



DISEÑO DE TORRE NUEVA DE MAYOR EFICIENCIA, COMPARADA CON LA TORRE ACTUAL



CFE *Una empresa
de clase mundial*

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL



INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS



C.H. ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA
INFORME FINAL DE RESIDENCIA PROFESIONAL

PRESENTADO POR:

Sarmiento Alvarado Eduardo

NÚMERO DE CONTROL:

08270713

ESPECIALIDAD:

Ingeniería Mecánica

ASESOR INTERNO:

Dr. Carlos Ríos Rojas

ASESOR EXTERNO:

Ing. Fernando Calderón Rincón

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 27 de Noviembre del 2012.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO 1	
ASPECTOS GENERALES	7
1.1 Justificación del proyecto	8
1.2 Objetivos del proyecto	9
1.2.1 Objetivo general	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 Caracterización del área de trabajo	10
1.3.1 Antecedentes históricos de la empresa	11
1.3.2 Misión	11
1.3.3 Visión	11
1.3.4 Políticas de calidad	11
1.4 Problemas a resolver	12
1.5 Alcances y limitaciones del proyecto	13
CAPITULO 2	
FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	14
2.1 Conceptos básicos	15
2.2. Procesos de transferencia de calor	16
2.2.1 Transferencia de calor	16
2.2.2 Mecanismos de la transferencia de calor	16
2.2.3 Conducción	17
2.2.4 Convección	18
2.2.5 Radiación	19
2.3 Principios de convección	20
2.3.1 Flujo viscoso	20
2.3.2 Capa límite térmica	21
2.2.3 Superficies isotermas	22
2.3.3 Flujo de calor constante	23



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

CAPITULO 3	
FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA	24
3.1 Fundamentos en la transferencia de masa por convección	26
3.2. Transferencia por una corriente que fluye bajo convección forzada	29
3.3 Transferencia de calor en cambio de fase	30
3.5 Modelo físico de la transferencia total de calor	30
3.6 Ecuación principal de Merkel	33
3.7 Capacidad de enfriamiento	37
CAPITULO 4	
TORRE DE ENFRIAMIENTO	38
4.1 Principio de operación	39
4.2 Clasificación	43
4.3 Componentes	47
4.4 Materiales de construcción	51
4.4 Consideraciones de la selección	52
4.5 Eficiencia energética	55
CAPITULO 5	
CÁLCULO DIMENSIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	56
6.1 Condiciones de diseño	57
6.2 Calculo dimensional	58
6.2.1 Determinación del valor del coeficiente total de transferencia de masa, ($KaVL$ ó NTU) el método de TCHEBYCHEFF	59
6.2.2 Cálculo del área de la sección transversal de la torre	60
6.2.3 Cálculo de la altura de la zona empaquetada	62
6.2.4 Cálculo de la cantidad de agua de recuperación	64
6.2.5 Selección del ventilador	65
6.2.6 Determinación de las dimensiones de la piscina	67
NOMENCLATURA	69
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	75



INTRODUCCIÓN

La central hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama ubicada en el estado de Hidalgo (límites con el estado de Querétaro). Esta central cuenta con dos turbinas Peltón de **150 MW** cada una, para proporcionar una potencia de aproximadamente **300 MW** y tiene la particularidad que eventualmente las unidades generadoras son operadas como condensadores.

La C.H. Zimapan como también se le denomina, se encuentra situada a un costado del río “Antiguo Moctezuma”, se podría usar esta, como agua de enfriamiento previamente filtrada, pero como es de suponer ésta contiene cantidades apreciables de sales disueltas, lo que implica que el uso continuo de agua del río produzca incrustaciones en la superficie de enfriamiento de los equipos, lo que trae como consecuencia el deterioro y aumento de costos en el mantenimiento industrial.

Por otro lado, como el agua calentada se le retorna al río, se presenta el problema de la contaminación térmica que puede ser tan grave como cualquier otra forma de contaminación, ya que el agua tibia estimula el crecimiento anormal de algas, que en cierto modo consumen el oxígeno de uso animal.

En cualquier caso, existe la necesidad de optar algún método que permita enfriar agua a menor costo, sin que produzca efectos secundarios. Los dispositivos que se utilizan para poner en contacto directo el aire con el agua, varían desde las piscinas abiertas al ambiente hasta las torres de enfriamiento de tiro inducido, las cuales son usadas cuando se necesita enfriar cantidades considerables de agua, como usualmente lo es a nivel industrial.

Las torres de enfriamiento no tienen la mayor parte de estos problemas y por lo tanto se utilizan comúnmente para disipar el calor de los sistemas de enfriamiento. La tasa de consumo del agua de un sistema de torre de enfriamiento es aproximadamente el 5% de un sistema convencional abierto, haciéndolo menos costoso para operar con abastecimiento de agua. Adicionalmente, la cantidad de agua calentada descargada es muy pequeña, así que el efecto ecológico se reduce mucho.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Últimamente, las torres de enfriamiento pueden enfriar agua dentro de 2 a 3 K de la temperatura de bulbo húmedo del ambiente o cerca de 20 K por debajo del mismo, que pueden ser sistemas congelados de aire con tamaño razonable.

Los sistemas de enfriamiento de esta central, utilizan una torre de enfriamiento húmeda para el rechazo de calor a la atmósfera, siendo la única en México que utiliza este tipo de sistema de enfriamiento. Cada sistema de enfriamiento (uno por turbina) cuenta con dos bombas de agua de circulación con una capacidad de diseño de 375 m³/h por bomba (una bomba proporciona el 100% del flujo requerido, la otra es redundante).

Esta central ha detectado mal funcionamiento de la torre de enfriamiento, lo cual, repercute en altas temperaturas, principalmente en generador eléctrico, el cual, alcanza temperaturas por arriba de las máximas establecidas por diseño, es decir, los materiales están operando en la zona de degradación rápida. Por esta razón, dicha central ha requerido el diseño de una torre de mayor eficiencia comparada con la actual.

Por lo tanto, es motivo del presente estudio el diseñar y calcular una torre de enfriamiento, en base a las consideraciones anteriormente indicadas; para lo cual se han tomado como referencia los principios fundamentales de transferencia de masa y calor, que intervienen en los procesos de enfriamiento de agua con aire cuando están en contacto directo.



CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES



1.1 JUSTIFICACIÓN

La C.H. Ing. Fernando Hiriart Balderrama cuenta con un sistema de enfriamiento que es de circuito cerrado, por lo que el agua, después de cada ciclo de enfriamiento por los diferentes equipos de las unidades generadoras requiere ser refrigerada por una torre de enfriamiento que cuenta con tres celdas.

Esta torre de enfriamiento es de tiro forzado a contra flujo y por el tiempo de operación que llevan sus componentes, sus respectivos materiales se han deteriorado con el paso del tiempo. Aunado a esto, el diseño de la torre se hizo con condiciones ambientales que no coinciden con las reales, ya que en temporadas de calor la temperatura ambiente alcanza valores de hasta 44°C en casa de máquinas, por lo que se tiene una torre ineficiente y con poca capacidad de enfriamiento que se vuelve una situación crítica en esta temporada del año. Así mismo los equipos de extracción de aire (moto-ventiladores); de acuerdo a los últimos estudios realizados, han perdido una eficiencia considerable, ya que no se extrae el suficiente aire para crear un contra flujo que retire calor del agua.

Los materiales de los rellenos y los componentes encargados de la distribución de agua en el interior de la torre (canaletas y platos) son obsoletos y se han desgastado críticamente. Todos estos factores hacen que la torre de enfriamiento sea ineficiente.

Es por ello que es requerido el nuevo diseño de la torre de enfriamiento, para que los equipos encargados de refrigerar las chumaceras de la turbina y el devanado del generador operen de forma óptima durante la temporada de calor y evitar que se incrementen sus temperaturas, ya que estos incrementos reducen la vida útil de los equipos y por consiguiente de las unidades generadoras, además de que se pierde confiabilidad de los sistemas.

El año pasado se tuvieron disparos por altas temperaturas en el generador, debido a que la torre no tuvo capacidad de extraer el calor suficiente del agua de enfriamiento.

Es por ello que la sustitución de la torre de enfriamiento es de gran importancia para la central, ya que se puede mejorar las temperaturas de operación en estator y chumaceras, y con ello prolongar el tiempo de vida útil de los generadores. Con esta acción se contribuye a mejorar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de las unidades generadoras y se asegura, la prestación y suministro ininterrumpido.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Generales

El objeto de este proyecto es diseñar una nueva torre de refrigeración para el enfriamiento de las aguas procedentes de los generadores eléctricos de las unidades 1 y 2 de la CFE C.H. Ing. Fernando Hiriart Balderrama, atendiendo entre otros factores a la mayor eficiencia.

1.2.2 Específicos

Por ello los principales objetivos son los siguientes:

- Desarrollar capacidades y conocimientos adquiridos en la carrera y de ponerlos en práctica, específicamente el área de transferencia de calor y diseño.
- Recolectar la información disponible e identificar los puntos requeridos para el proyecto de investigación.
- Analizar la torre de enfriamiento ubicada en campo.
- Evaluar y analizar las posibles alternativas de la ingeniería del proyecto.
- Definir parámetros de operación y funcionamiento.
- Realizar los cálculos de ingeniería básica para dimensionar la nueva torre de enfriamiento.
- Realizar la validación de elementos funcionales mediante la implementación de algún software.

1.3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE PARTICIPÓ

1.3.1 Antecedentes históricos de la empresa

La Comisión Federal de Electricidad desde sus inicios en 1937, se ha destacado por su servicio a la sociedad y su firme participación en el desarrollo del país, su principal propósito es mantener la continuidad del servicio en el suministro de energía eléctrica con seguridad, eficiencia, calidad y costo competitivo, además de proporcionar una atención esmerada a clientes y usuarios finales. Otros objetivos importantes son proteger el medio ambiente, promover el desarrollo social y respetar los valores de las poblaciones donde se ubican sus instalaciones.

La Central Hidroeléctrica Ing. Fernando Hiriart Balderrama (CH-FHB), perteneciente a la Gerencia Regional de Producción Central, es considerada desde su inicio de operación en 1995, como una instalación estratégica y primordial para el Sistema Eléctrico Nacional por su capacidad de rápida respuesta en la generación de energía eléctrica para la zona central del país (5 minutos de 0 a carga máxima, la más rápida a nivel nacional), y su capacidad de regulación de frecuencia y voltaje, que contribuye a la estabilidad del Sistema Interconectado Nacional.

La construcción y puesta en operación de la CH-FHB requirió una inversión total de 800 millones de dólares, originando un impacto positivo en la región al abrir grandes posibilidades de desarrollo, generación de empleo, creación de redes de comunicación terrestre, derrama económica e infraestructura de servicio médico. Se localiza entre los límites de los estados de Hidalgo y Querétaro y aprovecha el potencial energético del Río Moctezuma donde convergen los Ríos Tula y San Juan. La central cuenta con el túnel de conducción de agua para generación más largo del mundo (21 700 m), y su obra de contención (cortina), la más alta del mundo en su tipo (203 m), que permite almacenar el agua para generación de energía eléctrica.

1.3.2 Misión

- Asegurar, dentro de un marco de competencia y actualizado tecnológicamente, el servicio de energía eléctrica, en condiciones de cantidad, calidad y precio, con la adecuada diversificación de fuentes de energía.
- Optimizar la utilización de su infraestructura física, comercial y de recursos humanos.
- Proporcionar una atención de excelencia
- Proteger el medio ambiente, promover el desarrollo social y respetar los valores de las poblaciones donde se ubican las obras de electrificación.

1.3.3 Visión

Una empresa de clase mundial que participa competitivamente en la satisfacción demanda de energía eléctrica nacional e internacional, que optimiza el uso de infraestructura física y comercial, a la vanguardia en tecnología rentable, con imagen de excelencia industria limpia y recursos humanos altamente calificados.

1.3.4 Política de calidad

Proporcionar el servicio público de energía eléctrica y otros servicios relacionados de acuerdo a requerimientos de la sociedad, con base en el desempeño competitivo de los procesos de la dirección de operación y la mejora continua de la eficacia del sistema integral de gestión con el compromiso de:

- Formar y desarrollar el capital humano, incluyendo la cultura de equidad de género.
- Controlar los riesgos, para prevenir lesiones y enfermedades al personal y daños a las instalaciones.
- Cumplir con la legislación, reglamentación y otros requisitos aplicables.
- Prevenir la contaminación y aprovechar de manera responsable los recursos naturales.
- Mejorando continuamente la eficacia de nuestro Sistema integral de gestión.

1.4 PROBLEMAS A RESOLVER

- La operación de la torre de enfriamiento es deficiente principalmente porque el flujo de aire proporcionado por los ventiladores es muy bajo en comparación del que debieran proporcionar por diseño, alrededor de un 100% menor. También, dicha torre presenta problemas en la distribución del agua en las canaletas, así como, mal funcionamiento de los platos de salpicadura.
- Los problemas de mal funcionamiento de la torre se han agudizado debido al envejecimiento de la misma. Esta torre, ha rebasado su vida útil por varios años (tiene más de quince años de operación) y, los fabricantes recomiendan que después de 10 a 15 años de servicio, se reparen o se cambien los ventiladores, aspas, rellenos y sistema de distribución del agua. En algunos casos de reparación es necesario cambiar hasta las barreras laterales.
- Los problemas encontrados en las bombas de agua de circulación con respecto a las eficiencias. En estas se observa que las bombas correspondientes a la unidad 1, presentan ligeras deficiencias, entre 2 y 3 puntos porcentuales, mientras que las bombas correspondientes a la unidad 2, alcanzan valores entre 4 y 5 puntos porcentuales menos que en la condición de diseño. También, se observa que los flujos de agua actuales, están por debajo de los de diseño, 13 a 15 % menos que el correspondiente a dicho punto de punto de diseño. Este bajo flujo, repercute principalmente, en el desempeño de la torre de enfriamiento, debido a que disminuye la “superficie de transferencia” de calor agua-aire.

1.5 ALCANCES Y LIMITANTES DEL PROYECTO

Entre los alcances para el desarrollo de este proyecto se consultaron fuentes internet y bibliografía. Además se harán las cotizaciones de productos que se utilizarán en el proyecto y tener estimaciones de los costos.

También se realizará la estancia en las instalaciones de la C.H. Fernando Hiriart Balderrama para recopilar información acerca de las necesidades a cubrir, y proponer ideas de mejora del diseño anterior y aplicarlos en el actual prototipo.

Entre las limitantes de este proyecto se encuentra el tiempo de entrega de los materiales. Las pruebas de validación, así como el protocolo de aceptación se realizan una vez terminada la fabricación.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Atmósfera: es la capa de aire o el aire que nos rodea.

Humedad de la atmosfera: es el agua que se encuentra en la capa de aire o en el aire que nos rodea.

Presión parcial: la presión parcial de un gas, en atmosferas en una mezcla o solución sería aproximadamente la presión de dicho gas si se eliminaran repentinamente y sin que hubiese variación de temperaturas todos los demás componentes de la mezcla o solución. La presión parcial de un gas en una mezcla; es la medida de la actividad termodinámica de las moléculas de dicho gas.

Presión atmosférica: es la presión ejercida por el aire sobre un cuerpo y se puede llamar también presión barométrica.

Presión de vapor: es la presión que ejerce el vapor de la superficie libre de un líquido cuando éste se encuentra a una temperatura arriba de su congelación.

Aire saturado: aire que no puede retener mayor cantidad de humedad (100% de humedad).

Humedad absoluta: es la cantidad máxima de agua contenida en el aire.

Humedad relativa: es la relación de la presión de vapor en el aire entre la máxima entre la máxima presión de vapor, es decir la saturación.

Punto de rocío: es el punto de transición del agua cuando pasa de vapor a líquido y esto pasa cuando se tiene una temperatura por debajo de la de rocío.

Temperatura de bulbo seco: es la temperatura ordinaria del aire atmosférico.

Temperatura de bulbo húmedo: indica la cantidad de calor total contenido en el aire.

Calor total o entalpía: es una suma de energías es decir la suma de la entalpía o calor latente y la entalpía o calor sensible.

Sistema de equilibrio: es un equilibrio termodinámico que debe incluir tanto el equilibrio térmico como el difusivo.



2.2 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

2.2.1 Transferencia de calor

Se define calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la *cantidad* de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro.

La ciencia que trata la determinación de las velocidades de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

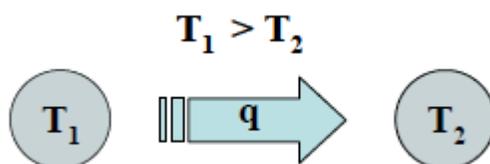


Figura 2.1: Sentido de la transferencia de calor

2.2.2 Mecanismos de transferencia de calor

El calor puede transferirse en tres modos diferentes:

- ❖ Conducción
- ❖ Convección
- ❖ Radiación

Todos los mecanismos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

2.2.3 Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de iteraciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los líquidos y gases la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de:

- La configuración geométrica
- Espesor del material
- Tipo de material
- Diferencia de temperatura

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura 2.2 La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$.

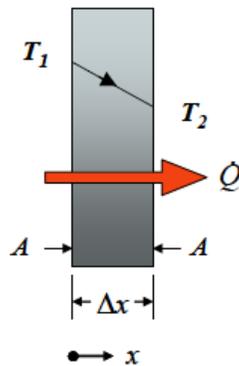


Figura 2.2: Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A

$$\dot{Q}_{cond} = KA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ (W)} \dots\dots\dots (2.1)$$

En donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material.

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$ la ecuación (2.1) se reduce a la forma diferencial:

$$\dot{Q}_{cond} = -KA \frac{dT}{dx} \text{ (W)} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.2.4 Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprenden los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento del fluido mayor es la transferencia de calor por convección.

Existen dos fenómenos de transferencia de calor por convección:

- a) Recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento (figura 2.3).
- b) Se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debido a la variación de la temperatura en ese fluido (figura 2.3).

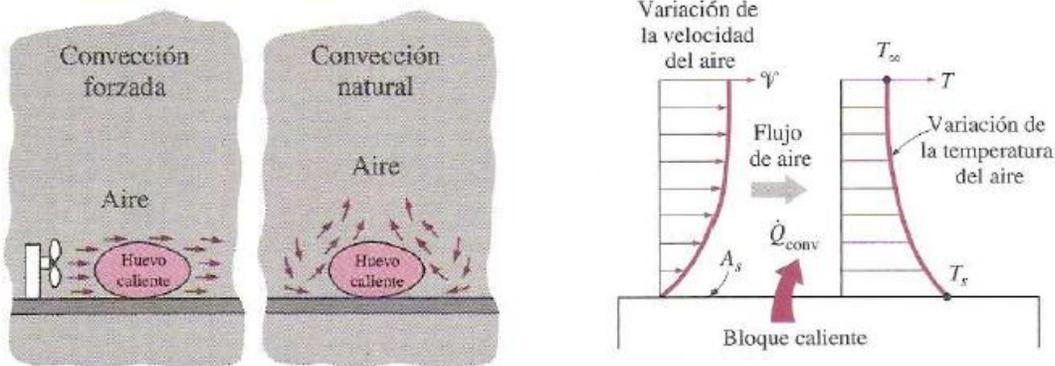


Figura 2.3 Transferencia de calor por convección

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{cond} = hA_s(T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (2.3)$$

En donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$ ó en $(Btu)/(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F)$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido.

2.2.5 Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de *ondas electromagnéticas* (o *fotones*), como resultado de los cambios en las configuraciones de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega a la tierra la energía del sol.

Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica. La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura T_s (en K o R) se expresa por la ley de Stefan-Boltzman como:

$$Q_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4 \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{k}^4)$, o bien $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ BTU/(h}^2 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4)$ es la constante de Stefan-Boltzman.

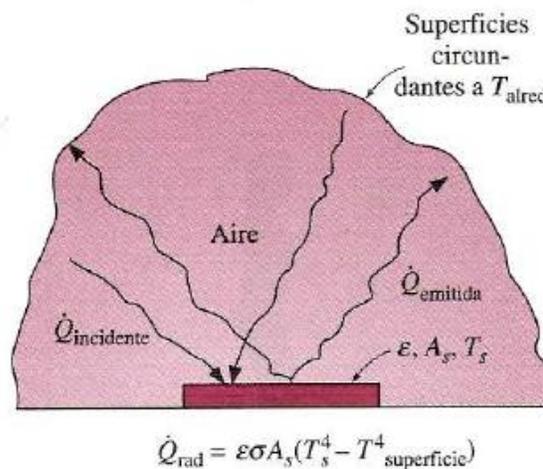


Fig.2.4 Transferencia de calor por radiación entre un cuerpo y los alrededores

2.3 PRINCIPIOS DE CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección requiere un balance de energía, además de un análisis de la dinámica de fluidos de los problemas de interés.

2.3.1 Flujo viscoso

Considérese el flujo sobre la placa plana como se muestra en la siguiente figura:

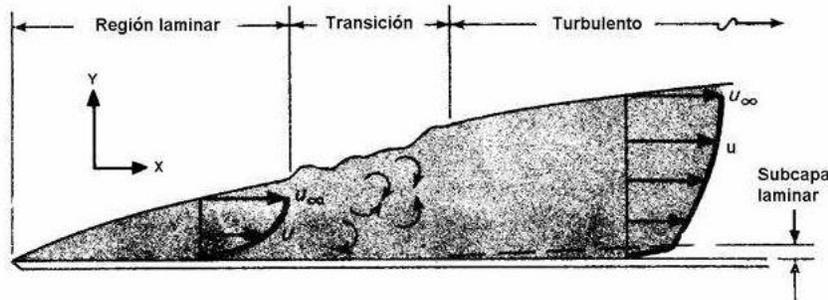


Figura 2.5: Esquema que muestra diferentes regímenes

Desde el comienzo del borde principal de la placa se desarrolla una región en donde se siente la influencia de fuerzas viscosas. Estas fuerzas se describen en términos de esfuerzos cortantes τ entre las capas de fluido. Si suponemos este esfuerzo como proporcional al gradiente de velocidad normal, tenemos la ecuación para definir la viscosidad dinámica, μ :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (2.5)$$

Es la región de flujo que se desarrolla a partir del borde principal de la placa en el que se observan los efectos de viscosidad. Se utiliza un punto arbitrario para designar la posición y , en donde termina la capa y donde la velocidad adquiere el 99 % del valor de corriente libre.

Inicialmente el desarrollo de la capa límite es laminar pero a una distancia crítica del borde principal y dependiendo del campo de flujo y las propiedades del fluido, comienzan a amplificarse pequeñas perturbaciones y tiene lugar un proceso de transición hasta que el flujo se vuelve turbulento.

Esta transición ocurre cuando:

$$\frac{u_{\infty}x}{\nu} = \frac{\rho u_{\infty}x}{\mu} > 5 \times 10^5 \dots\dots\dots (2.6)$$

Donde u_{∞} es la velocidad de corriente libre, x es la distancia desde el borde principal y ν es la viscosidad cinética.

A este grupo de términos se llama número de Reynolds y es adimensional:

$$Re_x = \frac{u_{\infty}x}{\nu} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.3.2 Capa límite térmica

Precisamente como la capa límite hidrodinámica se definió como la región del flujo en donde se sienten las fuerzas viscosas, una capa límite térmica puede definirse como aquella región en donde los gradientes de temperatura están presentes en el flujo. Estos gradientes de temperatura serían el resultado de un proceso de intercambio de calor entre fluido y la pared.

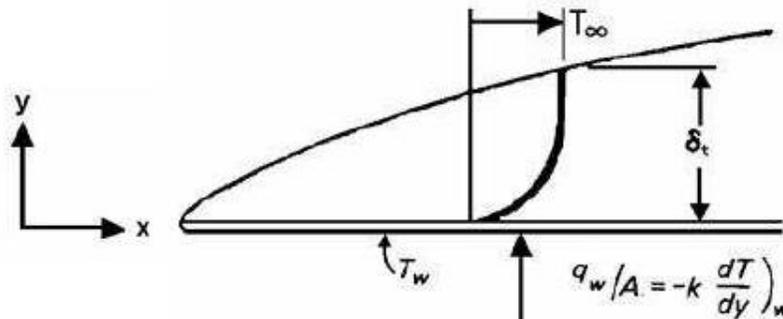


Fig. 2.6 Perfil de temperaturas en la capa límite térmica

El análisis de transferencia de calor entre una placa plana y un fluido puede tener lugar de dos distintas maneras: superficies isotermas y flujo de calor constante.

2.2.3 Superficies isotermas

En base a la figura anterior, la temperatura de la pared es T_W y la temperatura del fluido fuera de la capa térmica es T_∞ . En la pared la velocidad es cero, y la transferencia de calor hacia el fluido tiene lugar por conducción:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}_{pared} \dots\dots\dots (2.8)$$

De la ley de enfriamiento de Newton:

$$q'' = h(T_W - T_\infty) \dots\dots\dots (2.9)$$

Combinando estas ecuaciones tenemos:

$$h = \frac{-k(\frac{\partial T}{\partial y})}{T_W - T_\infty} \dots\dots\dots (2.10)$$

- | | |
|--|---|
| a) $T=T_W$ en $y=0$ | c) $T=T_\infty$ en $y=\delta T$ |
| b) $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ en $y=\delta T$ | d) $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$ en $y=0$ |

Considerando además el gradiente de temperaturas:

$$\frac{\partial T}{\partial y}_{y=0} = \frac{3\theta_\infty}{2\delta T} \dots\dots\dots (2.11)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.11):

$$h = \frac{k}{\theta_\infty} \left[\frac{3\theta_\infty}{2\delta T} \right] = \frac{3}{2} \frac{k}{\delta T} \dots\dots\dots (2.12)$$



Considerando la relación entre la capa límite hidrodinámica y la capa límite térmica:

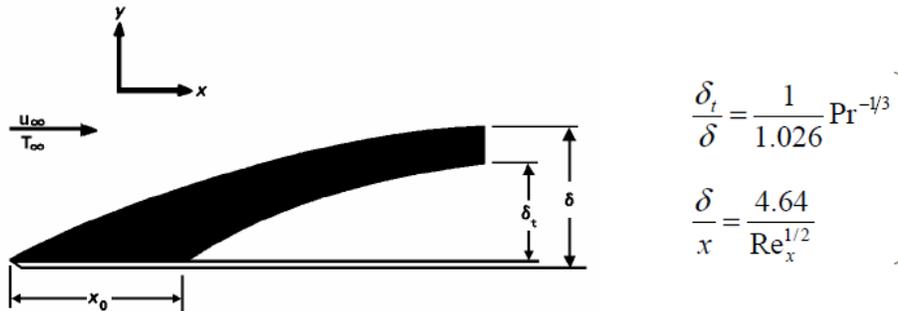


Figura 2.7: capas límite hidrodinámica y térmica en una placa plana

Donde Pr es el número de Prandtl, llamado así en honor a Ludwig Prandtl y es un parámetro adimensional que correlaciona las propiedades térmicas:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \dots \dots \dots (2.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones:

$$h_x = 0.322 k Pr^{1/3} \left(\frac{u_\infty}{\nu x} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.14)$$

El número de Nusselt, llamado así en honor a Wilhelm Nusselt, es la relación:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \dots \dots \dots (2.15)$$

2.3.4 Flujo de calor constante

En muchos problemas prácticos, el flujo de calor en la superficie es constante, y el objetivo es encontrar la distribución de temperaturas de la superficie de la placa. Para este caso, el número de Nusselt local se expresa:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = 0.453 Pr^{1/3} Re_x^{1/2} \dots \dots \dots (2.16)$$

CAPITULO 3

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA

FUNDAMENTOS TRANSFERENCIA DE MASA

Cuando un sistema contiene dos o más componentes cuyas concentraciones pueden variar de un punto a otro, hay una tendencia natural a que la masa se traslade.

El transporte de un componente desde una región de alta concentración hasta otra de baja concentración se llama transferencia de masa.

La transferencia de masa tiene un papel importante en muchos procesos industriales: la eliminación de contaminantes de las corrientes de descarga de las plantas por absorción, la separación de gases del agua residual, la difusión de neutrones dentro de los reactores nucleares y el acondicionamiento del aire son ejemplos típicos de esto.

El mecanismo de transferencia de masa, como también observó en la transferencia de calor, depende de la dinámica del sistema en que ocurre.

Existen dos modos distintos de transporte, la transferencia de masa molecular y la transferencia de masa convectiva, que son análogos a la transferencia de calor por conducción y a la transferencia de calor por convección.

En 1815 Parrot observó cualitativamente que siempre que una mezcla gaseosa contiene dos o más especies moleculares, cuyas concentraciones relativas varían de un punto a otro, se produce un proceso en apariencia natural que tiende a disminuir cualquier desigualdad en la composición. Este transporte macroscópico de masa, independiente de cualquier convección dentro del sistema, se define como difusión molecular.

En el caso específico de mezclas gaseosas puede deducirse una explicación lógica de este fenómeno de transporte a partir de la teoría cinética de los gases. A temperaturas superiores al cero absoluto, las moléculas individuales se encuentran en un estado de movimiento continuo y además aleatorio. Dentro de las mezclas de gases diluidos cada molécula de soluto se comporta independientemente de las otras moléculas de soluto, puesto que rara vez se encuentra con ellas. Los choques entre las moléculas de soluto y de disolvente ocurren en forma continua. Como resultado de los choques, las moléculas de soluto, puesto que rara vez se encuentra con ellas.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Los choques entre las moléculas de soluto y de disolvente ocurren en forma continua. Como resultado de los choques, las moléculas de soluto se mueven sobre una trayectoria en zigzag, algunas veces hacia una región de mayor concentración y otras hacia una de menor concentración.

Las leyes de transferencia de masa muestran la relación entre el flujo de la sustancia que se difunde y el gradiente de concentración responsable de esta transferencia de masa.

Puesto que la transferencia de masa o difusión, como también se llama, sólo ocurre en mezclas, su evaluación debe requerir un examen del efecto de cada componente.

3.1 FUNDAMENTOS EN LA TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN

La transferencia de masa debido a la convección implica la transferencia entre un fluido que se mueve y una superficie o entre dos fluidos que se mueven y que son relativamente inmiscibles.

Esta forma de transferencia depende tanto de las propiedades de transporte como de las características dinámicas del fluido.

La ecuación de la rapidez para la transferencia de masa por convección, generalizada en forma análoga a la “Ley” de Newton del enfriamiento, es:

$$N_A = k_c \Delta c_A \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde N_A es la transferencia de masa molar, medida en relación con coordenadas fijas en el espacio; Δc_A es la diferencia entre la concentración en la superficie límite y la concentración promedio de la corriente de fluido y k_c es el coeficiente convectivo de transferencia de masa.

El coeficiente de k_c en términos del flujo de masa y la diferencia de concentración desde el principio hasta el final de la trayectoria de difusión. Por lo tanto, el coeficiente incluye las características de las regiones laminar y turbulenta del fluido cualquiera que sean las proporciones que se consideren.

El mecanismo de transferencia de masa entre una superficie y un fluido debe implicar la transferencia de masa molecular a través de las capas de fluido estancado y un flujo laminar. La resistencia que controla la transferencia de masa por convección con frecuencia es el resultado de esta “película” de fluido y del coeficiente, k_c , que se conoce como coeficiente de película.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Un fluido sobre una superficie, tiene una capa, algunas veces extremadamente delgada, cercana a la superficie en donde el flujo es laminar. Por lo tanto, siempre existirá transferencia de masa molecular y tendrá un papel importante en cualquier proceso de convección. Si el flujo del fluido es laminar, entonces toda la transferencia entre la superficie y el fluido que se mueve será por medios moleculares. Si, por lo contrario, el flujo del fluido es turbulento, habrá un movimiento físico de paquetes de material a través de las líneas de corriente, transportados por los remolinos presentes en el flujo turbulento. La diferencia entre flujo laminar y turbulento será una característica importante en el estudio de cualquier situación en que exista convección.

Existen cuatro métodos de evaluar los coeficientes convectivos de transferencia de masa:

1. Análisis dimensional apoyado en datos experimentales;
2. Análisis exacto de la capa límite;
3. Análisis aproximado de la capa límite;
4. Analogía entre transferencia de momento, energía y masa.

Con frecuencia se utilizan parámetros adimensionales para correlacionar los datos de transferencia por convección. En la transferencia de momento se encontraron los números de Reynolds y de Euler. En la correlación de los datos de transferencia de calor por convección, fueron importantes los números de Prandtl.

Algunos de los mismos parámetros, junto con otras relaciones adimensionales recién definidas, serán útiles para correlacionar los datos de transferencia de masa por convección.

Las difusividades moleculares de los tres fenómenos de transferencia se han definido como:

$$\text{Difusividad del momento, } \nu = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\text{Difusividad térmica, } \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$\text{Difusividad de masa, } D_{AB} \dots \dots \dots (3.4)$$



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Las difusividades tienen las dimensiones L^2/t , por lo tanto, una relación de cualquiera de estas debe ser adimensional. La relación de la difusividad molecular del momento a la difusividad molecular de masa se denomina número de Schmidt.

$$\frac{\text{difusividad de momento}}{\text{difusividad de masa}} = S_C = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{\nu}{\rho D_{AB}} \dots \dots \dots (3.5)$$

El número de Schmidt juega un papel importante en la transferencia de masa por convección, análogo al del número de Prandtl en la transferencia de calor por convección. La relación de la difusividad térmica a la difusividad molecular de masa se denomina número de Lewis.

$$\frac{\text{difusividad de momento}}{\text{difusividad de masa}} = Le = \frac{k}{\rho D_{AB} C_p} \dots \dots \dots (3.6)$$

El número de Lewis se encuentra cuando un proceso involucra la transferencia simultánea de masa y de energía por convección.



3.2 TRANSFERENCIA POR CORRIENTE QUE FLUYE BAJO CONVECCIÓN FORZADA

Considérese la transferencia de masa desde las paredes de un conducto circular hasta un fluido que circula por dicho conducto. La transferencia es resultado de la fuerza impulsora de la concentración:

$$C_{A,S} - C_{A,S} \dots \dots \dots (3.7)$$

A continuación se enumeran las variables importantes, sus símbolos y sus representaciones dimensionales:

VARIABLE	SIMBOLO	DIMENSIONES
Diámetro del tubo	D	L
Densidad del fluido	ρ	M/L^3
Viscosidad del fluido	μ	M/Lt
Velocidad del fluido	v	L/t
Difusividad del fluido	D_{AB}	L^2/t
Coefficiente de transferencia de masa	k_c	L/t

Las variables anteriores incluyen términos que describen la geometría del sistema, el flujo, las propiedades del fluido y la cantidad que es de primordial interés.

La transferencia de masa por convección forzada en un conducto circular podría ser la forma:

$$N_{u_{AB}} = f(Re, Sc) \dots \dots \dots (3.8)$$

Que es análoga a la correlación en transferencia de calor:

$$N_u = f(Re, Pr) \dots \dots \dots (3.9)$$

$$N_{u_{AB}} = f(Gr_{AB}, Sc) \dots \dots \dots (3.10)$$

3.3 TRANSFERENCIA DE CALOR EN CAMBIO DE FASE

Los procesos de convección asociados con un cambio de fase de un fluido son de gran importancia en la transferencia de calor. Los dos ejemplos más importantes son los fenómenos de condensación y ebullición, aunque la transferencia de calor con cambios de fase sólido-líquido y sólido-gas ha adquirido importancia debido al gran número de aplicaciones.

En los ciclos de potencia o de refrigeración se está interesado en el paso de vapor a líquido o de líquido a vapor dependiendo de la parte concreta del ciclo en estudio. Estos cambios se llevan a cabo por ebullición o condensación, y el ingeniero debe entender los procesos implicados para poder diseñar el equipo apropiado.

3.4 MODELO FÍSICO DE LA TRANSFERENCIA TOTAL DE CALOR EN LÍMITE

El estudio del proceso de enfriamiento en una torre, implica el análisis del intercambio de calor por contacto directo entre un líquido (agua) y un gas (aire). Mediante la formulación de esquemas idealizados descriptivos del proceso y de algunas hipótesis justificadas por el relativo buen funcionamiento del esquema, es posible arribar a un procedimiento de cálculo que permite evaluar rápidamente si la torre puede satisfacer el servicio requerido. Un esquema idealizado del fenómeno de transferencia que tiene lugar entre la masa líquida y la gaseosa en una torre de enfriamiento se muestra en la Figura 3.2.

Puede suponerse que a uno y otro lado de la interfase 2-2' se forman una película de aire y otra de agua. Los gradientes de temperatura existentes en ambas películas promueven la transferencia de calor necesaria para producir la evaporación y difusión de una pequeña porción del agua que está en circulación.

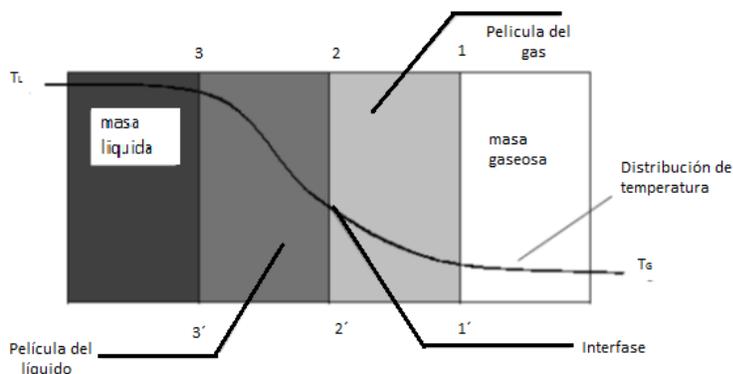


Fig.3.1 Idealización del modelo de transferencia de calor

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
 INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

El modelo físico de la transferencia total de calor en límite, emergen entre el agua y el aire. Se supone que la gota del agua, o la película del agua está rodeada con la película saturada uniforme del aire en temperatura del agua. También la temperatura del agua en superficie de la gota es igual a la temperatura en la sección.

La hipótesis de la película líquida permite, en cualquier sección de la torre, expresar la transferencia de calor desde la corriente líquida a una temperatura local media T_L hacia la interfase con temperatura T_i de la siguiente forma:

$$G_L C_{pL} dT_L = h_L a_H dV (T_L - T_i) \dots\dots\dots (3.11)$$

A su vez la película del lado del aire permite expresar la transferencia de calor desde la interface hacia la masa gaseosa con temperatura local media T_G como:

$$G_G C_{pG} dT_G = h_G a_H dV (T_G - T_i) \dots\dots\dots (3.12)$$

El balance energético se establece con base a considerar flujo estable tomando en cuenta los siguientes argumentos:

- Las propiedades termodinámicas cambian de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en cualquier punto específico permanece constante.
- Dentro del volumen ninguna propiedad intensiva y extensiva cambian.
- El flujo de masa permanece constante a lo largo del funcionamiento.

Con base a la ecuación de la continuidad y de la energía se tiene:

$$\sum \dot{G}_e = \sum \dot{G}_s \dots\dots\dots (3.13)$$

Donde la entrada se denota con la letra “e” y la salida con la letra “s”.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{G}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) - \sum \dot{G}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) \dots\dots\dots (3.14)$$



Considerando que no existe variación de energía cinética y potencial entre la entrada y la salida, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{G}_s(h_s) - \sum \dot{G}_e(h_e) \dots \dots \dots (3.15)$$

En la figura 3.3 se puede verificar un esquema de una torre para realizar el balance de energía:

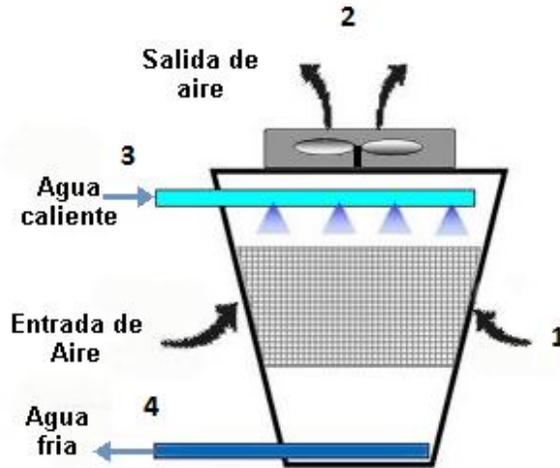


Fig. 3.2 Esquema de torre de enfriamiento de tiro inducido

La siguiente ecuación representa el balance general de energía de la torre de enfriamiento.

$$G_L C_{pL} (T_3 - T_4) = G_G (h_2 - h_1) \dots \dots \dots (3.16)$$

Donde G es el flujo másico de la corriente, C_p es el calor específico, T son las temperaturas del agua y H son las entalpías del aire.

3.6 ECUACIÓN PRINCIPAL DE MERKEL

El Dr. Merkel desarrollo una teoría para la transferencia de masa y calor en una torre de enfriamiento a contracorriente o contra flujo, este análisis se basa en la diferencia de la energía potencial de entalpia como una fuerza impulsora.

El proceso de transferencia de masa entre el líquido y el aire está íntimamente vinculado con el de transferencia de calor entre ambos medios. En muchos casos prácticos las condiciones en que se desarrollan ambos procesos son tales que puede suponerse que las difusividades térmica y másica son iguales, es decir el número de Lewis es igual a uno ($Le=1$). Si además de $Le = 1$ se acepta que la superficie total de transferencia de calor es igual a la superficie de masa se tiene que:

$$G_G dh_G = K a dV (h_w - h_a) \dots\dots\dots (3.17)$$

Donde k es el coeficiente de transferencia másica o un parámetro numérico común al agua y a la película de interfaz, h_w es la entalpia de la mezcla aire-vapor a la salida de la torre y H_a es la entalpia de la mezcla aire-vapor a la temperatura de bulbo húmedo de entrada al aire.

Para dos puntos de la torre separados por una distancia diferencial, la ecuación general del Balance de Energía, se puede expresar de la siguiente manera:

$$G_L C_{pL} dt = G_G dh_G \dots\dots\dots (3.18)$$

Combinando estas dos últimas ecuaciones se tiene que:

$$G_G G_L C_{pL} dt = K a dV (h_w - h_a) = G_G dh_G \dots\dots\dots (3.19)$$

En los sistemas de flujo en contracorriente la expresión anterior es la identidad fundamental del proceso y comprende dos ecuaciones independientes:

$$G_G G_L C_{pL} dt = K a dV (h_w - h_a) \dots\dots\dots (3.20)$$

$$G_G dh_G = K a dV (h_w - h_a) \dots\dots\dots (3.21)$$



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Para estas dos últimas ecuaciones diferenciales se pueden representar de la siguiente forma:

Donde los límites de la integral son: la temperatura de entrada del agua a la torre T_1 , la temperatura de salida del agua en la torre T_2 , la entalpía del aire a la salida de la torre h_1 .

$$\frac{KaV}{G_L} = Cp_L \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h_w - h_a} = NTU \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\frac{KaV}{G_G} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h_w - h_a} \dots\dots\dots (3.23)$$

La ecuación 3.22 se conoce como “Integral o ecuación de Merkel” y permite calcular el Número de Unidades de Transferencia de Calor (NTU), para que la torre cumpla con el servicio requerido. La ecuación no tiene una solución matemática directa, ya que la transferencia de masa y el balance de energía en cualquier punto de la torre son independientes del movimiento relativo entre los dos fluidos. El CTI propone una solución para la integral de Merkel empleando el método de Tchebycheff de la siguiente manera:

$$\int_a^b y dx = (b - a) * \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4} \dots\dots\dots (3.24)$$

$$\Delta h_1 = \text{valorde}(h_w - h_a)aT_2 + 0.1(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_2 = \text{valorde}(h_w - h_a)aT_2 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_3 = \text{valorde}(h_w - h_a)aT_1 - 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_4 = \text{valorde}(h_w - h_a)aT_1 - 0.1(T_1 - T_2)$$

Por lo tanto, para la evaluación de $\frac{KaV}{G_L}$, aplicando el método de Tchebycheff se tiene que:

$$\frac{KaV}{G_L} = Cp_L \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h_w - h_a} = \frac{T_1 - T_2}{4} * \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \dots\dots\dots (3.25)$$



La entalpía actual de la masa de aire húmedo h_{g2} en cualquier sección de la torre se puede expresar en términos de la relación entre la masa líquida y la del aire G_L/G_G . Puede calcularse a partir de la integración de la ecuación general del balance de energía:

$$h_{g2} = h_{g1} + C p_L \frac{G_L}{G_G} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots (3.26)$$

Una interpretación de la relación integral de Merkel puede obtenerse de la Figura 3.4.

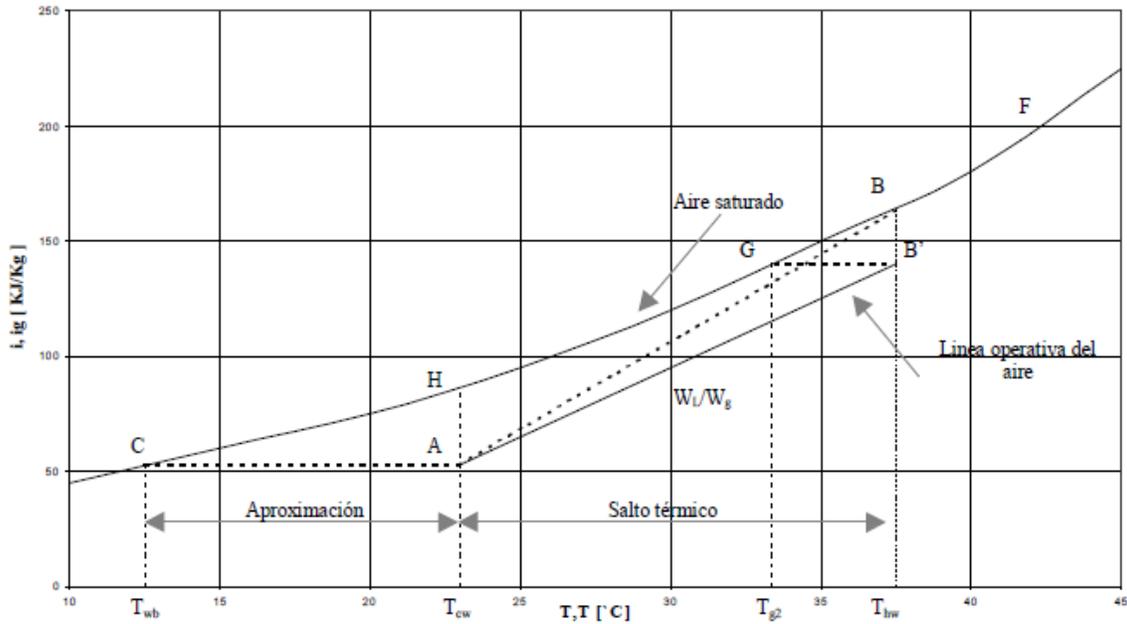


Fig. 3.3 Diagrama entálpico del proceso de enfriamiento

El aire a la temperatura T_2 se representa por el punto A el cual posee la misma entalpía que el aire saturado, T_{wb} . La diferencia entre las temperaturas del aire T_{wb} y T_2 se le denomina aproximación y a la diferencia entre las temperaturas T_1 y T_2 se le denomina salto térmico.

El aire que deja la torre adquiere la entalpía del agua caliente que entra por la parte superior. Cuando el contenido de humedad con el que sale el aire se aproxime al de saturación mejor será el desempeño térmico de la torre.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

De la figura 3.4 se depende que dicha saturación se consigue con la línea de operación que une “A” con “B” que además es la de mayor pendiente (Maximovalos de (L/G)). Pero por estar “B” sobre la curva de aire saturado, dicha operación es posible únicamente con una torre de altura infinita. Por lo tanto es necesario disminuir la relación agua-aire y conseguir una línea con menor inclinación como la AB.

En la formulación teórica de enfriamiento del agua en contra corriente de la torre de enfriamiento dos transferencias, calor y masa son definidas como manejo de fuerzas. Para la transferencia de calor por convección ha sido tomada la diferencia de temperatura entre los flujos de agua y aire. La transferencia de masa se expresa en la dependencia de las diferencias de la densidad del vapor en el contacto de la fase y en flujo de aire.

Esta formulación se considera correcta. Para el cálculo de torres de enfriamiento dos valores empíricos que son necesarios: coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de transferencia de masa.

En la formulación simplificada, que primero fue establecida por Merkel, la transferencia de calor convectivo y evaporativo es tomado por un coeficiente, definido como “coeficiente de transferencia de calor y masa”. “El manejo de fuerzas” es, en este caso, la diferencia de entalpía entre el aire saturado en el contacto de la fase y el aire sobresaturado en la mayoría de flujo. La ecuación fue simplificada fue nombrada como ecuación principal de Merkel.



3.7 CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO

El porcentaje de capacidad para la torre de enfriamiento por el criterio de Merkel está dado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de capacidad} = \frac{(L/G)_{prueba}}{(L/G)_{diseño}} * 100 \dots\dots\dots (3.27)$$

Donde $(L/G)_{prueba}$ es la relación entre el flujo de agua y el flujo de aire seco que ingresa a la torre, $(L/G)_{diseño}$, es la relación de diseño del flujo de agua con respecto al flujo de aire seco, proporcionado por el fabricante y $(L/G)_{prueba}$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$(L/G)_{prueba} = (L/G)_{diseño} \left(\frac{L_{prueba}}{L_{diseño}} \right) \left(\frac{BHP_{diseño}}{BHP_{prueba}} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_{G \text{ prueba}}}{\rho_{G \text{ diseño}}} \right)^{1/3} \left(\frac{V_{G \text{ prueba}}}{V_{G \text{ diseño}}} \right) \dots\dots\dots (3.28)$$

CAPITULO 4

TORRES DE ENFRIAMIENTO

El uso más extenso en la actualidad, de la transferencia de calor disfuncional se encuentra en la torre de enfriamiento, cámara de rocío de aire acondicionado, secadores de rocío, torres de rocío, y areador de fuente.

El uso de las torres de enfriamiento ha crecido tremendamente en los últimos veinte años, debido a una necesidad cada vez mayor.

4.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Una torre de enfriamiento enfría agua por una combinación de la transferencia de calor y la masa. El agua para ser enfriada es distribuida en la torre por bocas de rocío, las barras de salpicadura, o de tipo película, que expone un área muy grande de agua al aire atmosférico. El aire atmosférico es circulado por:

- (1) ventiladores
- (2) por las corrientes de convección
- (3) por las corrientes naturales de viento
- (4) por el efecto de la inducción de rocíos

Una porción del agua absorbe el calor para cambiar de un líquido a un vapor a presión constante. Este calor de vaporización en la presión atmosférica se transfiere del agua que queda en el estado líquido en la corriente de aire.

La figura 4.1 muestra la relación de la temperatura entre el agua y el aire mientras pasan a través de una torre que se enfría de la contra-corriente. Las curvas indican la temperatura del agua (punto A al punto B) y al incremento de la temperatura del bulbo húmedo del aire (punto C al punto D) en sus pasos respectivos a través de la torre.

La diferencia de la temperatura entre el agua que entra y que sale de la torre de enfriamiento (A menos B) es la gama.

Para un sistema que funciona en un estado constante, la gama es igual al incremento de la temperatura del agua a través del cambiador de calor de la carga, con tal que el caudal a través de la torre que se refresca y el cambiador de calor sean igual. Por consiguiente, la gama es determinada por la carga de calor y el caudal del agua, no por el tamaño o la capacidad termal de la torre de enfriamiento.

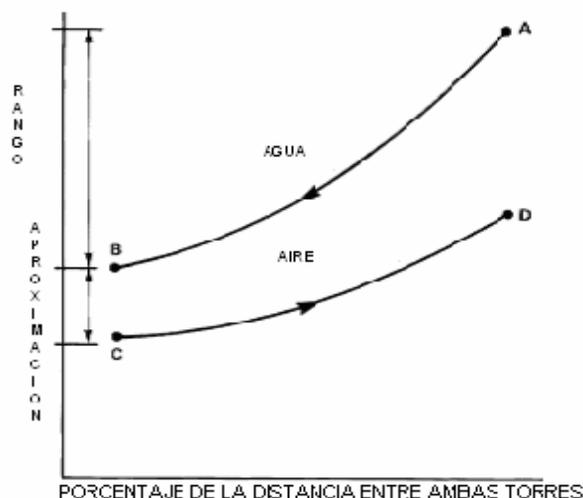


Fig.4.1 Muestra la relación de la temperatura entre el agua y el aire

La diferencia entre la temperatura de agua de partida y la temperatura de entrada de bulbo húmedo del aire (B negativa C). En la figura 3.1 es el enfoque a la de bulbo húmedo o simplemente el enfoque de la torre de enfriamiento. El enfoque es una función de la refrigeración de la capacidad de la torre, y una torre más grande de enfriamiento producen un enfoque más cerca (a la partida más fría de agua) para una carga dada de calor, para la tasa de flujo, y para el aire acondicionado entrante. Así, la cantidad del calor transferido a la atmósfera por la torre es siempre igual a la carga de calor que impuso en la torre, mientras el nivel de temperatura en que el calor se transfiere es determinado por la capacidad térmica de torre de enfriamiento y la temperatura de entrada de bulbo húmedo del aire.

El desempeño térmico de una torre de enfriamiento depende principalmente de la temperatura de entrada de bulbo seco del aire y la humedad relativa, tomadas independientemente, tiene un efecto insignificante en el desempeño térmico de las torres de enfriamiento de tiro-mecánico, pero ellos afectan la tasa de la evaporación de él agua dentro de la torre de enfriamiento.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Un análisis psicrométrico del aire que pasa por una torre de enfriamiento ilustra este efecto figura 4.2. El aire entra en el punto de condición del medio ambiente, absorbe calor y la masa (húmeda) del agua, y de las salidas en el punto B en una condición saturada (en cargas muy ligeras, el aire de la descarga no se puede saturar).

La cantidad del calor transferido del agua al aire es proporcional a la diferencia en la entalpía del aire al entrar y las condiciones iniciales ($h_B - h_A$). Por que las líneas de entalpía constante corresponden casi exactamente a líneas de la temperatura de bulbo húmedo, el cambio en la entalpía del aire es determinado por el cambio de temperatura de bulbo húmedo del aire.

El calentamiento del aire, representado por vector AB en la figura 4.2. Puede ser separado en la componente CA, que representa la porción correcta del calor absorbido por el aire como el agua que se enfría, y el componente CB, que representa la porción latente. Si el aire acondicionado de entrada se cambia al punto D a la misma temperatura de bulbo húmedo pero a una temperatura más alta de bulbo seco, la transferencia total de calor, representado por Vector DB, se queda igual, pero los componentes de calor sensible y latente cambian dramáticamente. DE representa la refrigeración sensible del aire, mientras EB representa el calor latente como el agua renuncia al calor y la masa al aire. Así, para la misma carga de agua-refrigeración, la proporción de la transferencia latente del calor a la transferencia sensible puede variar apreciablemente.

La proporción de calor latente al calor sensible es importante de analizar en el uso de agua de una torre de enfriamiento. La transferencia (evaporación) masiva ocurre sólo en la porción latente del proceso de la transferencia del calor y es proporcional al cambio en la humedad específica. Porque la temperatura entrante de bulbo seco del aire o humedad relativa afectan al calor latente a la proporción de calor sensible de la transferencia de calor, afecta también la tasa de la evaporación.

En la figura 4.2 la tasa de evaporación en caso de que AB ($W_B - W_A$) sea menos que en caso de que DB ($W_B - W_D$) porque la transferencia latente de calor (la transferencia de masa) representa una porción pequeña de la suma.

La tasa de la evaporación en condiciones típicas de diseño es aproximadamente 1% de la tasa de flujo de agua para cada 7 K de la gama de la temperatura de agua; sin embargo, la tasa media de la evaporación sobre la temporada de operación es menos que la tasa de diseño.

Además de pérdida de agua de la evaporación, las pérdidas también ocurren debido a adherencia al cilindro en la corriente aérea y la purga de la descarga para mantener aceptable la calidad del agua.

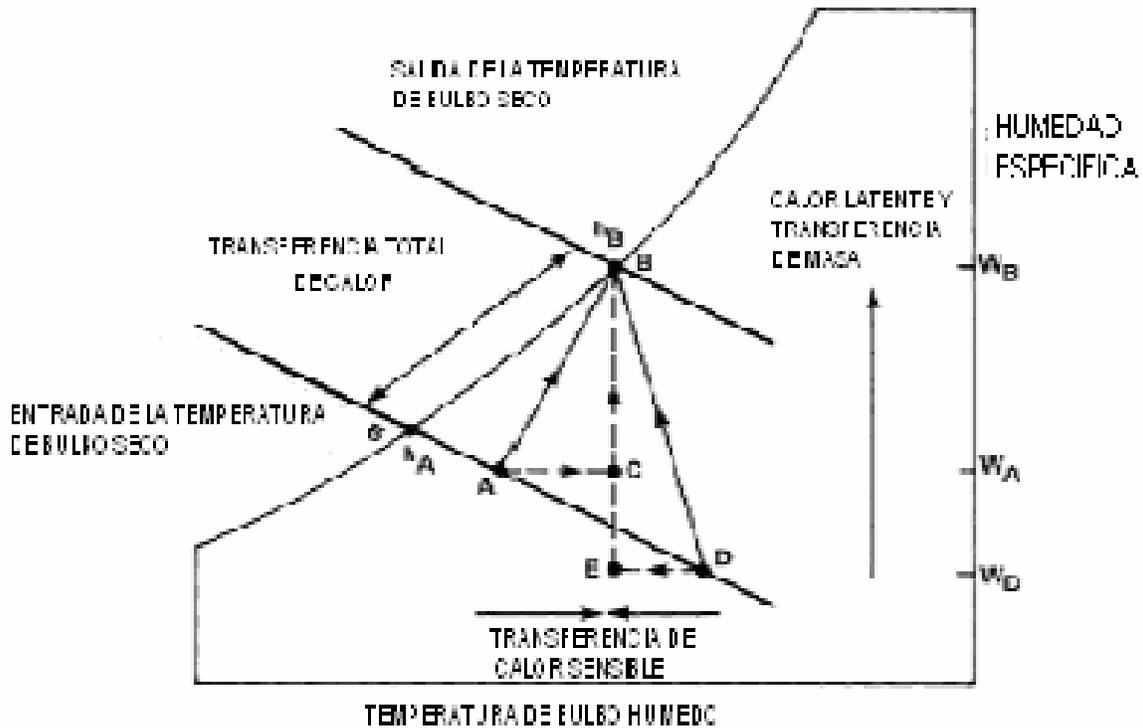


Fig.4.2 Muestra un análisis psicrométrico del aire que pasa por una torre de enfriamiento

4.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo con los medios por los que se suministra el aire. Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre al aire y el agua.

Torres de Tiro mecánico

- **Tiro inducido:** El aire se succiona a través de la torre mediante un abanico situado en la parte superior de la torre.
- **Tiro forzado:** El aire se fuerza por un abanico en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

Torres de circulación natural

- **Atmosféricas:** Aprovecha las corrientes atmosféricas de aire, este penetra a través de rompevientos en una sola dirección, cambiando con las estaciones del año y las condiciones atmosféricas.
- **Tiro natural:** Operan de la misma manera que una chimenea de un horno. La diferencia entre la densidad del aire en la torre y en el exterior originan un flujo natural de aire frío en la parte inferior y una expulsión del aire caliente menos denso en la parte superior.

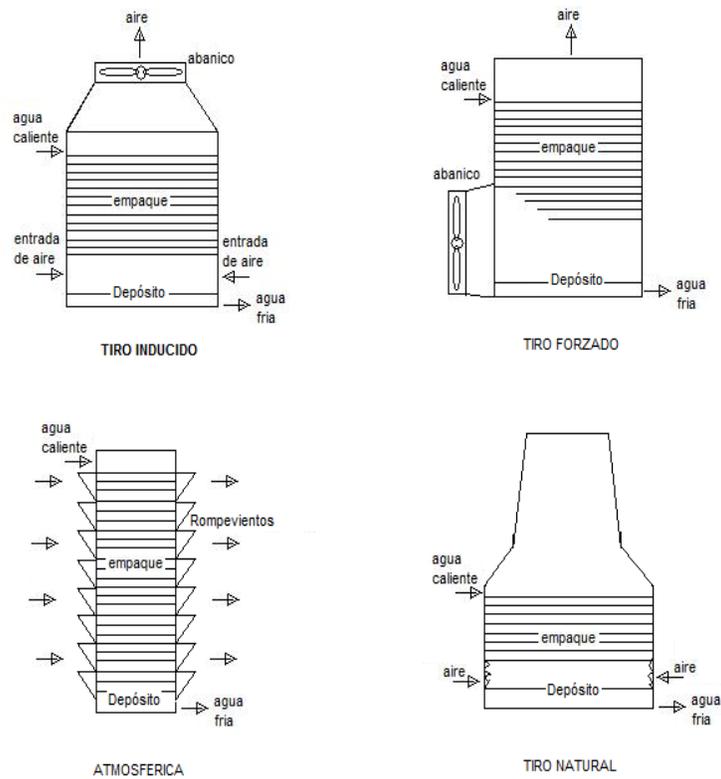


Fig. 4.3 Muestra los tipos de torres de enfriamiento

En el tipo de tiro forzado el aire entra a través de una abertura circular mediante un abanico, y debido a esto se debe suministrar una altura de torre y su volumen correspondiente de relativa inefectividad, que se usa como entrada de aire.

En las torres de tiro inducido, el aire puede entrar a lo largo de una o más paredes de la torre y, como resultado, la altura requerida de la torre para entrada del aire es muy pequeña.

En la torre atmosférica, las corrientes penetran a todo el ancho de la torre, las torres se hacen muy angostas en comparación con otros tipos, y deben ser muy largas para una capacidad igual.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Las torres de tiro natural deben ser altas para promover el efecto de las densidades, deben tener una sección transversal grande debido a la baja velocidad con que el aire circula comparada con las torres de tiro mecánico.

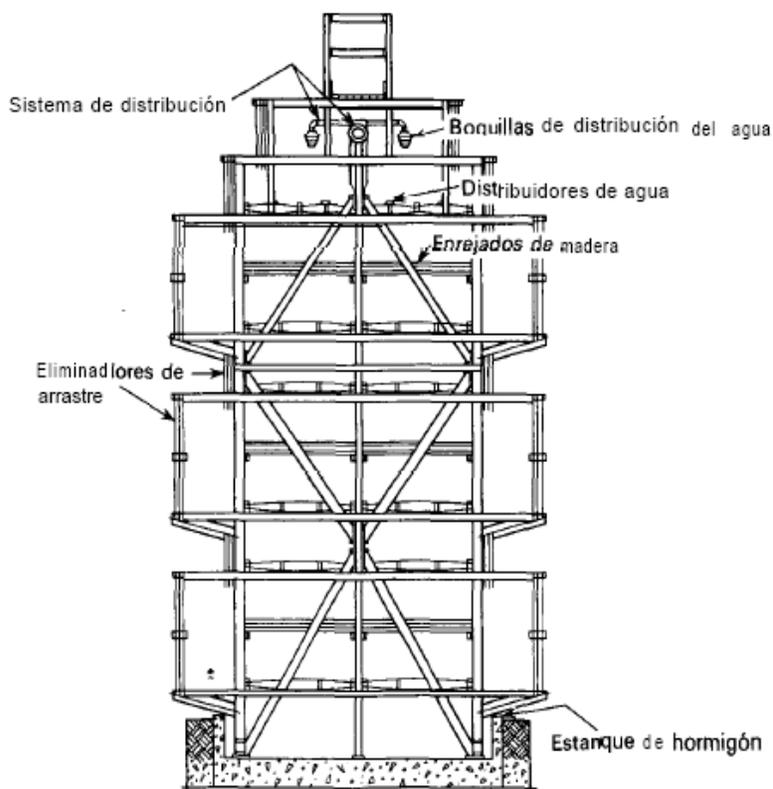


Fig.4.4 Muestra las partes principales de una torre de enfriamiento

Estas torres usan ventiladores para mover el aire en vez de depender del tiro natural o de la velocidad del viento en el sitio en que esté funcionando. Como se aprecia, el hecho de utilizar ventiladores, permite controlar la demanda de aire requerida para un determinado proceso de enfriamiento.

Las torres de tiro mecánico se subdividen en: (1) torres de tiro forzado y (2) torres de tiro inducido, según que el aire se forcé por un ventilador situado en la parte inferior o se succione mediante un extractor situado en la parte superior, respectivamente.

TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO

Estas torres se clasifican según el flujo de aire en dos tipos:

- (a) Flujo en contra-corriente
- (b) Flujo cruzado

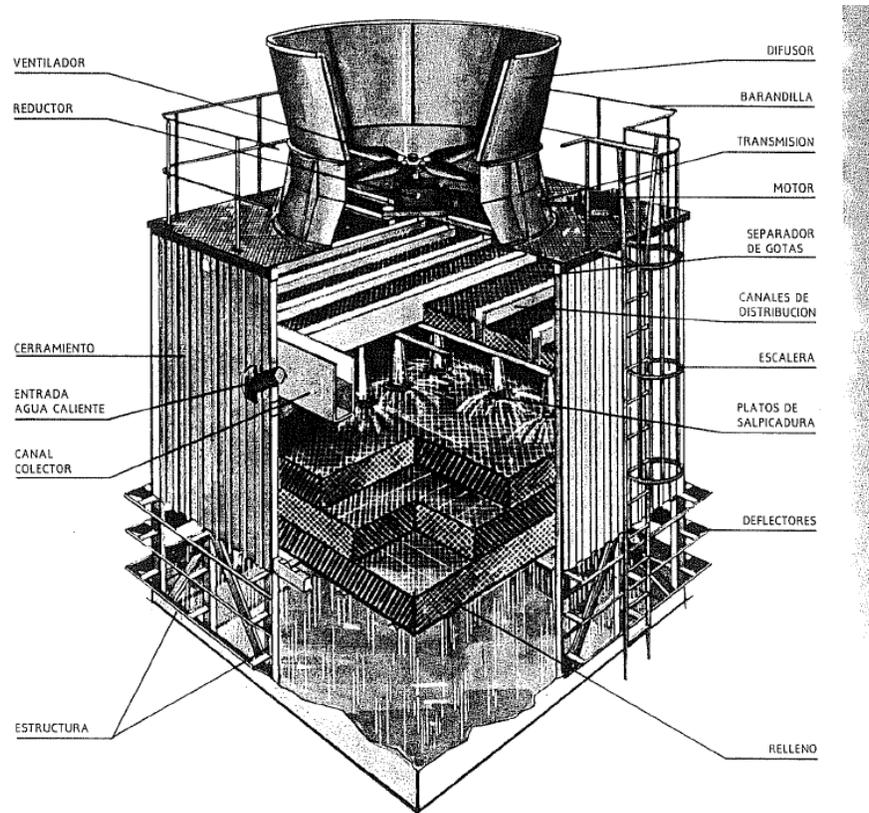


Fig. 4.5 Nos muestra una torre de enfriamiento de tiro inducido de flujo cruzado

Esta tipo de torre representado en la figura 4.5, tiene un extractor situado en la parte superior de la unidad, el cual succiona el aire verticalmente a través de la zona empaquetada y lo expulsa a alta velocidad.

4.3 COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

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:

I. 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:

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

II. 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.

III. Relleno

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

- Una superficie de intercambio lo más grande posible entre el agua que cae y el aire que asciende.
- Retardar el tiempo de caída del agua, asegurando una mayor duración del proceso de intercambio.

Las características de un relleno deben ser:

- a. Se debe de realizar con un material de bajo coste debido a la cantidad que se emplea, y debe ser de fácil colocación.
- b. La superficie del mismo debe ser la mayor posible en relación con su volumen.
- c. 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.
- d. 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.

IV. 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).

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.

La parte más importante en seleccionar un ventilador es la habilidad de poder leer los datos de la operación del ventilador o los términos de placa que tiene.

Términos:

PCM – Pies Cúbicos por Minuto. Una medida de la corriente del aire.

Pe – Presión Estática (*Pe*). La resistencia del aire medida en pulgadas de columnas de agua.

Sone – Una medida del ruido. Un sone es aproximadamente igual al ruido generado por un refrigerador a una distancia de 5 pies. Los sones siguen una escala lineal, que es, 10 sones son dos veces más fuertes que 5 sones.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

BHP – Punto de Operación de la Potencia del Motor (Brake Horsepower). Una medida del poder de consunción, usado para determinar el apropiado caballaje de fuerza para el motor y alambrado.

Hp – Caballaje de Fuerza (Horsepower). Utilizado para indicar el tamaño de motor del ventilador.

rpm – Revoluciones por Minuto. La medida de la velocidad del ventilador.

TS – La velocidad del tope de la rueda o hélice del ventilador (Tip Speed), medida en pies por minuto.

AMCA – Asociación del Movimiento y Control del Aire. Una Asociación mundialmente reconocida, la cual establece normas de pruebas para los rangos de operación de los ventiladores. También establece licencias para el volumen del aire y rangos del sonido.

En los ventiladores de acople por correa, la definición ofrece el tipo de modelo, tamaño y caballaje de fuerza del motor.

V. 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).

VI. Balsa

Situada en la parte inferior de la torre, es el depósito de agua fría de la torre.

VII. Sistema de agua de aporte

La evaporación de agua en la torre provoca una disminución del volumen de agua en ésta. Por otro lado, la concentración de sales en el agua se controla con un régimen de purgas adecuado. La evaporación y las purgas hacen que sea necesario el aporte constante de agua.



4.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los materiales de construcción de una torre de enfriamiento se escogen generalmente con la condición de que deben resistir el agua corrosiva y las condiciones atmosféricas.

Metales

El acero zinc galvanizado se utiliza para instalaciones pequeñas y medianas. Galvanizado en caliente y chapado de cadmio y zinc se utilizan para la ferretería. Los latones y los bronces se escogen para la ferretería especial, para los accesorios, y para la materia de tubería. Los aceros inoxidables (principalmente 302,304, y 316) a menudo son utilizados para el metal laminado, maneja túneles, y la ferretería (considerada como toda la parte metálica) en atmósferas excepcionalmente corrosivas.

Hierro fundido es una elección común para moldes despreciables, ejes de ventilador, engranajes de reducción, y los componentes de válvula de tubería. Los metales se revisten con poliuretano y el PVC son utilizados selectivamente para componentes especiales. Dos partes de epoxi la componen y capas epoxi en polvo se utilizan también para componentes claves o refrigeración entera de torres.

Plásticos

Las materias del plástico (FRP) fibra de vidrio reforzado se utilizan para componentes tales como la estructura, la tubería, los cilindros de ventilador, hojas de ventilador, embalar, las persianas, y para conectar estructuralmente los componentes. El polipropileno y el estireno (ABS) de acrilonitrilo butaideno se especifican para componentes de moldeo por inyección, tal como para llenar orificios de barras y flujo.

PVC se utiliza cada vez más como paquete, combate, elimina, y hace las materias de persiana. El mortero plástico reforzado se utiliza en sistemas más grandes de tubería.

Grafito

El compuesto de grafito maneja túneles, han llegado a ser recientemente disponibles para uso en la refrigeración de las instalaciones de las torres. Estos túneles ofrecen una alternativa fuerte y resistente a la corrosión, acero/túneles inoxidables de acero.

4.5 CONSIDERACIONES DE LA SELECCIÓN

La selección de una torre de enfriamiento, depende de una variedad de factores:

a) Flujo de agua a ser enfriada

El flujo de agua a ser enfriada es del orden de 105 kg de agua por segundo valor que está comprendido en el grupo de procesos distribuidos principalmente por torres de tiro inducido en contraflujo.

b) Rango de enfriamiento

El rango de enfriamiento está en el orden de los 10°C que comprende principalmente el rango de enfriamiento utilizado en una torre de tiro inducido en contra corriente.

c) Localización

Cuando una torre de enfriamiento se localiza en un espacio abierto con el movimiento de aire libre, normalmente no es un impedimento es por eso que es adecuado colocar la torre de enfriamiento en dicho lugar. Sin embargo, las torres a menudo se sitúan dentro de un espacio reducido: contra paredes, o en cercos. En tales casos, se deben considerar los siguientes factores:

1. Dirección adecuada del aire y un suministro de espacio aéreo adecuado para los ventiladores.
2. Promover la recirculación de una porción del aire tibio y húmedo de la descarga que vuelve entrar a la torre (figura 4.6).

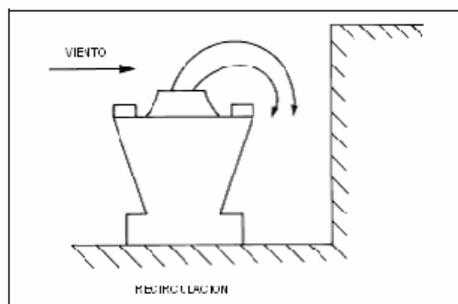


Fig. 4.6 Torre de Reingreso del Aire de Descarga

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

La posibilidad de recircular el aire se debe considerar, especialmente en instalaciones donde existan torres de enfriamiento con más de dos celdas.

La ubicación de la torre de refrigeración es determinada generalmente por uno o por más de lo siguiente:

- Los requisitos estructurales de apoyo.
- Códigos y ordenanzas locales
- El costo de traer los servicios auxiliares a la torre de la refrigeración.
- A la compatibilidad arquitectónica.

d) Tubería

La tubería se debe calibrar adecuadamente según la práctica comercial. Toda tubería se debe diseñar para permitir la expansión y la contracción provocada por la temperatura.

Instalar para equilibrar el flujo a cada celda apropiadamente. Todos los intercambiadores de calor, y tanta tubería de torre como es posible, se deben instalar debajo del nivel del agua de operación en la torre de enfriamiento para prevenir derramar la torre de enfriamiento en el cierre y para asegurar la operación satisfactoria de la bomba.

En virtud de todos estos factores, siempre y cuando mayor eficiencia de enfriamiento sea requerida, la técnica más adecuada sería la selección de una torre de enfriamiento que opere independientemente de la velocidad y dirección del viento, para que de esta forma se pueda controlar la demanda de aire con velocidad seleccionada en los requerimientos de un proceso.

Según lo indicado, la selección cae dentro de los tres tipos de torre mecánico:

- ✓ Torre de tiro forzado
- ✓ Torre de tiro inducido flujo en contra-corriente
- ✓ Torre de tiro inducido flujo cruzado

De estos tres tipos, la conclusión nos indica que los últimos dos son los más eficientes. Ahora bien, si entre estos se evalúa al mejor, la torre de tiro inducido flujo cruzado ofrece muchas ventajas. Esto se debe a que provee buena eficiencia de enfriamiento y alta economía en los costos de construcción y en los equipos mecánicos.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Pero la principal ventaja de estas torres está en el que el agua fría en la parte inferior se pone en contacto con el aire que entra (baja humedad relativa) y el agua caliente que entra, se pone en contacto con el aire húmedo que sale. En estos equipos, la recirculación rara vez es un problema puesto que, el aire saturado es expulsado a alta velocidad, de manera que se proyecte hacia arriba, lejos de las lumbreras de admisión de la torre y de esta manera se arrastrada por las corrientes naturales de aire que evitan su asentamiento posterior. Sin embargo, las torres de este tipo presentan caída de presión en la toma de aire del extractor, lo que produce un aumento de los requerimientos totales de energía y además la alta velocidad de descarga del extractor produce algo de pérdidas de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire a través de la unidad.

La preferencia hacia las torres de este tipo ha sido muy pronunciada en los últimos años, puesto que en su uso hay ventajas que exceden a todos los otros tipos, excepto en condiciones muy especiales; por otra lado, la mayoría de los investigadores que se dedicaron al análisis del funcionamiento de torres de enfriamiento de tiro mecánico, partieron de modelos de torres de tiro inducido, ofreciendo suficientes publicaciones concretas (estudios de torres de este tipo fueron hechos por célebres investigadores, tales como Markel, Goodman, Sherwood Y Mickley).

Factores muy importantes a tomar en cuenta son los siguientes: como la altura, la longitud, la anchura, el volumen de la corriente de aire, el ventilador y el consumo de energía de la bomba, los materiales de la construcción, la calidad de agua, y la disponibilidad influyen en la selección final del equipo.



4.6 CÁLCULO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética es una medida del desempeño de una máquina 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:

$$n_I = \frac{\text{Salida Deseada}}{\text{Entrada Requerida}} \dots\dots\dots (4.1)$$

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.

$$n_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{ag} c_{p_{ag}} \Delta T_{ag}}{q_{t, \min}(T_{ag,e} - T_{bh})} \dots\dots\dots (4.2)$$

Por otra parte la eficiencia energética para una Torre de enfriamiento se obtiene:

$$n_I = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{bh}} \dots\dots\dots (4.3)$$

Donde $T_{ag,e}$ es le temperatura de agua de entrada, T_{bh} es le temperatura de bulbo húmedo y $T_{ag,s}$ es la temperatura de agua de salida.

La eficiencia de enfriamiento puede ser mejorada aumentando el tiempo de contacto del agua con el aire, lo cual se logra aumentando:

- a) La cantidad de empaquetadura
- b) La altura de la torre
- c) El área de la sección transversal

Por otra parte, la eficiencia de enfriamiento de cualquier torre dada, varía con el flujo específico del agua que circula (Gagua). Una vez analizados los tipos de torres de enfriamiento, se puede concluir que, el tipo inducido permite mejor distribución del aire y mayor eficiencia de enfriamiento. El flujo cruzado permite bajas alturas y menor costo de bombeo de agua y, el flujo en contra-corriente provee mayor eficiencia de enfriamiento.

CAPITULO 5

CÁLCULOS DIMENSIONALES



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

5.1 CONDICIONES DE DISEÑO

La capacidad térmica de cualquier torre de enfriamiento puede ser definida por los parámetros siguientes:

- Entrada y salida de las temperaturas del agua.
- La entrada de temperatura de bulbo húmedo del agua o la entrada de la temperatura de bulbo húmedo y la de bulbo seco del aire.
- Flujo másico.

La temperatura de entrada de bulbo seco del aire afecta la cantidad de agua evaporada de cualquier torre de enfriamiento de tipo evaporador. Afecta también la corriente de aire por torres hiperbólicas y establece directamente la capacidad térmica dentro de cualquier contacto indirecto que refresca el componente de la torre que opera en un modo seco.

AGUA CALIENTE DE ENTRADA A LA TORRE			Diseño	
Temperatura de entrada	T_agua1P	°C	40	Entrada
Flujo volumétrico	Q_agua	m ³ /h	375	Salida
Flujo másico	G_agua1P	kg/s	103.7	Salida
AIRE DE ENTRADA A LA TORRE				
Temperatura de entrada a ventiladores	T0_P	°C	25	Entrada
Humedad relativa	HR_aireP	%	60	Entrada
Temperatura de bulbo húmedo	TBH_P	°C	20	Entrada
Flujo másico	G_aire	kg/s	72.52	Salida
AGUA FRIA A LA SALIDA DE LA TORRE				
Temperatura de salida agua	T_agua2P	°C	30	Salida
Flujo másico	G_agua2P	kg/s	103.7	Salida

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

CONDICIONES DE VENTILADORES				
Voltaje	V	Volt	230	Entrada
Corriente	I	Amp	115	Entrada
Factor de potencia	FP		0.885	Entrada
Potencia de motor	BHP_P	HP	54.37	Salida
AIRE A LA SALIDA DE LA TORRE				
Temperatura de salida aire	T_aire2P	°C	33.5	Entrada
Velocidad de aire	Vs_P	m/s	13.35	Entrada
Humedad Relativa	HR_aire2P		1	Entrada
CONDICIONES AMBIENTALES				
Presión atmosférica	PO_P	bar	1.013	Entrada
Temperatura ambiental	TO_P	°C	25	Entrada
Humedad Relativa	HR_P	%	60	Entrada

Tabla 5.1 Condiciones de diseño

5.2 CÁLCULO DIMENSIONAL

Con los datos suministrados por las condiciones de diseño y siguiendo el método para determinar las relaciones fundamentales, a continuación se procederá a efectuar los cálculos necesarios para obtener los siguientes valores.

- a) Determinación del valor del coeficiente total de transferencia de masa, (KaVL ó NTU)
- b) Cálculo del área de la sección transversal de la torre, (A)
- c) Cálculo de la altura de la zona empaquetada, (Z)
- d) Cálculo de la cantidad de agua de recuperación, (M)
- e) Selección del ventilador
- f) Determinación de las dimensiones de la piscina

5.2.1 Determinación del valor del coeficiente total de transferencia de masa, (KaVL) el método de TCHEBYCHEFF

La ecuación 6.1 se conoce como “Integral o ecuación de Merkel” y permite calcular el Número de Unidades de Transferencia de Calor (*NTU*), para que la torre cumpla con el servicio requerido. La ecuación no tiene una solución matemática directa, ya que la transferencia de masa y el balance de energía en cualquier punto de la torre son independientes del movimiento relativo entre los dos fluidos:

$$\frac{k_a V}{G_L} = C p_L \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h_w - h_a} = NTU \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\frac{k_a V}{G_G} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h_w - h_a} \dots\dots\dots (5.2)$$

De acuerdo a lo expuesto es necesario entonces escoger un estándar aplicable a nuestro interés: las Torres para Enfriamiento de Agua. En éste ámbito es numerosa la información que existe y entre otras podrían mencionarse las normas japonesas (*JIS*), las norteamericanas (*ASME* y *CTI*), y las alemanas (*DIN*). Para la realización de éste trabajo se decidió optar por los estándares del Cooling Tower Institute (*CTI*). Esta elección obedeció al elevado prestigio internacional de dicho instituto, además sus publicaciones e informes constituyen la mayor fuente bibliográfica.

Cooling Tower Institute (*CTI*) propone una solución para la integral de Merkel empleando el método de Tchebycheff de la siguiente manera:

$$\int_a^b y dx = (b - a) * \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4} \dots\dots\dots (5.3)$$

$$\Delta h_1 = \text{valorde}(h_w - h_a) a T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_2 = \text{valorde}(h_w - h_a) a T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_3 = \text{valorde}(h_w - h_a) a T_1 - 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_4 = \text{valorde}(h_w - h_a) a T_1 - 0.1(T_1 - T_2)$$



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Por lo tanto, para la evaluación de $\frac{KaV}{G_L}$, aplicando el método de Tchebycheff se tiene que:

$$\frac{KaV}{G_L} = C_{pL} \int_{T_2}^{T_1} \frac{dt}{h_w - h_a} = \frac{T_1 - T_2}{4} * \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \dots \dots \dots (5.4)$$

Para evaluar cada uno de los valores, se utilizó una herramienta computacional para resolver el método numérico. La más adecuada fue Engineering Equations Solver (EES).

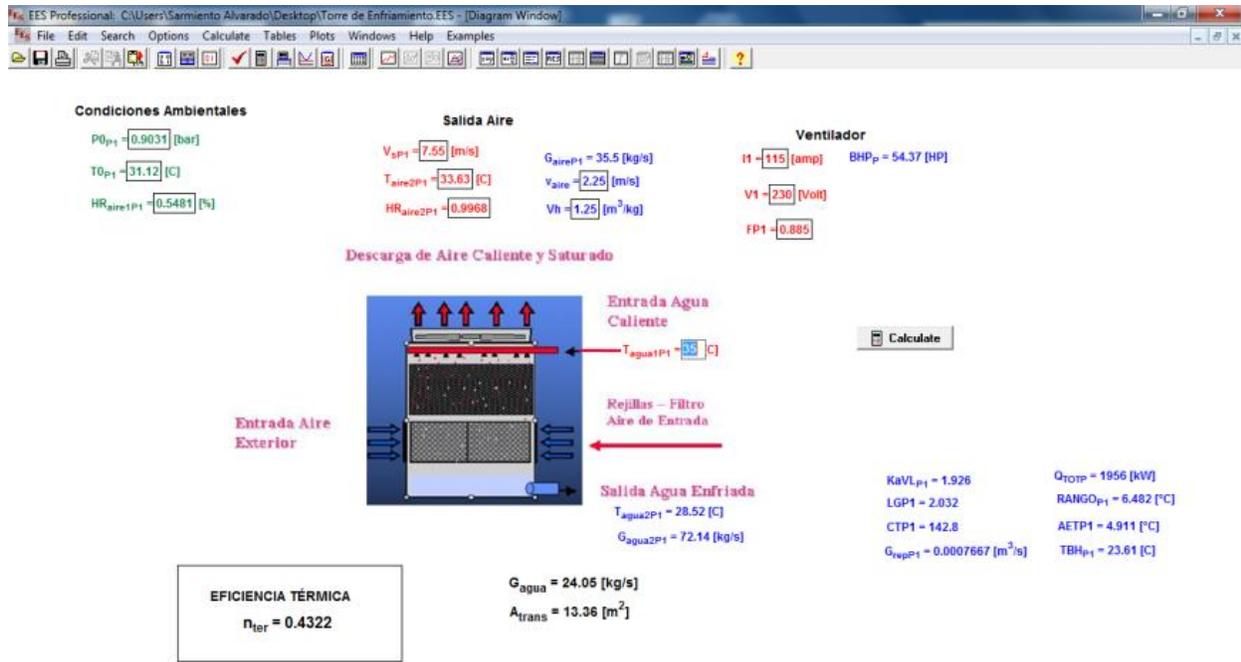


Fig.5.1 Programa EES

5.2.2 Cálculo del área transversal

Se tiene entonces que el flujo másico por celda corresponde a 24.05 kg/s valor que se considera para calcular el área transversal de la torre de enfriamiento:

$$G = 1.25 * G_{agua} \dots \dots \dots (5.5)$$

Donde G es el flujo másico total (kg/s) y G_{agua} es el flujo másico de agua de enfriamiento por cada celda o unidad (kg/s)

Se calcula el área transversal a partir del volumen húmedo y la velocidad del viento:

$$A_{transversal} = \frac{G * Volumen\ húmedo}{velocidad\ del\ viento} \dots \dots \dots (5.6)$$

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Donde:

Volumen húmedo del agua

(Aire/Agua): 1 a 1.5 $\text{kg}_{\text{aireseco}}/\text{kg}_{\text{agua}}$

Valor típico para una torre de tiro inducido a contraflujo **1.25**

Velocidad del aire

Velocidad del aire: 1.83 a 2.44 m/s.

Valor típico en Zimapan, Hidalgo: **2.13 aproximadamente**

Para una temperatura promedio en la central corresponde a 40 °C con el simulador nos arroja un valor de **13.36 m²**.

La construcción se tiene que hacer en un lugar de aproximadamente 3.65 metros por cada lado o se puede aproximar a 4 metros por lado lo que hace un total de 14 m².

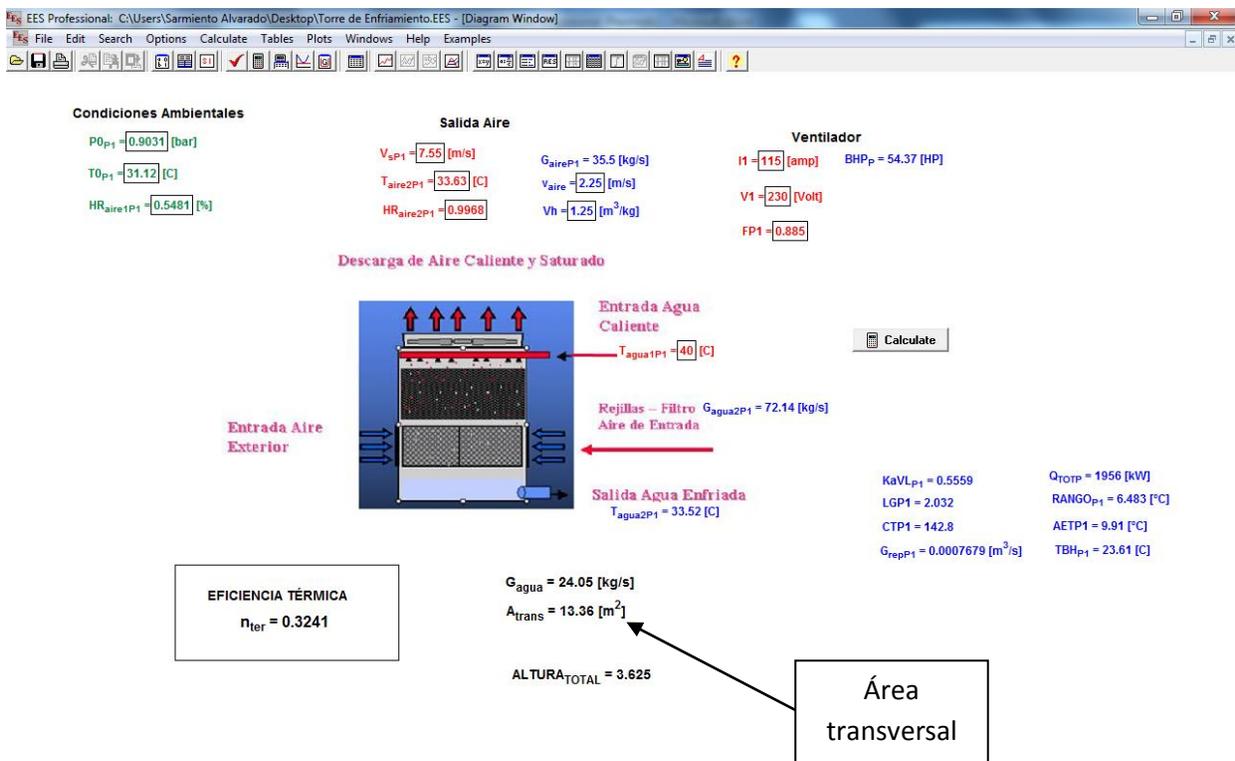


Fig.6.2 Cálculo del área transversal

5.2.3 Cálculo de la altura de la zona empaquetada, Z

Se determina la altura de una unidad de transferencia para ello se aplica las siguientes ecuaciones:

$$H_G = \frac{B}{K_H} \dots\dots\dots (5.7)$$

Entonces:

$$B = \frac{G_{agua}}{A_{trans}} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$K_H = 6.72 * B^{0.75} \dots\dots\dots (5.9)$$

Donde B es la cantidad promedio de agua, G_{agua} es el flujo másico por cada celda o unidad, A_{trans} es el área transversal, y K_H es el coeficiente de transferencia de masa.

Ahora bien, procedemos a calcular la altura del relleno, para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$Z = KaVL * H_G \dots\dots\dots (5.10)$$

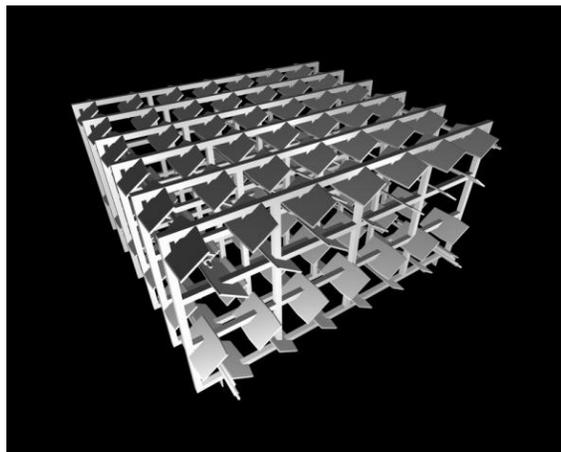


Fig.5.3 Relleno favorece a la transferencia de calor

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Entonces, se procede a calcular la altura total bajo la correspondiente ecuación:

$$ALTURA_{TOTAL} = Z + 0.3 * Z + 3.5 \dots \dots \dots (5.11)$$

Donde Z es la altura de una unidad de transferencia, 0.3 corresponde a un 30% de la altura como un estimado de la altura de la piscina y 3.5 corresponde a la altura del sistema de ventilador, soporte y rociamiento de agua.

Con el simulador se obtiene una altura total de **3.67** metros. Como el resultado de que la altitud favorece la transferencia de calor se aumentará un total de 2.5 metros proporcionales al área transversal quedando la ecuación:

$$ALTURA_{TOTAL} = Z + 0.3 * Z + 3.5 + 2.5 \dots \dots \dots (5.12)$$

Donde este último valor de 2.5 corresponde a la corrección de altitud.

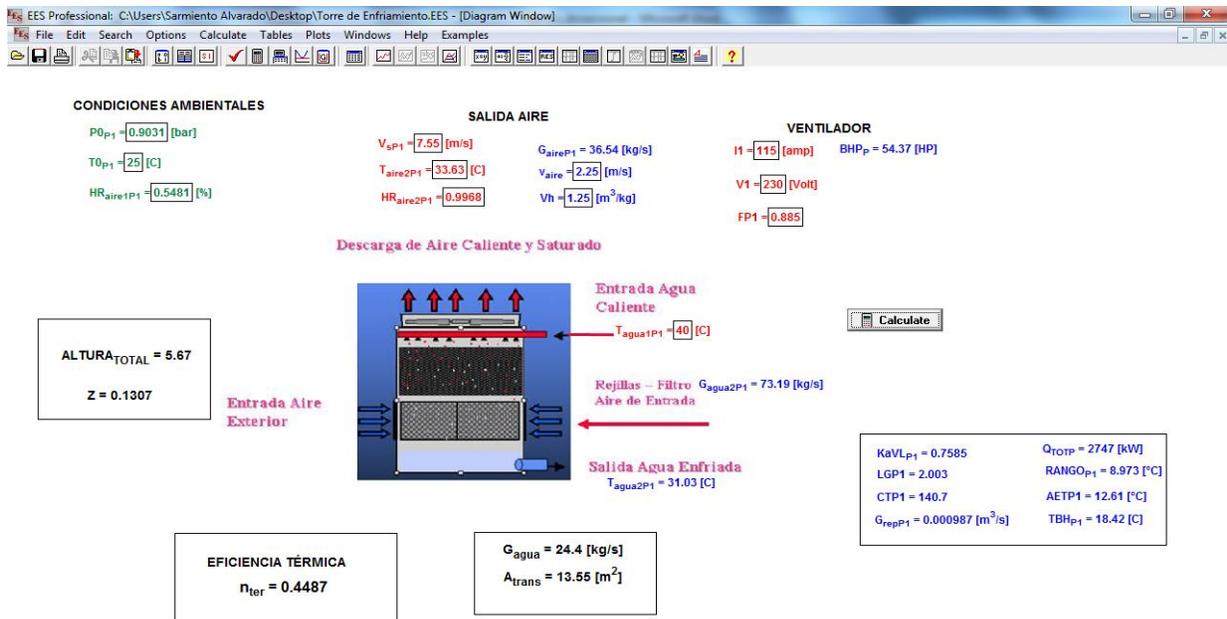


Fig.5.4 Cálculo de altura total

5.2.4 Cálculo de la cantidad de agua de reposición o make-up ;(G_{repP})

Para calcular la cantidad de agua de repuesto se utilizó la siguiente ecuación:

$$G_{REPUESTO} = P_{EVAR} + P_{AR} \dots \dots \dots (5.13)$$

El agua de repuesto es la sumatoria de las pérdidas por evaporación y por arrastre.

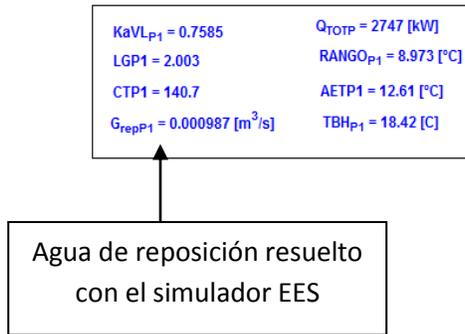
Las pérdidas por evaporación se calculan bajo la siguiente ecuación:

$$P_{EVAR} = \frac{G_{aire} (W_{AIRE2R} - W_{AIRE1R})}{RHO_{AGUA2R}} \dots \dots \dots (5.14)$$

Donde G_{aire} es el flujo másico del aire, W_{AIRE2R} es la humedad relativa a la salida, W_{AIRE1R} es la humedad relativa a la entrada y RHO_{AGUA2R} es la densidad del agua a la salida.

Las pérdidas por arrastre se encuentran regidas bajo la siguiente ecuación:

$$P_{AR} = \frac{0.05}{100} * \frac{G_{AGUA2R}}{RHO_{AGUA2R}} \dots \dots \dots (5.15)$$



Donde G_{AGUA2R} es el flujo másico del agua a la salida y RHO_{AGUA2R} es la densidad del agua a la salida.

5.2.5 Selección del ventilador.

Para seleccionar el ventilador para la torre de enfriamiento es necesario conocer los siguientes datos:

- ✓ Flujo de aire que circulara por la torre en kg/s
- ✓ Velocidad del aire m/s
- ✓ La presión estática o presión de resistencia contra la que debe operar el ventilador

El tipo de ventilador que se utiliza en las torres de enfriamiento es el de tiro inducido con flujo a contra-corriente. Este ventilador es de flujo axial con varias aletas, pudiendo ser estas fijas o de ángulo de inclinación variable.

El flujo de aire se determino con la siguiente ecuación:

$$G_{AIRE} = V_S * \frac{\pi}{4} * D_V * RHO_{AIRE\ 1} \dots\dots\dots (5.16)$$

Donde V_S es la velocidad del aire a la entrada medida obtenida con un anemómetro digital 15.1 m/s, D_V es el diámetro de alabes del ventilador valor obtenido por condiciones de diseño y $RHO_{AIRE\ 1}$ es la densidad del aire a la entrada.



Fig.5.5 Velocidad del ventilador obtenida con anemómetro digital

El flujo de aire corresponde a **36.54 kg/s**

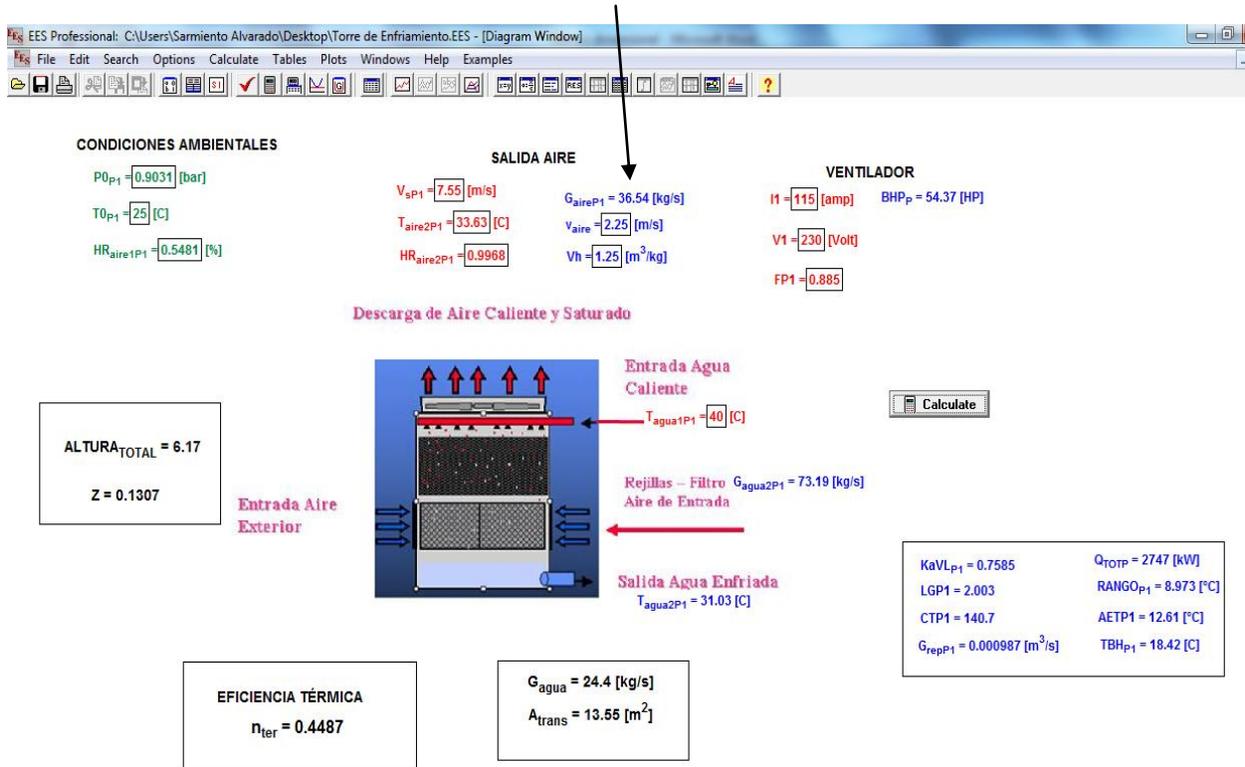


Fig.5.6 Cálculo de Flujo de aire

Con respecto a la caída de presión estática, contra la que debe operar el ventilador, se vió que en torres de este tipo era ordinariamente menor que una pulgada de columna de agua. Por lo tanto, tomando en consideración la resistencia ofrecida al paso del aire por la zona empaquetada y los separadores de gotas, se considera suficiente utilizar el valor de 0.5 pulgadas de agua, valor dentro del rango: 0.3 hasta 1 pulgada de columna de agua.

Una vez conocido los valores de aire circulando y la presión contra la que debe operar el ventilador, se encuentran los siguientes valores característicos para el ventilador a usarse:

- Diámetro del ventilador: 2.44 metros
- Flujo másico: 36.54 kg
- Número de alabes: 6 alabes
- Revoluciones por minuto (rpm): 450 rpm
- Potencia del motor: 54.37 HP

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Como los motores eléctricos cerrados, para torres de enfriamiento vienen con 1760 rpm, se tendrá que utilizar un reductor de velocidad de 1760 a 450 rpm, es decir una relación de reducción de 3.91/1 el cual será movido por una transmisión acoplada al motor (acoples flexibles). Todo el equipo deberá de estar montado sobre una estructura rígida.

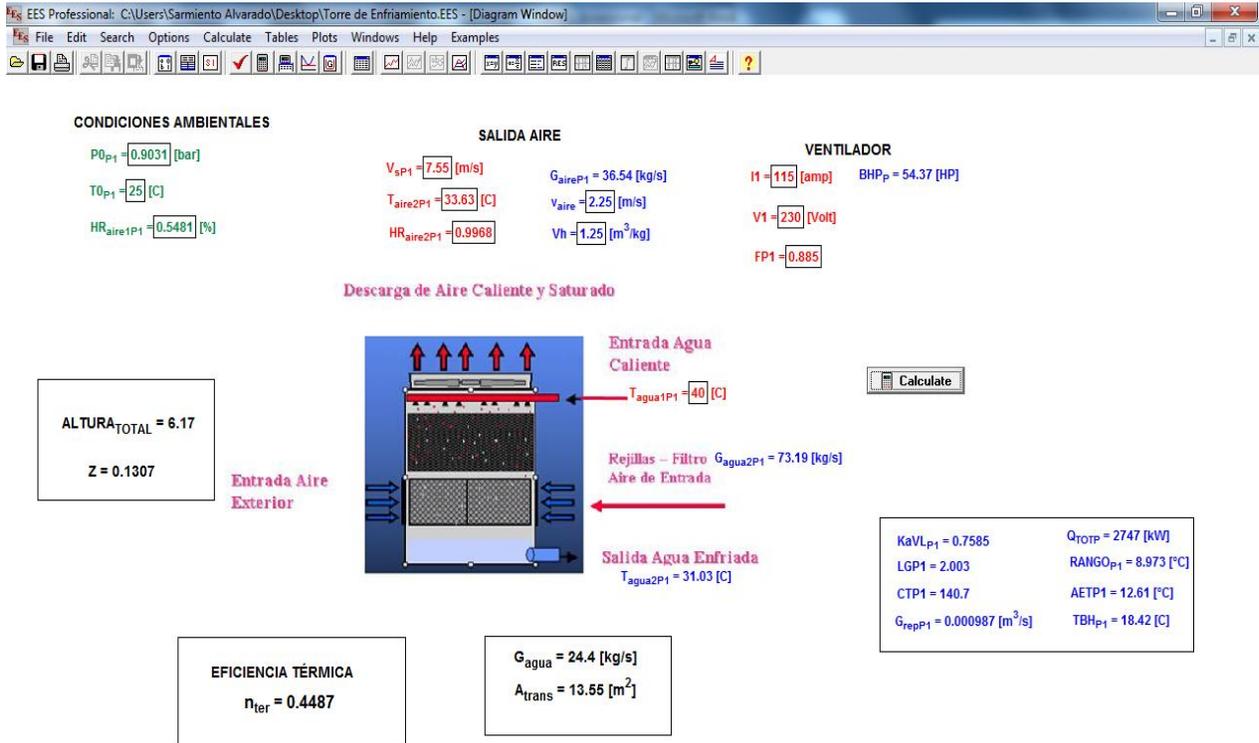


Fig.5.7 Cálculo del ventilador

5.2.6 Determinación de las dimensiones de la piscina.

Para determinar las dimensiones de la piscina para la torre de enfriamiento, se debe de conocer el tiempo, que demora el agua en circular a través del condensador y retornar al distribuidor de agua caliente.

Si se asume que el ciclo demora un minuto, se parte del dato de que la piscina deberá tener una capacidad mayor a los 1100 litros para evitar que este se quede sin líquido, además se requiere que la misma piscina sirva de base para soportar el peso de la torre con sus accesorios.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Como se aprecia, el problema consiste en seleccionar las dimensiones para la piscina, que provean mayor economía y aseguren un buen funcionamiento. Debido al área transversal calculado anteriormente, se considera suficiente una piscina de las siguientes condiciones:

SIMBOLO	
P0_R	Presión atmosférica
T0_R	Temperatura ambiente
TBH_R	Temperatura de bulbo húmedo
T_agua1R	Temperatura del agua a la entrada de la torre de enfriamiento
Q_aguaR	Caudal del agua de enfriamiento, m ³ /
T_agua1P1	Temperatura del agua a la entrada de la torre de enfriamiento

Tabla 5.1 Simbología

Valores obtenidos:

- Ancho: 14 metros
- Largo: 14 metros
- Profundidad: 1.851 metros
- Volumen de la piscina: $14 * 14 * 1.851 = 362.796 \text{ m}^3$.
- Flujo de agua que circulará por la piscina es de: 24.4 kg/s.
- Volumen de agua disponible: $14 * 14 * 1.5 = 294 \text{ m}^3$.

El agua de alimentación será agua potable y el nivel de un metro de profundidad estará controlado por una válvula accionada por un flotador conectada a la línea de alimentación.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

NOMENCLATURA

“CONDICIONES DE PRUEBA PARA LA CELDA 1”

“REFERENCIAS EXTERIOR”

SIMBOLO	
HR0_R	Húmedad Relativa
RANGO_R	Rango de temperaturas del agua
RHO_agua2R	Densidad del agua a las salida de la torre
G_agua2R	FluT_aire2P1o másico del agua
AET_R	Aproximación a la temperatura de bulbo Húmedo

“CONDICIONES DEL AIRE A LA ENTRADA DE LA TORRE”

SIMBOLO	
HR_aire1R	Húmedad Relativa del aire a la entrada de la torre
W0_aire1R	Relación de humedades del Aire a la entrada de la torre
H_aire1R	Entalpía del aire a la entrada de la torre
RHO_aire1R	Densidad del aire a la entrada de la torre
V_aire1R	Volumen del aire a la entrada de la torre
CP_aireR	Calor específico del aire

“CONDICIONES DE SALIDA”

SIMBOLO	
HR_aire2R	Húmedad Relativa del aire a la salida de la torre
W0_aire2R	Relación de humedades del Aire a la salida de la torre
H_aire2R	Entalpía del aire a la salida de la torre
RHO_aire2R	Densidad del aire a la salida de la torre
V_aire2R	Volumen del aire a la entrada de la torre
CP_aire2R	Calor específico del aire a la salida de la torre
H_aire2R	Entalpía del aire a la entrada de la torre
CP_agua2	Calor específico del agua a la salida de la torre
Q_TOTR	Calor total

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

“NTU UTILIZANDO EL MÉTODO TCHEBYCHEFF”

SIMBOLO	
KaVL_R	Número de unidades de transferencia de calor
DH1	Diferencia de entalpía 1
DH2	Diferencia de entalpía 2
DH3	Diferencia de entalpía 3
DH4	Diferencia de entalpía 4
Le	Número de Lewis
W0_aire1S	Relación de humedades a la entrada
W0_aire2SA	Relación de humedades a la salida

“FLUJO DE AIRE”

SIMBOLO	
V_s	Velocidad del aire a la salida del ventilador
D_v	Diámetro de alabes del ventilador
BHP_R	Potencia del motor de ventilador
G_aireR	Flujo másico
LGR	$G_{\text{agua2R}}/(G_{\text{aireR}})$

"CANTIDAD DE AGUA DE REPUESTO O PÉRDIDA EN LA TORRE"

SIMBOLO	
G_repuestoR	Agua de repuesto en referencia, m^3/s
PEVAR	Pérdidas por evaporación, m^3/s
PAR	Pérdidas por arrastre, m^3/s
P_EVAR	Pérdidas por evaporación, %

SIMBOLO	
RANGO_P1	"Rango de temperaturas"
RHO_agua2P1	"Densidad del agua a las salida de la torre"
G_agua2P1	"Flujo másico del agua"
AETP1	"Aproximación a la temperatura de bulbo Húmedo"

"CONDICIONES DEL AIRE A LA ENTRADA DE TORRE"

SIMBOLO	
HR_aire1P1	Húmedad Relativa del aire a la entrada de la torre
W0_aire1P1	Relación de humedades del Aire a la entrada de la torre
H_aire1P1	Relación de humedades del Aire a la entrada de la torre
RHO_aire1P1	Densidad del aire a la entrada de la torre



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

V_aire1P1	Volumen del aire a la entrada de la torre
CP_aire1P1	Calor específico del aire
H_aire2P1	Entalpía del aire a la entrada de la torre
CP_agua2P1	Calor específico del agua a la salida de la torre
TBH_P1	Temperatura de bulbo húmedo
W0_aire2P1	Relación de humedades del Aire a la salida de la torre
HR_aire2P1	Húmedad Relativa del aire a la salida de la torre

"FLUJO DE AIRE DE CELDA 1"

SIMBOLO	
V_sP1	Velocidad del ventilador
V1	Voltaje de ventilador
I1	Amperaje de ventilador
FP1	Factor de Potencia
G_aireP1	Flujo másico de aire
BHP_P	Potencia de ventiladores

"ÁREA TRANSVERSAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR"

SIMBOLO	
V_húmedo	Volumen húmedo
v_aire	Velocidad del aire
A_trans	Área transversal de transferencia de calor

"ALTURA DE TORRE"

SIMBOLO	
B	Flujo másico promedio por área transversal
G_agua	Flujo másico de agua por cada celda
Kha	Coficiente de transferencia de calor
HG	Flujo másico promedio por el coeficiente de transferencia de calor
Z	Altura de la zona empaquetada
A_TOTAL	Altura total de la torre de enfriamiento

"CAPACIDAD DE TORRE CELDA 1 y EFICIENCIA ENÉRGICA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO "

SIMBOLO	
CTP1	Capacidad de la torre de enfriamiento
n_ter	$(T_{\text{agua1P1}} - T_{\text{agua2P1}}) / (T_{\text{agua1P1}} - T_{\text{BH_R}})$



CONCLUSIONES

En la actualidad existe mucha información dispersa acerca de estos cálculos y diseños pero no proporcionan una idea concreta de cómo realizar los mismos, ya que algunos son muy complejos e incompletos.

Debido a esta falta de información se realizó una investigación bastante amplia sobre la transferencia de calor, transferencia de masa y los principales modelos de cálculo del dimensionamiento geométrico del paquete de las torres de enfriamiento.

Este trabajo trata de brindar las herramientas necesarias para que la empresa sea capaz de satisfacer sus requerimientos del cálculo y diseño, sin tener que recurrir a los datos de empresas dedicadas al diseño y construcción de torres de enfriamiento, ya que son muy difíciles de acceder y los servicios que ofrecen son de costos muy elevados.

RECOMENDACIONES

Después de finalizar el diseño y análisis de la torre de enfriamiento de la C.H. y de llegar a ciertas conclusiones, pasamos a realizar las recomendaciones pertinentes. Después de una minuciosa inspección visual se puede observar que la instalación de la torre de enfriamiento se encuentra muy deteriorada, lo cual es una de las causas del bajo rendimiento de la torre. La torre de enfriamiento lleva 15 años en operación, esto ha sobrepasado las recomendaciones del fabricante sobre la vida útil de la torre.

Aunque los efectos del deterioro general de la torre son muy notables en el rendimiento, la principal causa del bajo rendimiento de la torre es el bajo flujo de aire, provocado por los ventiladores con un rendimiento realmente bajo.

1. Se recuerda que el flujo de agua está afectado por una adecuación en las tuberías (bypass), para que en la renovación de la torre se modifique esta adecuación.
2. Evaluar la torre de enfriamiento por periodo estacional y la operación de día y noche para que de esta forma podamos observar la influencia de la temperatura ambiente en el desempeño de la torre, ya que este trabajo solo evaluó bajo una condición fija de temperatura ambiente.
3. Mantenimiento continuo al paquete de relleno.
4. Limpiar todas las suciedades que puedan provocar el bajo rendimiento de transferencia de calor.
5. La nueva torre deberá tener por lo menos un metro más que la antigua torre de enfriamiento.
6. A menos que la ubicación de la torre este limitada, está deberá ubicarse de tal manera que la descarga de la torre no esté ubicada del mismo lado que la admisión de aire a la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-J.P.HOLMAN

TRANSFERENCIA DE CALOR

OCTAVA EDICIÓN (PRIMERA EDICIÓN EN ESPAÑOL)

-DONALD Q. KERN

PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL S.A. DE C.V.
MÉXICO 1997

-WELTY JAMES, R.

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MOMENTO, CALOR Y MASA

LIMUSA
MÉXICO
2001

-APUNTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ, INGENIERÍA MECÁNICA
DR.CARLOS RIOS ROJAS

-MANUAL DE TORRE DE ENFRIAMIENTO

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD-TORREVAL

INTERNET

<http://www.tecno-tower.com.ar/TecnoTower-TorresdeEnfriamiento.pdf>

<http://www.fibertower.cl/Folletos/Tutorial%20de%20Torres%20De%20Enfriamiento.pdf>

http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf

[http://www.aberef.com/english/pdf%20descarga/SISTEMAS%20DE%20ENFRIAMIENTO%20DE%20AGUA\(OGA\).pdf](http://www.aberef.com/english/pdf%20descarga/SISTEMAS%20DE%20ENFRIAMIENTO%20DE%20AGUA(OGA).pdf)



ANEXOS

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ
INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

TABLA 1. Material, Coeficientes y separación del paquete

No.	Paquetes	C	M	n	Separación entre placas
1	Láminas de asbesto planas	0.289	0.70	0.35	4.45 cm
2	Láminas de asbesto planas	0.361	0.72	0.42	3.81 cm.
3	Láminas de asbesto planas	0.394	0.76	0.36	3.18 cm.
4	Plástico corrugado ángulo de 60°, Munters M12060	0.459	0.73	0.52	2.54 cm.
5	Plástico corrugado ángulo de 60°, Munters M12060	2.98	0.20	0.27	1.17 "
6	Plástico corrugado ángulo de 60°, Munters M19060	1.575	0.58	0.31	1.8 "
7	Plástico corrugado vertical ATP CoolFilm	1.378	0.56	0.23	1.63"
8	Pantalla plástica horizontal ATP Cool Drop	0.558	0.48	0.23	8" Malla 2"
9	Malla plástica horizontal Eco dyne perfil 10	0.525	0.58	0.85	12
10	Plástico corrugado angular Marley MC67	1.312	0.62	0.27	1.88"
11	Laminas mecanizadas Toschi Asbestos-free	0.755	0.93	0.99	0.72"
12	Panal de abeja plástico vertical, Brentwood Ind. Accu-Pack	1.476	0.60	0.31	1.75"

DIAGRAMA 1. CARTA PSICOMETRICA PARA AIRE-VAPOR

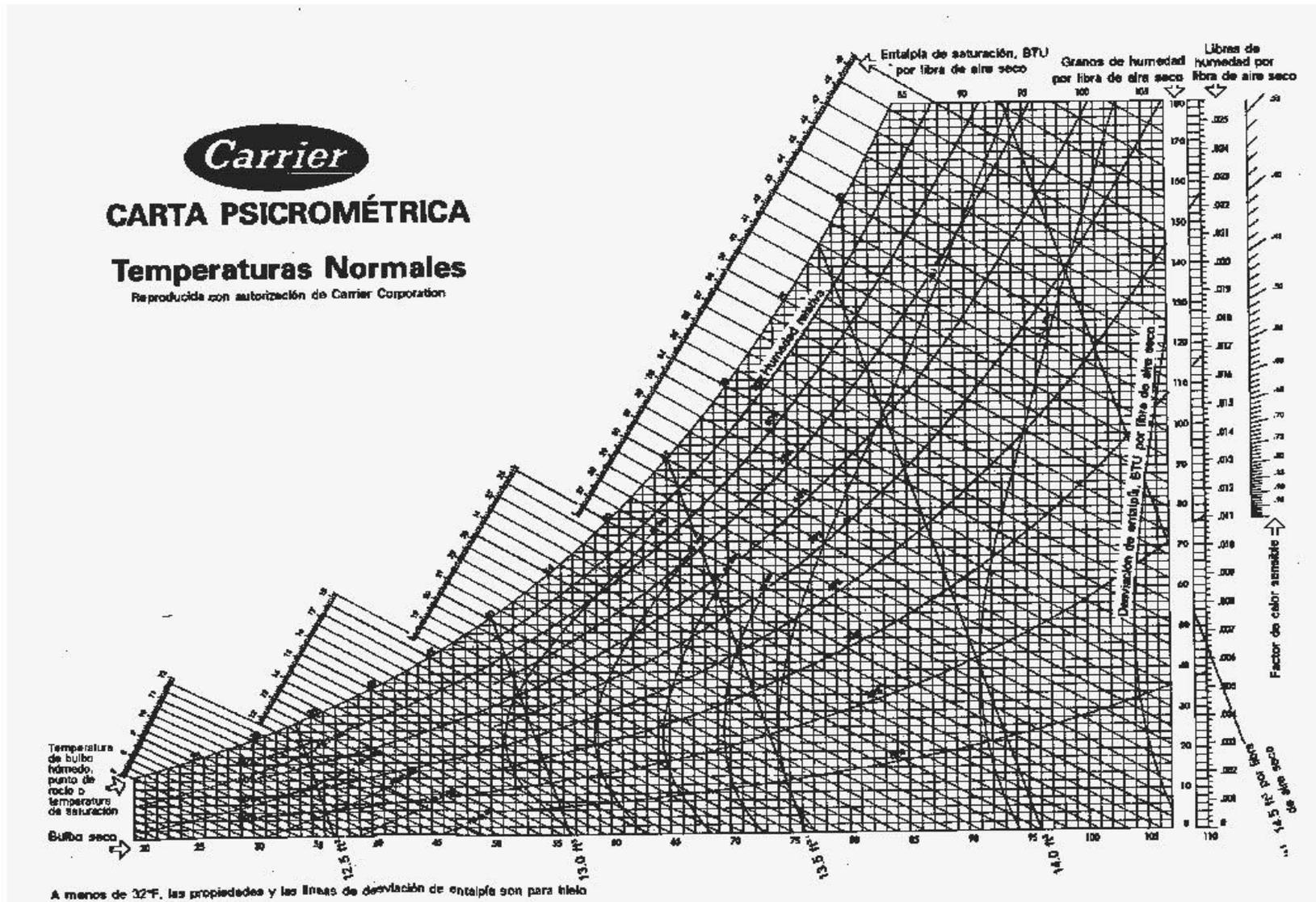


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA EN EES

