

En esta sección se hacen una serie de recomendaciones técnicas, que ayuden a mejorar la operación de la Torre de Enfriamiento, y así mantener la capacidad de enfriamiento de la Torre de Enfriamiento, y poder ayudar a la eficiencia de la planta, las propuestas técnicas son las siguientes:

- a. El análisis térmico, que incluye el análisis energético y el análisis exergético de la Torre de Enfriamiento se basa en disponer de información válida, lo que implica la instalación o mejoramiento de la instrumentación correspondiente.
- b. Se debe programar un mantenimiento periódico de la Torre de Enfriamiento y seguir las recomendaciones técnicas indicadas por el fabricante. Este programa debe incluir subprogramas de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.
- c. Sustituir el relleno de la Torre de Enfriamiento dañado, para retardar la caída del agua y así aumentar el tiempo de contacto entre el agua y el aire, para tener una mayor transferencia de calor.
- d. Ajustar y uniformizar el ángulo de ataque de las aspas de los ventiladores recomendado por el fabricante, para que el motor del ventilador opere con la potencia recomendada por el fabricante
- e. Revisar y/o corregir los huelgos de las bombas de agua de circulación de la Torre de Enfriamiento o si es necesario revisar las partes internas de la misma, con el objetivo de recuperar el flujo másico de diseño de este equipo, ya que el flujo másico de operación, presenta una diferencia de 931 kg/s, con respecto al de diseño.
- f. Se debe supervisar que se mantenga limpia la torre y la distribución de agua sea uniforme en las charolas de distribución de cada celda de la Torre de Enfriamiento.

Referencias

1. Libro de Consulta para Evaluación Ambiental (Volumen I; II y III). Trabajos Técnicos del Departamento de Medio Ambiente del Banco Mundial.
2. Criterios de diseño de plantas termoeléctricas, Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez, editorial LIMUSA México 1981.
3. Elementos de *centrales eléctricas* I : Hidroeléctricas, termoeléctricas, nucleares / Gilberto *Enríquez Harper*. Editorial: México : Limusa, 1982 .
4. http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Generacion.aspx
5. Elonka, S. “Cooling Towers”. Power special report, Marzo 1963.
6. Manual del ingeniero Químico. Autor: Robert H. Perry; Don W. Green *Editorial: Mc Graw Hill. Edición: 7ª* (2001).
7. “Evaluación exergética de una torre de enfriamiento de una central termoeléctrica de ciclo híbrido de 550 MW”.
 - a. Ing. Arturo Reyes León, Junio del 2011.