



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**“PROPUESTA DE UN NUEVO GUIÓN EXPERIMENTAL
PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:
VILLEGAS ECHEVERRIA KARLA**

**DIRECTOR:
DR. MARIANO PÉREZ CAMACHO**

CIUDAD DE MÉXICO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Carlos Villegas y Concepción Echeverría, por brindarme todo el amor, apoyo, comprensión y sacrificio que hoy hacen posible cumplir una meta en mi vida.

A Sergio Torres, por su apoyo a lo largo de la carrera.

A Erick Matías Torres Villegas, mi hijo y motor principal, por inspirarme a ser mejor día con día y lograr mis metas, te amo.

A mis tías Alicia Villegas y Antonia Villegas, por su apoyo y consejos para lograr esta meta.

A todos mis familiares que siempre me alentaron para poder llegar hasta aquí.

Al Doctor Mariano Pérez Camacho, por su dedicación, esmero y paciencia para la realización de este trabajo.

A todos los profesores que fueron parte de mi formación académica, porque además de conocimientos me brindaron consejos y enseñanzas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, pero sobre todo a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por todas las experiencias vividas, excelentes personas que conocí y por la formación en sus aulas, me siento orgullosa de ser parte de esta gran casa.

Se agradece su invaluable ayuda para la realización de este trabajo al proyecto PAPIME con clave PE105319 “EFECTO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR EN LA DINÁMICA DE ENFRIAMIENTO EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA”, 2019.

CONTENIDO

TABLA DE FIGURAS	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO 1.....	9
MARCO DE REFERENCIA	9
1.1 Planteamiento del problema.....	10
1.2 Hipótesis	10
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos particulares.....	10
CAPÍTULO 2.....	11
CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.....	11
2.1 Torres Atmosféricas	12
2.2 Torres de Tiro Natural o Hiperbólicas.....	12
2.3 Torres de Tiro Mecánico	14
2.4 Torres de Rocío.....	17
2.5 Comparación entre torres que operan con flujo en contracorriente y torres que operan con flujo cruzado.	17
CAPÍTULO 3.....	20
CONCEPTOS GENERALES.	20
3.1 Relaciones Psicrométricas.	21
3.1.1 Fracción mol del vapor	21
3.1.2 Humedad molar o saturación molar.....	21
3.1.3 Humedad absoluta o saturación absoluta	21
3.1.4 Humedad o saturación relativa	22
3.1.5 Humedad o saturación porcentual.....	22
3.1.6 Volumen específico del gas húmedo.....	23
3.1.7 Calor específico del gas húmedo.	23
3.1.8 Entalpía específica.....	23
3.1.9 Temperatura de bulbo seco	24
3.1.10 Punto de rocío	24
3.1.11 Calor sensible.....	24

3.1.12 Calor latente.....	24
3.1.13 Temperatura de saturación adiabática.	24
3.1.15 Relación de Lewis.	25
CAPÍTULO 4.....	26
FUNDAMENTOS OPERATIVOS DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	26
4.1 Temperatura de Bulbo Húmedo.	27
4.2 Operación de una torre de enfriamiento	29
CAPÍTULO 5.....	33
ECUACIONES DE DISEÑO	33
5.1 Ecuaciones de Diseño de una Torre de Enfriamiento y conceptos de Altura y Número de Unidades de Transferencia.....	34
5.2 Ecuación de la Línea de Operación	38
5.3 Ecuación de la Línea de Unión.....	38
5.4 Ecuación que permite predecir la temperatura del aire a la salida de la torre. Método de Mickley	39
5.5 Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y calor en la torre de enfriamiento de agua.....	42
5.5 Evaluación del número de unidades de transferencia por el método de Carey-Williamson	43
CAPÍTULO 6.....	45
DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL EQUIPO	45
6.1 Componentes Principales del Equipo.....	46
6.2 Alineación del Equipo.	46
6.3 Códigos de Identificación.....	47
6.4 Operación del Intercambiador de Tubos y Coraza.....	48
CAPÍTULO 7.....	49
ACTIVIDAD EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
7.1 Actividad Experimental.....	50
7.2 Evaluación de las propiedades del aire húmedo a la entrada y salida de la torre.....	51
CAPÍTULO 8.....	53
CÁLCULOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	53
8.1 Explicación del desarrollo del Método	54
8.2 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Masa y Calor	54
8.3 Resultados	58

CAPÍTULO 10	63
GUIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTO	63
CAPÍTULO 11	99
CONCLUSIONES	99
11.1 Conclusiones	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÉNDICE A	101
.....	103
.....	103

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de una torre atmosférica de flujo cruzado	12
Figura 2. Diagrama de una torre de enfriamiento de tiro natural o hiperbólico.	13
Figura 3. Diagrama de una torre de enfriamiento de agua de tiro forzado.	14
Figura 4. Torre industrial de tiro inducido con flujo en contracorriente.	16
Figura 5. Diagrama de una torre de enfriamiento de flujo transversal o cruzado.	16
Figura 6. Torre de enfriamiento de rocío.....	17
Figura 7. Torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo a contracorriente.	18
Figura 8. Torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado.....	19
Figura 9. Condiciones en una torre de enfriamiento.	27
Figura 10. Condiciones en un deshumidificador.	28
Figura 11. Condiciones para la transmisión de calores latente y sensible en condiciones opuestas.	29
Figura 12. Intercambio de calor en la torre de enfriamiento.....	30
figura 13. Dinámica de transferencia de calor y masa en la parte superior de una	31
Figura 14. Dinámica de transferencia de calor y masa en la parte inferior de una Torre de enfriamiento.	32
Figura 15. Transferencia de calor entre la fase gas y la fase líquida.	36
Figura 16. Ejemplo simplificado de una tabla psicrométrica.	39
Figura 17. Método de Mickley	41
Figura 18. Gráfica de Carey-Williamson.....	44
Figura 19. Componentes principales de la torre de enfriamiento.	46
Figura 20. Alineación de la torre de enfriamiento.	46
Figura 21. Alineación de tuberías de suministro y descarga de la torre de enfriamiento.	47
Figura 22. Método de Mickley para los datos seleccionados.	57

RESUMEN

El siguiente trabajo tiene por objetivo el planteamiento de un desarrollo experimental y una propuesta de guión experimental para que los alumnos del Laboratorio y Taller de Proyectos de séptimo semestre de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza” comprendan el funcionamiento de la torre de enfriamiento de agua y relacionen la teoría vista en clase con el trabajo de laboratorio.

Mediante el estudio, evaluación y determinación de los parámetros de transferencia de masa y calor en la torre de enfriamiento de agua de la Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza”, donde se pudo evaluar cuál de los dos mecanismos de aceptación de calor por parte del aire impactaba con mayor peso en el proceso de enfriamiento del agua, se concluyó que el calor aceptado asociado al calor sensible aceptaba un 11.64% del calor que desprendía la corriente líquida mientras que el calor aceptado asociado a la evaporación representó un 88.36% esta condición se pudo seguir a partir de la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor que fue de $hC= 0.01211 \text{ Btu/sft}^2$ mientras que el coeficiente de transferencia de masa con un valor de $kya= 0.04821 \text{ lbmol/ft}^3\text{s}$.

INTRODUCCIÓN

Un factor predominante para el éxito que la ingeniería química ha tenido en los últimos 50 años, es la integración de las operaciones unitarias con otros campos del estudio de los procesos químicos como: la cinética, la termodinámica, la energía, la sustentabilidad e incluso la economía. Las operaciones unitarias se encuentran entre las herramientas más importantes con las que cuenta el ingeniero químico en el ejercicio de su profesión.

El ingeniero que ha sido instruido en el conocimiento y evolución del concepto tradicional de las operaciones unitarias es más efectivo para el adecuado planteamiento que conduzca a la definición y solución de los problemas amplios y vastos que intervienen en los procesos químicos.

En el ámbito industrial una torre de enfriamiento es utilizada como un intercambiador de calor, que enfría el agua caliente proveniente de un proceso, esto se realiza con el fin de recircular el agua y/o evitar la contaminación térmica por su vertimiento al ambiente. En la transferencia del calor en una torre de enfriamiento, existe generación de calor sensible y calor latente, al entrar en contacto el agua caliente con el aire. La masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del líquido, el cual es cedido al aire obteniéndose el enfriamiento del agua y el aumento de la temperatura del aire. A pesar de que Walkel (1923) en su libro *Principles of Chemical Engineering*, fue el primero en proponer balances sencillos de masa y energía para torres de enfriamiento (Khan et al., 2003), es Merkel (1925) con su trabajo *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, quien estructuró la teoría básica de estas (Khan et al., 2003). Él modificó lo expuesto por Walker, relacionando el calor sensible y el calor latente en los balances de masa y energía. Webb (1989), en su trabajo “*Design of Cooling Towers by the Effectiveness-NTU Method*”, mostró que la eficiencia y las unidades de difusión en una torre, son consistentes con las usadas en otros intercambiadores de calor (citado en Khan et al., 2003). Nimr (1999), presentó un modelo que describe el comportamiento de una torre, para ello tuvo en cuenta el empaque o relleno en la torre. Milosavjevic (2001), determinó un modelo en ecuaciones diferenciales ordinarias, para describir la transferencia de masa y calor en una torre de enfriamiento mecánica, él utilizó datos experimentales en un equipo piloto para analizar con una simulación, el comportamiento de la torre con diferentes empaques. Kloppers y Kröger (2005a; 2005b), evaluaron el número de Lewis (relación entre el coeficiente de transferencia de masa y calor, con el calor húmedo) en una torre de enfriamiento y encontró que la relación disminuye, cuando el aire entra relativamente húmedo y caliente en la torre. Kloppers y Kröger (2005a; 2005b) plantearon un modelo matemático en ecuaciones diferenciales ordinarias para determinar la transferencia de masa y energía en una torre de enfriamiento, usó el método de Poppe para el calcular diferencialmente la integral de Merkel, la solución numérica la obtuvo con el método Runge-Kutta de cuarto orden y alcanzó buenos resultados. Fisenko y Brin (2007), describen la transferencia de masa y calor en una torre, acopla un modelo ecuaciones diferenciales parciales (para la temperatura del aire y del agua), con uno en ecuaciones diferenciales ordinarias (para el crecimiento de

una gota de agua). Kranc (2007), desarrolló un modelo computacional para simulación, tuvo en cuenta la distribución no uniforme del agua en el empaque.

En los últimos años se han desarrollado nuevas herramientas en el modelo de torres de enfriamiento como la de Xiaoni (2007), quien desarrolló un modelo matemático en ecuaciones diferenciales ordinarias, él aplicó el concepto de Red Neuronal Artificial (ANA), proponiéndola como una herramienta de diseño computacional que ayuda a evaluar la temperatura de agua a la salida. Los resultados que predecía el ANA fueron comparados con los obtenidos del modelo matemático y con los datos experimentales. El ANA predijo la temperatura del agua con un margen de error absoluto de 1.31%, y de 9.42% para el modelo. Ming Gao (2008) aplicó una ANA para predecir el funcionamiento de una torre, la ANA mostró un buen comportamiento estadístico, el coeficiente de correlación estaba en el rango de 0.993 - 0.999.

El siguiente trabajo tiene como finalidad estudiar, evaluar y determinar parámetros de transferencia de masa y calor en la torre de enfriamiento de agua de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza; así como dejar establecido un desarrollo experimental y una propuesta de guión experimental para que los alumnos del Laboratorio y Taller de Proyectos de séptimo semestre comprendan el funcionamiento de la torre de enfriamiento de agua y relacionen la teoría vista en clase con el trabajo de laboratorio.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

1.1 Planteamiento del problema

El enfriamiento de agua por medio de una torre de enfriamiento es una de las operaciones unitarias más importantes en todo proceso industrial ya que implica la transferencia de masa y calor de una fase a otra; aproximadamente el 80% del agua que se ocupa en una planta industrial recae en labores de enfriamiento, debido a esto resulta importante para todo ingeniero químico tener bien conjuntados la teoría y el trabajo experimental para comprender los fenómenos que ocurren en un proceso de esta magnitud.

En la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza se cuenta con los equipos y laboratorios destinados a tal fin en lo que respecta a operaciones unitarias; pero hace falta adentrarse a la búsqueda de los parámetros bajo los cuales operan tales equipos, tal es el caso de la torre de enfriamiento de agua de la planta piloto, la cual no es posible operar sin antes conocer el sustento teórico y práctico para el óptimo funcionamiento de esta. Provocando esto un área de oportunidad en la formación académica de los alumnos de la carrera de Ingeniería Química.

1.2 Hipótesis

Si a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis se logran exponer los criterios operativos de una torre de enfriamiento de agua, en base a la identificación de los tipos de transferencia de calor, así como de los mecanismos de transferencia de calor y masa involucrados en la dinámica operativa de la misma, entonces los alumnos que cursan el laboratorio de LTP 7 en la FES Zaragoza podrán mediante el seguimiento del guión experimental propuesto tomar decisiones operativas a fin de proporcionar un servicio de enfriamiento de agua que sea requerido tanto a nivel industrial como dentro de las instalaciones de la facultad

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un guión experimental a partir del análisis de los coeficientes de transferencia de masa y calor que permita a los estudiantes determinar experimentalmente los coeficientes de transferencia de masa y calor que ocurren en una torre de enfriamiento a fin de interpretar el efecto que tiene la humidificación del aire y su repercusión en el enfriamiento de agua que se lleva a cabo en este equipo.

1.3.2 Objetivos particulares

1. Enlazar la teoría y desarrollo experimental necesarios para que los alumnos de Ingeniería Química comprendan el funcionamiento de la torre de enfriamiento de agua de la planta piloto de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y les permita realizar con ella el desarrollo experimental que coadyuve a su formación.
2. Sentar las bases de operación que se requieren para realizar prácticas de laboratorio de transferencia de masa y calor en la torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 2

**CLASIFICACIÓN DE LAS
DIFERENTES TORRES DE
ENFRIAMIENTO DE AGUA.**

2.1 Torres Atmosféricas

En este tipo de torres (figura 1) se aprovechan las corrientes naturales del aire, que penetran al equipo a través de unas persianas laterales, las cuales tienen como función impedir pérdidas excesivas de agua por arrastre.

Las torres atmosféricas siempre se deberán orientar de acuerdo con la dirección del viento que predomina durante el año. Este tipo de torres deben ser angostas para no provocar una gran caída de presión en la corriente del aire, y por consecuencia, serán más largas que las otras torres para una capacidad de enfriamiento determinada. Es necesario ubicarlas en lugares abiertos, donde no existan obstáculos para las corrientes atmosféricas. Estas torres operan con flujo cruzado, es decir, el flujo del aire es perpendicular al del agua para un desempeño adecuado en una torre atmosférica son necesarios vientos de velocidades de 7.5 a 10.5 km/h.

Bajo estas condiciones, la torre atmosférica puede ser la más económica; si bien debido a su tamaño la inversión inicial es alta, se elimina el costo principal de operación de las torres con tiro mecánico: la energía consumida por el ventilador. Sin embargo, existe el costo del bombeo del agua hasta la parte superior, que es relativamente alta.

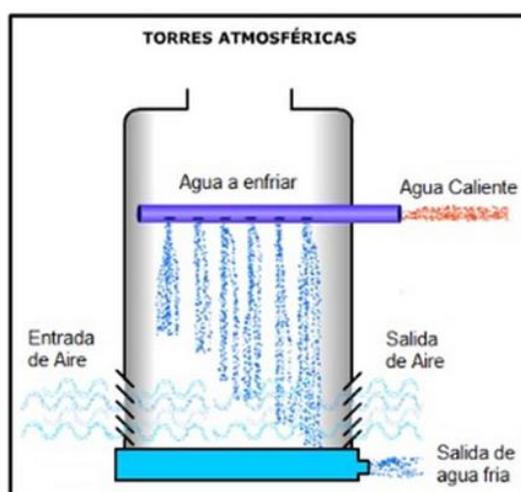


Figura 1. Diagrama de una torre atmosférica de flujo cruzado

Una de las principales desventajas que presentan este tipo de torres es su dependencia de las corrientes naturales para lograr una operación aceptable. Por otra parte, no consiguen enfriar el agua a temperaturas cercanas a la de bulbo húmedo del aire.

2.2 Torres de Tiro Natural o Hiperbólicas.

En una torre de tiro natural se aprovecha la diferencia de densidades entre el aire atmosférico, relativamente frío, y el aire caliente en el interior del equipo para promover el flujo ascendente de la corriente de enfriamiento a través del empaque.

Las torres de tiro natural deben ser altas ya que la diferencia de presiones producida por el efecto de las distintas densidades es aproximadamente proporcional a la altura del equipo. Para favorecer el tiro natural se requiere una sección transversal grande en la parte inferior y una coraza en forma hiperbólica (figura 2).

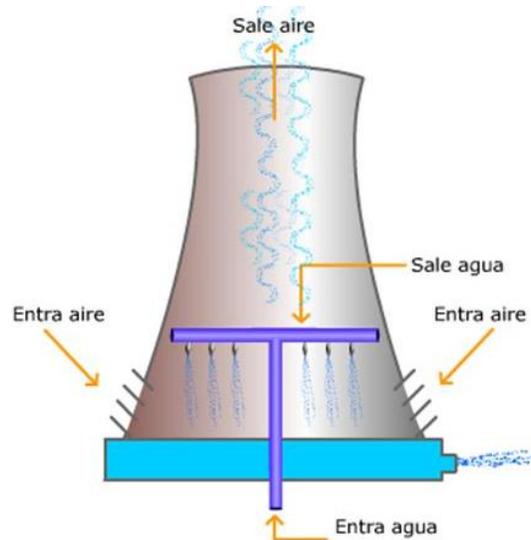


Figura 2. Diagrama de una torre de enfriamiento de tiro natural o hiperbólico.

Asimismo, la diferencia de densidades que impulsa el flujo del aire depende de la temperatura que alcance éste en la región empacada, lo cual está en función de la temperatura del agua a la entrada y a la salida de la torre. El agua caliente da lugar a una corriente rápida de aire a través del empaque, pero conforme su temperatura se va reduciendo hacia la parte baja de la torre, la velocidad del aire también disminuye.

En las torres de este tipo, el empaque ocupa únicamente la parte inferior y tiene poca altura en comparación con la estructura total de la torre, que en su mayor parte se emplea para mover el tiro natural. Cabe señalar que la resistencia al flujo de aire debe reducirse lo más posible, para evitar grandes caídas de presión.

El costo inicial de una torre de este tipo es elevado debido a su gran tamaño, y en cuanto al consumo de energía, sólo lo realiza para bombear el agua hasta la parte superior del relleno, cuya altura es normalmente menor que una torre atmosférica.

Estas torres trabajan mejor en lugares donde la atmósfera tiene una humedad relativamente alta dado que el flujo del aire que se produce es por la diferencia de densidades. Por supuesto que el agua a enfriar deberá tener una temperatura mayor que la de bulbo seco del aire, con el fin de que la densidad de éste disminuya dentro de la torre.

Si durante algún período del día la temperatura del aire se eleva notablemente con respecto a la del agua que se ha de enfriar, el rendimiento de la torre bajará, lo cual representa un

inconveniente. Otra desventaja que tienen las torres de tiro natural es su incapacidad para enfriar el agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire.

Sin embargo, pueden representar una opción económica cuando se manejan grandes volúmenes de agua y no se requiere un acercamiento muy pequeño, debido a que se elimina el alto costo de operación del ventilador y el mantenimiento del equipo mecánico. Estas torres pueden operar con flujo cruzado o en contracorriente. Actualmente su uso está declinado, al igual que el de las torres atmosféricas.

2.3 Torres de Tiro Mecánico

Las torres de tiro mecánico emplean ventiladores para abastecerse del aire de enfriamiento que circulará a través de ellas. De esta forma, su desempeño es más estable y depende de un número menor de variables psicrométricas a comparación con las torres atmosféricas y de tiro inducido.

La presencia de ventiladores provee de un medio para regular el flujo de aire cuando las condiciones de operación lo requieran.

De acuerdo con la colocación del ventilador, las torres de este tipo pueden ser de tiro forzado o de tiro inducido.

Si el ventilador está montado frente a la entrada del aire en la base de la torre, se dice que es tiro forzado (figura 3). Este arreglo tiene la ventaja de que todo el equipo mecánico se encuentra fuera de la torre, facilitando las labores de inspección, mantenimiento y reduciendo los problemas de corrosión ya que el aire impulsado está en condiciones atmosféricas, menos agresivas que las del aire que sale de la torre.

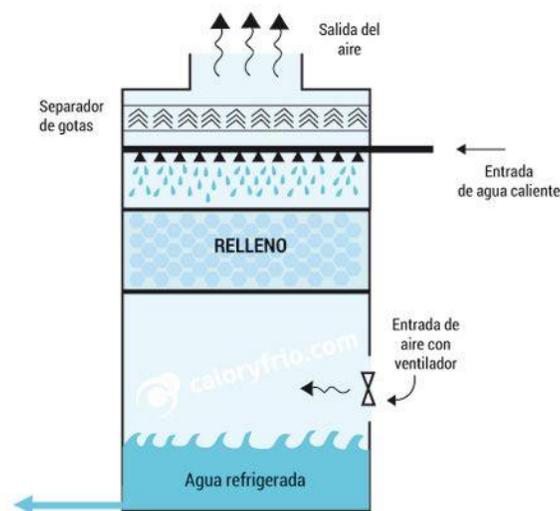


Figura 3. Diagrama de una torre de enfriamiento de agua de tiro forzado.

Por otra parte, la desventaja es que durante el invierno el desempeño del ventilador puede verse afectado por la formación de hielo sobre las aspas. Otro inconveniente que presenta ese modelo es que la distribución del aire en el empaque es relativamente pobre, debido a las altas velocidades y gran turbulencia que alcanza este elemento a la entrada de la torre.

Después de su trayectoria a través del relleno, el aire sale por la sección superior a baja velocidad, lo cual ocasiona que una parte de él sea succionada nuevamente por el ventilador (recirculación parcial). Esto disminuye el rendimiento de la torre, ya que la corriente de entrada se contamina con aire cuya humedad y temperatura son mayores. Estas torres operan con flujo en contracorriente.

En las torres de tiro inducido, el ventilador está montado sobre la sección superior, por donde se descarga el aire de enfriamiento. El equipo mecánico, expuesto a corrientes con temperaturas relativamente altas, no corre el riesgo de que se forme hielo sobre sus partes, sin embargo, el peligro de corrosión es mayor que en las torres de tiro forzado. Dada la posición del ventilador, el aire puede ingresar a la torre a través de una o más paredes y tendrá una distribución uniforme en el empaque. Por otra parte, hay muy poca o ninguna tendencia a que se formen zonas de baja presión frente a las aberturas por las cuales penetran las corrientes de enfriamiento, como ocurre cuando se emplea el tiro forzado.

Este hecho, aunado a que la descarga del aire se realiza a alta velocidad, reduce considerablemente el riesgo de que se presente la recirculación parcial. Las torres de tiro inducido pueden operar con flujo en contra corriente (figura 4) o cruzado (figura 5), y las ventajas que ofrecen han hecho que actualmente se empleen más que las de tiro forzado.

Las torres que operan con flujo cruzado se subclasifican de acuerdo con el número de entradas para el aire con que cuentan. Se construye con una entrada en lugares donde las corrientes naturales disponen de una sola trayectoria libre de obstáculos hacia la torre; o bien, donde el viento tiene una dirección predominante durante el año. Orientado a la entrada del aire de modo que reciba directamente las corrientes naturales, la recirculación parcial puede eliminarse por completo.

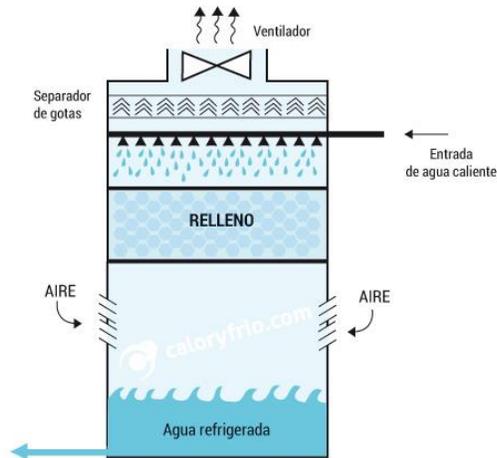


Figura 4. Torre industrial de tiro inducido con flujo en contracorriente.

También se diseñan torres que operan con doble flujo cruzado (tienen dos entradas para el aire). Después de atravesar las regiones empacadas, ambas corrientes se juntan en un claro en el centro de la torre y salen por la parte superior (figura 5).

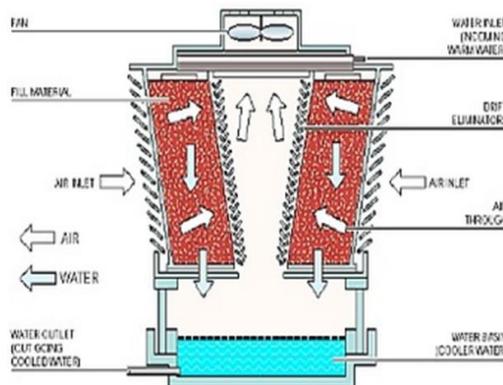


Figura 5. Diagrama de una torre de enfriamiento de flujo trasversal o cruzado.

Pueden construirse torres con varias celdas, pero generalmente, son dispuestas en pares, cada uno de los cuales empleará un sistema de tiro inducido.

2.4 Torres de Rocío

Las torres de rocío (figura 6) no tienen empaque, de modo que, para incrementar la superficie de contacto entre el aire y el agua, esta se pulveriza haciéndola pasar por boquillas esparcidoras para después dejarla caer por gravedad. La operación puede hacerse con flujo cruzado o en contracorriente, y el aire puede abastecerse con ventiladores o aprovechando las corrientes atmosféricas.

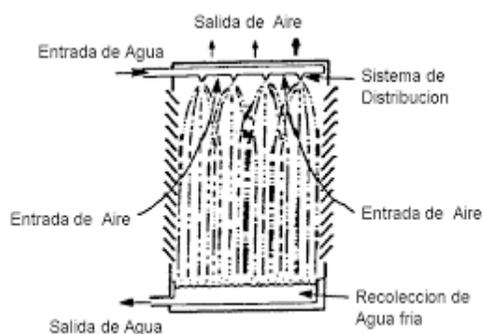


Figura 6. Torre de enfriamiento de rocío.

El uso de estas torres se limita a aquellos procesos en los cuales no se requiere enfriar el agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo del aire.

También se emplea cuando el agua tiene un alto grado de sustancias contaminantes que pueden dañar el material del empaque. Por supuesto que estas torres tienen un menor rendimiento que las demás.

2.5 Comparación entre torres que operan con flujo en contracorriente y torres que operan con flujo cruzado.

Cada tipo de torre presenta ventajas y desventajas entre sí; por lo que, para hacer una correcta elección, se deben considerar los cargos fijos, los costos de operación y el servicio requerido. En general, puede afirmarse que en una torre que opera con flujo a contracorriente ofrece un mejor servicio cuando se requieren amplios rangos de enfriamiento y pequeñas aproximaciones; pero también puede aseverarse que comúnmente tendrá menores costos de operación una torre que trabaja con flujo cruzado.

La explicación para la primera aseveración es que cuando la operación se realiza con flujo en contracorriente, el potencial de la transferencia de masa y energía es constante a todo lo ancho de la torre (y por lo tanto se aprovecha más eficazmente) que cuando la operación se lleva a cabo con flujo cruzado. En este último caso, la fuerza impulsora del transporte de masa y energía disminuye continuamente en las direcciones de los flujos de agua y de aire, de tal manera que, si éste se mueve hacia la derecha en una celda, dicha fuerza tendrá su

máximo valor en la esquina superior izquierda y alcanzará el mínimo en la arista diagonalmente opuesta (figura 7).

En cuanto a la segunda afirmación, se tiene que en general las torres que operan con flujo en contracorriente son más altas que las que lo hacen con flujo cruzado, debido a que requieren grandes aberturas en la parte inferior para la parte del aire, a lo cual se suma la longitud vertical del empaque (figura 8). Esto implica la necesidad de grandes cabezas de bombeo para llevar el agua hasta la parte superior. En cambio, la altura de una torre que trabaja con flujo cruzado es básicamente igual a la del empaque (figura 9). En cuanto a la pérdida de presión, es mayor cuando el aire tiene que moverse contra la caída del agua que cuando lo hace transversalmente con respecto al curso del líquido, por lo cual, el ventilador requerirá mayor potencia en el primer caso.

Lo anteriormente expuesto coincide con las investigaciones de Molyneux [1], quién concluye: “que mientras más grande sea el rango y más difícil de lograr la aproximación especificada, más considerable será la ventaja que para cumplir con los requerimientos tendrá una torre que opere con flujo en contracorriente”. Asimismo, señala “que, en condiciones de trabajo menos extremas, la torres que operan con flujo cruzado aventajan a las otras, debido a sus menores costos de operación”.

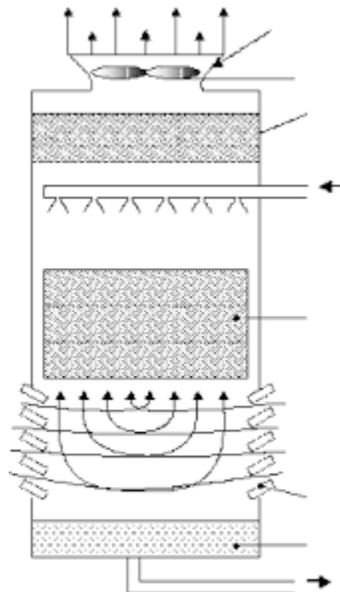


Figura 7. Torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo a contracorriente.

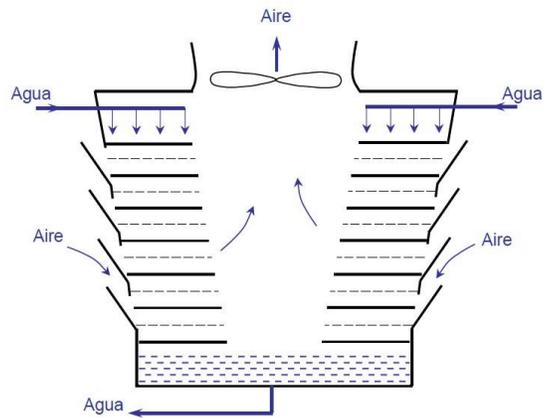


Figura 8. Torre de enfriamiento de tiro inducido con flujo cruzado.

Por otra parte, la distribución del agua en el área transversal superior de una torre que trabaja con flujo en contracorriente se hace mediante ductos con boquillas rociadoras de alta presión.

En el otro tipo de torre existen depósitos con orificios provistos de boquillas distribuidoras a través de las cuales el líquido cae por gravedad. Estos depósitos están montados sobre las unidades de relleno y es posible darles mantenimiento aun cuando la torre está trabajando, lo cual no es factible con los sistemas de distribución mencionados en primer término.

En cuanto al terreno, las torres que operan con flujo en contracorriente requieren generalmente una menor área para el mismo servicio.

CAPÍTULO 3

CONCEPTOS GENERALES.

3.1 Relaciones Psicrométricas.

Generalmente al hablar de humidificación se hace referencia al estudio de mezclas de aire y vapor de agua, como lo haremos en este trabajo; sin embargo, este concepto es extensivo a cualquier tipo de mezclas constituidas por un gas y un vapor.

Se supondrá en este estudio que el comportamiento de la mezcla agua-aire cumple con las leyes de los gases ideales y además sigue la ley de Dalton donde la presión total ejercida por la mezcla será igual a la suma de la presión parcial del gas y la presión parcial del vapor.

$$P_T = P_{gas} + P_{vapor}$$

En estas condiciones tenemos la posibilidad de establecer ciertos conceptos de transferencia de masa y calor que resultan importantes al hacer un estudio sobre torres de enfriamiento de agua.

3.1.1 Fracción mol del vapor

La fracción molar es igual a la composición en volumen; esto es, los moles de vapor entre

$$y = \frac{n_V}{n_V + n_G} = \frac{n_V}{n_{total}} = \frac{P_V}{P_{total}} \quad (3.1)$$

la suma de los moles totales del gas y del vapor.

3.1.2 Humedad molar o saturación molar

Es la relación entre el número de moles de vapor y los moles del gas contenidos en una determinada masa gaseosa.

$$Y_m = \frac{n_V}{n_G} = \frac{P_{vapor}}{P_{gas}} = \frac{P_{vapor}}{P_{total} - P_{vapor}} = \frac{kgmol_{vapor}}{kgmol_{gas}} \quad (3.2)$$

3.1.3 Humedad absoluta o saturación absoluta

Se refiere a la relación entre la masa de vapor y la masa del gas contenidos en una determinada masa gaseosa.

$$Y = \frac{M_V}{M_G} Y^m = \frac{M_V}{M_G} \frac{P_{vapor}}{P_{total} - P_{vapor}} = \frac{PM_{vapor}}{PM_{gas}} \frac{P_{vapor}}{P_{total} - P_{vapor}} = \frac{kg_{vapor}}{kg_{gas}} \quad (3.3)$$

Siendo MV y MG las masas moleculares del vapor y del gas respectivamente.

Para el caso de la mezcla agua-aire, tomando para el aire una masa molecular media igual a 29, tendremos:

$$Y = \frac{18}{29} \frac{P_{vapor}}{P_{total} - P_{vapor}} = (0.062) \frac{P_{vapor}}{P_{total} - P_{vapor}} \quad (3.4)$$

3.1.4 Humedad o saturación relativa

Se define como el cociente entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor a la misma temperatura.

$$Y_R = \frac{P_{vapor}}{P^o} \quad (3.5)$$

Dónde:

Pvapor= Presión parcial.

Po= Presión de vapor. (Mediante la ecuación de Antoine).

Ecuación de Antoine para el caso del sistema aire-agua.

$$\ln P^o = A - \frac{B}{(T + C)}$$

P en KPa T en K

A = 16.5362 B=5985.44 C=-38.9974

3.1.5 Humedad o saturación porcentual.

Es la relación entre la humedad existente en la masa gaseosa, y la que existiría si estuviera saturada.

$$Y\% = \frac{Y}{Y^*} = \left[\frac{P_V}{(P_V)^*} \frac{[P - (P_V)^*]}{(P - P_V)} \right] \quad (3.6)$$

3.1.6 Volumen específico del gas húmedo.

Es el volumen ocupado por la mezcla que contiene 1 kg de gas (equivale al inverso de la densidad), y viene dado por:

$$V_H = \left(\frac{1}{PM_G} + \frac{1}{PM_V} \right) \frac{RT}{P} = \frac{m^3}{\text{kg aire seco}} \quad (3.7)$$

Para el caso de la mezcla aire-vapor de agua, expresando P en atmósferas y T en K, el volumen específico (en metros cúbicos por kilogramo de aire seco) viene dado como:

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{1}{18} \right) \frac{0.082T}{P} \quad (3.8)$$

3.1.7 Calor específico del gas húmedo.

Es el calor que hay que suministrar a 1 kg de gas y el vapor que contiene para elevar 1 °C su temperatura, manteniendo constante la presión; equivale a evaluar el Cp de la mezcla aire-agua.

$$C_H = (C_p)_{gas} + (C_p)_{vapor} Y = \frac{\text{kcal}}{\text{kg aire seco } ^\circ\text{C}} \quad (3.9)$$

Para el caso de aire vapor de agua:

$$C_H = (0.24) + (0.46Y) \quad (3.10)$$

3.1.8 Entalpía específica.

Es la suma del calor sensible de 1 kg de gas y el calor latente de vaporización del vapor medidos a la temperatura a la que se refieren las entalpías.

$$H = i = C_H (T - T_0) + \lambda_0 Y = \frac{kcal}{kg\text{aire}\text{sec } o} \quad (3.11)$$

Dónde:

λ_0 = Calor latente de vaporización a la temperatura de saturación.

Para el caso del aire-agua, tomando como temperatura de referencia la del agua líquida a 0 °C:

$$H = i = (0.24 - 0.46Y)T + 596Y \quad (3.12)$$

3.1.9 Temperatura de bulbo seco

Es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.

3.1.10 Punto de rocío

Es la temperatura a la cual una mezcla vapor-gas se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido.

3.1.11 Calor sensible.

Es el calor transferido donde no hay cambio de fase, pero sí de temperatura.

3.1.12 Calor latente.

Se refiere al calor transferido manteniéndose la temperatura constante, pero con un cambio de fase.

3.1.13 Temperatura de saturación adiabática.

Es la temperatura alcanzada por una masa de aire cuando se pone en contacto con el agua en condiciones adiabáticas. Se determina por medio de la expresión:

$$(Y_s - Y) = \frac{c}{\lambda_s} (T - T_s) \quad (3.13)$$

Siendo:

Y_s = Humedad de saturación a la temperatura de saturación adiabática.

T_s = Temperatura de saturación adiabática. (°F).

λ_s = Calor latente de vaporización del líquido a T_s .

c = Calor específico de la masa húmeda.

Para el caso aire-vapor de agua, el valor de la temperatura de bulbo húmedo y el de la temperatura de saturación adiabática prácticamente coinciden, y nosotros tomaremos indistintamente una u otra.

3.1.15 Relación de Lewis.

Ya se vio que para el sistema aire-vapor de agua, h_G / k_y es aproximadamente igual a C_s , o que aproximadamente, $h_G / k_y C_s = 1$. Esta es la llamada relación de Lewis. Esto no sólo lleva a la casi igualdad de las temperaturas de bulbo húmedo y de saturación adiabática (como en el caso del sistema aire-vapor de agua), sino también a otras simplificaciones que se desarrollan posteriormente.

Considerando que $J_A = N_A$ y si son iguales las difusividades de remolino E_D y E_H , se puede mostrar que la relación de Lewis sólo se seguirá si la difusividad térmica y la molecular son idénticas, o si $Sc = Pr$ o $Le = 1$. Por supuesto, esta conclusión también se alcanza a partir de la ecuación empírica 3.19.

Le es básicamente 1 para sistemas aire-vapor de agua, pero no para la mayoría de los demás sistemas. (esto último sólo será cierto en el caso de que el empaque de la torre se encuentre completamente irrigado; aún para el contacto aire-agua se han observado valores de “ r ” tan altos como 2, con flujos bajos de líquido^[6]).

CAPÍTULO 4

**FUNDAMENTOS OPERATIVOS DE UNA
TORRE DE ENFRIAMIENTO**

4.1 Temperatura de Bulbo Húmedo.

Considérese una gota de líquido que bien podría ser agua caliente que se sumerge en una corriente de una mezcla agua-vapor no saturada, que podría ser agua -aire, la cual se mueve rápidamente alrededor de la gota. Si se asume que el líquido inicialmente está a una temperatura más elevada que su correspondiente punto de rocío entrarán en una competencia justo en la interfase gas-líquido, la presión de vapor del agua y la presión parcial del agua del aire que rodea a la gota, lo que provocará una evaporación espontánea del agua líquida y se difundirá hacia el seno de la fase gas, mientras que la temperatura del aire que rodea la gota descenderá desde la interfase gas-líquido hacia el seno de la fase gas, tal y como lo muestra la figura 9.

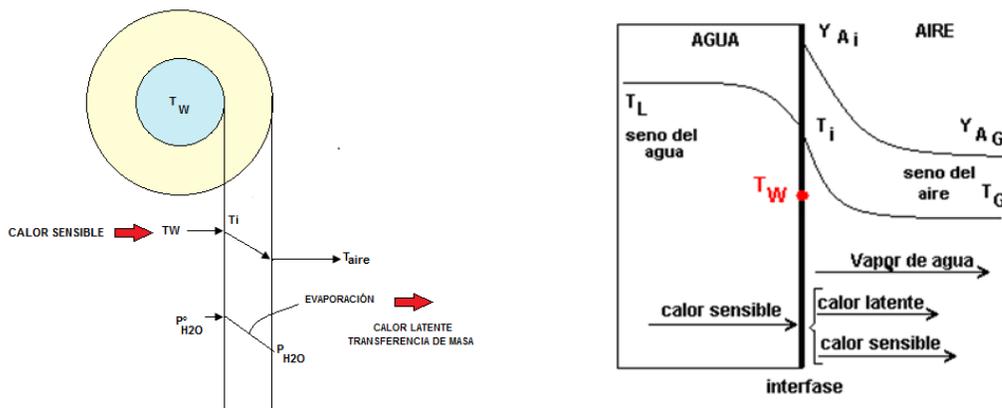
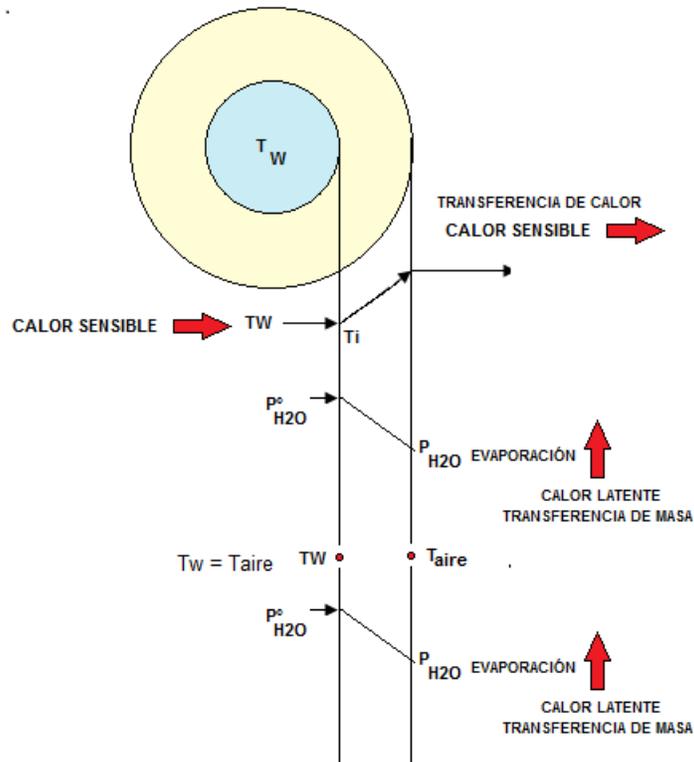


Figura 9. Condiciones en una torre de enfriamiento.

Sin embargo esta evaporación espontánea tiene consecuencias dentro de la gota de agua en descenso, ya que para poder evaporarse una pequeña porción del agua líquida ubicada en la interfase, esta debe tomar energía del seno de la gota en forma de calor sensible y convertirlo calor latente para poderse evaporar, ocasionando con esto una disminución de la temperatura de la gota, es decir mientras que la gota pierde calor latente, el aire que rodea la gota gana por un lado calor sensible producto de estar en contacto la gota con una temperatura más alta que la del aire y calor latente proveniente de la evaporación del agua en la interfase, pero además el flujo de aire gana masa en forma de agua vapor que provoca humidificación del aire en la interfase gas-liquido. A este fenómeno se le conoce como humidificación adiabática.

Sin embargo, surge una pregunta: ¿Qué pasa cuando la gota ha disminuido su temperatura a tal valor que iguala a la temperatura de bulbo seco del aire en la interfase?, ¿La competencia entre la presión de vapor del agua y la presión parcial del agua en el aire en la interfase se detiene?, esta condición se puede observar en la figura 10



La gota aún se sigue enfriando por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire

Figura 10. Condiciones en un deshumidificador.

La respuesta es: La competencia entre ambas presiones aún persiste, en estas condiciones la presión de vapor del agua es mayor que la presión parcial del agua en el aire en la interfase, es decir la gotita de agua se sigue enfriando aún por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire que la rodea lo que ocasiona necesariamente una inversión en la dirección de la transmisión de calor, ahora el aire estará más caliente que la gota de agua.

De aquí que toma una mayor relevancia la competencia entre la transferencia de masa asociada al proceso evaporativo por parte de la gota que tiene como consecuencia un enfriamiento y la transferencia de calor sensible proveniente del aire hacia la gota, que tienen dirección opuesta.

El fenómeno se detiene cuando ambos fenómenos se presentan con igual intensidad ocasionando que el fenómeno de evaporación se detenga, así como la transferencia de calor del aire hacia la gota como lo muestra la figura. 11.

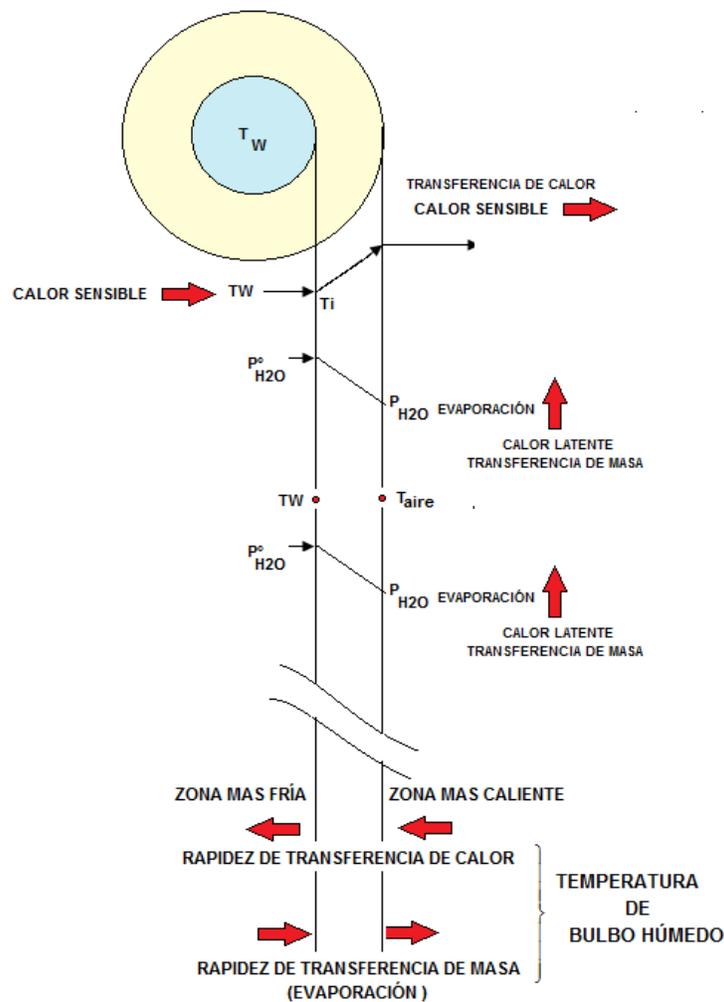


Figura 11. Condiciones para la transmisión de calores latente y sensible en condiciones opuestas.

Se dice que la temperatura que se alcanza tanto del lado del agua como del lado del aire es la misma y se le conoce como temperatura de bulbo húmedo.

4.2 Operación de una torre de enfriamiento

En las torres de enfriamiento una corriente de agua caliente es enfriada por intercambio de calor sensible y Calor latente por parte del agua líquida con una corriente de aire relativamente frío.

La operación básica de este tipo de equipos es mostrada en la figura. 12 , el agua caliente se alimenta por la parte superior de la torre a una temperatura T_{L2} y sale con una temperatura menor por la parte inferior de la misma torre a una temperatura T_{L1} . El aire fluye a contracorriente en relación a como lo hace el agua , entrando por la parte inferior a condiciones indicadas por el punto 1 de la figura12.

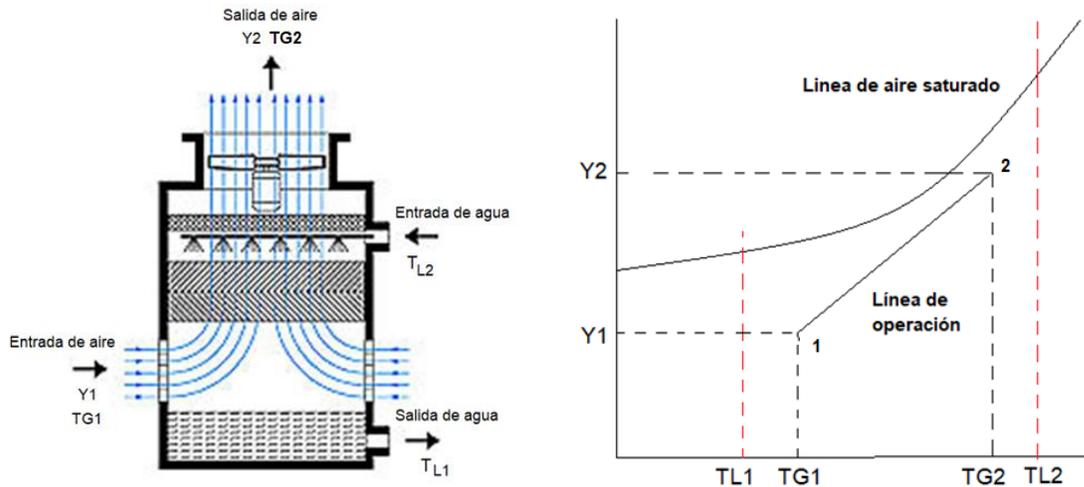


Figura 12. Intercambio de calor en la torre de enfriamiento

Y sale por la parte del domo a condiciones indicadas por el punto 2.

Durante la operación de la torre la temperatura de la interfase aire-gua que se forma en cada una de las gotas que recorren la torre se aproximan a la temperatura de saturación adiabática. En la figura 5 se describe la dinámica de transferencia simultánea de calor y masa que ocurre en la parte superior de la torre, indicada por el punto 2 de la figura 4.

En esa zona el calor se transfiere del agua caliente al aire, por lo que la temperatura del agua es más alta que la de la interfase y por lo general la temperatura de la interfase es más alta que la del aire. El calor que es removido del agua es de dos tipos, calor sensible y calor latente, el primero atribuido a la diferencia de temperaturas entre el agua caliente y la corriente de aire frío, mientras que el segundo es atribuido a la evaporación del agua ocasionada por la diferencia entre la presión de vapor del agua ubicada en la interfase y la presión parcial del agua contenida en la corriente de aire, esto ocasiona que la humedad de saturación en la interfase descienda paulatinamente a medida que se aparta de la interfase hacia el seno de la fase gas, ocasionando un incremento en la humedad del aire que rodea a la corriente de agua, simultáneamente la temperatura del aire en la interfase que se encuentra muy cercana a la temperatura de saturación tenderá a disminuir a medida que se adentra hacia el seno de la fase gas, ocasionando que la temperatura de bulbo seco de la corriente de aire que rodea al flujo de agua caliente se vea incrementada de igual manera que su humedad produciendo a la salida de la torre un aire húmedo y caliente.

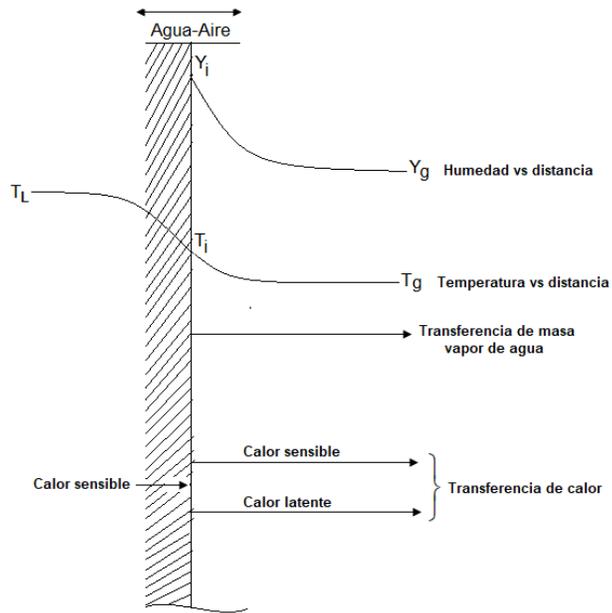


figura 13. Dinámica de transferencia de calor y masa en la parte superior de una

En el fondo de la torre tanto la temperatura del agua como su correspondiente de interfase puede ser más baja que la temperatura del aire que tiene contacto con esa corriente de agua tal y como se muestra en la figura 6.

Esta condición provoca que la dirección de la transferencia de calor en este caso sensible cambie de dirección del aire hacia la interfase y este sea incorporado nuevamente como calor latente al seno de la corriente líquida.

Resulta importante hacer notar que si bien en el fondo de la torre, se presenta la evaporación del agua al aire y existe en dirección contraria transferencia de calor del aire a la corriente de agua, las torres de enfriamiento convencionales difícilmente tienen la altura necesaria para alcanzar la temperatura de bulbo húmedo.

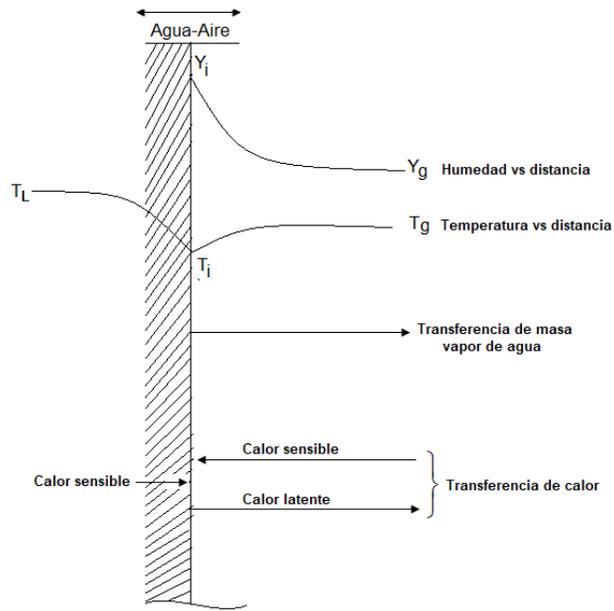


Figura 14. Dinámica de transferencia de calor y masa en la parte inferior de una Torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 5

ECUACIONES DE DISEÑO

5.1 Ecuaciones de Diseño de una Torre de Enfriamiento y conceptos de Altura y Número de Unidades de Transferencia

Balance de energía total

$$L_2 - L_1 \tag{5.1}$$

Balance de agua

$$G'(Y_2 - Y_1) = L_2 - L_1 \tag{5.2}$$

Balance de entalpía

$$L_2 HL_2 + G' HG_1 + Q = L_1 HL_1 + G' HG_2 \tag{5.3}$$

Si se considera que la torre opera adiabáticamente es decir $Q \approx 0$, que será cada vez más cierto a medida que se manejen mayores volúmenes de agua caliente, la ecuación 5.3 podrá escribirse como:

$$L_2 HL_2 + G' HG_1 = L_1 HL_1 + G' HG_2$$

$$P_{H_2O}^0 > P_{gas} \tag{5.4}$$

O en su forma diferencial

$$G' dHG = d(LHL) \tag{5.5}$$

También como:

$$G' dHG = d(LHL) \approx L_m C_{pL} dT_L \tag{5.6}$$

Dónde:

$$L_m = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

Para el cambio de entalpía que sufre la fase gas a lo largo de la torre como consecuencia de la transferencia de calor y masa simultánea, el lado izquierdo de la ecuación 5.6 se puede escribir como:

$$G' dHG = G' d \left[\underbrace{C_h (T_G - T_O)}_{\text{Calor Sensible}} + \underbrace{Y \lambda_o}_{\text{Calor Latente}} \right] = G' C_h dT_G + G' \lambda_o dY \tag{5.7}$$

En esta ecuación se ha considerado que el cambio de entalpía es ocasionado por dos tipos de calores, el primero es asociado al calor sensible provocado por el contacto entre del líquido caliente en contacto con la corriente del gas frío y el otro es debido al calor latente producto de la evaporación que experimenta el líquido ocasionado por el alto valor de su presión de vapor debido a su alta temperatura.

Los perfiles de temperatura y humedad que experimentan el agua y el aire en su paso a través de la interfase gas-líquido a lo largo de la torre puede observarse en la figura 17

De tal manera que la transferencia de calor sensible que se da desde el seno de la fase líquida hacia la interfase puede expresarse en términos del coeficiente de transferencia de calor como:

$$\left(\frac{L_m}{S}\right) C_{p_L} dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (5.8)$$

Por otro lado, en la interfase la presión de vapor del agua dado que se encuentra a una temperatura elevada su presión de vapor es mayor que la presión parcial del agua en el aire, lo que favorece la evaporación espontánea del agua líquida favoreciendo la transferencia de masa a través del incremento de la humedad del aire en la interfase Y_i , la cual necesariamente disminuye diferencialmente a medida que se aleja la observación de la interfase. Esta condición puede observarse claramente en la figura 17 y puede modelarse con un coeficiente de transferencia de masa mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{G'}{S}\right) \lambda_0 dY = \lambda_0 k_Y a (Y_i - Y) dZ \quad (5.9)$$

Finalmente, el aire se calienta y se humidifica, debido al calor sensible que recibe por tener contacto con el líquido caliente y al calor latente producto de su evaporación, este par de calores son recibidos por la fase gaseosa en forma de calor sensible que puede estimarse a partir de la siguiente relación.

$$\left(\frac{G'}{S}\right) Ch dT_G = h_c a (T_i - T_G) dZ \quad (5.10)$$

Las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10 son la base para describir la dinámica de enfriamiento del agua dentro de la torre, las cuales serán empleadas en detalle en este trabajo.

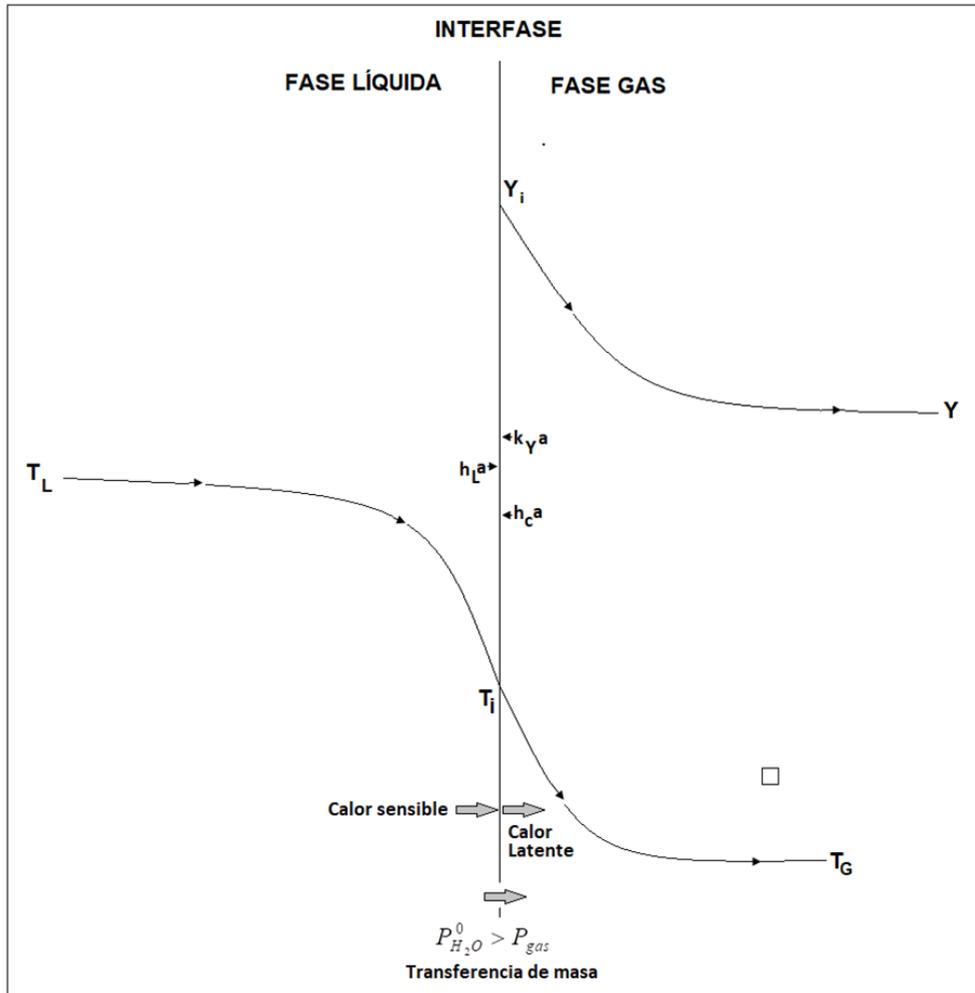


Figura 15. Transferencia de calor entre la fase gas y la fase líquida.

El cambio de entalpía que experimenta la fase gas está dado directamente por la ecuación 4.7 Por lo que resulta conveniente dividirla entre el área transversal de la torre para quedar como:

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = \left[\left(\frac{G'}{S}\right)Ch dT_G + \left(\frac{G'}{S}\right)\lambda_0 dY\right] \quad (5.11)$$

La cual puede expresarse en términos de los coeficientes de transferencia de calor y de masa, haciendo uso de las ecuaciones 5.9 y 5.10 para dar:

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = h_c a (T_i - T_G) dZ + \lambda_0 k_y a (Y_i - Y) dZ \quad (5.12)$$

Si se define al siguiente número adimensional con conocido como Número de Lewis

$$r = \frac{h_c}{k_y Ch} \quad (5.13)$$

Por lo que la ecuación 5.12 puede escribirse como:

$$\left(\frac{G'}{S}\right) dHG = k_y a [(Ch r T_i + \lambda_0 Y_i) - (Ch r T_G + \lambda_0 Y)] dZ \quad (5.14)$$

Esta condición presupone que el área por unidad de volumen asociada a cada uno de los coeficientes de transferencia de calor y masa (a) proporcionada por el empaque es la misma

Para el caso particular aire-agua la relación de Lewis $r = \frac{h_c}{k_y Ch} = 1$, por lo que la ecuación 5.14 podrá escribirse como:

$$\begin{aligned} \left(\frac{G'}{S}\right) dHG &= k_y a (H_i - H_G) dZ \\ \left(\frac{G'}{S}\right) dHG &= h_L a (T_L - T_i) dZ \\ -\frac{h_L a}{k_y a} &= \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Dónde:

$$H_i = Ch T_i + \lambda_0 Y_i \quad H_G = Ch T_G + \lambda_0 Y$$

Por lo que después de arreglar términos y tomar integrales la ecuación 5.15 se puede expresar como:

$$\int_0^Z dZ = \int_{HG_1}^{HG_2} \left(\frac{G'}{S}\right) \frac{dHG}{k_y a (H_i - H_G)} \quad (5.16)$$

O también:

$$Z = \int_{HG_1}^{HG_2} \left(\frac{G'}{S}\right) \frac{dHG}{k_y a (H_i - H_G)} \quad (5.17)$$

La expresión 5.17 corresponde a la Ecuación de diseño de una torre de enfriamiento, la cual puede escribirse en términos de la altura de unidad de transferencia y del número de unidades de transferencia si se considera un coeficiente de transferencia de masa promedio

$$Z = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_Y a} \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (5.18)$$

Siendo:

AUT = Altura de la unidad de transferencia

$$\text{AUT} = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_Y a} \quad (5.19)$$

NUT = Número de unidades de transferencia

$$\text{NUT} = \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (5.20)$$

5.2 Ecuación de la Línea de Operación

La Ecuación de la línea de operación está fundamentada en el balance diferencial de energía a lo largo de la torre, dada por la ecuación 5.6

$$G' dHG = d(LHL) \approx L_m C_{pL} dT_L \quad (5.6)$$

Expresando esta ecuación en términos de diferencias finitas

$$G'(HG_2 - HG_1) = L_m C_{pL} (TL_2 - TL_1) \quad (5.21)$$

O también

$$\frac{HG_2 - HG_1}{TL_2 - TL_1} = \frac{L_m C_{pL}}{G'} \quad (5.22)$$

5.3 Ecuación de la Línea de Unión

La línea de unión permite establecer la temperatura del aire y su entalpía con sus respectivos valores en las condiciones interfaciales, se obtiene a partir del balance de entalpía dado por las ecuaciones 5.5 y 5.8.

$$G' dHG = d(LHL) \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{L_m}{S} \right) C_{pL} dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (5.8)$$

La cual conduce a:

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (5.23)$$

Que al combinarlo con la ecuación 5.15, que evalúa el mismo balance de entalpía en términos del coeficiente de transferencia de masa

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = k_Y a (H_i - H_G) dZ \quad (5.15)$$

Se llega finalmente a:

$$-\frac{h_L a}{k_Y a} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \quad (5.24)$$

Conocido como línea de unión.

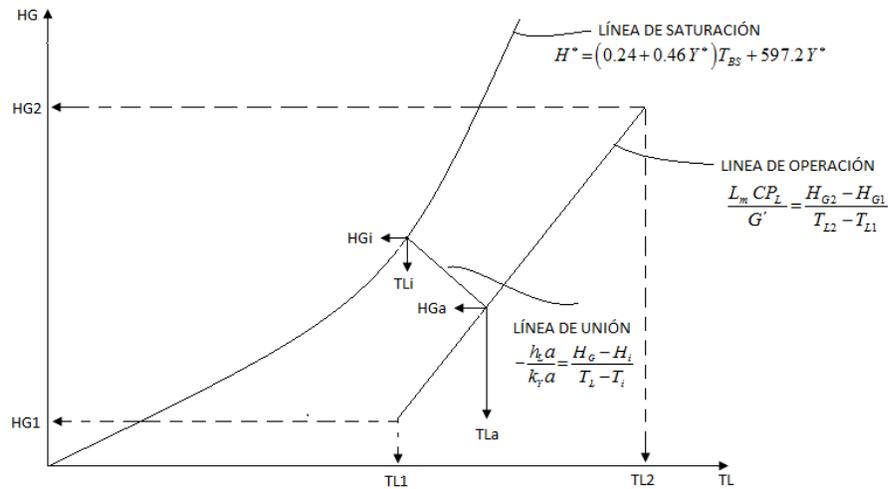


Figura 16. Ejemplo simplificado de una tabla psicrométrica.

5.4 Ecuación que permite predecir la temperatura del aire a la salida de la torre. Método de Mickley

Mickley utilizando un diagrama H vs. T pudo seguir gráficamente la trayectoria del aire a través de la torre.

El método se basa en el siguiente análisis matemático:

$$\frac{G'}{S} C_h dT_G = h_c a (T_i - T_G) dZ \quad (5.25)$$

$$\frac{G'}{S} dH_G = K_y a (H_i - H_G) dZ \quad (5.26)$$

Dividiendo la ecuación 5.25 entre la ecuación 5.26 obtenemos:

$$\frac{dT_G}{dH_G} = \frac{h_c a}{k_y a C_h} \frac{(T_i - T_G)}{(H_i - H_G)} \quad (5.27)$$

Donde:

$h_c a$ = Coeficiente de transferencia de calor en la fase gas.

$k_y a$ = Coeficiente de transferencia de masa en la fase gas.

A partir de que la relación de Lewis para el sistema aire-agua es igual a 1 obtendremos la ecuación:

$$\frac{dT_G}{dH_G} = \frac{T_i - T_G}{H_i - H_G} \approx \frac{\Delta T_G}{\Delta H_G} \quad (5.28)$$

donde Δ se refiere a una diferencia pequeña pero finita.

Si se desconocen las condiciones de la fase gaseosa en cada extremo de la columna, es posible usar un método de etapas para trazar la curva de las condiciones de la fase gaseosa a través de la torre. El procedimiento se ilustra en la figura xy. El agua tibia entra a la torre a T_{L2} y sale fría a T_{L1} . Esto se efectúa usando un flujo de aire a contracorriente que entra por el fondo de la columna a H_{G1} , T_{G1} . La temperatura del aire puede ser mayor o menor que T_{L1} , pero para este caso $T_{G1} > T_{L1}$. Debe ser mayor que T_i a H_{G1} . Por la ecuación 5.25 la pendiente de la línea recta que va desde el punto A hasta la condición de la interfase correspondiente a los puntos B y A.

Es posible determinar la condición de la interfase mediante la ecuación 5.15, usando la relación de coeficientes para obtener la línea de unión desde un punto de la curva $T_L - H_G$ hasta el punto correspondiente de la interfase. El procedimiento por pasos es como sigue, con las letras refiriéndose a los puntos de la figura xy:

1. De la ecuación 5.15 se obtiene el punto C. Se traza CA. Si las condiciones en la interfase son constantes, ADC representará la trayectoria de las condiciones de la fase gaseosa, como se indica mediante la ecuación 4.25. Esto basta para una distancia AD arbitrariamente corta.
2. Las condiciones de la línea de operación correspondientes a D estarán en E. Por consiguiente, T_E será la temperatura del líquido en el punto de la columna donde T_D es la temperatura de la fase gaseosa. Mediante la ecuación 5.15, se determina F a

partir de E. Se traza la línea FD y se supone arbitrariamente que ésta es la curva de la condición gaseosa al punto G.

3. Se repite. La construcción determina los puntos en orden alfabético. Los puntos B, E, H, K, N, Q, T, W, Z, C1 y F1 quedan en la línea de operación, mientras que los puntos A, D, G, J, M, P, S, V, Y, B1 y E1 son los puntos de la curva de condición de la fase. El punto E1 concluye la curva de condición de la fase gaseosa en la entalpía del gas de salida.

MÉTODO DE MICKLEY

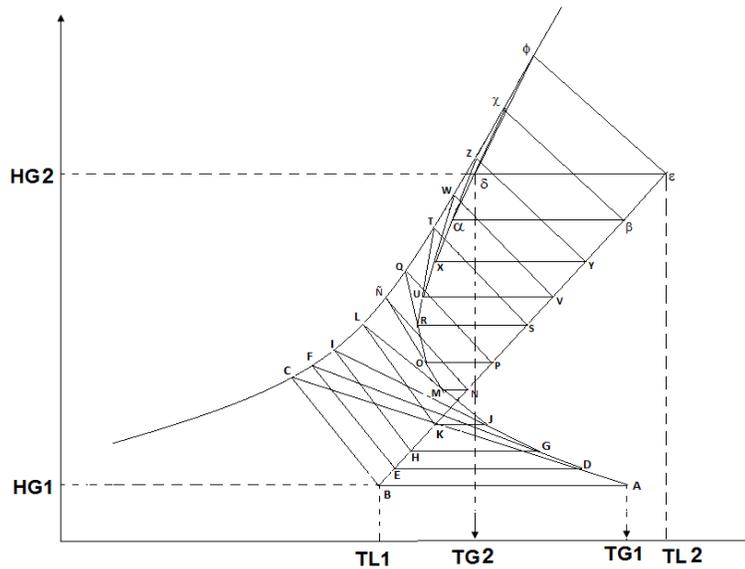


Figura 17. Método de Mickley

Resulta obvio que, esta construcción acumula errores debidos a la aproximación inherente al uso de diferencias finitas en el lugar de diferenciales. En la ecuación 5.25, cada segmento de la línea de la curva AE1 representa una línea tangente a la curva de la condición de la fase gaseosa verdadera.

A medida que se acortan los segmentos de línea AD, DG, GJ, etc., acercándose a las diferenciales verdaderas, el error disminuye y se tiende a la curva correcta de la condición del gas. En cualquier caso, la curvatura de la línea de la condición de gas, determinada con diferencias finitas, es menor que la curvatura verdadera de esta línea cuando los cálculos se empiezan desde un extremo de la columna y es también menor que la curvatura verdadera cuando los cálculos se empiezan desde el extremo opuesto de la columna.

Por tanto, una forma de acercarse a la curva verdadera de la condición del gas es el llevar a cabo una solución por pasos desde ambos extremos de la columna y entonces

trazar una línea final con una forma curvada entre las líneas de las dos soluciones por pasos. Las ecuaciones 5.21 y 5.25 establecen que la pendiente de la línea de unión que se extiende desde un punto en una curva de condición de fase (para este caso de la fase gaseosa) a la condición equivalente de la interfase, es igual a un número constante de veces la pendiente de la línea de condición de la fase gaseosa.

La ecuación 5.25 relaciona la velocidad total de transferencia de calor a través de la fase vapor por los mecanismos de transferencia convectiva de calor y masa con la velocidad total de transferencia de calor a través de la fase líquida. En contraste, la ecuación 5.21 ó 5.25 relaciona la velocidad de transferencia de calor a través de la fase vapor debida al mecanismo de convección, con la velocidad total de transferencia de calor a través de la fase vapor debida a la transferencia por convección del calor latente, asociada con la transferencia de masa. Se involucran los coeficientes de la fase vapor, pero se relacionen a través de la relación psicrométrica ($h_{ca} / k_{ya} C_h = r$).

Por tanto, la curva de la condición de la fase gaseosa difiere de manera fundamental de las líneas de operación usadas en transferencia de calor, transferencia de masa y cálculos de transferencia simultánea de calor y masa.

5.5 Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y calor en la torre de enfriamiento de agua.

La construcción paso a paso del método de Mickley puede procederse de sentido inverso para determinar las constantes de velocidad, (k_{ya} , h_{ca} y h_{la}) a partir de un solo conjunto de datos de prueba. Con las temperaturas globales de entrada y salida de las fase gaseosa y líquida y de las humedades de la fase gaseosa. Es posible trazar de inmediato la línea de operación. La curva de la condición de la fase gaseosa puede obtenerse suponiendo un valor de $-h_{la} / k_{ya}$ y graficando la curva paso a paso. Si ésta curva no cumple con la condición final experimental, debe escogerse un nuevo valor de $-h_{la} / k_{ya}$. Una vez que se ha encontrado el valor apropiado de la relación $-h_{la} / k_{ya}$. Se lee la “fuerza impulsora” ($H_i - H_G$) de la construcción y se resuelve en forma directa la ecuación de diseño en la forma integrada

$$\int_{HG1}^{HG2} \frac{dH_G}{(H_i - H_G)} = \frac{S k_y a Z}{G'}$$

Para dar k_{ya} . Entonces, con este valor de k_{ya} se puede obtener el valor de h_{la} , a través de la relación $-h_{la} / k_{ya}$ determinada anteriormente. Por último, es posible utilizar la relación de Lewis para obtener h_{ca} . Al igual que como se hizo antes, ésta solución supone que as áreas para la transferencia de calor y masa son iguales.

5.5 Evaluación del número de unidades de transferencia por el método de Carey-Williamson

Este es un método alternativo para estimar el número de unidades de transferencia (NUT) que consiste en la evaluación de la integral de la ecuación de diseño.

A partir de:

$$Z = \frac{G' dH_G}{S k_y a (H_i - H_G)}$$

Integrando:

$$Z = \frac{G'}{S k_y a} \int_{HG1}^{HG2} \frac{dH_G}{(H_i - H_G)}$$

Dónde:

$$\int_{HG1}^{HG2} \frac{dH_G}{(H_i - H_G)}$$

Es el número de unidades de transferencia (NUT).

Y consiste en suponer que $H_i - H_G$ varía de una manera parabólica a lo largo de la torre.

En éste método se consideran tres puntos para definir la parábola: en el fondo ΔH_1 , en la parte superior de la columna ΔH_2 y en la parte media de la torre ΔH_M (el cual se estima en la parte promedio del agua de la columna).

La fuerza directora promedio efectiva es $f \Delta H_M$ que es la que debe sustituir al término $H_i - H_G$.

$$f \Delta H_M = H_i - H_G$$

Donde f es un factor que se obtiene de la figura de Carey – Williamson. En la figura se puede apreciar la forma en cómo se lleva a cabo el cálculo de los valores mencionados a partir de la figura de Carey – Williamson.

Los valores de ΔH_1 y ΔH_2 se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta H_1 = H_i - H_{G1} \quad \Delta H_2 = H_i - H_{G2}$$

$$T_m = \frac{T_{1,2} T_{1,1}}{2}$$

$$\Delta H_M = H_{iM} - H_{GM}$$

A partir de la obtención de todos los valores podremos calcular el número de unidades de transferencia (NUT):

$$NUT = \frac{H_{G2} - H_{G1}}{f \Delta H_M}$$

De ésta manera ya no es necesario hacer el desarrollo gráfico de la integral de la ecuación de diseño.

Para el trabajo que se llevó a cabo con la torre de enfriamiento de agua no se toma en cuenta el método de Carey – Williamson para la obtención del valor del número de unidades de transferencia (NUT), ya que tiene un porcentaje de error mayor en comparación al que se evaluaría si se realiza la integral de manera gráfica.

Aun así, se menciona en el trabajo con la finalidad de tener conocimiento de un método alternativo para obtener el valor de la integral.

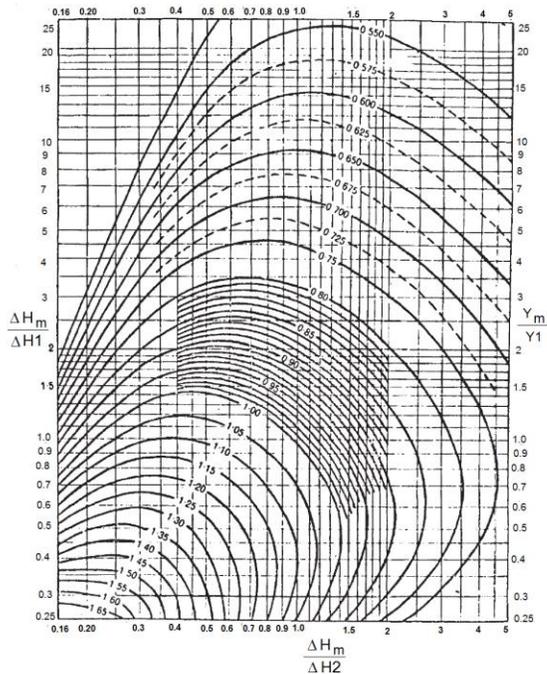


Figura 18. Gráfica de Carey-Williamson.

CAPÍTULO 6
DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL
EQUIPO

6.1 Componentes Principales del Equipo.

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

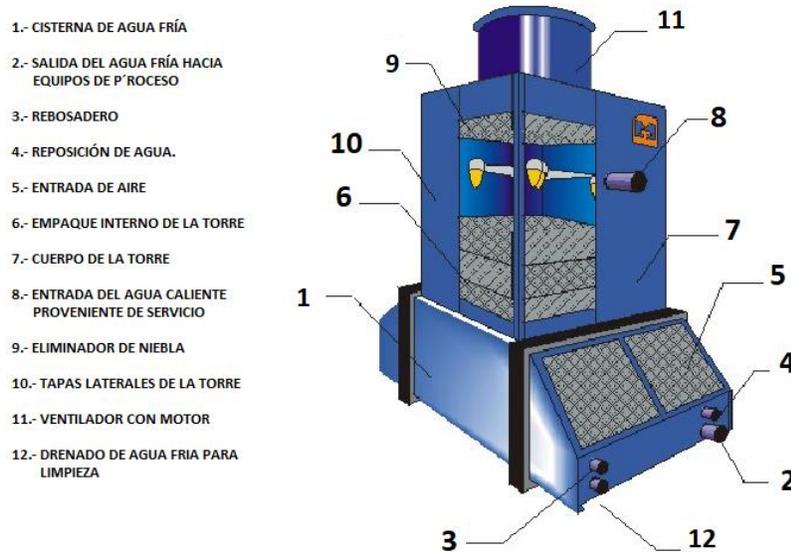


Figura 19. Componentes principales de la torre de enfriamiento.

6.2 Alineación del Equipo.

Los diagramas de tubería e instrumentación para la alineación de la torre de enfriamiento se presentan en las Figuras no.18 y 19.

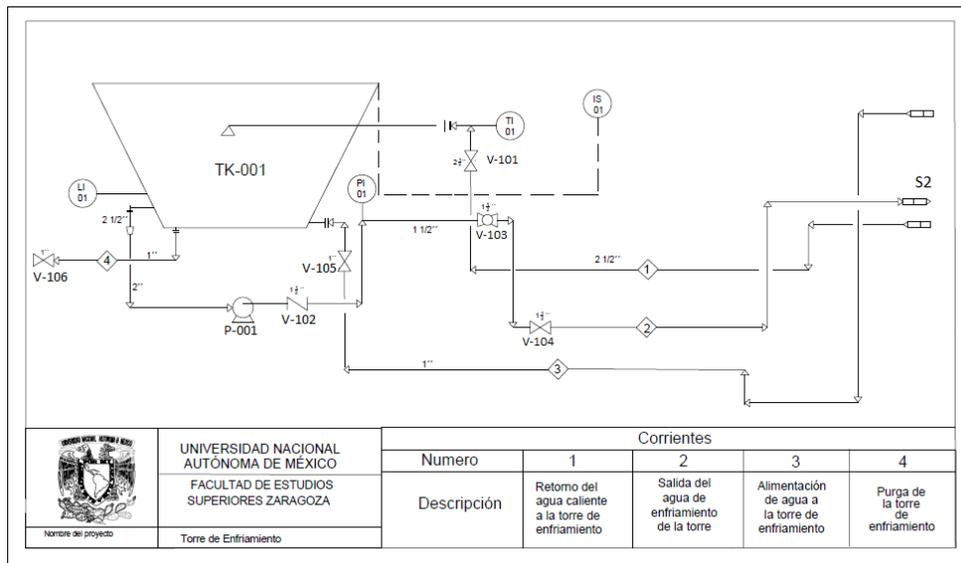


Figura 20. Alineación de la torre de enfriamiento.

Viñas, E.B., Moreno, C. (2021). Manual de operación: Torre de enfriamiento. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. pág. 12.

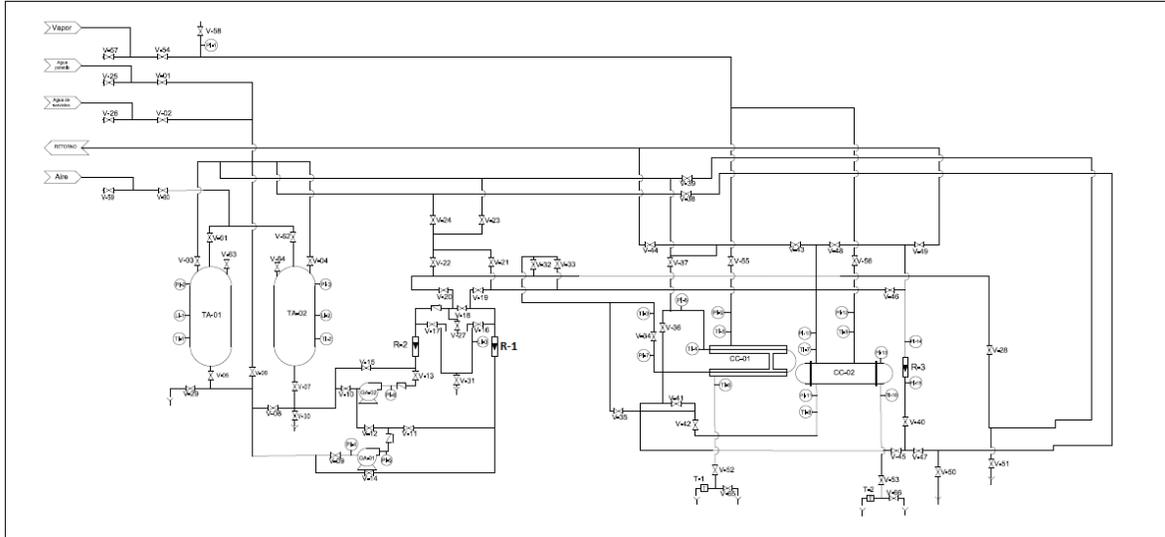


Figura 21. Alineación de tuberías de suministro y descarga de la torre de enfriamiento.

Viñas, E.B., Ambriso, L.N. (2019). *Manual de operación: Bombas*. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. s/n.p.

6.3 Códigos de Identificación

Tabla 1. Equipos, instrumentos y accesorios que conforman la torre de enfriamiento.

Cantidad	Descripción	Código
1	Torre de Enfriamiento	TK-001
1	Bomba Centrífuga	P-001
1	Válvula de Globo	V-103
4	Válvula de Compuerta	V-106, V-105, V-101 y V-104
1	Válvula Check	V-102
1	Indicador de Presión	PI
1	Indicador de Temperatura	TI
1	Indicador de Nivel	LI
1	Interruptor de Corriente Eléctrica	IS

Servicios requeridos.

- Agua.
- Vapor.

Equipo auxiliar

- Intercambiador de calor de tubos y coraza

Manejo de la torre de enfriamiento.

- Familiarizarse con el equipo revisando el diagrama de las figuras 1 y 2.
- Cerrar la válvula V-106 correspondiente al drenado del agua fría
- Abrir la válvula V-105 para permitir la alimentación de agua fresca a la cisterna de la torre de enfriamiento.
- Abrir la válvula V-101 y permitir el paso del agua caliente a los distribuidores de la torre de enfriamiento que proviene del intercambiador.
- Abrir las válvulas V-102 V-103 y V-104 para permitir la salida S2 del agua de enfriamiento de la torre hacia los intercambiadores¹.
- Encender el motor del ventilador y la bomba P-001.

6.4 Operación del Intercambiador de Tubos y Coraza

1. Inspeccionar que todas las válvulas donde se localiza el intercambiador se encuentren cerradas antes de iniciar.
2. Seguir la línea de flujo del suministro de agua proveniente de la torre al intercambiador, alineando las válvulas V-06, V-08, V-15, V-20, V-32, V-35 y V-42.
3. Seguir la línea de salida de agua del intercambiador, alineando las válvulas V-48, V-49 y V-65, para el retorno del agua a la torre de enfriamiento.
4. Alinear las válvulas de la torre de enfriamiento, de salida y su retorno. Encender el ventilador, y bomba de la torre de enfriamiento
5. Abrir el suministro de agua de la torre de enfriamiento al equipo con la válvula V-02.
6. Abrir la válvula V-54 y V-56 para el suministro de vapor a la coraza del equipo, ajustando la presión de alimentación de vapor al intercambiador de calor con V-58, leyendo presión y temperatura en el manómetro (PI-12) y termómetro (TI-9) a la entrada del intercambiador.
7. Abrir la válvula V-53 y V-66, para dar salida al condensado.

Recomendaciones de Seguridad.

- Revisar constantemente que la tina de la torre de enfriamiento no se vacíe para que la bomba no trabaje sin agua o bien esta no se inunde y se desborde el agua.

Inicialmente se opera haciendo fluir el líquido frío para posteriormente circular el fluido caliente y al término de la práctica se procede de forma contraria. Primeramente, cerrar el paso del fluido caliente y dejar circular el fluido frío por un rato para posteriormente cerrar la válvula.

CAPÍTULO 7

**ACTIVIDAD EXPERIMENTAL Y
ANÁLISIS DE RESULTADOS**

7.1 Actividad Experimental

Para el desarrollo de la actividad experimental se establecen los parámetros bajo los cuales se trabajó en la torre de enfriamiento para la obtención de los coeficientes de transferencia de masa y calor.

Principalmente son 2 las variables con las que se trabajó en la torre:

- Flujo volumétrico de agua
- Temperatura de entrada del agua

Se llevó a cabo la experimentación dejando una de ellas fija y variando ambas, esto con la finalidad de obtener todos los datos para transferencia de masa y calor a cada una de las condiciones dadas.

Tabla 2. Primera Corrida (12 de noviembre 2019):

Fondo de la Torre [°C]			Parte Superior de la Torre [°C]			
Q _{H2O} [GPM]	Tb _{S1}	Tb _{H1}	Q _{H2O} [GPM]	Tb _{S1}	Tb _{H1}	Q _{H2O} [GPM]
18	22	16,5	18	22	16,5	18
16	23	14,4	16	23,3	22,6	44
14	24,4	13,3	17	23,8	23,3	47
12	24,3	13,3	18	24	24	50
10	19,3	10,1	16	27,6	27,1	59

Tabla 3. Segunda corrida (28 de enero de 2020):

Fondo de la Torre [°C]			Parte Superior de la Torre [°C]			
Q _{H2O} [GPM]	Tb _{S1}	Tb _{H1}	TL ₁	Tb _{S2}	Tb _{H2}	TL ₂
9	23,3	15,7	18	21,2	15,5	30
11	21,5	15,3	16	21,3	16,2	30
13	20,3	14,4	14	20,8	16,3	30
15	18,7	14,8	14	20,8	17,1	30
17	22,3	16,2	15	23,2	18,2	30

Dónde:

Q_{H2O}= Gasto de agua a la entrada de la torre (galones por minuto).

T_{bS1} , b_{H1} = Temperatura de bulbo seco y húmedo en el fondo de la torre de enfriamiento (°C).

T_{bS2} , b_{H2} = Temperatura de bulbo seco y húmedo en la parte superior de la torre de enfriamiento (°C).

$TL_{1,2}$ = Temperatura del agua en el fondo y parte superior de la torre de enfriamiento (°C).

De esta manera ya es posible llevar a cabo el cálculo de las propiedades del aire a la entrada y salida de la torre. Esto se hace aplicando las ecuaciones del capítulo 3.

7.2 Evaluación de las propiedades del aire húmedo a la entrada y salida de la torre.

Para conocer las condiciones de entrada y salida del aire húmedo en la torre de enfriamiento se desarrolló un programa en Mathcad (Apéndice A) para determinar el valor de la entalpía y la humedad del gas a partir de la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco a la entrada y salida del vapor.

Con base en los conceptos vistos en el capítulo de psicrometría es posible aplicar las ecuaciones que nos permiten llegar a la obtención del programa computacional.

Aplicando la ecuación 3.4 se obtiene la humedad del aire a la entrada y salida de la torre, debiendo antes calcular la presión de vapor en base a la ecuación de Antoine (vista también en el capítulo 3); la humedad relativa se encuentra mediante la ecuación 3.5 y por último para el cálculo de entalpía se ocupa la ecuación 3.12.

El programa se desarrolló para los datos:

Fondo de la Torre [°C]			Parte Superior de la Torre [°C]			
$Q_{H2O}[GPM]$	T_{bS1}	T_{bH1}	TL_1	T_{bS2}	T_{bH2}	TL_2
18	22	16,5	20	29	29	40,5

Con los valores de la entalpía del gas a la entrada y salida de la torre es posible realizar una gráfica H_G vs. T con la finalidad de encontrar la línea de operación bajo la cual se desenvuelve la torre a determinadas condiciones.

A partir de la obtención de dicha grafica es posible llevar a cabo el desarrollo del método de Mickley mencionado anteriormente para la obtención de las condiciones de salida del gas en la torre de enfriamiento.

Los resultados del programa de Mathcad para el cálculo de las propiedades del aire húmedo fueron los siguientes:

Y	HG1(Btu/lbmol AS)	HG2(Btu/lbmol AS)
0.01345552	676.3525969	1437.448194
0.03371212		

Dónde:

Y= Humedad absoluta a la entrada de la torre (lbmol H₂O / lbmol aire seco)

H_{G1}= Entalpía específica a la entrada de la torre (BTU / lbmol aire seco)

H_{G2}= Entalpía específica a la salida de la torre (BTU / lbmol aire seco)

CAPÍTULO 8
CÁLCULOS Y RESULTADOS
EXPERIMENTALES

8.1 Explicación del desarrollo del Método

Tomando como referencia los valores establecidos a partir de los capítulos anteriores es posible desarrollar el método de Mickley para la obtención de las condiciones de salida del gas.

Debido a que el método de Mickley exige un desarrollo gráfico para encontrar la solución, se realizó un programa en Mathcad donde se calculan todos los valores necesarios para encontrar las condiciones de salida del gas y que no exista la necesidad de efectuar el método de manera convencional.

El programa en Mathcad para el desarrollo del método de Mickley (Apéndice A) establece como único valor a ingresar una temperatura de interfase, con la cual se encuentra la línea de unión y por consecuencia una pendiente de la misma. A partir de ello se encuentran determinadas condiciones de salida del gas que en el caso de concordar con la temperatura de salida del gas obtenida experimentalmente significa que los valores desplegados por el programa son los correctos.

Para la creación del programa computacional se tomó como base todos los conceptos generales de transferencia de masa y calor vistos en el capítulo 5 de este trabajo.

A partir de que se tienen todos los valores para la torre de enfriamiento es necesario trasladarlos a una hoja de cálculo para dejar establecida la gráfica del método aplicado.

8.2 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Masa y Calor

En el mismo programa de desarrollo del método de Mickley se adiciona la parte relativa al cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y masa; de tal manera que se facilite la obtención de los cálculos para cada una de las pruebas.

Como se observa en el programa, resulta necesario adicionar el valor del número de unidades de transferencia (NUT), que no es más que el cálculo de la integral de diseño, mencionada en el programa de Mathcad y desarrollada en el capítulo 4 de este trabajo.

Además, para la obtención del calor húmedo se debe adicionar los valores de la humedad absoluta para la entrada y salida del gas. Estos valores se obtienen a partir del desarrollo del programa del apéndice A para la obtención de las propiedades del aire húmedo a la entrada y salida de la torre.

Al final del programa en Mathcad para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y calor se despliegan los resultados finales obtenidos a partir de la aplicación del programa computacional a las condiciones de ingreso del usuario.

Para dejar más claro esto, se muestran los resultados obtenidos gracias al programa desarrollado en Mathcad (Apéndice A)

Condiciones de entrada y salida de la torre:

Temperatura del H_2O entrada

TL2= 40.5 °C TL2F=104.9 °F

Temperatura del H_2O salida

TL1= 20 °C TL1=68 °F

Temperatura de entrada del Aire

TbS1=22 °C TbS1=71.6 °F

TbH1=16.5 °C TbH1=61.7 °F

Temperatura de salida del Aire

TbS2=29 °C TbS2=84.2 °F

TbH2=29 °C TbH2=84.2 °F

Q= 18 GPM

Aplicando el programa para calcular la humedad y entalpía del gas a la entrada y salida de la torre, se obtiene:

Y	HG1(Btu/lbmol AS)	HG2(Btu/lbmol AS)
0.01345552	676.3525969	1437.448194
0.03371212		

Obtener la curva de saturación aplicando la metodología del apéndice B

Con los valores de entalpías del aire y las temperaturas del agua a la salida y entrada de la torre, graficar la línea de operación como se muestra en la figura 19.

Se adicionan los valores de las temperaturas y las entalpías del aire y agua al programa computacional de apéndice A.

Como se aprecia en el programa, es necesario estar iterando la temperatura de interfase del gas, hasta que la temperatura de salida del gas del programa coincida con la temperatura de salida del gas experimental, como muestra en la tabla 4.

Tabla 4:

Temperatura de interfase propuesta	Temperatura del gas de salida del programa	Temperatura del gas de salida experimental
66 °F	99.24 °F	104.9 °F
67 °F	104.9 °F	104.9 °F

Como se puede observar en la tabla 4, en la segunda celda la temperatura del gas determinada por el programa coincide con la temperatura del gas experimental, lo cual significa que la temperatura de interfase propuesta de 67°F es la correcta.

Los valores encontrados en el programa computacional del apéndice A son los resultados finales que permiten obtener la trayectoria del aire a lo largo de la torre por el método de Mickley, de tal manera que ya no es necesario desarrollar el método gráfico de la figura para encontrar las condiciones de salida del aire.

Para determinar los coeficientes de transferencia de masa y calor. Continuando con el programa del apéndice A; se debe adicionar el número de unidades de transferencia (NUT), para esto se utiliza el método de Carey-Williamson, el cual permite encontrar el valor de la integral del NUT sin necesidad de aplicar el método gráfico. El método de Carey-Williamson se aplica en el apéndice A.

Es necesario adicionar en el programa del apéndice A los valores de la humedad y la entalpía del gas a la entrada y salida de la torre para obtener los coeficientes de transferencia de masa y calor. Estos valores se determinaron al inicio del apéndice A.

La obtención del coeficiente de transferencia de masa ($k_y a$) se determina a partir de la ecuación 5.18

$$Z = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_y a} \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G}$$

que viene a ser la ecuación de diseño con la diferencia de entalpía en la fase gas como fuerza directora o promotora de la transferencia de masa y calor; dado que se mantiene constante el gasto de aire, agua y la altura de la torre para estas condiciones el programa computacional lo desarrolla de manera propia, sin necesidad de adicionar algún valor extra.

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor en la fase líquida a partir de la pendiente de la línea de unión y del valor ya conocido de $k_y a$ en el punto anterior se logra tal propósito, mediante la relación:

$$-m = \frac{h_c a}{k_y a}$$

Por último, determinar el coeficiente de transferencia de calor en la fase gas ($h_c a$), es necesario la adición de la humedad del gas a la entrada y salida de la torre para obtener los calores húmedos y aplicar la relación de Lewis para encontrar $h_c a$.

Esto es:

$$h_c a = k_y a C_{hm}$$

Dónde:

C_{hm} es el calor húmedo del aire.

Al final del programa se muestran los coeficientes de transferencia de masa y calor para las condiciones dadas.

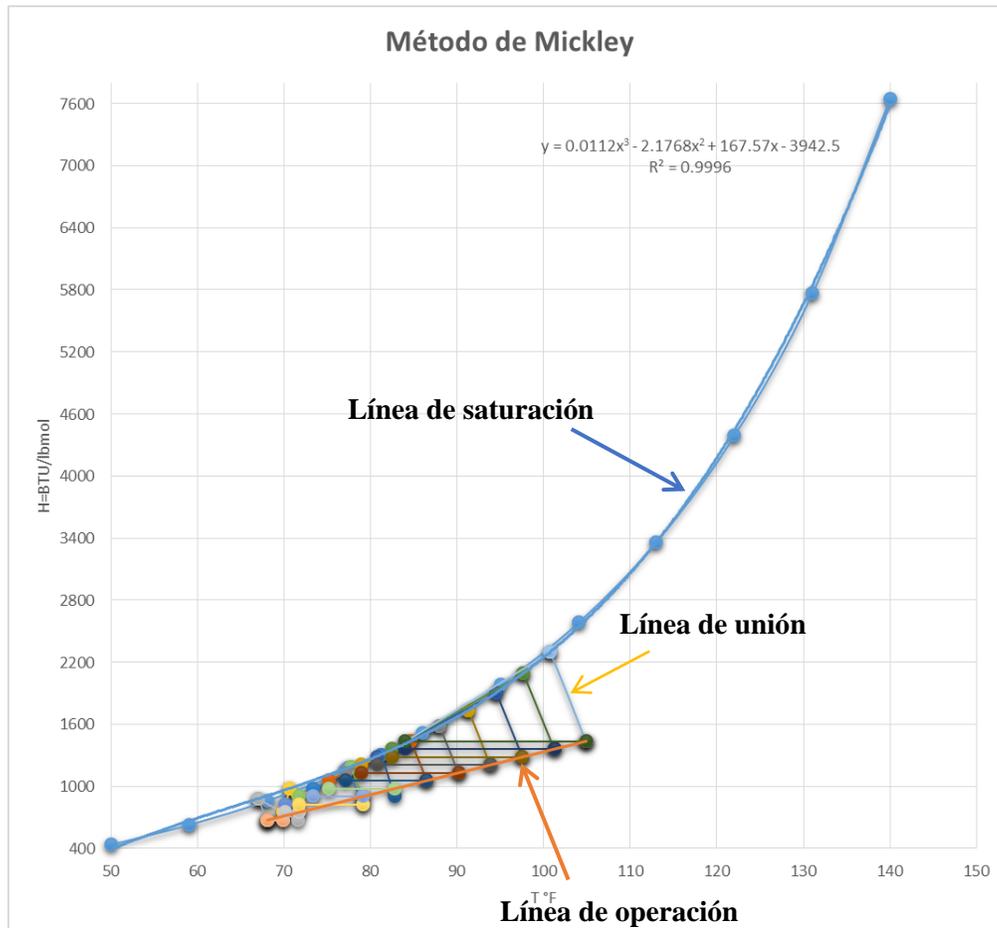


Figura 22. Método de Mickley para los datos seleccionados.

8.3 Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los programas realizados en Mathcad para la evaluación de los coeficientes de transferencia de masa y calor de la torre de enfriamiento de agua son los siguientes:

Cálculo de Coeficientes

a) Transferencia de Masa

$$z = \left(\frac{G'}{S} \right) \left(\frac{1}{k_y a} \right) \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH_G}{H_i - H_G}$$

Flujo de Aire seco a través de la torre:

$$\frac{Lm c_{pL}}{G'} = \frac{H_{G2} - H_{G1}}{T_{L2} - T_{L1}}$$

Siendo:

$$G' = Lm c_{pL} \left(\frac{T_{L2} - T_{L1}}{H_{G2} - H_{G1}} \right) = \frac{lbmol A.S}{s}$$

$$L_2 = GPM * 2.228 \times 10^{-3} \frac{ft^3}{s}$$

$$L_{prom} = \frac{L_1 + L_2}{2} = \frac{ft^3}{s}$$

$$L_1 = GPM * 2.228 \times 10^{-3} \frac{ft^3}{s}$$

Densidad del agua

Polinomio de artículo, a Temp. promedio

$$\rho_{H_2O_{prom}} = 62.7538 - 3.5347 \times 10^{-3} T_{H_2O} - 4.8193 \times 10^{-5} T_{H_2O}^2 = \frac{lb}{ft^3}$$

$$L_m = L_{prom} * \rho_{H_2O_{prom}} * \frac{1}{PM} = \frac{lbmol H_2O}{s}$$

$$z = 1.45m$$

Se despeja $k_y a$:

$$k_y a = \left(\frac{G'}{S} \right) \left(\frac{1}{z} \right) \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH_G}{H_i - H_G}$$

$$\int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH_G}{H_i - H_G} = \frac{H_{G1} - H_{G2}}{f \Delta H_{Gm}}$$

$$\Delta H_{Gm} = (H_{Gim} - H_{Gm})$$

$$T_m = \frac{T_{L2} + T_{L1}}{2}$$

RESULTADO DE LAS VARIABLES

L1(ft3/s)	L2(ft3/s)			p prom H2O (lb/ft3)	
0.04010	0.04010			62.088	
Lprom	Lm(lbmol/hr)			G' (lbmol A.S./s)	
0.040104	0.138332064			0.120720915	
CpL(BTU/lbmolC)	f	z (ft)	ΔHGm	Integral	
18	0.88	4.756	454.721763	1.90200125	

ΔH1

ΔH2

ΔHm

Hgi	ΔH1	232.022603	
908.3752	ΔH2	1173.00711	
Hgi2	Hgm	1056.9077	
2610.455301	Tm	86.45	
Hgim			
1511.629463		ΔHm/ΔH1	1.95981666
		ΔHm/ΔH2	0.38765474

kya (lbmol/ft3 s)

0.048278245

b) Coeficiente de T.C. lado del líquido

Línea de unión:

$$\frac{H_G - H_{Gi}}{T_L - T_i} = \frac{hLa}{kya} = -mLu$$

mLu , ya conocido, se despeja hLa

$$hLa = -mLu * kya$$

hLa(BTU/ft2 s)
9.90803807

c) **Coefficiente de T.C. lado del gas**

$$r = \frac{hca}{kya\overline{CH}}$$

$$\overline{CH} = \frac{CH1 + CH2}{2}$$

$$CH = .24 + 0.46Y$$

Se despeja

$$hca = rkya\overline{CH}$$

hca(BTU/ft2 s)
0.012110528

Siendo:

Kya = coeficiente de transferencia de masa

hLa = coeficiente de transferencia de calor del lado de la fase líquida

hca = coeficiente de transferencia de calor del lado de la fase gaseosa

Del Balance de Energía:

$$Q_L = hLa(T_L - T_i)\Delta z = \frac{BTU}{sft^2}$$

$$Q_{sens} = hca(T_i - T_G)\Delta z = \frac{BTU}{sft^2}$$

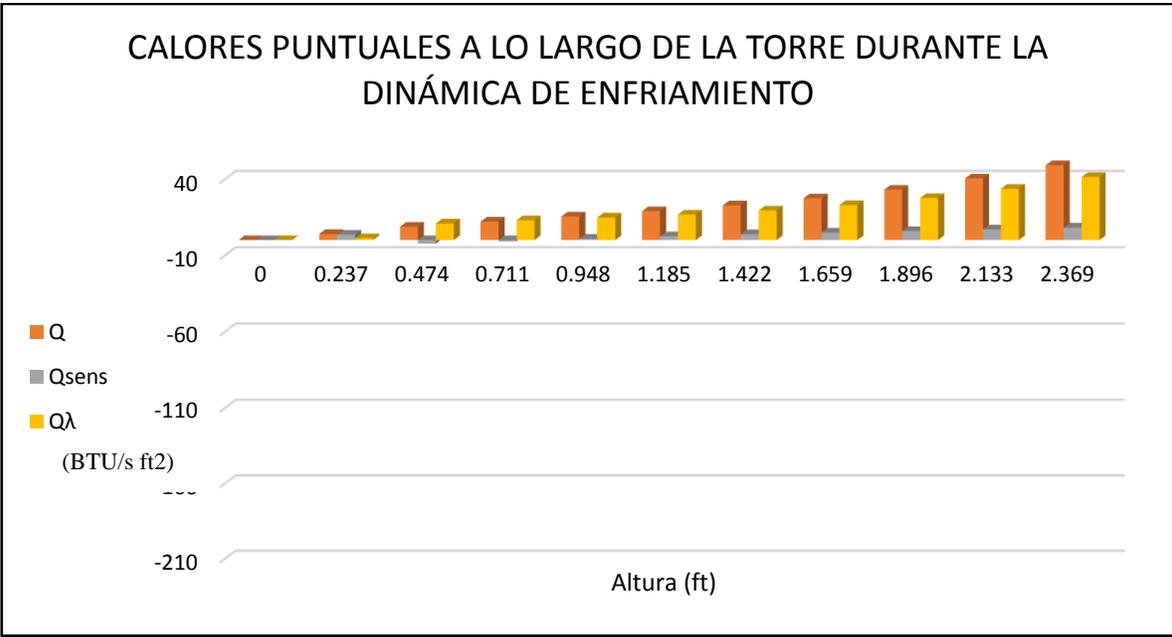
$$Q_\lambda = \lambda_0 * 1.8PM_{H2O} kya(y_i - y)\Delta z = \frac{BTU}{sft^2}$$

$$\Delta z = \frac{z_2 - z_1}{T_{L2} - T_{L1}} (T_L - T_{L1})$$

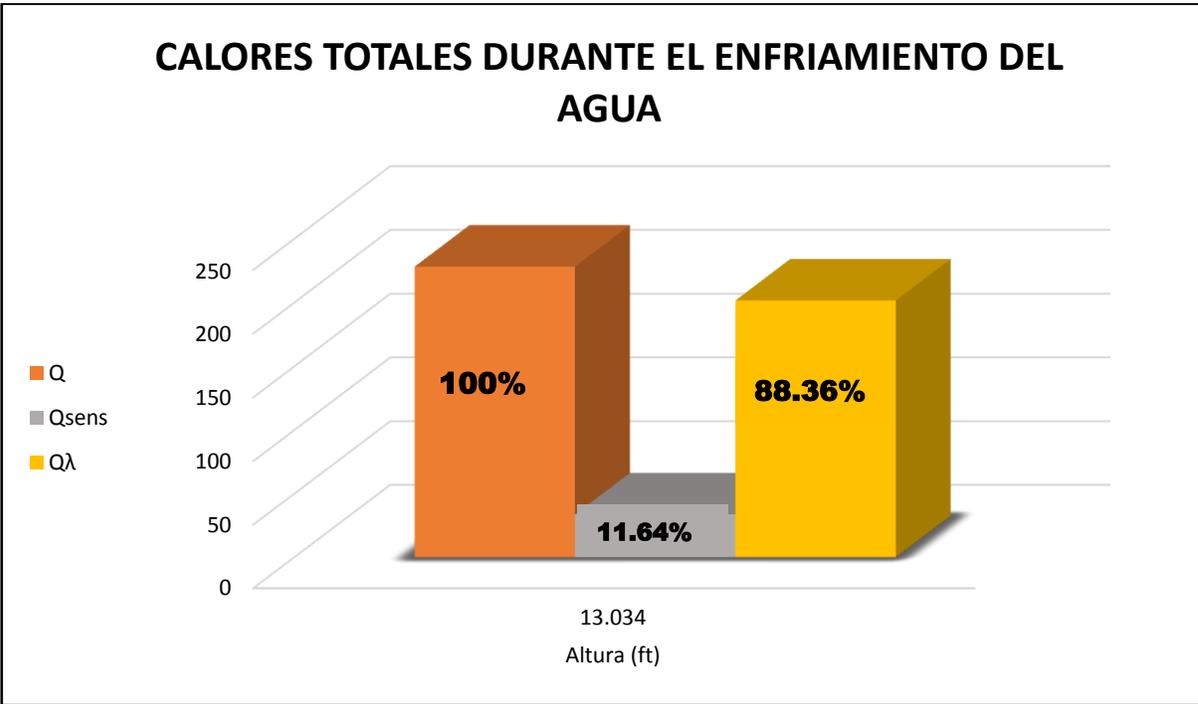
$$y = \frac{H_G - (0.24PM_{aire})T_G}{(0.46PM_{H2O})T_G + \lambda_0 * 1.8PM_{H2O}}$$

$$y_i = \frac{H_{Gi} - (0.24PM_{aire})T_i}{(0.46PM_{H2O})T_i + \lambda_0 * 1.8PM_{H2O}}$$

Δz (ft)	y (lbmol H ₂ O/lbmol A.S)	QL (BTU/s ft ²)	Qsens (BTU/s ft ²)	Q_{λ} (BTU/s ft ²)	Yi (lbmol H ₂ O/lbmol A.S)
0.4756	0.009528795	22.100513	-0.01666918	5.0244843	0.02083803
1.4268	0.013265394	119.924223	0.00794659	14.9263143	0.02446424
1.4268	0.016524321	24.1267344	0.09786848	20.7739113	0.03211047
1.9024	0.01976861	95.6746306	0.10098494	22.6104927	0.03249168
2.378	0.022924332	124.378481	0.17375012	31.6003378	0.0371497
2.8536	0.026052262	156.541139	0.26142199	43.5234479	0.04237954
3.3292	0.029186004	193.203403	0.36540565	59.3433067	0.04826764
3.8048	0.032343033	235.49693	0.48705011	80.1107254	0.05488244
4.2804	0.035531391	284.607044	0.62736797	106.935467	0.06227507
4.756	0.038753816	341.752613	0.78697011	140.968726	0.07048342
4.756	0.042550813	197.131623	0.96373938	164.480637	0.07957254



Gráfica 1. Calores puntuales a lo largo de la torre durante la dinámica de enfriamiento.



Gráfica 2. Calores totales durante el enfriamiento del agua

CAPÍTULO 10
GUIÓN EXPERIMENTAL
PROPUESTO



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

L 1

**EFFECTO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA
EN LA DINÁMICA DE ENFRIAMIENTO DEL AGUA EN UNA TORRE DE
ENFRIAMIENTO.**

1. OBJETIVOS

Objetivo Académico.

Que el alumno identifique y cuantifique mediante la experimentación los tipos de calor involucrados en la dinámica de enfriamiento de agua caliente dentro de una torre de enfriamiento a fin de determinar cuál de ellos y en qué proporción contribuyen al enfriamiento de una corriente de agua caliente.

2.- PROBLEMA A RESOLVER POR EL ESTUDIANTE.

Para flujos de agua caliente de 9,12 y 15 GPM alimentados a la torre de enfriamiento a una temperatura de 70°C, y un flujo de aire determinado por el ventilador de la misma torre, determinar ¿qué porcentaje del calor que pierde el agua durante su enfriamiento lo gana el aire en forma de calor sensible y cuanto en forma de calor latente?

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

3.- COMPONENTES Y DIMENSIONES PRINCIPALES DEL EQUIPO.

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA

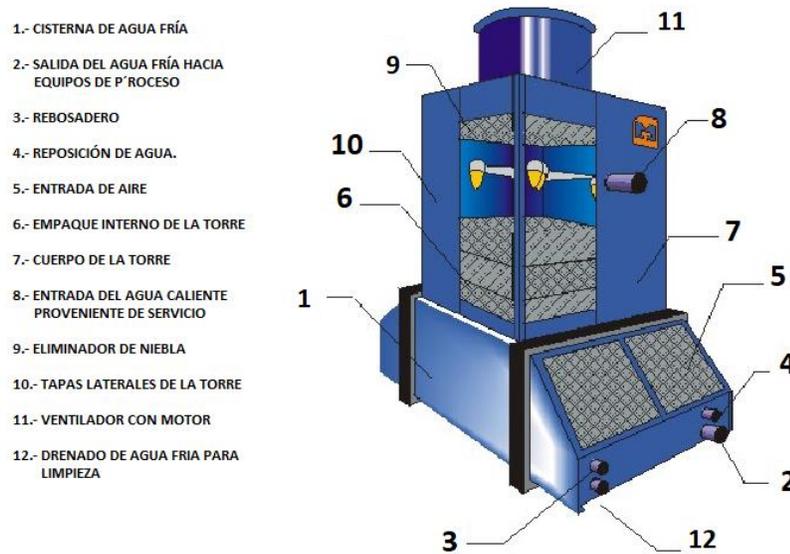


Figura. 3.1 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

CONCEPTO	DIMENSIONES
Altura de la zona empacada	
Cuerpo de la torre	
Diámetro del soporte del ventilador	
Cisterna de agua fría	

Anotar las dimensiones de acuerdo al equipo con el que se cuenta en la FES Zaragoza.

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

4.- ALINEACIÓN DEL EQUIPO.

Los diagramas de tubería e instrumentación para la alineación de la torre de enfriamiento se presentan en las Figuras no.1 y 2

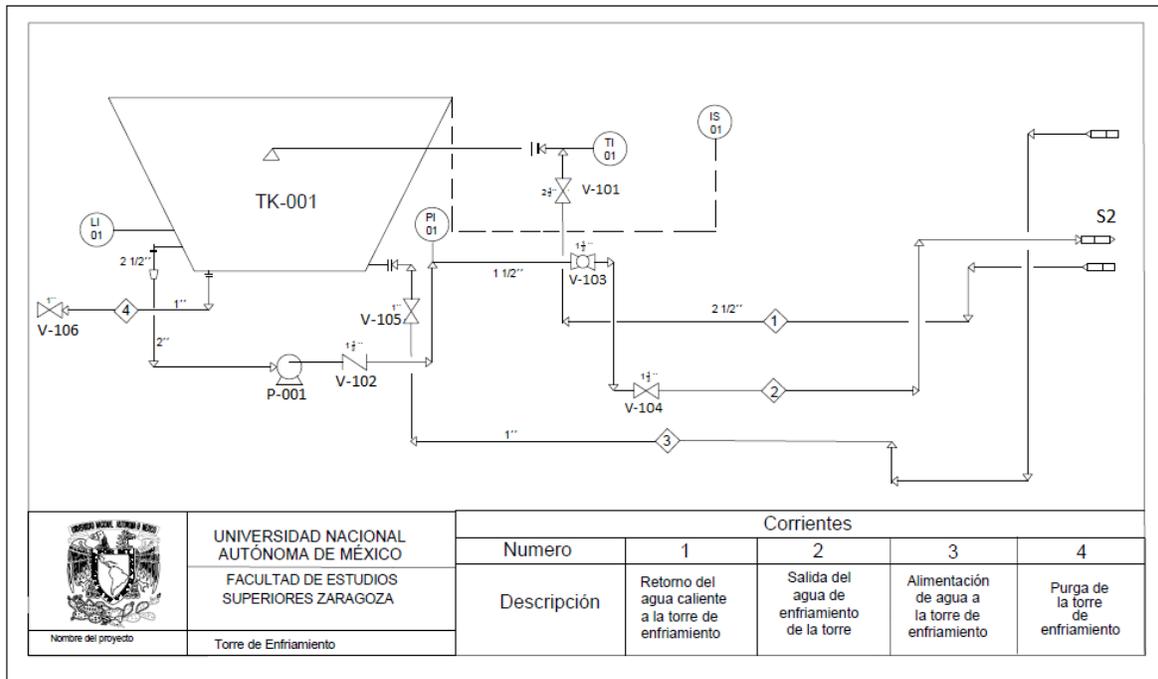


Figura 1 Alineación de la torre de enfriamiento

Viñas, E.B., Moreno, C. (2021). Manual de operación: Torre de enfriamiento. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. pág. 12.

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-XXXX	17/04/2019	0	

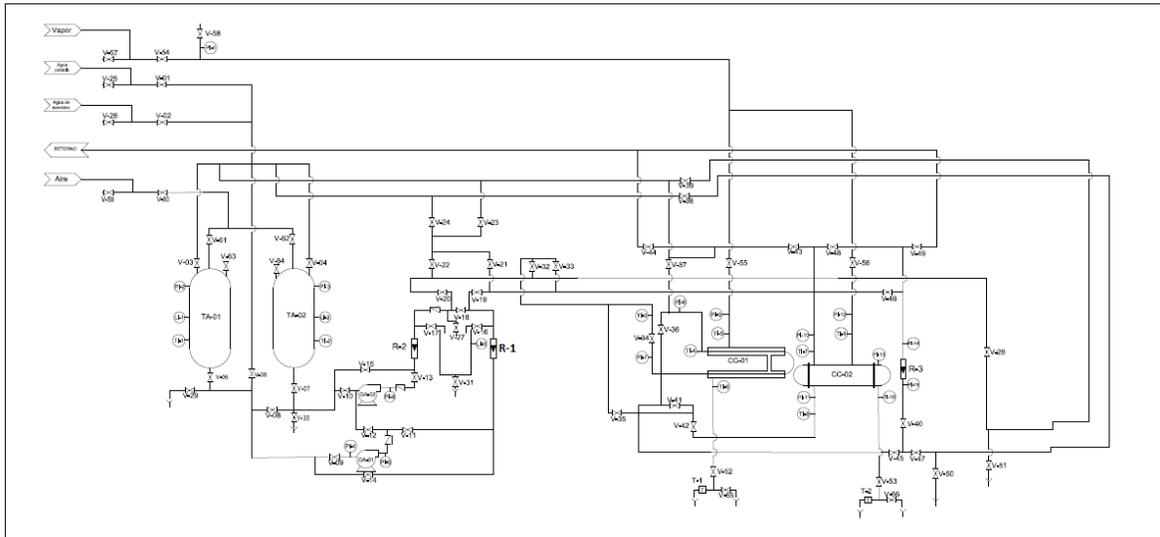


Figura 2 Alineación de tuberías de suministro y descarga de la torre de enfriamiento

Viñas, E.B., Ambriso, L.N. (2019). Manual de operación: Bombas. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. s/n.p.

CODIGOS DE IDENTIFICACIÓN

Tabla 1. Equipos, instrumentos y accesorios que conforman la torre de enfriamiento

Cantidad	Descripción	Código
1	Torre de Enfriamiento	TK-001
1	Bomba Centrífuga	P-001
1	Válvula de Globo	V-103
4	Válvula de Compuerta	V-106, V-105, V-101 y V-104
1	Válvula Check	V-102
1	Indicador de Presión	PI
1	Indicador de Temperatura	TI
1	Indicador de Nivel	LI
1	Interruptor de Corriente Eléctrica	IS



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-XXXX	17/04/2019	0	

Materiales, equipo y herramienta

- 1 psicrómetro
- 2 termómetros 0°C-100°C.
- Bata blanca de algodón.
- Casco.
- Zapato cerrado antiderrapante.

Servicios requeridos.

- Agua.
- Vapor.

Equipo auxiliar

- Intercambiador de calor de tubos y coraza

Manejo de la torre de enfriamiento.

- Familiarizarse con el equipo revisando el diagrama de las figuras 1 y 2.
- Cerrar la válvula V-106 correspondiente al drenado del agua fría
- Abrir la válvula V-105 para permitir la alimentación de agua fresca a la cisterna de la torre de enfriamiento.
- Abrir la válvula V-101 y permitir el paso del agua caliente a los distribuidores de la torre de enfriamiento que proviene del intercambiador.
- Abrir las válvulas V-102 V-103 y V-104 para permitir la salida S2 del agua de enfriamiento de la torre hacia los intercambiadores².
- Poner en marcha el motor del ventilador y la bomba P-001.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
SGC-FESZ-IQ-XXXX	17/04/2019	0	

Operación del intercambiador de tubos y coraza

1. Inspeccionar que todas las válvulas donde se localiza el intercambiador se encuentren cerradas antes de iniciar.
2. Seguir la línea de flujo del suministro de agua proveniente de la torre al intercambiador, alineando las válvulas V-06, V-08, V-15, V-20, V-32, V-35 y V-42.
3. Seguir la línea de salida de agua del intercambiador, alineando las válvulas V-48, V-49 y V-65, para el retorno del agua a la torre de enfriamiento.
4. Alinear las válvulas de la torre de enfriamiento, de salida y su retorno. Encender el ventilador, y bomba de la torre de enfriamiento
5. Abrir el suministro de agua de la torre de enfriamiento al equipo con la válvula V-02.
6. Abrir la válvula V-54 y V-56 para el suministro de vapor a la coraza del equipo, ajustando la presión de alimentación de vapor al intercambiador de calor con V-58, leyendo presión y temperatura en el manómetro (PI-12) y termómetro (TI-9) a la entrada del intercambiador.
7. Abrir la válvula V-53 y V-66, para dar salida al condensado.

Recomendaciones de Seguridad.

- Revisar constantemente que la tina de la torre de enfriamiento no se vacíe para que la bomba no trabaje sin agua o bien esta no se inunde y se desborde el agua.

Inicialmente se opera haciendo fluir el líquido frío para posteriormente circular el fluido caliente y al término de la práctica se procede de forma contraria. Primeramente, cerrar el paso del fluido caliente y dejar circular el fluido frío por un rato para posteriormente cerrar la válvula.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

5.- ECUACIONES BÁSICAS SOBRE TORRES DE ENFRIAMIENTO

La ecuación básica de diseño está expresada por:

$$Z = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_y a} \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (1)$$

Z = Altura de la zona empacada

AUT = Altura de la unidad de transferencia

$$AUT = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_y a}$$

NUT = Número de unidades de transferencia

$$NUT = \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G}$$

La dinámica de la transferencia de calor y masa en términos de sus respectivos coeficientes los coeficientes, están dadas por las siguientes relaciones:

$$\left(\frac{L_m}{S} \right) C_{pL} dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (2)$$

$$\left(\frac{G'}{S} \right) Ch dT_G = h_c a (T_i - T_G) dZ \quad (3)$$

$$\left(\frac{G'}{S} \right) \lambda_0 dY = \lambda_0 k_y a (Y_i - Y) dZ \quad (4)$$

La línea de operación que relaciona la entalpía del gas con la temperatura del líquido a lo largo de la torre está dada por

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

$$\frac{HG_2 - HG_1}{TL_2 - TL_1} = \frac{L_m CP_L}{G'} \quad (5)$$

La línea de unión que relaciona los coeficientes de transferencia de calor y masa con la entalpía del gas y la temperatura en las condiciones imperantes en la interfase está dada por:

$$-\frac{h_L a}{k_Y a} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \quad (6)$$

Un tratamiento detallado de estas ecuaciones se encuentra en el apéndice no.1 de este guión y la representación de cada una de estas ecuaciones se pueden observar en la figura 5.1

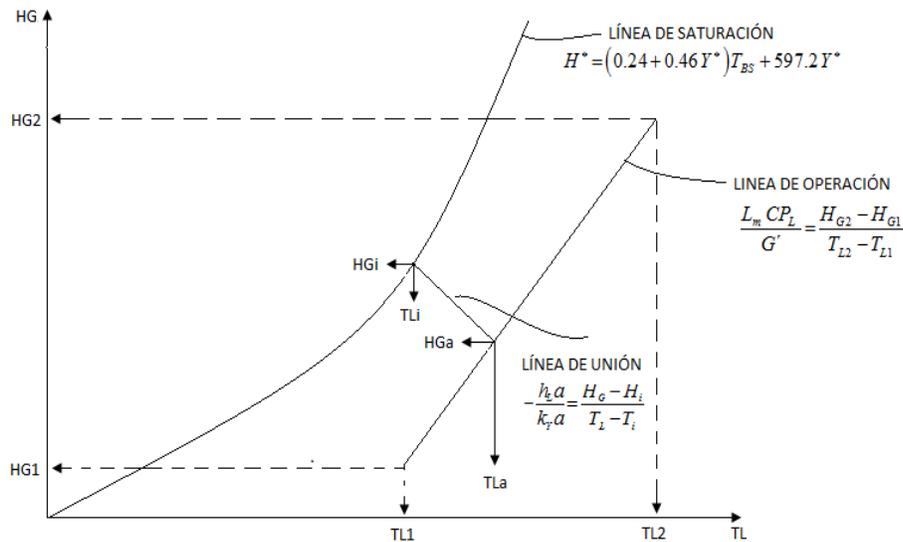


Figura 5.1 Representación gráfica de las líneas que definen la dinámica de enfriamiento del agua en una torre de enfriamiento



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

6.- ACTIVIDAD EXPERIMENTAL

1. Alinear la torre de enfriamiento de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 4
2. Fijar para cada una de las corridas indicadas en la Tabla no.6.1, un flujo de agua empleando el rotámetro R2 a su correspondiente temperatura de alimentación, para ajustar la temperatura de entrada del agua caliente a la torre abrir lentamente la válvula V-58 que suministra vapor del generador de vapor al cambiador de calor CC-02 y leer la temperatura con el termómetro T01.
3. La torre de enfriamiento cuenta con dos zonas de entrada del aire, bloquee la entrada del aire por la parte trasera de la torre con la lámina ubicada en la puerta de la rejilla y abra completamente la puerta de la rejilla delantera.
4. Con el psicrómetro proporcionado leer la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo a la entrada y a la salida de la torre, anote sus registros en la tabla no.6.1
5. Con un termómetro de vidrio registre la temperatura de salida del agua, directamente en el líquido acumulado a la cisterna de la torre, no intente tomar esta temperatura directamente de las gotas que caen de la torre porque existe la posibilidad de que su registro sea la temperatura de bulbo húmedo

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

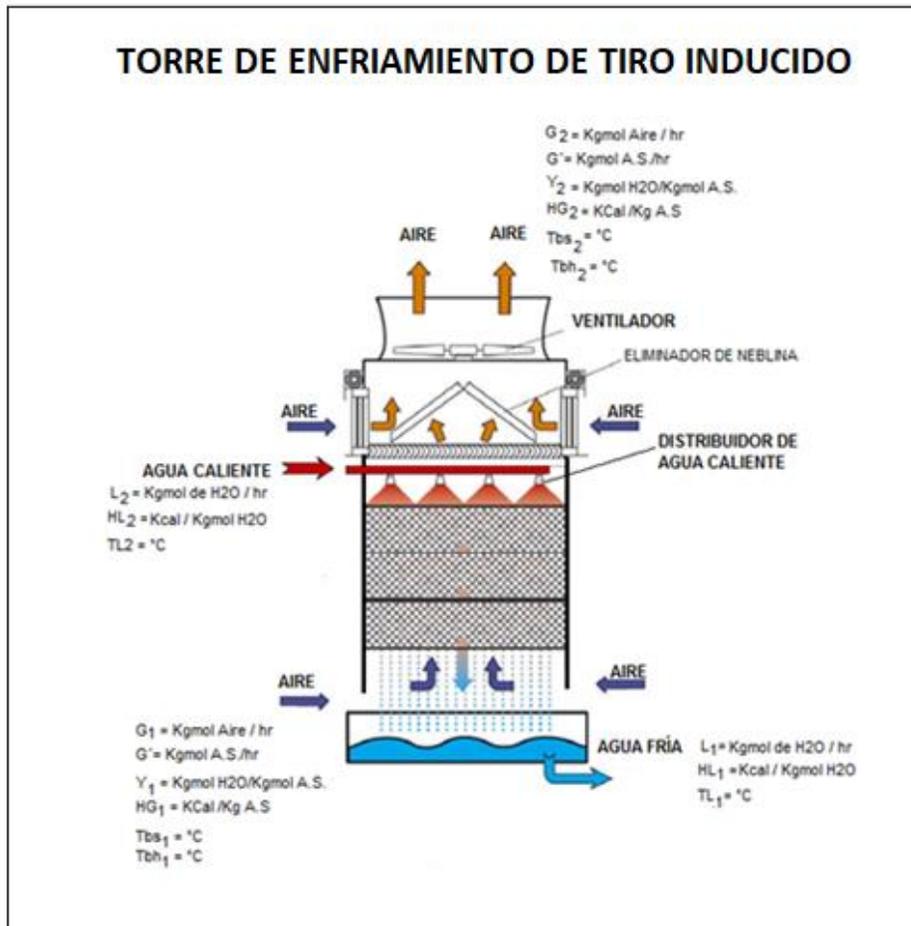


Figura 6.1 Distribuciones de flujo en la Torre de Enfriamiento



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

TABLA NO.6.1

OPERACIÓN CON ENTRADA DE AIRE LIBRE DEL LADO FRONTAL										
	Aire de entrada				Agua de entrada	Aire de salida				Agua de salida
Q_{Agua} Gal/min	Tbs1 °C	Tbh1 °C	HG ₁ Kcal/Kg.A. s.	Y1 Kg H ₂ O/Kg A.S	TL2 °C	Tbs2 °C	Tbh2 °C	HG ₂ Kcal/Kg.A. s	Y2 Kg H ₂ O/Kg A.S	TL1 °C
20					60°C					
30					60°C					
40					60°C					
50					60°C					

6.6.- Haciendo uso de la Ec. 4 del apéndice no.2, para cada una de las corridas experimentales que se hicieron, estime las entalpías del aire húmedo a la entrada y salida de la torre. Si fuera el caso en que a la salida del aire la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo son las mismas es indicativo que el aire se encuentra saturado, en su caso la entalpia se evalúa con la EC.1, anote sus resultados en la Tabla no.6.1.

6.7.- Utilizando la Ec. 4 del apéndice 2 para cada una de las corridas experimentales estime la humedad del aire húmedo a la entrada y a la salida de la torre, anote sus resultados en la tabla 6.1

6.8.- Aplicando la Ec.1 del apéndice 2 calcule la entalpia del aire saturado para cada corrida y grafique por separado en papel milimétrico la entalpia del aire saturado en el intervalo en que oscila la entalpia del aire a la entrada y a la salida de la torre.

6.9.- En cada una de las gráficas elaboradas en el punto 6.8 y con los datos de entalpia y temperatura del agua a la entrada y a la salida registrados en la tabla 6.11, represente gráficamente la trayectoria de la línea de operación de acuerdo con la ec. 23 del apéndice 1.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

CUESTIONARIO NO.1

- I. Explicar claramente ¿por qué en el análisis operativo de una torre de enfriamiento debe considerarse la línea de saturación y cuál es su utilidad?
- II. ¿Qué interpretación física le da al hecho de que la línea de operación está por debajo de la línea de saturación?
- III. Explicar claramente ¿qué información proporciona el cambio de pendiente que experimenta la línea de operación a medida que se incrementa el gasto del agua caliente?
- IV. ¿Qué interpretación física le daría al caso en que la línea de operación cruzara a la línea de saturación?, ¿Es factible que eso suceda en el equipo usado para realizar su actividad experimental?
- V. Proponga un mecanismo de transferencia de calor y masa que explique la razón por la cuál a la salida de la torre la humedad y la temperatura del aire se incrementan en relación a sus condiciones de entrada.

7.- EVALUACIÓN DE LA PENDIENTE DE LA LÍNEA DE UNIÓN

7.1.- Sobre cada una de las gráficas elaboradas en el punto 2, ubique el punto A similar al que se presenta sobre la figura 7.1 y que representa la entalpía y temperatura del gas a la entrada de la torre, a partir de este punto construya un método de Mickley suponiendo líneas de unión con idéntica pendiente cubriendo con al menos 10 líneas la totalidad de la línea de operación, hasta que la temperatura del aire a la salida de la torre evaluada con este método coincida con su correspondiente temperatura de bulbo seco que usted midió experimentalmente.

(Este método se encuentra explicado con mayor detalle en el anexo 2)



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

CUESTIONARIO NO.2

- I. Desde el punto de vista operativo de la torre y considerando los fenómenos que allí se presentan durante el enfriamiento del agua, ¿Que indica el valor de la pendiente de la línea de unión que usted encontró en el punto 7?

- II. ¿Qué condición física se presentaría en la torre si la pendiente de la línea de unión que usted encontró en el punto 7 tuviera un valor de infinito?

- III. ¿Qué condición física se presentaría en la torre si la pendiente de la línea de unión que usted encontró en el punto 7 tuviera un valor de cero?

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

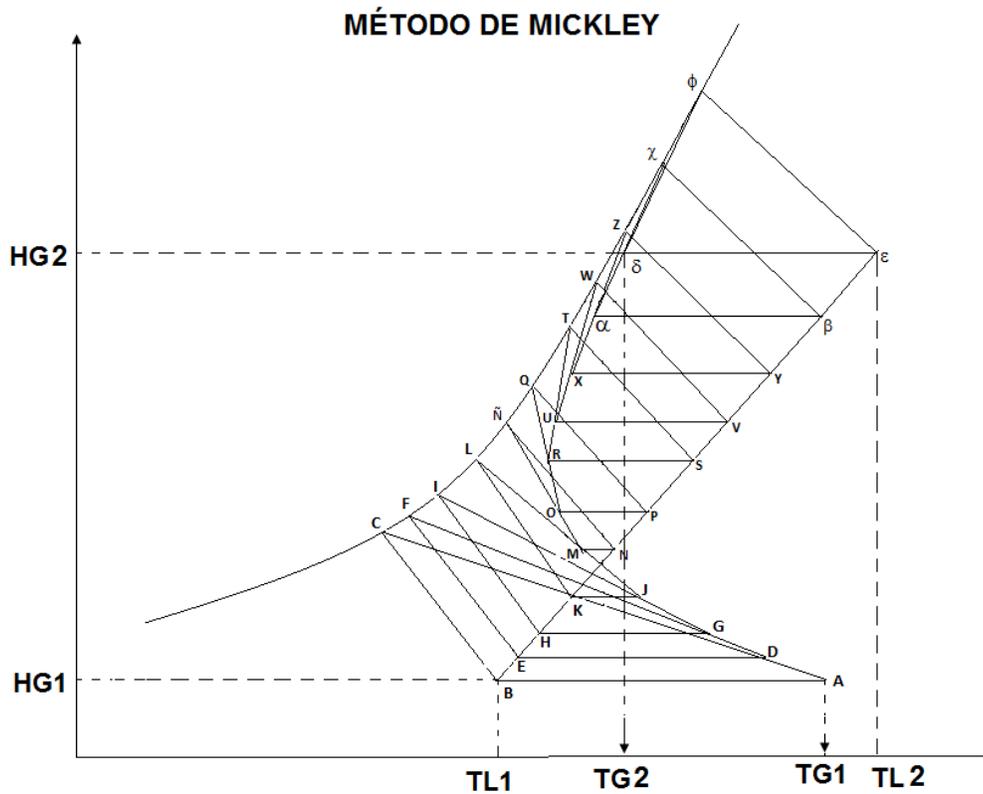


Figura 7.1 Método gráfico de Mickley para seguir la trayectoria del aire a lo largo de la torre

7.2 EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA

Evaluar el no. de unidades de Transferencia que corresponde a la parte de la integral de la Ec.1, para esto Carey y Williamson han propuesto un método gráfico muy aceptado, ellos proponen que este parámetro puede escribirse como:

$$NUT = \int_{HG1}^{HG2} \frac{dHG}{HG_i - HG} = \frac{HG2 - HG1}{f \Delta H_m} \quad (7)$$



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

Dónde:

HG_2 = Entalpía del aire a la salida de la torre

HG_1 = Entalpía del aire a la entrada de la torre

$\Delta H_1 = HG_i - HG_1$ = Gradiente de entalpía del aire a la entrada de la torre

$\Delta H_2 = HG_i - HG_2$ = Gradiente de entalpía del aire a la salida de la torre

$\Delta H_m = HG_i - HG_m$ = Gradiente de entalpía del aire evaluado a la temperatura media del líquido

f = Factor de Carey-Williamson obtenido de grafica No. 3.2 de Apéndice 2

Una descripción detallada de este método se encuentra descrita en el Apéndice no.3.

7.3 EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR VOLUMÉTRICOS A TRAVÉS DE LA TORRE.

a). - Mediante el uso de la Ec.1 Evaluar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico

$$k_y a = \left(\frac{G'}{S} \right) \left(\frac{1}{Z} \right) \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (8)$$

b). -Mediante el uso de la Ecuación 6 estime el coeficiente de transferencia de calor volumétrico

$$h_L a = \left(\frac{HG - H_i}{T_L - T_i} \right) k_y a \quad (9)$$

c). - Mediante la relación de Lewis para el caso aire- agua, evaluar el coeficiente de transferencia de calor del lado del gas.

$$h_c a = k_y a \bar{C}_h \quad (10)$$



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

En donde el calor húmedo promedio puede estimarse como:

$$\bar{C}_h = 0.24 + 0.46 \bar{Y} = \frac{Kcal}{kg A.S \text{ } ^\circ C}$$

$$\bar{Y} = \frac{Y_1 + Y_2}{2} = \frac{kg H_2O}{kg A.S.}$$

8.- COMPROBACIÓN DEL BALANCE DIFERENCIAL DE ENERGÍA A LO LARGO DE LA TORRE

Considere los calores deferenciales involucrados en el enfriamiento del agua a lo largo de la torre dados por las Ecs. 2,3 y 4

$$Q_{Agua} = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (2)$$

$$Q_{Sensible} = h_c a (T_i - T_G) dZ \quad (3)$$

$$Q_{Latente} = \lambda_0 k_Y a (Y_i - Y) dZ \quad (4)$$

8.1 Comenzando desde el fondo de la torre en $Z=0$, estime a que altura de la torre, la temperatura del agua caliente que circula por dentro de ella, adquiere una temperatura igual a aquella leída directamente de las líneas de unión en intersección con la línea de operación. Registre sus resultados en la Tabla.8.1, para esto se sugiere el empleo de la siguiente relación

$$TL = TL_1 + \left(\frac{TL_2 - TL_1}{h} \right) \Delta Z$$

Dónde:

TL = Temperatura del agua dentro de la torre a una altura Z

TL₂ = Temperatura del agua a la entrada de la torre

TL₁ = Temperatura del agua a la salida de la torre

h = Altura total de la zona empacada

ΔZ = Altura parcial de la torre medida desde el fondo



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

CUESTIONARIO NO.4

- I. De los resultados obtenidos en el punto 8.4, estime que porcentaje del calor total que pierde la corriente de agua, lo gana la corriente de aire en forma de calor sensible.
- II. De los resultados obtenidos en el punto 8.4, estime que porcentaje del calor total que pierde la corriente del agua, lo gana el aire en forma de calor latente.
- III. Para flujos de agua caliente de 9,12 y 15 gpm alimentados a la torre de enfriamiento a una temperatura de 70°C, ¿qué porcentaje del calor que pierde el agua durante su enfriamiento lo gana el aire en forma de calor sensible y cuanto en forma de calor latente?

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS
ALAN S. FOUST, LEONARD A. WENZEL Y OTROS
ED. CECSA 2°ED, 2006
- 2.- OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA 7° Ed.2007
WARREN L Mc CABE, JULIAN C. SMITH, PETER HARRIOT
Ed. Mc Graw Hill 7° Ed.2007
- 3.- PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS
C.J. GEANKOPLIS
Ed. CECSA 3°a Ed. 2005.
- 4.- CHEMICAL ENGINEERING VOL1
COULSON AND RICHARDSON
ED. BUTTERWORTH-HEINMANN 1999 6 Ed.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

**APÉNDICE NO.1
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA**

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

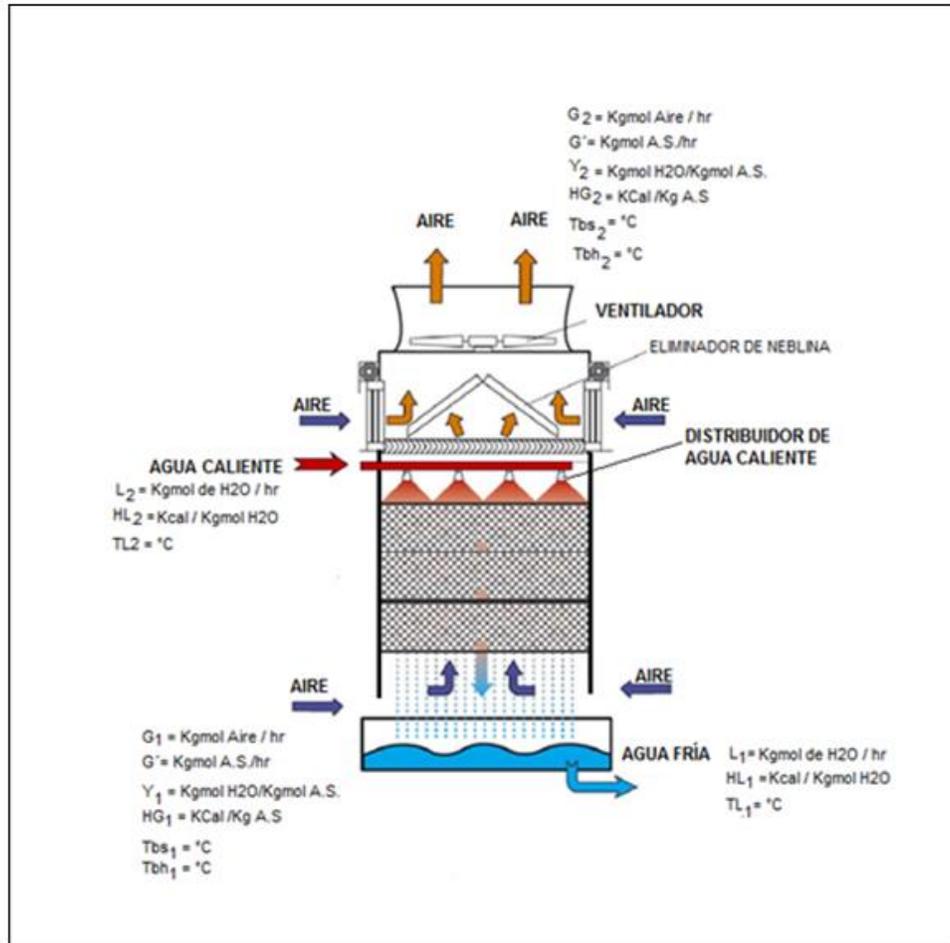


Figura no.1.1

ECUACIONES DE DISEÑO

Balance de energía total

$$L_2 - L_1 \tag{1}$$

Balance de agua

$$G'(Y_2 - Y_1) = L_2 - L_1 \tag{2}$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

Balance de entalpía

$$L_2 HL_2 + G' HG_1 + Q = L_1 HL_1 + G' HG_2 \quad (3)$$

Si se supone que la torre opera adiabáticamente es decir $Q \approx 0$, que será cada vez más cierto a medida que se manejen mayores volúmenes de agua caliente, la ecuación 3 podrá escribirse como:

$$L_2 HL_2 + G' HG_1 = L_1 HL_1 + G' HG_2 \quad (4)$$

$$P_{H_2O}^0 > P_{gas}$$

O en su forma diferencial

$$G' dHG = d(LHL) \quad (5)$$

También como:

$$G' dHG = d(LHL) \approx L_m C_{pL} dT_L \quad (6)$$

Dónde:

$$L_m = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

Para el cambio de entalpía que sufre la fase gas a lo largo de la torre como consecuencia de la transferencia de calor y masa simultánea, el lado izquierdo de la Ec.6 se puede escribir como:

$$G' dHG = G' d \left[\underbrace{C_h (T_G - T_O)}_{\text{Calor Sensible}} + \underbrace{Y \lambda_o}_{\text{Calor Latente}} \right] = G' C_h dT_G + G' \lambda_o dY \quad (7)$$

En esta ecuación se ha considerado que el cambio de entalpía es ocasionado por dos tipos de calores, el primero es asociado al calor sensible provocado por el contacto entre del líquido caliente en contacto con la corriente del gas frío y el otro es debido al calor latente producto de la evaporación que experimenta el líquido ocasionado por el alto valor de su presión de vapor debido a su alta temperatura. Los perfiles de temperatura y humedad que experimentan el agua y el aire en su paso a través de la interfase gas-líquido a lo largo de la torre puede observarse en la figura 2.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

De tal manera que la transferencia de calor sensible que se da desde el seno de la fase líquida hacia la interfase puede expresarse en términos del coeficiente de transferencia de calor como:

$$\left(\frac{L_m}{S}\right) C_{p_L} dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ$$

(8)

Por otro lado, en la interfase la presión de vapor del agua dado que se encuentra a una temperatura elevada su presión de vapor es mayor que la presión parcial del agua en el aire, lo que favorece la evaporación espontánea del agua líquida favoreciendo la transferencia de masa a través del incremento de la humedad del aire en la interfase Y_i , la cual necesariamente disminuye diferencialmente a medida que se aleja la observación de la interfase. Esta condición puede observarse claramente en la figura 2 y puede modelarse con un coeficiente de transferencia de masa mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{G'}{S}\right) \lambda_0 dY = \lambda_0 k_Y a (Y_i - Y) dZ$$

(9)

Finalmente, el aire se calienta y se humidifica, debido al calor sensible que recibe por tener contacto con el líquido caliente y al calor latente producto de su evaporación, este par de calores son recibidos por la fase gaseosa en forma de calor sensible que puede estimarse a partir de la siguiente relación.

$$\left(\frac{G'}{S}\right) Ch dT_G = h_c a (T_i - T_G) dZ$$

(10)

Las Ecs. 8, 9 y 10 son la base para describir la dinámica de enfriamiento del agua dentro de la torre, las cuales serán empleadas en detalle en este trabajo.

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

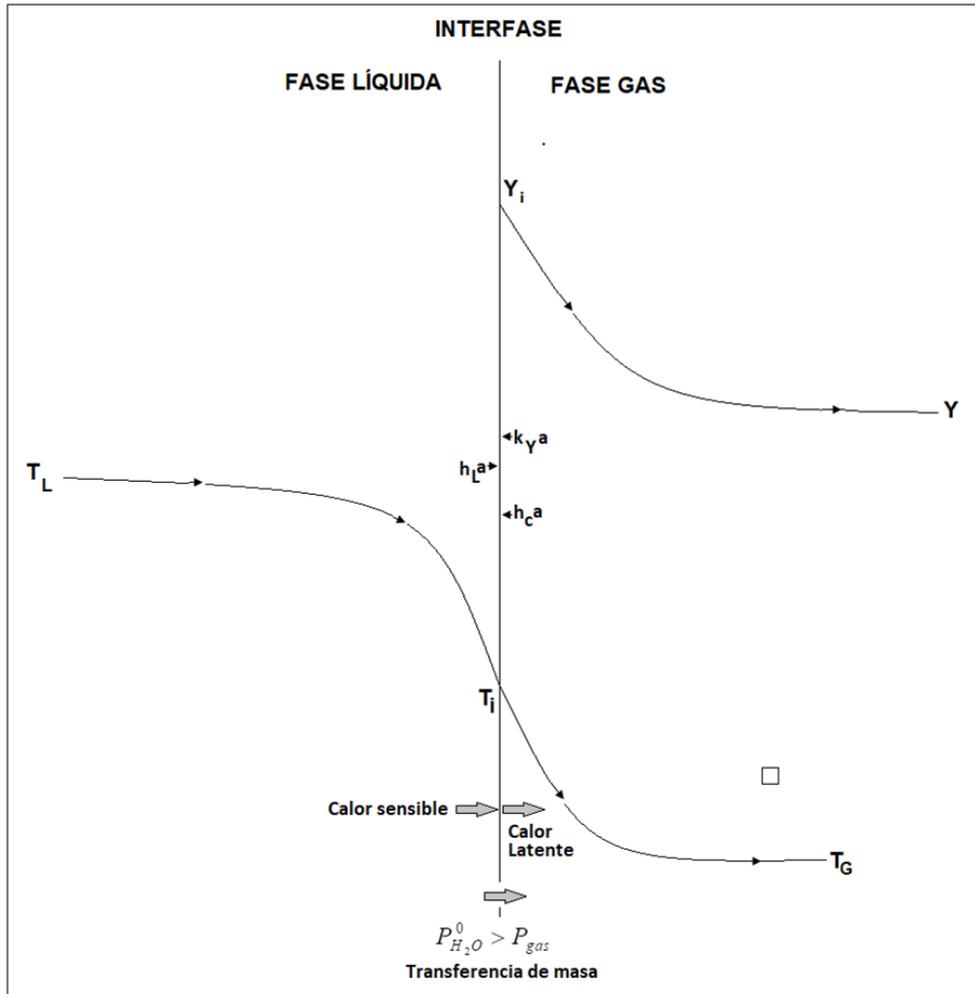


Figura 1.2

El cambio de entalpia que experimenta la fase gas está dado directamente por la Ec. 7 Por lo que resulta conveniente dividirla entre el área transversal de la torre para quedar como:

$$\left(\frac{G'}{S}\right) dHG = \left[\left(\frac{G'}{S}\right) Ch dT_G + \left(\frac{G'}{S}\right) \lambda_0 dY \right] \quad (11)$$

La cual puede expresarse en términos de los coeficientes de transferencia de calor y de masa, haciendo uso de las Ecs. 9 y 10 para dar:



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = h_c a (T_i - T_G) dZ + \lambda_0 k_y a (Y_i - Y) dZ \quad (12)$$

Si se define al siguiente número adimensional con conocido como No. de Lewis

$$r = \frac{h_c}{k_y Ch} \quad (13)$$

Por lo que la Ec.12 puede escribirse como:

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = k_y a [(Ch r T_i + \lambda_0 Y_i) - (Ch r T_G + \lambda_0 Y)] dZ \quad (14)$$

Esta condición presupone que el área por unidad de volumen asociada a cada uno de los coeficientes de transferencia de calor y masa (a) proporcionada por el empaque es la misma.

Para el caso particular aire-agua la relación de Lewis $r = \frac{h_c}{k_y Ch} = 1$, por lo que la Ec.14

podrá escribirse como:

$$\left(\frac{G'}{S}\right)dHG = k_y a (H_i - H_G) dZ \quad (15)$$

$$H_i = Ch T_i + \lambda_0 Y_i$$

$$H_G = Ch T_G + \lambda_0 Y$$

Por lo que arreglando la Ec.15 y tomando integrales considerando límites de variación de la zona empacada de la torre y la variación de la entalpia del aire desde que entra hasta que sale de la torre, se tiene:

$$\int_0^Z dZ = \int_{HG_1}^{HG_2} \left(\frac{G'}{S}\right) \frac{dHG}{k_y a (H_i - H_G)} \quad (16)$$

Si se considera un coeficiente de transferencia de masa promedio puede asumirse como constante por lo que la Ec.16 se puede escribir como:



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

La Expresión dada por la Ec.17 corresponde a la Ec. de diseño de una torre de enfriamiento, la cual puede escribirse en términos de la altura de unidad de transferencia y del número de unidades de transferencia

$$Z = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_y a} \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (19)$$

Siendo:

AUT = Altura de la unidad de transferencia

$$AUT = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_y a} \quad (20)$$

NUT = Número de unidades de transferencia

$$NUT = \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G} \quad (21)$$

ECUACIÓN DE LA LÍNEA DE OPERACIÓN

La Ecuación de la línea de operación está fundamentada en el balance diferencial de energía a lo largo de la torre, dada por la Ec.6

$$G' dHG = d(LHL) \approx L_m C_{pL} dT_L \quad (6)$$

Expresando esta ecuación en términos de diferencias finitas

$$G'(HG_2 - HG_1) = L_m C_{pL} (TL_2 - TL_1) \quad (22)$$

O también

$$\frac{HG_2 - HG_1}{TL_2 - TL_1} = \frac{L_m C_{pL}}{G'} \quad (23)$$

Esta Ecuación llamada línea de operación y que corresponde a una recta, es la encargada de describir el cambio de entalpía que experimenta el aire a lo largo de la torre como consecuencia del enfriamiento del agua en contacto con el aire a lo largo del empaque.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

ECUACIÓN DE LA LÍNEA DE UNIÓN

La línea de unión permite establecer la temperatura del aire y su entalpía con sus respectivos valores en las condiciones interfaciales, se obtiene a partir del balance de entalpía dado por las Ecs 5, 8

$$G' dHG = d(LHL) \quad (5)$$

$$\left(\frac{L_m}{S}\right) Cp_L dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (8)$$

La cual conduce a:

$$\left(\frac{G'}{S}\right) dHG = h_L a (T_L - T_i) dZ \quad (24)$$

Que al combinarlo con la Ec. 15, que evalúa el mismo balance de entalpía en términos del coeficiente de transferencia de masa

$$\left(\frac{G'}{S}\right) dHG = k_Y a (H_i - H_G) dZ \quad (15)$$

Se llega finalmente a:

$$-\frac{h_L a}{k_Y a} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \quad (25)$$

Conocido como línea de unión.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

**APÉNDICE NO.2
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS LÍNEAS
REPRESENTATIVAS DE LA DINÁMICA
OPERATIVA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

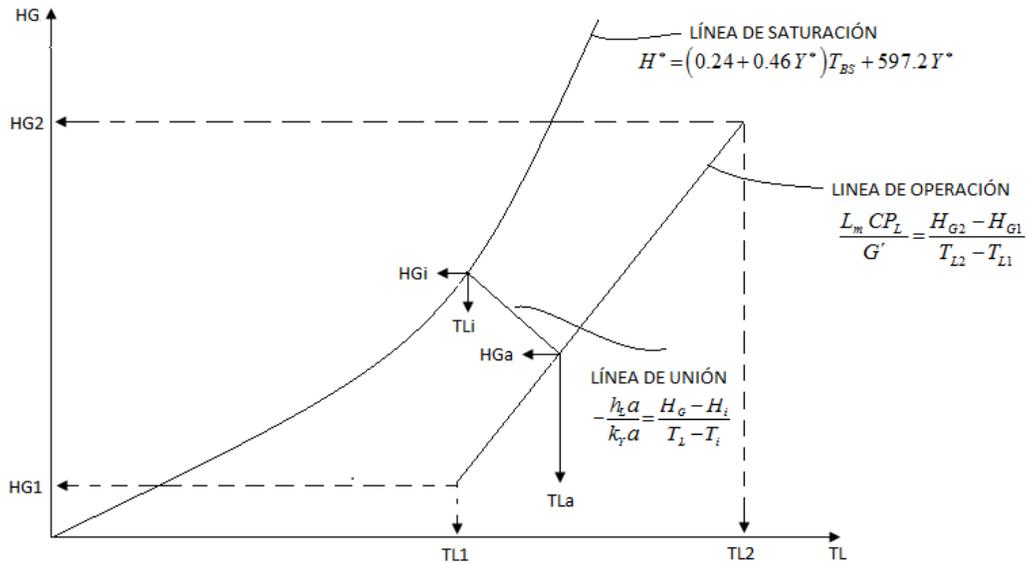


Figura 2.1

EVALUACIÓN DE LA ENTALPÍA DE SATURACIÓN

La entalpía de un aire saturado puede calcularse a partir de la siguiente relación:

$$H^* = (0.24 + 0.46Y^*)T^{\circ}C = \frac{Kcal}{Kg \text{ A.S.}} \quad (1)$$

La humedad de saturación para el caso aire -agua se puede calcular como:

$$Y^* = \frac{P_v^*}{P - P_v^*} = \frac{Kg \text{ H}_2\text{O}}{Kg \text{ A.S.}} \quad (2)$$

P = Presión de operación en mmHg, Para la Cd de México P = 760 mmHg.

La Presión del agua saturada, puede evaluarse a partir de la Ec. de Antoine

$$\ln P_v^* = A - \frac{B}{(T^{\circ}C + 273) + C} = Kpa \quad (3)$$



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

Dónde:

$$A = 16.5362, \quad B = 3985.44, \quad C = -38.9974$$

EVALUACIÓN DE LA ENTALPÍA DE UN AIRE HÚMEDO

La entalpía de un aire húmedo se estima a partir de la siguiente relación:

$$H = (0.24 + 0.46Y)T^{\circ}C = \frac{Kcal}{Kg \text{ A.S.}} \quad (4)$$

La humedad absoluta de un aire húmedo puede estimarse como:

$$Y = \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{Kg \text{ H}_2\text{O}}{Kg \text{ A.S.}} \quad (5)$$

La presión parcial del vapor de agua en una corriente de aire seco no puede estimarse experimentalmente, para esto se hace uso de la siguiente relación:

$$P_w^* - P_v = \frac{h_G}{k_G M_v \lambda_w} (T - T_w) \quad (6)$$

P_w^* = Presión de vapor evaluada a la temperatura de bulbo húmedo en mmHg

P_v = Presión parcial del vapor en la mezcla gaseosa en mmHg

h_G = Coeficiente de transferencia de calor del lado de la fase gas Kcal/hr m²

k_G = Coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase gas

λ_w = Calor latente de vaporización del líquido evaluado a la temperatura de bulbo húmedo

M_v = Peso molecular del agua

T = Temperatura de bulbo seco de la corriente gaseosa en °C

T_w = Temperatura de bulbo húmedo de la corriente gaseosa en °C

Para el caso aire-agua el coeficiente estequiométrico $\frac{h_G}{k_G M_v \lambda_w} \approx 0.5$



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

APÉNDICE NO.3
**MÉTODO DE MICKLEY Y EVALUACIÓN DEL
NÚMERO DE UNIDADES DE TRASFERENCIA**



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

Este método tiene el propósito de describir la trayectoria de la entalpía y la temperatura del gas a lo largo de su trayectoria a lo largo de la torre de enfriamiento.

Para esto se hace uso de las Ecs. 10 y 15 del apéndice no.1

$$\left(\frac{G'}{S}\right) Ch dT_G = h_c a (T_i - T_G) dZ$$

(10)

$$\left(\frac{G'}{S}\right) dHG = k_y a (H_i - H_G) dZ$$

(15)

Relacionando ambas ecuaciones se llega fácilmente a:

$$\frac{dT_G}{dH_G} = \frac{h_c a}{k_y a C_h} \left(\frac{T_i - T_G}{H_i - H_G} \right)$$

(1)

Para el sistema aire-agua

$$r = \frac{h_c a}{k_y a C_h} = 1$$

Por lo que la Ec.1 se reduce a:

$$\frac{dT_G}{dH_G} = \left(\frac{T_i - T_G}{H_i - H_G} \right)$$

(2)

La Solución de la Ec.2 no es analítica ya que las temperaturas y entalpías del gas en la interfase las fijan la pendiente de la línea de unión que hasta este momento no se conoce, su solución es gráfica y de índole iterativa, en la siguiente figura se ilustra la metodología de solución.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

1.- Este método parte del conocimiento de la temperatura y entalpía del aire a la entrada de la torre, es decir, TG1 y HG1, las cuales pueden medirse experimentalmente. Esta condición está representada en el punto A de la figura 1 de este apéndice.

2.- Se traza una primera línea horizontal hasta el inicio de la línea de operación que corresponde al punto B, físicamente este punto representa a la entrada del aire por la parte inferior de la torre.

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

3.- Se propone una línea de unión arbitraria de pendiente negativa dada por la línea B-C, este punto permite evaluar de ser necesario las condiciones de interfase HG_i y TG_i en la parte baja de la torre.

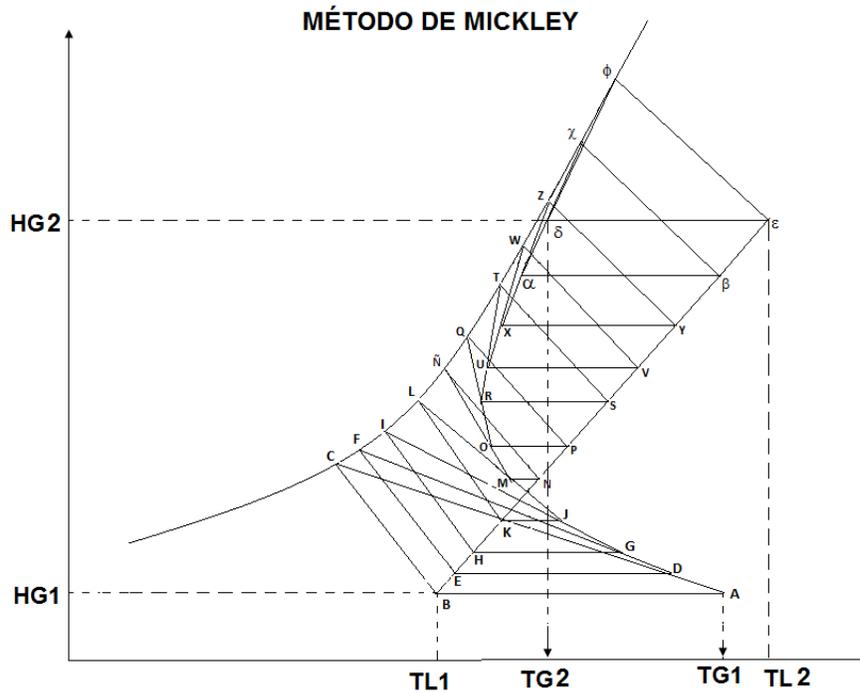


Figura 3.1

4.- Se cierra el ciclo formando un triángulo A-B-C-A, observar que las condiciones del gas a la entrada del aire se leen directamente en el punto A

5.- El siguiente paso es dar un incremento diferencial sobre la línea C-A como lo es el punto D el cual corresponde a nuevas condiciones del aire a una altura diferencial del empaque por encima del empaque.

Del punto D trazar una línea D-E hasta tocar la línea de operación, de allí trazar una nueva línea de unión con pendiente idéntica a la anterior hasta tocar la línea de saturación, formando así la línea E-F, sobre el punto F se obtienen las propiedades entalpía del gas HG_i y temperatura del aire TG_i del aire a condiciones de interfase.



**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

Para cerrar el ciclo se traza la línea F-G. El punto G corresponde a la entalpia HG y la temperatura TG del gas a la nueva altura de la torre.

6.- El proceso se sigue dando un nuevo incremento dado por G sobre la línea F-D hasta cerrar el ciclo dada por la línea I-G. Es importante observar que la trayectoria del aire tiende a ingresar al espacio acotado por la línea de saturación y la línea de operación, lo cual es correcto y describe la trayectoria del aire a lo largo de su paso por la zona empacada.

7.- El l final del método se alcanza cuando se da cuando el incremento coincide con el final de la línea de operación, en este caso corresponde al punto δ de la figura 3.1.

Observar que, sobre este punto, se lee la entalpia HG2 y temperatura TG2 del aire a la salida de la torre, esta condición es la que permite saber si la pendiente de la línea de unión supuesta es la correcta, ya que esta temperatura TG2 debe coincidir con la temperatura TG2 medida experimentalmente a la salida del aire de la torre.

EVALUACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRASFERENCIA

$$Z = \left(\frac{G'}{S} \right) \frac{1}{k_Y a} \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{H_i - H_G}$$

El número de unidades de transferencia corresponde a la parte de la integral de la Ec. de diseño.

Carey y Williamson han propuesto un método gráfico muy aceptado en la bibliografía, y está basado en la evaluación de 3 gradientes de entalpia, como se ilustra en la figura 3.2, su expresión es:

$$NUT = \int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{HG_i - HG} = \frac{HG_2 - HG_1}{f \Delta H_m} \tag{3}$$

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA

MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

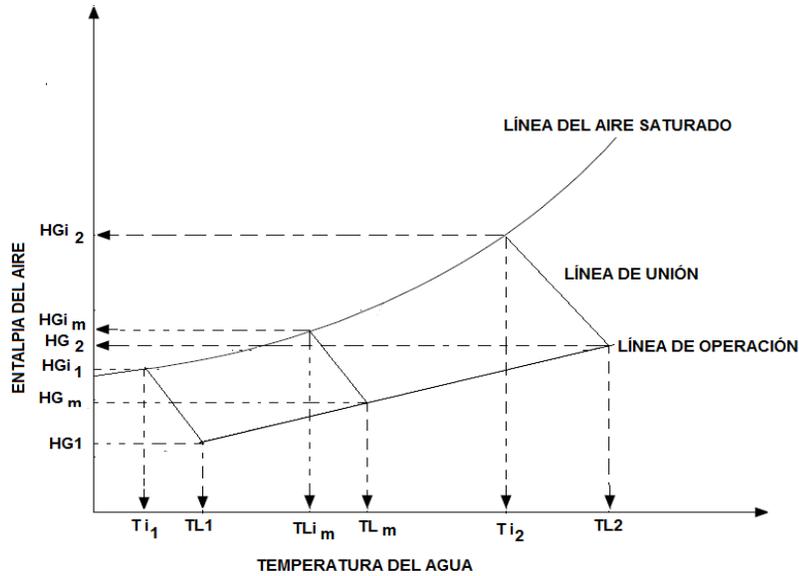


Figura 3.2 Gradientes de entalpía considerados en el método de Carey-Williamson

Donde

HG_2 = Entalpía del aire a la salida de la torre

HG_1 = Entalpía del aire a la entrada de la torre

$\Delta H_1 = HG_i - HG_1$ = Gradiente de entalpía del aire a la entrada de la torre

$\Delta H_2 = HG_i - HG_2$ = Gradiente de entalpía del aire a la salida de la torre

$\Delta H_m = HG_i - HG_m$ = Gradiente de entalpía del aire evaluado a la temperatura media del líquido, $T_m = \frac{TL_1 + TL_2}{2}$

$$f = \text{Factor de Carey-Williamson} \quad \left. \begin{array}{l} \frac{\Delta H_m}{\Delta H_1} \\ \frac{\Delta H_m}{\Delta H_2} \end{array} \right\} \longrightarrow f$$

Figura 3.3

**SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA
MANUAL DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 7° SEMESTRE**

Código	Fecha de emisión	Versión	Página
XXX-XXXX-XX-XXXX		0	

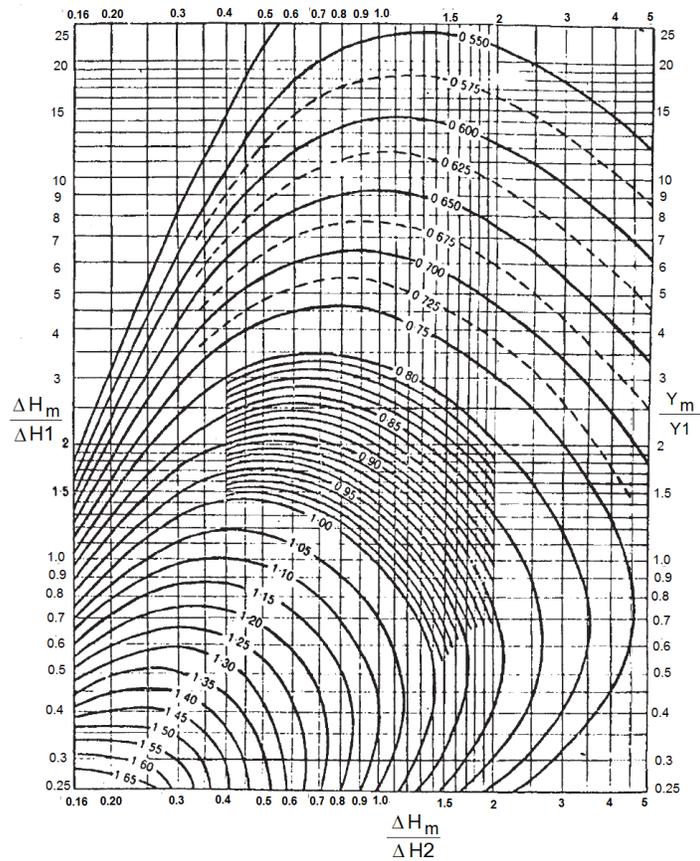


Figura 3.3 Grafico de Carey- Williamson

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES

11.1 Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis se ha propuesto una metodología que permite identificar y cuantificar los calores involucrados durante el proceso de enfriamiento de una corriente de agua a su paso dentro de una torre de enfriamiento, se aprendió que el enfriamiento del agua caliente, se lleva a cabo por dos mecanismos, el primero consistente en la cedencia de calor de tipo sensible ocasionada por el contacto directo de la corriente del agua con la corriente de aire frío, y el segundo ocasionado por un fenómeno de evaporación espontánea hacia el aire circundante ocasionada por la competencia natural entre la presión de vapor del agua caliente de mayor magnitud y la presión parcial del agua contenida en la corriente del aire que circula a contracorriente.

Se aprendió que la aceptación del calor por parte de la corriente caliente dependía de la capacidad de aceptación por parte de la corriente de aire que lo hacía por dos mecanismos, el primero de tipo calor sensible debido a que el aire estaba más frío que la corriente de agua caliente y el segundo debido a una transferencia simultánea de calor y masa, en el cual el aire gana calor latente y masa, ambos producto de la evaporación del agua en la interfase gas-líquido.

En este estudio se pudo evaluar cuál de los dos mecanismos de aceptación de calor por parte del aire impactaba con mayor peso en el proceso de enfriamiento del agua, se concluyó que el calor aceptado asociado al calor sensible aceptaba un 11.64% del calor que desprendía la corriente líquida mientras que el calor aceptado asociado a la evaporación representó un 88.36% esta condición se pudo seguir a partir de la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor que fue de $hC = 0.01211 \text{ Btu/sft}^2$ mientras que el coeficiente de transferencia de masa con un valor de $k_{ya} = 0.04821 \text{ lbmol/ft}^3\text{s}$.

Con la estimación de los dos coeficientes de transferencia de calor y masa el alumno aprendió a identificar la fase que controla el proceso de enfriamiento e identificar la variable operativa que le permite proporcionar un servicio de agua fría requerido en un momento dado en la planta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Moulineux “COUNTER AND CORSS-FLOW COOLING TOWERS” Chem. & Process Engineering, May. 1967 vol. 48, No. 5, Pag. 56.**
- **Ocon-Tojo. “PROBLEMAS DE INGENIERÍA QUÍMICA.” Tomo 1, Editorial Aguilar. Cap. 4, Pág. 225.**
- **Dropkin, D. Cornell Univ. Eng. Expt. Sta. Bull., 23 (1936); 26 (1939).**
- **Fair, J. R. Chem. Engineering., 81, pag. 91.**
- **Fuller, A. L., A. L. Kohl y E. Butcher. Chem. Eng. Progr., 53, 501 (1957).**
- **Hensel, S. L. y R.E. Treybal. Chem. Eng. Progr., 48, 362 (1952).**
- **Foust, A.S. “PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS” Ed. CECSA. 371-444 pp.**
- **Treybal, Robert E. “OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA” 2/a. Edición. Ed. McGraw-Hill. 289-295 pp.**
- **Geankoplis, Christie. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. Ed. CECSA.**
- **Ricardo Lobo. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE MASA, Ed. UAM.**
- **Smith-Van Ness-Abbott INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA EN INGENIERÍA QUÍMICA. 5/a Edición, Ed. McGraw-Hill.**
- **Viñas, E.B., Moreno, C. (2021). Manual de operación: Torre de enfriamiento. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. pág. 12.**
- **Viñas, E.B., Ambriso, L.N. (2019). Manual de operación: Bombas. Ciudad de México: FES Zaragoza, UNAM. s/n.p.**

APÉNDICE A

HUMEDAD DE SATURACIÓN

$$Y = \left[0.62 \cdot \left(\frac{P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}}{P_{\text{Mex1}} - P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}} \right) \right] \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

$$P_{\text{Mex1}} := \left(\frac{585}{760} \right) \cdot \left(\frac{1}{.0098685} \right) \text{Kpa}$$

$$Y_{\text{sat}} := \left[0.62 \cdot \left(\frac{P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}}{P_{\text{Mex1}} - P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}} \right) \right] \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

	0	
0	0.01	
1	0.011	
2	0.013	
3	0.015	
4	0.017	$\left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAS}} \right) \circ \left(\frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbAS}} \right)$
5	0.019	
6	0.026	
7	0.036	
8	0.048	
9	0.065	
10	...	

	14
	16
	18
	20
	25
$T_{\text{ww}} :=$	30
	35
	40
	42
	45
	50
	55
	60

$$\Psi := \left[A - \frac{B}{(T + 273.15) + C} \right]$$

$$P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat} := e^{\Psi}$$

	0	
0	1.237	
1	1.412	
2	1.609	
3	1.83	
4	2.076	
5	2.351	
6	3.182	
7	...	

$P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat} =$ Kpa

HUMEDAD DE SATURACIÓN

$$Y = \left[0.62 \cdot \left(\frac{P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}}{P_{\text{Mex1}} - P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}} \right) \right] \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

$$P_{\text{Mex1}} := \left(\frac{585}{760} \right) \cdot \left(\frac{1}{.0098685} \right) \text{Kpa}$$

$$Y_{\text{sat}} := \left[0.62 \cdot \left(\frac{P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}}{P_{\text{Mex1}} - P^{\circ} \text{H}_2\text{O.sat}} \right) \right] \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

	0	
0	0.01	
1	0.011	
2	0.013	
3	0.015	
4	0.017	$\left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAS}} \right)$ o $\left(\frac{\text{lbH}_2\text{O}}{\text{lbAS}} \right)$
5	0.019	
6	0.026	
7	0.036	
8	0.048	
9	0.065	
10	...	

ENTALPÍA ESPECÍFICA DEL AIRE SATURADO

$$H_{\text{SAT}} := \left[\left[(0.24 + 0.46 \cdot Y_{\text{sat}}) \cdot T + 597.2 \cdot Y_{\text{sat}} \right] \right] \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}} \right)$$

$$H_{\text{sat}} := \left[\left[(0.24 + 0.46 \cdot Y_{\text{sat}}) \cdot T + 597.2 \cdot Y_{\text{sat}} \right] \cdot 52.190 \right] \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

$$T_F := \left[\left(\frac{9}{5} \right) \cdot T + 32 \right]$$

	50
	53.6
	57.2
	60.8
	64.4
	68
	77
$T_F =$	86
	95
	104
	107.6
	113
	122
	131
	140

°F

	0
0	10
1	12
2	14
3	16
4	18
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	42
11	45
12	50
13	55
14	60

°C

$$H_{\text{sat}} = \begin{pmatrix} 439.039 \\ 509.963 \\ 586.83 \\ 670.327 \\ 761.221 \\ 860.362 \\ 1150.781 \\ 1517.077 \\ 1983.46 \\ 2582.964 \\ 2869.821 \\ 3361.896 \\ 4387.403 \\ 5761.037 \\ 7644.677 \end{pmatrix} \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

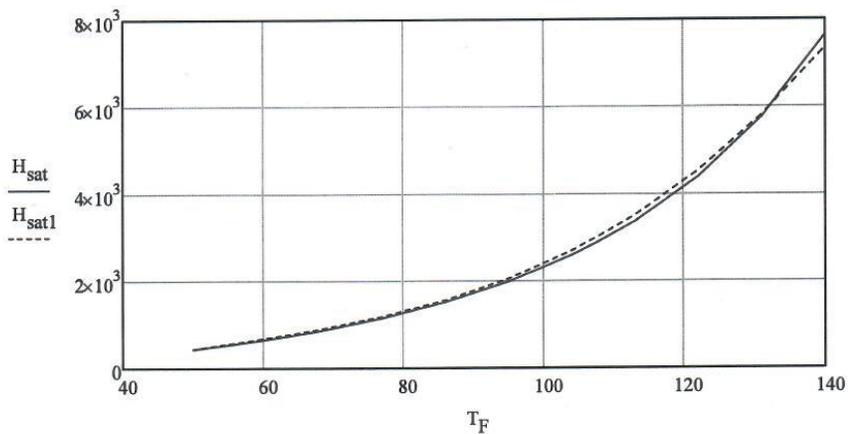
	0
0	8.412
1	9.771
2	11.244
3	12.844
4	14.586
5	16.485
6	22.05
7	29.068
8	38.005
9	49.492
10	54.988
11	64.416
12	84.066
13	110.386
14	146.478

$$H_{\text{SAT}} = \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}} \right)$$

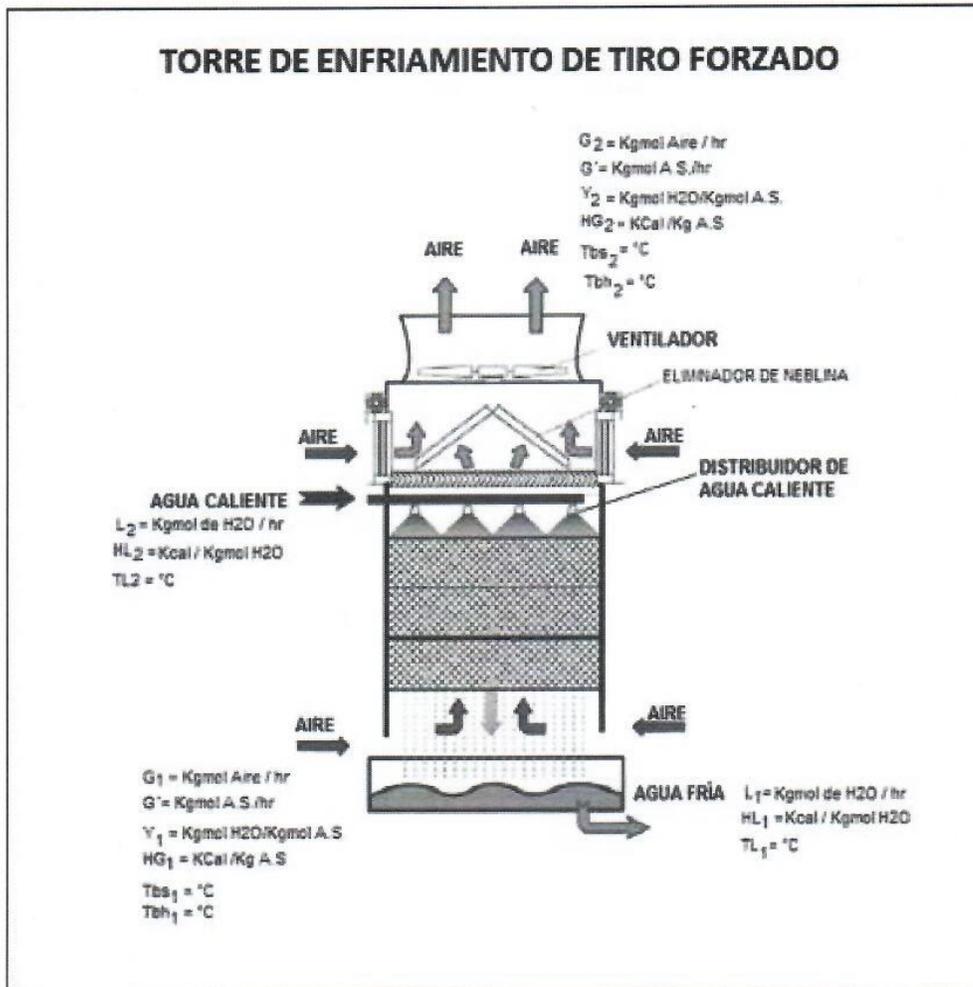
Haciendo un ajuste de los datos ente TF vs Hsat

$$H_{\text{SAT1}} := 0.0007 \cdot T^3 - 0.0207 \cdot T^2 + 0.837 \cdot T + 2.939 \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}} \right)$$

$$H_{\text{sat1}} := 0.0073 \cdot T_F^3 - 1.169 \cdot T_F^2 + 86.524 \cdot T_F - 1878.7 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$



TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO



TRAZO DE LA LINEA DE OPERACIÓN

TEMPERATURA DE ENTRADA
DEL AGUA

$$TL2 := 40.5 \quad ^\circ\text{C}$$

$$TL2F := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot TL2 + 32$$

$$TL2F = 104.9 \quad ^\circ\text{F}$$

TEMPERATURA DE SALIDA
DEL AGUA

$$TL1 := 20 \quad ^\circ\text{C}$$

$$TL1F := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot TL1 + 32$$

$$TL1F = 68 \quad ^\circ\text{F}$$

TEMPERATURAS DE ENTRADA
DE LAIRE

$$T_{bs1} := 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{bh1} := 16.5 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{bs1F} := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot T_{bs1} + 32 = 71.6 \quad ^\circ\text{F}$$

$$T_{bh1F} := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot T_{bh1} + 32 = 61.7 \quad ^\circ\text{F}$$

TEMPERATURAS DE SALIDA
DE LAIRE

$$T_{bs2} := 29 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{bh2} := 29 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{bs2F} := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot T_{bs2} + 32 = 84.2$$

$$T_{bh2F} := \left(\frac{9}{5}\right) \cdot T_{bh2} + 32 = 84.2$$

ENTALPIA ESPECIFICA DELAIRE HUMEDO

$$HG = (0.24 + 0.46 \cdot Y) \cdot T + 597.2 \cdot Y \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAs}}\right)$$

$$Y = 0.62 \cdot \left(\frac{P_V}{P_{\text{Mex}} - P_V}\right) \quad \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}\right)$$

MÉTODO 1

PRESIÓN DE VAPORA LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

P_W

$$\ln P^\circ = A - \left[\frac{B}{(T_{bh}^\circ\text{C} + 273) + C} \right]$$

$$A := 16.5362$$

$$B := 3985.44$$

$$C := -38.9974$$

ENTRADA

$$\Psi_1 := A - \frac{B}{(T_{bh1} + 273) + C}$$

$$P_{w1} := e^{\Psi_1} \cdot 9.8685 \cdot 10^{-3} \cdot 760$$

$$P_{w1} = 14.032 \text{ mmHg}$$

SALIDA

$$\Psi_2 := A - \frac{B}{(T_{bh2} + 273) + C}$$

$$P_{w2} := e^{\Psi_2} \cdot 9.8685 \cdot 10^{-3} \cdot 760$$

$$P_{w2} = 29.889 \text{ mmHg}$$

PRESIÓN PARCIAL DEL VAPOR

$$P_V = P_W - 0.5 \cdot (T - T_W)$$

ENTRADA

SALIDA

$$PV1 := Pw1 - 0.5 \cdot (Tbs1 - Tbh1)$$

$$PV2 := Pw2 - 0.5 \cdot (Tbs2 - Tbh2)$$

$$PV1 = 11.282 \text{ mmHg}$$

$$PV2 = 29.88 \text{ mmHg}$$

HUMEDAD DEL AIRE HÚMEDO

$$P_{Mex} := 585$$

$$Y = 0.62 \cdot \left(\frac{P_V}{P_{Mex} - P_V} \right) \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

ENTRADA

SALIDA

$$Y1 := 0.62 \cdot \left(\frac{PV1}{P_{Mex} - PV1} \right) \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y2 := 0.62 \cdot \left(\frac{PV2}{P_{Mex} - PV2} \right) \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y1 = 0.012 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y2 = 0.033 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

METODO 2

$$HG = (0.24 + 0.46 \cdot Y) \cdot T + 597.2 \cdot Y \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}} \right)$$

$$Y = 0.62 \cdot \left(\frac{P_V}{P_{Mex} - P_V} \right) \quad \left(\frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \right)$$

$$P_V = \frac{Y_r \cdot P^{\circ}\text{H}_2\text{O}}{100}$$

$$\ln P^{\circ}\text{H}_2\text{O} = A - \left[\frac{B}{(Tbs^{\circ}\text{C} + 273) + C} \right]$$

$$A := 16.5362$$

$$B := 3985.44$$

$$C := -38.9974$$

ENTRADA

$$\Psi_e := A - \frac{B}{(T_{bs1} + 273) + C}$$

$$P^{\circ}_{H2O1} := e^{\Psi_e} \cdot 9.8685 \cdot 10^{-3} \cdot 760$$

$$P^{\circ}_{H2O1} = 19.75 \text{ mmHg}$$

$$\%Y_{r1} := 45.6$$

$$Y_{rE} := \frac{\%Y_{r1}}{100}$$

$$P_{V_e} := Y_{rE} \cdot P^{\circ}_{H2O1} = 9.006$$

SALIDA

$$\Psi_s := A - \frac{B}{(T_{bs2} + 273) + C}$$

$$P^{\circ}_{H2O2} := e^{\Psi_s} \cdot 9.8685 \cdot 10^{-3} \cdot 760$$

$$P^{\circ}_{H2O2} = 29.885 \text{ mmHg}$$

$$\%Y_{r2} := 80.2$$

$$Y_{rS} := \frac{\%Y_{r2}}{100}$$

$$P_{V_s} := Y_{rS} \cdot P^{\circ}_{H2O2} = 23.971$$

$$P_{Mex} = 585$$

ENTRADA

$$Y_{11} := 0.62 \cdot \left(\frac{P_{V_e}}{P_{Mex} - P_{V_e}} \right)$$

SALIDA

$$Y_{22} := 0.62 \cdot \left(\frac{P_{V_s}}{P_{Mex} - P_{V_s}} \right)$$

Comprobando ambos métodos

$$Y_{11} = 0.0097 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y_{22} = 0.0265 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y_1 = 0.012 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$Y_2 = 0.033 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

ENTALPIA ESPECIFICA DEL AIRE HUMEDO

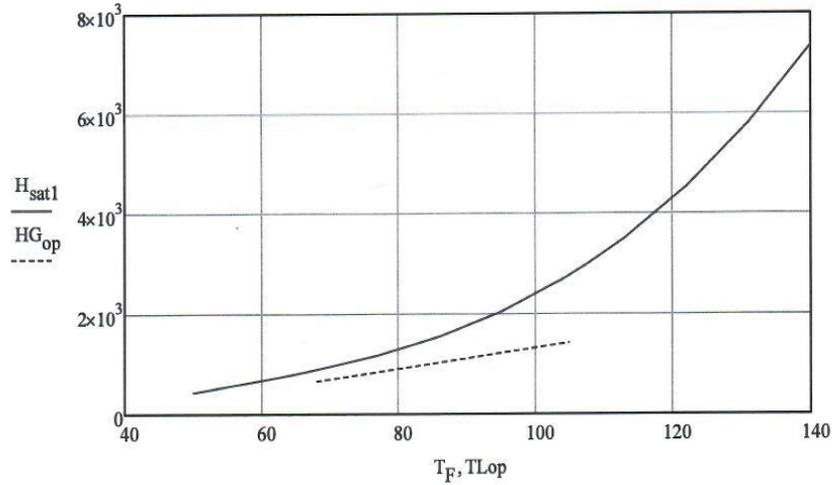
$$HG = (0.24 + 0.46 \cdot Y) \cdot T + 597.2 \cdot Y \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}} \right)$$

$$HG_1 := [(0.24 + 0.46 \cdot Y_1) \cdot T_{bs1} + 597.2 \cdot Y_1] \cdot 52.19 \quad HG_2 := [(0.24 + 0.46 \cdot Y_2) \cdot T_{bs2} + 597.2 \cdot Y_2] \cdot 52.19$$

$$HG_1 = 662.003 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

$$HG_2 = 1.427 \times 10^3 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

$$T_{Lop} := \begin{pmatrix} TL1F \\ TL2F \end{pmatrix} \quad HG_{op} := \begin{pmatrix} HG1 \\ HG2 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} TL1F = 68 & HG1 = 662.003 \\ TL2F = 104.9 & HG2 = 1.427 \times 10^3 \end{array}$$



FLUJO DE AIRE SECO A TRAVÉS DE LA TORRE

METODO 1

ENTRADA

VELOCIDAD DEL AIRE A LA ENTRADA

$$V1 := 3.3 \quad \frac{m}{s}$$

LARGO DE LA TORRE $L1 := 1.78 \text{ m}$

ANCHO DE LA TORRE $L2 := 1.78 \text{ m}$

ÁREA DEL FONDO DE LA TORRE

$$S1 := L1 \cdot L2 = 3.168 \text{ m}^2$$

FLUJO VOLUMÉTRICO DEL AIRE HUMEDO A LA ENTRADA

$$Q1 := V1 \cdot S1 \quad Q1 = 10.4 \frac{m^3}{s}$$

SALIDA

VELOCIDAD DEL AIRE A LA SALIDA

$$V2 := 11.5 \quad \frac{m^3}{s}$$

ÁREA DEL DOMO DE LA TORRE

DIÁMETRO DEL DOMO DE LA TORRE

$$D := 0.95 \text{ m}$$

$$S2 := \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \pi \cdot D^2 \quad S2 = 0.709 \text{ m}^2$$

FLUJO VOLUMÉTRICO DEL AIRE HUMEDO A LA SALIDA

$$Q2 := V2 \cdot S2 \quad Q2 = 8.151 \frac{m^3}{s}$$

VOLUMEN HUMEDO DELAIRE
A LA ENTRADA

$$\frac{R}{W} := 0.082 \frac{\text{ltatm}}{\text{gmolK}} \quad P := \frac{P_{\text{Mex}}}{760}$$

$$T1 := T_{\text{bs1}} + 273 \quad T1 = 295 \quad ^\circ\text{K}$$

$$Y1 = 0.012 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$VH1 := \left[\left(\frac{1}{29} \right) + \frac{Y1}{18} \right] \cdot \frac{R \cdot T1}{P}$$

$$VH1 = 1.105 \frac{\text{m}^3}{\text{KgAS}}$$

FLUJO MÁSCO DE AIRE SECO
A LA ENTRADA

$$W1_{\text{AS}} := Q1 \cdot \left(\frac{1}{VH1} \right)$$

$$W1_{\text{AS}} = 9.463 \frac{\text{KgAS}}{\text{s}}$$

VOLUMEN HUMEDO DELAIRE
A LA SALIDA

$$\frac{R}{W} := 0.082 \frac{\text{ltatm}}{\text{gmolK}} \quad P := \frac{P_{\text{Mex}}}{760}$$

$$T2 := T_{\text{bs2}} + 273 \quad T2 = 302 \quad ^\circ\text{K}$$

$$Y2 = 0.033 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$VH2 := \left[\left(\frac{1}{29} \right) + \frac{Y2}{18} \right] \cdot \frac{R \cdot T2}{P}$$

$$VH2 = 1.169 \frac{\text{m}^3}{\text{KgAS}}$$

FLUJO MÁSCO DE AIRE SECO
A LA SALIDA

$$W2_{\text{AS}} := Q2 \cdot \left(\frac{1}{VH2} \right)$$

$$W2_{\text{AS}} = 6.973 \frac{\text{KgAS}}{\text{s}}$$

METODO 2

FLUJO DE AGUA CALIENTE

$$LC_2 := 18 \quad \text{GPM}$$

$$LC_1 := 18 \quad \text{GPM}$$

$$L_{\text{prom}} := \frac{LC_2 \cdot 2.228 \cdot 10^{-3} + LC_1 \cdot 2.228 \cdot 10^{-3}}{2} = 0.0 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA CALIENTE A TRAVÉS DE LA TORRE

$$TL2F = 104.9 \quad ^\circ\text{F} \quad TL1F = 68 \quad ^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{TL1F + TL2F}{2}$$

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = 86.45 \quad ^\circ\text{F}$$

DENSIDAD PROMEDIO DEL AGUA CALIENTE A TRAVÉS DE LA TORRE

$$\rho_{H2O} := 62.7538 - 3.5347 \cdot 10^{-3} \cdot T_{H2O} - 4.8193 \cdot 10^{-5} \cdot T_{H2O}^2$$

$$\rho_{H2O} = 62.088 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

FLUJO DE AGUA CALIENTE A TRAVÉS DE LA TORRE

$$L_m := L_{\text{prom}} \cdot \rho_{H2O} \cdot \left(\frac{1}{18} \right) = 0.138 \frac{\text{lbmol}}{\text{s}}$$

$$L_m = 0.138 \frac{\text{lbmol}}{\text{s}}$$

FLUJO DE AIRE SECO A TRAVÉS DE LA TORRE

$$Y1 = 0.012 \frac{\text{KgH2O}}{\text{KgAS}} \quad Y2 = 0.033 \frac{\text{KgH2O}}{\text{KgAS}}$$

$$G_S := \frac{L_m}{Y2 \cdot \left(\frac{29}{18} \right) - Y1 \cdot \left(\frac{29}{18} \right)} \left(\frac{\text{lbmolAS}}{\text{s}} \right)$$

$$G_S = 4.052 \frac{\text{lbmolAS}}{\text{s}}$$

MÉTODO DE MICKLEY

ECUACIÓN DE LA LÍNEA DE OPERACIÓN

$$\frac{HG2 - HG1}{TL2 - TL1} = \frac{L_m \cdot CP_L}{G_s}$$

$$HG2 = 1.427 \times 10^3 \left(\frac{BTU}{lbmolAS} \right) \quad TL2F = 104.9 \text{ } ^\circ F \quad CP_L := 11 \frac{Btu}{lbmol^\circ F}$$

$$HG1 = 662.003 \left(\frac{BTU}{lbmolAS} \right) \quad TL1F = 68 \text{ } ^\circ F \quad PM_{AS} := 29 \frac{lb}{lbmol}$$

$$G_s = 4.052 \frac{lbmolAS}{s}$$

$$G_p := G_s \quad G_p = 4.052 \frac{lbmolAS}{s}$$

FLUJO DE AGUA PROMEDIO USADA EN LA TORRE

GASTO DE AGUA PROMEDIO EN LA TORRE

$$L_m = 0.138 \frac{lbmolH_2O}{s}$$

PENDIENTE DE LA LÍNEA DE OPERACIÓN

$$m_{Lop} := \frac{HG2 - HG1}{TL2 - TL1} \quad m_{Lop} = 37.315 \frac{Btu}{lbmolAS^\circ F}$$

ENTALPÍA DEL AIRE A LA ENTRADA Y A LA SALIDA

$$HG2 = 1.427 \times 10^3 \left(\frac{BTU}{lbmolAS} \right) \quad HG1 = 662.003 \left(\frac{BTU}{lbmolAS} \right)$$

INCREMENTO DE ENTALPIAS

Se tomarán 10 incrementos para trazar el Micky

$$\Delta := \frac{\overrightarrow{(HG2 - HG1)}}{10} \quad \Delta = 76.496$$

$$HG1 = 662.003$$

$$HG\Delta1 := HG1 + \Delta \quad HG\Delta1 = 738.499$$

$$HG\Delta2 := HG\Delta1 + \Delta \quad HG\Delta2 = 814.995$$

$$HG\Delta3 := HG\Delta2 + \Delta \quad HG\Delta3 = 891.491$$

$$HG\Delta4 := HG\Delta3 + \Delta \quad HG\Delta4 = 967.987$$

$$HG\Delta5 := HG\Delta4 + \Delta \quad HG\Delta5 = 1.044 \times 10^3$$

$$HG\Delta6 := HG\Delta5 + \Delta \quad HG\Delta6 = 1.121 \times 10^3$$

$$HG\Delta7 := HG\Delta6 + \Delta \quad HG\Delta7 = 1.197 \times 10^3$$

$$HG\Delta8 := HG\Delta7 + \Delta \quad HG\Delta8 = 1.274 \times 10^3$$

$$HG\Delta9 := HG\Delta8 + \Delta \quad HG\Delta9 = 1.35 \times 10^3$$

$$HG\Delta10 := HG\Delta9 + \Delta \quad HG\Delta10 = 1.427 \times 10^3$$

FONDO DE LA TORRE

Temperatura de bulbo seco a la entrada $T_{bs1F} = 71.6$

Entalpia del aire de entrada $HG1 = 662.003 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$

Temperatura del agua a la salida $TL1F = 68 \text{ } ^\circ\text{F}$

CONDICIONES DE INTERFASE EN EL FONDO DE LA TORRE

Se propone una T_{Li} este valor definirá la pendiente de la línea de unión

Se supone $T_{i1} := 67.5 \text{ } ^\circ\text{F}$

ENTALPIA DEL AIRE EN LA INTERFASE EN EL FONDO DE LA TORRE

$$HG_{i1} := (0.0073 \cdot T_{i1}^3) - (1.169 \cdot T_{i1}^2) + (86.524 \cdot T_{i1}) - 1878.7$$

$$HG_{i1} = 880.506 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

Valor de la pendiente de la línea de unión (Línea C-B)

$$\left(\frac{HG_1 - HG_i}{TL_1 - T_{i1}} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right)$$

$$m_{LU} := \frac{HG_1 - HG_{i1}}{TL_{1F} - T_{i1}} \quad m_{LU} = -437.006$$

PRIMER INCREMENTO

(Pendiente de la línea CA)

$$HG_{i1} = 880.506$$

$$T_{bs1F} = 71.6 \quad T_{i1} = 67.5 \quad TL_{1F} = 68$$

$$m_{CA} := \frac{HG_1 - HG_{i1}}{T_{bs1F} - T_{i1}} \quad m_{CA} = -53.293$$

(Pendiente de la Línea C-D)

$$\left(\frac{HG_{\Delta 1} - HG_{i1}}{TG_{\Delta 1} - T_{i1}} \right) = m_{CD}$$

$$\text{Pero la pendiente} \quad m_{CD} := m_{CA} \quad m_{CD} = -53.293$$

ENTALPIA DELAIRE EN EL PRIMER INCREMENTO

$$HG\Delta 1 = 738.499 \quad HGi1 = 880.506 \quad Ti1 = 67.5 \quad TG1 := Tbs1F \quad TG1 = 71.6 \text{ } ^\circ\text{F}$$

TEMPERATURA DELAIRE EN ELPRIMER INCREMENTO

$$TG\Delta 1 := Ti1 - \left(\frac{HGi1 - HG\Delta 1}{m_{CD}} \right) \quad TG\Delta 1 = 70.165 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Se puede estimar la temperatura $TL\Delta 1$ a partir de de la pendiente de la línea B-E que es igual a la pendiente de la línea de operación total de la torre dada por

$$m_{Lop} := \frac{HG2 - HG1}{TL2 - TL1} \quad m_{Lop} = 37.315 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}^\circ\text{F}}$$

Pendiente de la línea B-E

$$\left(\frac{HG\Delta 1 - HG1}{TL\Delta 1 - TL1} \right) = m_{Lop}$$

TEMPERATURA DELAGUA EN EL PRIMER INCREMENTO

Despejando $TL\Delta 1$:

$$TL\Delta 1 := \left(\frac{HG\Delta 1 - HG1}{m_{Lop}} \right) + TL1F \quad TL1F = 68 \quad TL\Delta 1 = 70.05 \text{ } ^\circ\text{F}$$

SEGUNDA LÍNEA DE UNIÓN (F-E)

Se conoce $HG\Delta 1 = 738.499 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}} \quad TL\Delta 1 = 70.05 \text{ } ^\circ\text{F}$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006 \quad HG1 = 662.003 \quad TL1 = 20$

$$\left(\frac{HG\Delta 1 - HGi2}{TL\Delta 1 - Ti2} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -m_{LU}$$

Ahora se tienen 2 incógnitas H_{Gi2} y T_{i2} , las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$T_{i2} := 89.621 \quad H_{Gi2} := 925.869$$

Given

$$T_{i2} = T_{L\Delta 1} - \left(\frac{H_{G\Delta 1} - H_{Gi2}}{m_{LU}} \right)$$

$$H_{Gi2} = \left[(0.008 \cdot T_{i2}^3) - (1.3917 \cdot T_{i2}^2) + (107.71 \cdot T_{i2}) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(T_{i2}, H_{Gi2}) = \left(\begin{array}{c} 89.621 \\ 925.869 \end{array} \right)$$

Punto F

TEMPERATURA DE INTERFASE EN LA SEGUNDA LÍNEA DE UNIÓN

$$T_{i2} = 89.621 \text{ } ^\circ\text{F}$$

ENTALPÍA DE INTERFASE EN LA SEGUNDA LÍNEA DE UNIÓN

$$H_{Gi2} = 925.869 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}^\circ\text{F}}$$

Pendiente de la línea FD

$$H_{Gi2} = 925.869 \quad H_{G\Delta 1} = 738.499$$

$$T_{i2} = 89.621 \quad T_{G\Delta 1} = 70.165$$

$$m_{FD} := \frac{H_{G\Delta 1} - H_{Gi2}}{T_{G\Delta 1} - T_{i2}} \quad m_{FD} = 9.63$$

Pendiente de la línea FG

$$m_{FG} = \frac{H_{G\Delta 2} - H_{Gi2}}{T_{G\Delta 2} - T_{i2}}$$

$$\text{Pero } m_{FG} := m_{FD} = 9.63$$

(PUNTO D)

TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SEGUNDO INCREMENTO

$$T_{G\Delta 2} := \left[\frac{(H_{G\Delta 2} - H_{Gi2})}{m_{FD}} \right] + T_{i2} \quad T_{G\Delta 2} = 78.108$$

Pendiente de la línea BH que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG1 - HG\Delta2}{TL1F - TL\Delta2} = 113.757$$

(PUNTO E)

TEMPERATURA DEL AGUA
EN EL SEGUNDO INCREMENTO

$$TL\Delta2 := TL1F - \left(\frac{HG1 - HG\Delta2}{m_{Lop}} \right)$$

$$TL\Delta2 = 72.1 \quad ^\circ F$$

$$TL\Delta1 = 70.05$$

TERCERA LÍNEA DE UNIÓN (LH)

Se conoce $HG\Delta2 = 814.995 \frac{Btu}{lbmolAS}$ $TL\Delta2 = 72.1$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta2 - HG_i3}{TL\Delta2 - TL_i3} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -221.776$$

Ahora se tienen 2 incógnitas HG_i3 y $Ti3$, las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

Given

$$HG_i3 := 990.028 \quad Ti3 := 71.69$$

$$Ti3 = TL\Delta2 - \left(\frac{HG\Delta2 - HG_i3}{m_{LU}} \right)$$

$$HG_i3 = \left[(0.008 \cdot Ti3^3) - (1.3917 \cdot Ti3^2) + (107.71 \cdot Ti3) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(HG_i3, Ti3) = \begin{pmatrix} 990.028 \\ 71.699 \end{pmatrix}$$

(PUNTO I)

TEMPERATURA DE INTERFASE EN
LA TERCERA LÍNEA DE UNIÓN

$$Ti3 = 71.69$$

ENTALPÍA DE INTERFASE EN LA TERCERA
LÍNEA DE UNIÓN

$$HG_i3 = 990.028$$

Pendiente de la línea (i-G)

$$HG_{i3} = 990.028 \quad HG_{\Delta 2} = 814.995$$

$$Ti_3 = 71.69 \quad TG_{\Delta 2} = 78.108$$

$$m_{iG} := \frac{HG_{\Delta 2} - HG_{i3}}{TG_{\Delta 2} - Ti_3} \quad m_{iG} = -27.273$$

Pendiente de la línea (i-J)

$$m_{iJ} = \frac{HG_{\Delta 3} - HG_{i3}}{TG_{\Delta 3} - TL_{i3}}$$

Pero $m_{iJ} := m_{iG} = -27.273$

(PUNTO J)

TEMPERATURA DEL AIRE
EN EL TERCER INCREMENTO

$$TG_{\Delta 3} := \left[\frac{(HG_{\Delta 3} - HG_{i3})}{m_{iJ}} \right] + Ti_3$$

$$TG_{\Delta 3} = 75.303 \quad ^\circ\text{F}$$

$$TG_{\Delta 2} = 78.108 \quad ^\circ\text{F}$$

Pendiente de la línea BK que corresponde a la línea de operación

Q - O

$$m_{Lop} = \frac{HG_1 - HG_{\Delta 3}}{TL_{1F} - TL_{\Delta 3}} = 113.757$$

(PUNTO H)

TEMPERATURA DEL AGUA
EN EL TERCER INCREMENTO

$$TL_{\Delta 3} := TL_{1F} - \left(\frac{HG_1 - HG_{\Delta 3}}{m_{Lop}} \right)$$

$$TL_{\Delta 3} = 74.15 \quad ^\circ\text{F}$$

$$TL_{\Delta 2} = 72.1$$

CUARTA LÍNEA DE UNIÓN (L-K)

Se conoce $HG_{\Delta 3} = 891.491 \quad \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}} \quad TL_{\Delta 3} = 74.15 \quad ^\circ\text{F}$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG_{\Delta 3} - HG_{i4}}{TL_{\Delta 3} - Ti_4} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -221.776$$

Ahora se tienen 2 incógnitas H_{Gi4} y T_{i4} , las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$H_{Gi4} := 1.057 \cdot 10^3 \quad T_{i4} := 73.772$$

Given

$$T_{i4} = T_{L\Delta 3} - \left(\frac{H_{G\Delta 3} - H_{Gi4}}{m_{LU}} \right)$$

$$H_{Gi4} = \left[(0.008 \cdot T_{i4}^3) - (1.3917 \cdot T_{i4}^2) + (107.71 \cdot T_{i4}) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(H_{Gi4}, T_{i4}) = \left(\frac{1.057 \times 10^3}{73.772} \right)$$

(PUNTO L)

TEMPERATURA DE INTERFASE EN
LA CUARTA LÍNEA DE UNIÓN

$$T_{i4} = 73.772$$

ENTALPIA DE INTERFASE EN LA CUARTA
LÍNEA DE UNIÓN

$$H_{Gi4} = 1.057 \times 10^3$$

Pendiente de la línea (L-J)

$$H_{Gi4} = 1.057 \times 10^3 \quad H_{G\Delta 3} = 891.491$$

$$T_{i4} = 73.772 \quad T_{G\Delta 3} = 75.303$$

$$m_{LJ} := \frac{H_{G\Delta 3} - H_{Gi4}}{T_{G\Delta 3} - T_{i4}} \quad m_{LJ} = -108.102$$

Pendiente de la línea (L-M)

$$m_{LM} = \frac{H_{G\Delta 4} - H_{Gi4}}{T_{G\Delta 4} - T_{i4}}$$

$$\text{Pero } m_{LM} := m_{LJ} = -108.102$$

(PUNTO M)

TEMPERATURA DELAIRE
EN EL CUARTO INCREMENTO

$$T_{G\Delta 4} := \left[\frac{(H_{G\Delta 4} - H_{Gi4})}{m_{LM}} \right] + T_{i4}$$

$$T_{G\Delta 4} = 74.595 \text{ °F}$$

$$T_{G\Delta 3} = 75.3 \text{ °C}$$

Pendiente de la línea BN corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG1 - HG\Delta4}{TL1F - TL\Delta4} = 113.757$$

(PUNTO N)

TEMPERATURA DEL AGUA
EN EL CUARTO INCREMENTO

$$TL\Delta4 := TL1F - \left(\frac{HG1 - HG\Delta4}{m_{Lop}} \right)$$

$$TL\Delta4 = 76.2 \quad ^\circ\text{F}$$

$$TL\Delta3 = 74.15$$

QUINTA LÍNEA DE UNIÓN (Ñ-N)

Se conoce $HG\Delta4 = 967.987 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$ $TL\Delta4 = 76.2$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta4 - HG\text{i}5}{TL\Delta4 - T\text{i}5} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -221.776$$

Ahora se tienen 2 incógnitas $HG\text{i}5$ y $T\text{i}5$, las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$HG\text{i}5 := 1.127 \cdot 10^3 \quad T\text{i}5 := 75.837$$

Given

$$T\text{i}5 = TL\Delta4 - \left(\frac{HG\Delta4 - HG\text{i}5}{m_{LU}} \right)$$

$$HG\text{i}5 = \left[(0.008 \cdot T\text{i}5^3) - (1.3917 \cdot T\text{i}5^2) + (107.71 \cdot T\text{i}5) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(HG\text{i}5, T\text{i}5) = \begin{pmatrix} 1.127 \times 10^3 \\ 75.837 \end{pmatrix}$$

(PUNTO Ñ)

TEMPERATURA DE INTERFASE EN
LA QUINTA LÍNEA DE UNIÓN

$$T\text{i}5 = 75.837$$

ENTALPÍA DE INTERFASE EN LA QUINTA
LÍNEA DE UNIÓN

$$HG\text{i}5 = 1.127 \times 10^3$$

Pendiente de la línea (O-M)

$$HG_{i5} = 1.127 \times 10^3 \quad HG_{\Delta 4} = 967.987$$

$$Ti_5 = 75.837 \quad TG_{\Delta 4} = 74.595$$

$$m_{OM} := \frac{HG_{\Delta 4} - HG_{i5}}{TG_{\Delta 4} - Ti_5} \quad m_{OM} = 128.073$$

Pendiente de la línea (Ñ-M)

$$m_{\check{N}M} = \frac{HG_{\Delta 5} - HG_{i5}}{TG_{\Delta 5} - TL_{i5}}$$

$$\text{Pero } m_{\check{N}M} := m_{OM} = 128.073$$

(PUNTO M)

TEMPERATURA DELAIRE
EN EL QUINTO INCREMENTO

$$TG_{\Delta 5} := \left[\frac{(HG_{\Delta 5} - HG_{i5})}{m_{OM}} \right] + Ti_5$$

$$TG_{\Delta 5} = 75.193 \quad ^\circ\text{F}$$

$$TG_{\Delta 4} = 74.595 \quad ^\circ\text{F}$$

Pendiente de la línea BN que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG_1 - HG_{\Delta 5}}{TL_{1F} - TL_{\Delta 5}} = 113.757$$

(PUNTO N)

TEMPERATURA DELAGUA
EN EL QUINTO INCREMENTO

$$TL_{\Delta 5} := TL_{1F} - \left(\frac{HG_1 - HG_{\Delta 5}}{m_{Lop}} \right)$$

$$TL_{\Delta 5} = 78.25 \quad ^\circ\text{F}$$

$$TL_{\Delta 4} = 76.2$$

SEXTALINEA DE UNION (Q-P)

$$\text{Se conoce } HG_{\Delta 5} = 1.044 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}} \quad TL_{\Delta 5} = 78.25$$

$$\text{El valor de la línea de unión conserva su valor } m_{LU} = -437.006$$

$$\left(\frac{HG_{\Delta 5} - HG_{i6}}{TL_{\Delta 5} - Ti_6} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -m_{LU}$$

Ahora se tienen 2 incógnitas H_{Gi6} y T_{i6} , las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$H_{Gi6} := 1.2 \cdot 10^3 \quad T_{i6} := 77.895$$

Given

$$T_{i6} = T_{L\Delta 5} - \left(\frac{H_{G\Delta 5} - H_{Gi6}}{m_{LU}} \right)$$

$$H_{Gi6} = \left[(0.008 \cdot T_{i6}^3) - (1.3917 \cdot T_{i6}^2) + (107.71 \cdot T_{i6}) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(H_{Gi6}, T_{i6}) = \begin{pmatrix} 1.2 \times 10^3 \\ 77.895 \end{pmatrix}$$

(PUNTO Q)

TEMPERATURA DE INTERFASE EN LA SEXTA LÍNEA DE UNIÓN

$$T_{i6} = 77.895$$

ENTALPÍA DE INTERFASE EN LA SEXTA LÍNEA DE UNIÓN

$$H_{Gi6} = 1.2 \times 10^3$$

PENDIENTE DE LA LÍNEA (Q-O)

$$m_{QO} := \frac{H_{G\Delta 5} - H_{Gi6}}{T_{G\Delta 5} - T_{i6}} \quad m_{QO} = 57.55 \quad \text{esto esta mal}$$

Pendiente de la línea (Q-R)

$$m_{QR} = \frac{H_{G\Delta 6} - H_{Gi6}}{T_{G\Delta 6} - T_{i6}}$$

$$\text{Pero } m_{QR} := m_{QO} = 57.55$$

(PUNTO O)

TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SEXTO INCREMENTO

$$T_{G\Delta 6} := \left[\frac{(H_{G\Delta 6} - H_{Gi6})}{m_{QR}} \right] + T_{i6}$$

$$T_{G\Delta 6} = 76.522 \quad ^\circ\text{F}$$

$$T_{G\Delta 5} = 75.193 \quad ^\circ\text{F}$$

Pendiente de la línea BP que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{H_{G1} - H_{G\Delta 6}}{T_{L1F} - T_{L\Delta 6}} = 113.757$$

(PUNTO P)

TEMPERATURA DEL AGUA EN EL
SEXTO INCREMENTO

$$TL\Delta 6 := TL1F - \left(\frac{HG1 - HG\Delta 6}{m_{Lop}} \right)$$

$$TL\Delta 6 = 80.3 \quad ^\circ F$$

$$TL\Delta 5 = 78.25 \quad ^\circ F$$

SEPTIMA LINEA DE UNION (T-S)

Se conoce $HG\Delta 6 = 1.121 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$ $TL\Delta 6 = 80.3 \quad ^\circ F$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta 6 - HG_i7}{TL\Delta 6 - T_i7} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -m_{LU}$$

Ahora se tienen 2 incógnitas HG_i7 y TL_i7 , las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$HG_i7 := 1.277 \cdot 10^3 \quad T_i7 := 79.944$$

Given

$$T_i7 = TL\Delta 6 - \left(\frac{HG\Delta 6 - HG_i7}{m_{LU}} \right)$$

$$HG_i7 = \left[(0.008 \cdot T_i7^3) - (1.3917 \cdot T_i7^2) + (107.71 \cdot T_i7) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(HG_i7, T_i7) = \left(\begin{array}{c} 1.277 \times 10^3 \\ 79.944 \end{array} \right)$$

(PUNTO T)

CONDICIONES EN LA INTERFASE

TEMPERATURA DE INTERFASE EN
LA SEPTIMA LINEA DE UNIÓN

$$T_i7 = 79.944 \quad ^\circ F$$

ENTALPIA DE INTERFASE EN LA SEPTIMA
LINEA DE UNIÓN

$$HG_i7 = 1.277 \times 10 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

$$m_{TR} := \frac{HG\Delta 6 - HG_i7}{TG\Delta 6 - T_i7} \quad m_{TR} = 45.592$$

Pendiente de la línea (T-U)

$$m_{TU} = \frac{HG\Delta 7 - HGi7}{TG\Delta 7 - TLi7}$$

Pero $m_{TU} := m_{TR} = 45.592$

(PUNTO U)

TEMPERATURA DELAIRE EN EL SEPTIMO INCREMENTO

$$TG\Delta 7 := \left[\frac{(HG\Delta 7 - HGi7)}{m_{TU}} \right] + Ti7 \quad TG\Delta 7 = 78.2 \quad ^\circ F$$

$$TG\Delta 6 = 76.522$$

Pendiente de la línea BS que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG1 - HG\Delta 7}{TL1F - TL\Delta 7} = 113.757$$

(PUNTO S)

TEMPERATURA DELAGUAEN EL SEPTIMO INCREMENTO

$$TL\Delta 7 := TL1F - \left(\frac{HG1 - HG\Delta 7}{m_{Lop}} \right) \quad TL\Delta 7 = 82.35 \quad ^\circ F$$

$$TL\Delta 6 = 80.3 \quad ^\circ F$$

OCTAVALÍNEA DE UNIÓN (W-V)

Se conoce $HG\Delta 7 = 1.197 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$ $TL\Delta 7 = 82.35$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta 7 - HGi8}{TL\Delta 7 - TLi8} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -221.776$$

Ahora se tienen 2 incógnitas $HGi8$ y $Ti8$, las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$HGi8 := 1.358 \cdot 10^3 \quad Ti8 := 81.983$$

Given

$$Ti8 = TL\Delta 7 - \left(\frac{HG\Delta 7 - HGi8}{m_{LU}} \right)$$

$$HGi8 = \left[(0.008 \cdot Ti8^3) - (1.3917 \cdot Ti8^2) + (107.71 \cdot Ti8) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(H_{Gi8}, T_{i8}) = \begin{pmatrix} 1.358 \times 10^3 \\ 81.983 \end{pmatrix} \quad (\text{PUNTO W})$$

TEMPERATURA DE INTERFASE EN LA SEPTIMA LÍNEA DE UNIÓN $T_{i8} = 81.983 \text{ } ^\circ\text{F}$

ENTALPIA DE INTERFASE EN LA SEPTIMA LÍNEA DE UNIÓN $H_{Gi8} = 1.358 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$

Pendiente de la línea (W-U)

$$m_{WU} := \frac{HG_{\Delta 7} - H_{Gi8}}{TG_{\Delta 7} - T_{i8}} \quad m_{WU} = 42.43$$

Pendiente de la línea (W-X)

$$m_{WX} = \frac{HG_{\Delta 8} - H_{Gi8}}{TG_{\Delta 8} - T_{Li8}}$$

Pero $m_{WX} := m_{WU}$

PUNTO U

TEMPERATURA DELAIRE EN EL INCREMENTO OCHO $TG_{\Delta 8} := \left[\frac{(HG_{\Delta 8} - H_{Gi8})}{m_{WX}} \right] + T_{i8}$ $TG_{\Delta 8} = 80.003 \text{ } ^\circ\text{F}$
 $TG_{\Delta 7} = 78.2 \text{ } ^\circ\text{F}$

Pendiente de la línea BV que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG_1 - HG_{\Delta 8}}{TL_{1F} - TL_{\Delta 8}} = 113.757$$

(PUNTO V)

TEMPERATURA DELAGUA EN EL INCREMENTO OCHO $TL_{\Delta 8} := TL_{1F} - \left(\frac{HG_1 - HG_{\Delta 8}}{m_{Lop}} \right)$ $TL_{\Delta 8} = 84.4 \text{ } ^\circ\text{F}$
 $TL_{\Delta 7} = 82.35 \text{ } ^\circ\text{F}$

NOVENA LÍNEA DE UNIÓN (Z-Y)

Se conoce $HG\Delta 8 = 1.274 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$ $TL\Delta 8 = 84.4$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta 8 - HG_i9}{TL\Delta 8 - Ti9} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -m_{LU}$$

Ahora se tienen 2 incógnitas HG_i9 y $Ti9$, las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$HG_i9 := 1.443 \cdot 10^3 \quad Ti9 := 84.013$$

Given

$$Ti9 = TL\Delta 8 - \left(\frac{HG\Delta 8 - HG_i9}{m_{LU}} \right)$$

$$HG_i9 = \left[(0.008 \cdot Ti9^3) - (1.3917 \cdot Ti9^2) + (107.71 \cdot Ti9) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(HG_i9, Ti9) = \begin{pmatrix} 1.443 \times 10^3 \\ 84.013 \end{pmatrix}$$

PUNTO Z

TEMPERATURA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO NUEVE $Ti9 = 84.013 \quad ^\circ\text{F}$

ENTALPIA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO NUEVE $HG_i9 = 1.443 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$

Pendiente de la línea zx

$$m_{ZX} := \frac{HG\Delta 8 - HG_i9}{TG\Delta 8 - Ti9} \quad m_{ZX} = 42.148$$

Pendiente de la línea (Z- α)

$$m_{Z\alpha} = \frac{HG\Delta 9 - HG_i9}{TG\Delta 9 - TLi9}$$

PUNTO χ

TEMPERATURA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO DIEZ

$$Ti10 = 86.03 \text{ } ^\circ\text{F}$$

ENTALPIA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO DIEZ

$$HGi10 = 1.533 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

Pendiente de la línea χ - α

$$HG9 := HG2 = 1.427 \times 10^3 \quad TG\Delta 9 = 81.818$$

$$m_{\chi\alpha} := \frac{HG\Delta 9 - HGi10}{TG\Delta 9 - Ti10}$$

$$m_{\chi\alpha} = 43.332$$

Pendiente de la línea χ - δ

$$m_{\chi\delta} = \frac{HG\Delta 10 - HGi10}{TG\Delta 10 - Ti10} \quad HG\Delta 10 = 1.427 \times 10^3$$

$$\text{Pero } m_{\chi\delta} := m_{\chi\alpha} = 43.332$$

TEMPERATURA DELAIRE EN EL INCREMENTO DIEZ (SALIDA DELAIRE)

$$TG\Delta 10 := \left[\frac{(HG\Delta 10 - HGi10)}{m_{\chi\delta}} \right] + Ti10 \quad TG\Delta 10 = 83.583 \text{ } ^\circ\text{F}$$
$$TG\Delta 9 = 81.818 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Pendiente de la línea B- δ que corresponde a la línea de operación

$$m_{Lop} = \frac{HG1 - HG\Delta 10}{TL1F - TL\Delta 10} = 113.757$$

TEMPERATURA DELAGUA EN EL INCREMENTO DIEZ

$$TL\Delta 10 := TL1F - \left(\frac{HG1 - HG\Delta 10}{m_{Lop}} \right) \quad TL\Delta 10 = 88.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$
$$TL\Delta 9 = 86.45$$

ONCEAVA LÍNEA DE UNIÓN (ϕ - ϵ)

Se conoce $HG\Delta_{10} = 1.427 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$ $TL\Delta_{10} = 88.5$

El valor de la línea de unión conserva su valor $m_{LU} = -437.006$

$$\left(\frac{HG\Delta_{10} - HGi_{11}}{TL\Delta_{10} - Ti_{11}} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right) = -m_{LU}$$

Ahora se tienen 2 incógnitas HGi_{11} y Ti_{11} , las cuales se calculan resolviendo simultáneamente la ecuación de la línea de saturación y la línea de unión

$$HGi_{11} := 1.628 \cdot 10^3 \quad Ti_{11} := 88.04$$

Given

$$Ti_{11} = TL\Delta_{10} - \left(\frac{HG\Delta_{10} - HGi_{11}}{m_{LU}} \right)$$

$$HGi_{11} = \left[(0.008 \cdot Ti_{11}^3) - (1.3917 \cdot Ti_{11}^2) + (107.71 \cdot Ti_{11}) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(Ti_{11}, HGi_{11}) = \left(\begin{array}{c} 88.04 \\ 1.628 \times 10^3 \end{array} \right)$$

TEMPERATURA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO ONCE

$$Ti_{11} = 88.04 \quad ^\circ\text{F}$$

ENTALPIA DE INTERFASE EN EL INCREMENTO ONCE

$$HGi_{11} = 1.628 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

Pendiente de la línea (ϕ - δ)

$$m_{\phi\delta} := \frac{HG\Delta_{10} - HGi_{11}}{TG\Delta_{10} - Ti_{11}}$$

pero $HG\Delta_{10} = HG_2$ que corresponde a la entalpía del aire de salida que se ha medido, es decir

$$m_{\phi\delta} := \frac{HG_2 - HGi_{11}}{TG\Delta_{10} - Ti_{11}}$$

$$TG\Delta_{10} = 83.583$$

Despejando $TG\Delta_{10}$ se tiene:

$$TGA_{10\text{calculda}} := \left(\frac{HG_2 - H_{Gi1}}{m_{\phi\delta}} \right) + T_{i1}$$

$$TGA_{10\text{calculda}} = 83.583 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{bs2F} = 84.2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

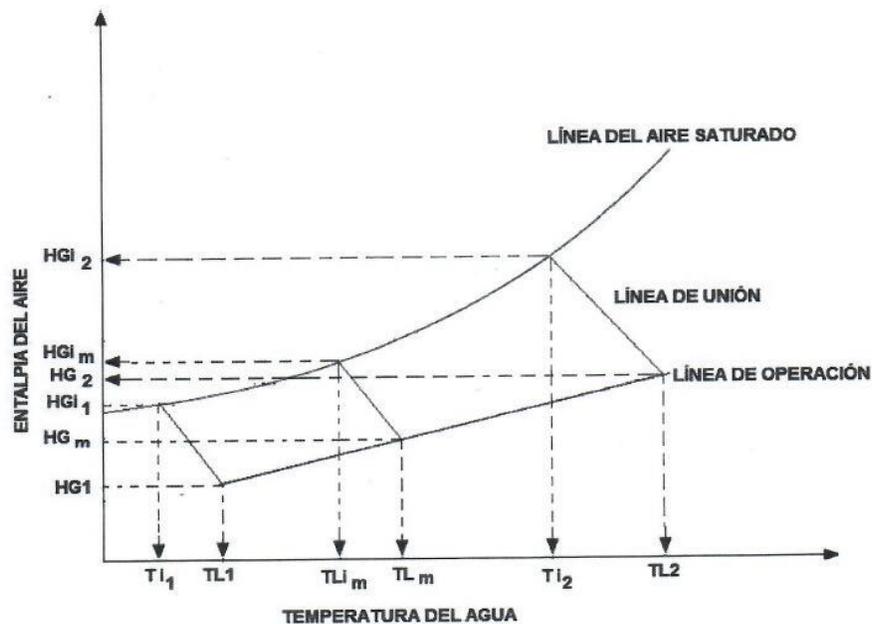
Si $TGA_{10\text{calculda}}$ es igual a T_{bs2F} que corresponde a la temperatura de bulbo seco de salida del aire de la torre, la temperatura T_i de interfase supuesta es la correcta y por lo tanto la pendiente de la línea de unión es la correcta por lo que puede emplearse para estimar los coeficientes de transferencia de calor y masa.

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

ECUACIÓN DE DISEÑO

$$Z = \left(\frac{G'}{S K_y a} \right) \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH_G}{H_i - H_G}$$

Estimación del Número de Unidades de Transferencia por el Método de Carey-Williamson



$$\Delta H_1 = (HG_{i_1} - HG_1)$$

$$\Delta H_2 = (HG_{i_2} - HG_2)$$

$$\Delta H_m = (HG_{i_m} - HG_m)$$

De la grafica de Carey -Williamson

$$X = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_2} \quad \Rightarrow \quad f$$

$$Y = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_1}$$

El número de Unidades de Transferencia se calcula como:

$$\int_{HG_1}^{HG_2} \frac{dHG}{HG_i - HG} = \frac{HG_1 - HG_2}{f \Delta H_m}$$

TEMPERATURA DEL AGUA A LA ENTRADA Y A LA SALIDA

$$TL_{1F} = 68 \text{ } ^\circ\text{F} \quad TL_{10F} := TL_{\Delta 10} \quad TL_{10F} = 88.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA

$$TL_m := \frac{TL_{1F} + TL_{10F}}{2} \quad TL_m = 78.25 \text{ } ^\circ\text{F}$$

ENTALPÍA DEL AIRE A LA ENTRADA Y A LA SALIDA

$$HG_1 = 662.003 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right) \quad HG_{11} := HG_2$$

ENTALPIA PROMEDIO DEL AIRE

$$HG_m := \frac{HG_1 + HG_{11}}{2} \quad HG_m = 1.044 \times 10^3 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

TEMPERATURA Y ENENTALPIA DE INTERFASE EN LA PRIMERA LÍNEA DE UNIÓN

$$TL_{i1} := 67 \text{ } ^\circ\text{F} \quad HG_{i1} = 880.506 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol}}$$

TEMPERATURA Y ENTALPIA DE INTERFASE EN LA DECIMA LÍNEA DE UNIÓN
(SALIDA DE LA TORRE)

$$Ti11 = 88.04 \text{ } ^\circ\text{F} \quad HGi11 = 1.628 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

LÍNEA DE UNIÓN EN LAS CONDICIONES PROMEDIO

$$\left(\frac{HGm - HGim}{TLm - Tim} \right) = - \left(\frac{hLa}{kya} \right)$$

$$m_{LU} = -437.006$$

Given

$$HGim := 1.228 \cdot 10^3 \quad Tim := 78.671$$

$$HGim = HGm + m_{LU}(TLm - Tim)$$

$$HGim = \left[(0.008 \cdot Tim^3) - (1.3917 \cdot Tim^2) + (107.71 \cdot Tim) - 2527 \right]$$

$$\text{Find}(Tim, HGim) = \left(\begin{array}{c} 78.671 \\ 1.228 \times 10^3 \end{array} \right)$$

TEMPERATURA DE INTERFASE EN
LA PARTE MEDIA DE LA TORRE

$$Tim = 78.671 \text{ } ^\circ\text{F}$$

ENTALPIA DE INTERFASE EN
LA PARTE MEDIA DE LA
TORRE

$$HGim = 1.228 \times 10^3 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

$$\Delta H1 := HGi1 - HG1 \quad \Delta H1 = 218.503 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

$$\Delta H11 := HGi11 - HG11 \quad \Delta H11 = 201.037 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

$$\Delta Hm := HGim - HGm \quad \Delta Hm = 183.517 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmolAS}}$$

De la Grafica de Carey-Williamson

$$X := \frac{\Delta Hm}{\Delta H11} \quad X = 0.913$$

$$Y := \frac{\Delta Hm}{\Delta H1} \quad Y = 0.84$$



$$f := 1.08$$

$$NUT := \frac{HG2 - HG1}{f \cdot \Delta Hm}$$

$$NUT = 3.86$$

EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

$$K_Y a = \left(\frac{G'}{S} \right) \left(\frac{1}{Z} \right) \int_{HG1}^{HG2} \frac{dH_G}{H_i - H_G}$$

$$S1 = 3.168 \text{ m}^2 \quad G_S = 4.052 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \quad Z := 1.3 \text{ m}$$

$$K_{Ya} := \left[\frac{G_S}{S1 \cdot (10.76)} \right] \cdot \left[\frac{1}{Z \cdot \left(\frac{1}{0.3048} \right)} \right] \cdot NUT$$

$$K_{Ya} = 0.108 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3 \text{s}}$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL LADO DEL LÍQUIDO

Línea de Unión

$$\frac{hLa}{kYa} = \frac{H_G - H_i}{T_L - T_i}$$

Despejando hLa, se tiene:

$$hLa = kYa \left(\frac{H_G - H_i}{T_L - T_i} \right)$$

$$m_{LU} = -437.006$$

$$K_{Ya} = 0.108 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3 \text{s}}$$

$$hLa := -m_{LU} \cdot K_{Ya} \quad hLa = 46.999 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^3 \text{s}}$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL LADO DEL GAS

Relación de Lewis

$$r = \frac{hca}{kY_a C_H} \quad \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^3\text{s}}$$

$$CH = \frac{(CHE + CHS)}{2} \quad r = \text{relación de lewis} = 1 \quad r := 1$$

$$Y1 = 0.012 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}} \quad Y2 = 0.033 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

Calor húmedo de entrada

$$CHE := 0.24 + 0.46 \cdot Y1 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Calor húmedo de salida

$$CHS := 0.24 + 0.46 \cdot Y2 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Calor húmedo promedio

$$CH := \frac{CHE + CHS}{2} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right) \text{ o } \left(\frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \right)$$

$$hCa := r \cdot K_{Y_a} \cdot CH \cdot 29 \frac{\text{KgH}_2\text{O}}{\text{KgAs}}$$

$$hCa = 0.781 \frac{\text{Btu}}{(\text{ft}^3)(\text{s})(^\circ\text{F})}$$

ALTURA DE LA TORRE COMO UNA FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LÍQUIDO

$$TL1F = 68 \text{ }^\circ\text{F} \quad TL2F = 104.9 \quad Z2 := 1.30 \text{ m} \quad Z1 := 0 \quad b := 0$$

Pendiente de enfriamiento del agua

$$M := \frac{Z2 - Z1}{TL2F - TL1F} \quad M = 0.035 \frac{\text{m}}{^\circ\text{F}}$$

CALOR QUE PIERDE LA CORRIENTE LÍQUIDA

$$Q = hL_a \cdot (TL - Ti) \cdot \Delta Z \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2\text{s}}$$

ESTAS TEMPERATURAS SE OBTUVIERON DURANTE LA ELABORACIÓN DEL METODO DE MICKLEY

TG :=	(Tbs1F)		0	°F
	TGΔ1	0	71.6	
	TGΔ2	1	70.165	
	TGΔ3	2	78.108	
	TGΔ4	3	75.303	
	TGΔ5	4	74.595	
	TGΔ6	5	75.193	
	TGΔ7	6	76.522	
	TGΔ8	7	78.2	
	TGΔ9	8	80.003	
	TGΔ10	9	81.818	
	10	83.583		

TL :=	(TL1F)		0	°F
	TLΔ1	0	68	
	TLΔ2	1	70.05	
	TLΔ3	2	72.1	
	TLΔ4	3	74.15	
	TLΔ5	4	76.2	
	TLΔ6	5	78.25	
	TLΔ7	6	80.3	
	TLΔ8	7	82.35	
	TLΔ9	8	84.4	
	TLΔ10	9	86.45	
	10	88.5		

$$HG = (0.24 + 0.46Y)T + 597.2 \frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}}$$

$$PM_{\text{aire}} := 29$$

$$PM_{\text{H}_2\text{O}} := 18$$

$$\lambda_0 := 597.22 \frac{\text{Kcal}}{\text{KgH}_2\text{O}}$$

$$Y_i := \frac{HG_i - (0.24 \cdot PM_{\text{aire}}) \cdot T_i}{(0.46 \cdot PM_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot T_i + \lambda_0 \cdot 1.80 \cdot PM_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$Y := \frac{HG - (0.24 \cdot PM_{\text{aire}}) \cdot TG}{(0.46 \cdot PM_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot TG + \lambda_0 \cdot 1.8 \cdot PM_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\left(\frac{\text{lbmolH}_2\text{O}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

$$\Delta Z := \frac{1}{0.3048} [M \cdot (TL - TL1F)]$$

$$\left(\frac{\text{lbmolH}_2\text{O}}{\text{lbmolAS}} \right)$$

ΔZ =		0
	0	0
	1	0.237
	2	0.474
	3	0.711
	4	0.948
	5	1.185
	6	1.422
	7	1.659
	8	1.896
	9	2.133
10	2.369	

ft

Yi =		0
	0	0.021
	1	0.015
	2	0.025
	3	0.027
	4	0.03
	5	0.033
	6	0.036
	7	0.039
	8	0.043
	9	0.047
10	0.051	

Y =		0
	0	0.008
	1	0.013
	2	0.014
	3	0.018
	4	0.022
	5	0.026
	6	0.029
	7	0.033
	8	0.036
	9	0.039
10	0.042	

CALOR SENSIBLE QUE ACEPTA LA FASE GAS

$$Q_{\text{sens}} = hca \cdot (T_i - T_G) \cdot \Delta Z \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2\text{s}}$$

ESTAS TEMPERATURAS Y ENTALPIAS DE INTERFASE SE OBTUVIERON DURANTE LA ELABORACIÓN DEL METODO DE MICKLEY

Ti :=	Ti1		0	HG _i :=	HGi1		0
	Ti2	0	67.5		HGi2	0	880.506
	Ti3	1	89.621		HGi3	1	925.869
	Ti4	2	71.69		HGi4	2	990.028
	Ti5	3	73.772		HGi5	3	1.057·10 ³
	Ti6	4	75.837		HGi6	4	1.127·10 ³
	Ti7	5	77.895		HGi7	5	1.2·10 ³
	Ti8	6	79.944		HGi8	6	1.277·10 ³
	Ti9	7	81.983		HGi9	7	1.358·10 ³
	Ti10	8	84.013		HGi10	8	1.443·10 ³
	Ti11	9	86.03		HGi11	9	1.533·10 ³
		10	88.04		10	1.628·10 ³	

PARA EL CALOR LATENTE QUE RECIBE LA FASE GAS

$$Q_{\lambda} = \lambda_0 \cdot 1.8 \cdot PM_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (K_{Y_a})(Y_i - Y) \cdot \Delta Z \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2\text{s}}$$

ESTAS ENTALPIAS PROVIENEN DE LA DISCRETIZACIÓN PARA EL MÉTODO DE MICKLEY

HG :=	HG1		0
	HGΔ1	0	662.003
	HGΔ2	1	738.499
	HGΔ3	2	814.995
	HGΔ4	3	891.491
	HGΔ5	4	967.987
	HGΔ6	5	1.044·10 ³
	HGΔ7	6	1.121·10 ³
	HGΔ8	7	1.197·10 ³
	HGΔ9	8	1.274·10 ³
	HG2	9	1.35·10 ³
	10	1.427·10 ³	

CALOR QUE PIERDE LA CORRIENTE LÍQUIDA

$$Q_w := \frac{[hL_a \cdot (T_L - T_i) \cdot \Delta Z]}{\text{ft}2\text{s}} \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$$

	0
0	0
1	-217.952
2	9.132
3	12.629
4	16.17
5	19.767
6	23.787
7	28.61
8	34.478
9	42.096
10	51.228

$Q = \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$

PARA EL CALOR LATENTE QUE RECIBE LA FASE GAS

$$Q_{\lambda w} := \frac{[\lambda_0 \cdot 1.8 \cdot PM_{H2O} \cdot (K_{Y_a})(Y_i - Y) \cdot \Delta Z]}{\text{ft}2\text{s}} \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$$

	0
0	0
1	1.225
2	10.9
3	13.073
4	14.823
5	16.785
6	19.422
7	22.95
8	27.537
9	33.591
10	41.371

$Q_{\lambda} = \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$

CALOR SENSIBLE QUE ACEPTA LA FASE GAS

$$Q_{\text{sens}} := \frac{[hC_a \cdot (T_i - T_G) \cdot \Delta Z]}{\text{ft}2\text{s}} \quad \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$$

	0
0	0
1	3.602
2	-2.376
3	-0.85
4	0.919
5	2.501
6	3.801
7	4.902
8	5.939
9	7.018
10	8.251

$Q_{\text{sens}} = \frac{\text{BTU}}{\text{ft}2\text{s}}$

