

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA  
DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA**

**BLANCA JOHANA CALDERÓN GODOY  
HELMER GEOBEL PINTO GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA  
DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA**

**BLANCA JOHANA CALDERÓN GODOY  
HELMER GEOBEL PINTO GALVIS**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico.**

**Director**

**M. Sc. CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA.**

**Co-director**

**M. Sc. JORGE ENRIQUE FORERO SANABRIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**

## **DEDICATORIA**

A mi maestro JESÚS, porque sin él no sería posible éste triunfo.

A mis padres, por su sacrificio, esmero, apoyo paciencia y amor para regalar a sus hijas cada día lo mejor de la vida.

A Sandrita, por su constancia, empuje y apoyo siempre que lo necesité.

A Martica y Freddy por estar ahí siempre que lo necesité.

A mis angelitos, por ser parte de mi vida.

Al amor de mi vida, Dennys, por su amor, compañía y apoyo en el logro de mis metas.

A Bertica, Adolfo, Dani y Edelmira por toda la colaboración prestada.

A Cleo y Kata por creer en mí.

A susi, iván y Eve, por su colaboración a lo largo de la carrera.

A Sergio, por su compañía.

A Angela, por fincar esperanzas en mí.

A mis amigos, gracias.

**JOHANA.**

## DEDICATORIA

### A Dios

Por iluminar mi camino y por su compañía incondicional.

### A mi madre, **Flor Maria**

Por el inmenso apoyo que me brindo a lo largo de la carrera, su capacidad de sacrificio y el amor con me acompaño siempre tanto en las situaciones buenas como en las adversas, sin desfallecer en el empeño de proporcionarme respaldo material y afectivo.

### A mi padre, **Ismael**

Por su ejemplo y cariño.

### A mi hermana, **Leydy Diana**

Por su carisma y comprensión.

### A mi **Novia**

Por lo que representa para mi vida, por su apoyo incondicional y por que me a enseñado que a pesar de las dificultades siempre hay espacio para el amor, la comprensión y el respeto.

### A mis **Amigos**

Por creer en mi y por recordarme que siempre en la vida existen personas que te aprecian sin pedir nada a cambio.

**HELMER.**

## **AGRADECIMIENTOS**

M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, director del proyecto, por su colaboración y consejos en el momento apropiado.

M. Sc. Jorge Enrique Forero Sanabria, co-director del proyecto, por guiarnos en el desarrollo y ejecución del mismo.

M. Sc. Javier Díaz Sierra, por su aporte teórico.

Ing. Luis Fernando Gaviria Acuña, por su colaboración y aporte teórico a la elaboración del documento final.

Ing. Luis López Márquez, por colaborarnos en el manejo de Labview.

Ing. Adriana Judith Becerra.

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Escuela de Ingeniería Civil.

Escuela de Ingeniería Química.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	1
1. SICROMETRIA	3
1.1 HUMEDAD ABSOLUTA O SATURACIÓN ABSOLUTA	3
1.2 HUMEDAD RELATIVA O SATURACIÓN RELATIVA	4
1.3 PUNTO DE ROCÍO	5
1.4 TEMPERATURA DE BULBO SECO	5
1.5 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO	5
2. TORRES DE ENFRIAMIENTO	6
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	6
2.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO	7
2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO	11
2.3.1 Tipos de torres de enfriamiento de contacto directo	13
2.3.1.1 Torres de tiro no mecánico	14
• Naturalmente aspiradas	14
• Torres de chimenea (hiperbólicas)	14
• Torres de tipo atmosférico	14
2.3.1.2 Torres de tiro mecánico	15
• De tiro forzado	16
• De tiro inducido	17
2.3.2 Torres de tipo de contacto indirecto	21
2.3.2.1 Enfriadores de fluido en circuito cerrado (de tiro mecánico)	21
2.3.2.2 Torres "Coil Shed" (de tiro mecánico)	21
2.4 PARTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	22
2.4.1 Tanque o depósito de agua	22
2.4.2 Ventanas de succión de aire	22
2.4.3 Cuerpo de la torre	23

2.4.3.1 Relleno o empaque	23
2.4.3.2 Sistema de distribución de agua	24
2.4.3.3 Eliminadores de gotas	25
2.4.4 Cubierta de la torre y ventilador	25
2.5 ECUACIONES BÁSICAS DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO	26
2.5.1 Desarrollo de la ecuación	27
2.5.2 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN BÁSICA	34
2.5.3 METODOS APROXIMADOS DE SOLUCIÓN	37
2.5.3.1 Integración Gráfica	37
2.5.3.2 Integración Numérica	38
2.5.3.3 Método Numérico de Tchebycheff	38
2.5.3.4 Método de la Diferencia Media Logarítmica	38
2.5.3.5 Curvas de Desempeño	41
2.5.4 MÉTODO DE MICKLEY	43
2.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	45
2.7 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN EL DISEÑO	47
2.7.1 Sequedad del aire	47
2.7.2 Aproximación Limite	48
2.7.3 Cambio de la relación L/G	48
2.7.4 Localización del Rango de Operación	48
2.7.5 Empalme	48
2.7.6 Elevación	49
2.8 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	53
3. MODELO MATEMÁTICO	54
3.1 MODELO OPERACIONAL	54
3.1.1 Método de Newton-Raphson	59
3.1.2 Método de Runge - Kutta de cuarto orden	62
3.2 MODELO TERMODINÁMICO	65
4. RESULTADOS	68
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO	68
4.2 CASO DE ESTUDIO	77
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO OPERACIONAL	79

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO TERMODINÁMICO	80
5.2.1 Prueba de bondad del ajuste	80
5.2.1.1 Prueba ji-cuadrada de bondad del ajuste	81
5.2.1.2 Elaboración de la prueba ji-cuadrada	82
5.2.2 Intervalos de confianza	83
5.2.2.1 Intervalo de confianza para la media de una distribución normal, varianza desconocida.	85
5.2.2.2 Prueba del intervalo de confianza	87
5.2.3 Introducción a la hipótesis estadística	88
5.2.3.1 Procedimiento general para la prueba de hipótesis	90
5.2.3.2 Prueba de hipótesis sobre la media de una distribución normal y varianza desconocida de una población.	91
5.2.3.3 Desarrollo del procedimiento de prueba	91
5.2.3.4 Elaboración de la prueba de hipótesis	93
6. RECOMENDACIONES OPERACIONALES	95
6.1 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A TRAVÉS DE LA TORRE	95
6.2 RELLENO	96
6.3 ELIMINADORES DE ROCÍO	97
6.4 EQUIPO MECÁNICO	98
6.4.1 Ventiladores	98
6.4.2 Reductor de velocidad	99
6.4.3 Flechas de transmisión de potencia	99
6.4.4 Paredes laterales, persianas y cuerpo de la torre	99
6.4.5 Estructura de madera	100
6.5 FLUJO DE AIRE	101
6.6 FLUJO DE AGUA	102
6.7 CICLOS DE CONCENTRACIÓN	104
7. CONCLUSIONES	105
8. RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICES	111
ANEXOS	151

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Resultados obtenidos para diferentes empaques.	78
<b>Cuadro 2.</b> Frecuencias observadas y esperadas.	82
<b>Cuadro 3.</b> Datos de la muestra utilizados para la prueba del intervalo de confianza	87
<b>Cuadro 4.</b> Decisiones en la prueba de hipótesis.	90
<b>Cuadro 5.</b> Datos de la muestra utilizados en la prueba de hipótesis.	93
<b>Cuadro 6.</b> Recomendaciones operacionales de la distribución de agua en la torre.	95
<b>Cuadro 7.</b> Recomendaciones operacionales del relleno.	96
<b>Cuadro 8.</b> Recomendaciones operacionales de los eliminadores de rocío.	97
<b>Cuadro 9.</b> Recomendaciones operacionales de los ventiladores.	98
<b>Cuadro 10.</b> Recomendaciones operacionales del reductor de velocidad.	99
<b>Cuadro 11.</b> Recomendaciones operacionales de las flechas de transmisión de potencia.	99
<b>Cuadro 12.</b> Recomendaciones operacionales de paredes, persianas y cuerpo de la torre.	99
<b>Cuadro 13.</b> Recomendaciones operacionales de la estructura de madera.	100
<b>Cuadro 14.</b> Recomendaciones operacionales del flujo de aire.	101
<b>Cuadro 15.</b> Recomendaciones operacionales del flujo de agua.	102
<b>Cuadro 16.</b> Recomendaciones operacionales de los ciclos de concentración.	104

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Representación esquemática de una torre de enfriamiento en contraflujo.	8
<b>Figura 2.</b> Relación entre las temperaturas de Agua y aire en una torre de enfriamiento.	9
<b>Figura 3.</b> Análisis psicrométrico del flujo de aire a través de una torre de enfriamiento.	10
<b>Figura 4.</b> Torre de enfriamiento evaporativa de contacto directo.	12
<b>Figura 5.</b> Tipos de relleno.	13
<b>Figura 6.</b> Torre de tipo atmosférico.	15
<b>Figura 7.</b> Torre de enfriamiento de tiro forzado.	17
<b>Figura 8.</b> Torre de enfriamiento de tiro inducido.	18
<b>Figura 9.</b> Torres de enfriamiento a contracorriente y corriente cruzada.	19
<b>Figura 10.</b> Relaciones de transferencia de calor y masa.	29
<b>Figura 11.</b> Diagrama de enfriamiento en contraflujo.	36
<b>Figura 12.</b> Método de la diferencia media logarítmica.	40
<b>Figura 13.</b> Valores de corrección $\delta h$ .	40
<b>Figura 14.</b> Método para el desarrollo de las curvas de desempeño.	41
<b>Figura 15.</b> Ejemplo de intersección de las curvas de rendimiento con la curva característica de la torre.	43
<b>Figura 16.</b> Diagrama del proceso indicando cambio en la aproximación.	43
<b>Figura 17.</b> Efecto de las variables de diseño en el tamaño del potencial.	50
<b>Figura 18.</b> Efecto de la variación de los requerimientos de desempeño sobre el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.	51
<b>Figura 19.</b> Efecto de la variación del bulbo húmedo en el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.	52

<b>Figura 20.</b> Efecto de la variación del rango en el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.	52
<b>Figura 21.</b> Torre a contracorriente gas-líquido.	55
<b>Figura 22.</b> Representación gráfica del Método de Newton-Raphson.	61
<b>Figura 23.</b> Panel de control del programa.	69
<b>Figura 24.</b> Diagrama de bloques explicando la opción Información.	69
<b>Figura 25.</b> Panel de control de la opción Datos de Entrada.	70
<b>Figura 26.</b> Diagrama de bloques explicando la opción Datos de Entrada.	71
<b>Figura 27.</b> Panel de control de la opción Teoría de Merkel.	72
<b>Figura 28.</b> Diagrama de bloques explicando la opción Teoría de Merkel.	72
<b>Figura 29.</b> Panel frontal de la opción Perfil de Temperatura 1.	73
<b>Figura 30.</b> Panel frontal de la opción Perfil de Temperatura 2.	74
<b>Figura 31.</b> Panel frontal de la opción Perfil de Humedad.	75
<b>Figura 32.</b> Panel frontal de la opción Resultados.	76
<b>Figura 33.</b> Panel frontal de la opción Parada.	76
<b>Figura 34.</b> Panel frontal de la opción Fallas.	77

## LISTA DE APENDICES

		<b>pág.</b>
Apéndice 1	Tratamiento de aguas.	112
Apéndice 2	Manejo de LabVIEW.	133

## LISTA DE ANEXOS

		<b>pág.</b>
ANEXO A	Prueba Chi-cuadrada de Bondad del Ajuste.	151
ANEXO B	Prueba del intervalo de confianza.	153
ANEXO C	Prueba de hipótesis.	155
ANEXO D	Puntos porcentuales de la distribución Chi-cuadrada.	157
ANEXO E	Puntos porcentuales de la distribución t.	159
ANEXO F	Código fuente de MATLAB.	161

**TITULO.** DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

**AUTORES.** BLANCA JOHANA CALDERÓN GODOY  
HELMER GEOBEL PINTO GALVIS\*\*

**Palabras Claves.** Torre de enfriamiento, tiro inducido, modelo operacional, modelo termodinámico, Matlab. Labview.

### RESUMEN

La herramienta propuesta permite el cálculo del perfil de temperatura para el agua, el perfil de temperatura para el aire, el perfil de humedad y la demanda térmica a contracorriente en una torre de enfriamiento de agua de tiro inducido a contracorriente.

Como un primer paso, se construye un modelo matemático, que rige el funcionamiento de una torre de enfriamiento de agua de tiro inducido a contracorriente que contiene un empaque de madera vertical. El modelo matemático estructurado contiene ecuaciones que describen los fenómenos de transferencia de masa, transferencia de calor, el balance de energía y la ecuación de equilibrio generada a partir de datos para el sistema aire-agua reportados en la literatura. En el modelo también se incluyen ecuaciones que modelan el comportamiento termodinámico de la torre partiendo de datos de entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a 1 atmósfera de presión.

Una vez conformado el modelo, este se resuelve numéricamente para cada uno de los empaques utilizados partiendo de las mismas condiciones de operación y diseño con el fin de obtener los resultados del modelo operacional, luego se obtiene la demanda térmica a contracorriente a partir de las condiciones de diseño. Por último, se generan diferentes datos de condiciones de operación con el fin de evaluar la demanda térmica a contracorriente para la herramienta y para el demo "CTI Toolkit" de Cooling Tower Institute.

De la solución numérica se obtuvo el calor removido por la torre, el porcentaje de agua perdido, la temperatura de agua fría, la temperatura del aire a la salida, la demanda térmica a contracorriente, los perfiles de temperatura para el agua y el aire y el perfil de humedad. Además, se obtiene que el empaque más eficiente es el de madera vertical y que la herramienta tiene una confiabilidad del 98% al compararla con el demo "CTI Toolkit" de Cooling Tower Institute.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

**TITLE .** DEVELOPING A TOOL FOR EVALUATING THE EFICIENCY OF A WATER-COOLING TOWER.\*

**AUTHORS.** BLANCA JOHANA CALDERÓN GODOY  
HELMER GEOBEL PINTO GALVIS\*\*

**KEY WORDS.** Cooling tower, induced shot, operational model, thermodynamic model, Matlab, Labview.

### **ABSTRACT**

The proposed tool permits the calculation of the temperature profile for water, the temperature profile for air, the humidity profile and the thermal demand to counterstream in a induced shot to counterstream water-cooling tower.

As a first sep, a mathematical model wich rules the functionig of induced shot to counterstream water-cooling tower which countains a wooden vertical seal-is constructed. The structured mathematical model contains equations describing the phenomena of mass transference, heat transference, energy balance and the equation of generated equilibrium from reported-in-literature data for the air-water system. Equations modeling the thermodynamic behavior of the tower starting from data of entalpy from the mixture air-water steam at a presure or 1 atmosphere are included in the in the model.

Once the model is constituted, it is numerically solved for each of the utilized seals starting from the same conditions of operation and desing with the purpose of obtaining the results of the operational model, then the thermal demand to counterstream according to the conditions of design. Finally, several data about the conditions of operation are generated with the purpose of evaluatig the thermal demand at counterstream for the tool and for demo "CTI Toolkit" from the Cooling Tower Institute.

From the numeric solution the removed heat of the tower is obtained, the percentage of lost water the temperature of cold water, the air temperature in the exit, the thermal demand to counterstream, the temperature porfiles for water and air the humidity profile were obtained. Also, it is obtained that the most efficient seal is the wooden vertical one and that the tool has a reliability of 98%, when comparing it with demo "CTI Toolkit" from Cooling Tower Institute.

---

\* Grade thesis.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. Department of Chemical Engineering. Chaiman. M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

## GLOSARIO

**AGUA DE CIRCULACIÓN.** Cantidad de agua caliente que entra a la torre de enfriamiento.

**AGUA DE REPUESTO.** Cantidad de agua añadida al agua de circulación para reemplazar el agua que se pierde en el sistema por la evaporación, el arrastre, la purga, etc. (Unidad: metros cúbicos por hora, m<sup>3</sup>/h o Galones por minuto GPM)

**AIRE ENTRANTE.** Aire de la atmósfera que rodea a la torre de enfriamiento, el cual entra a través de las persianas en una torre de tiro inducido o es el aire descargado en la torre por un ventilador en una torre de tiro forzado.

**AIRE EXHAUSTO.** Es la mezcla de aire que está asociada con el vapor de agua que deja la torre. Unidad: metros cúbicos por hora, (m<sup>3</sup>/h) o pies cúbicos por minuto (CFM).

**ALGA.** Especie de planta la cual generalmente requiere de la luz del sol y aire para su existencia.

**AMBIENTE.** Término que se refiere a la atmósfera la cual es adyacente a la torre de enfriamiento pero que no afecta su operación.

**APROXIMACIÓN.** Es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura del bulbo húmedo, está dada en °C ó °F.

**ARRASTRE.** Es la pérdida de agua como gotas de agua mezcladas con aire exhausto. Unidad: % de agua de circulación.

**BARRA DE SALPIQUEO.** Componente horizontal el cual proporciona una superficie de rebote o salto de agua (salpique). Se fabrica de madera tratada o PVC. Su perfil se presenta en diferentes diseños.

**BOQUILLAS.** Dispositivo utilizado para controlar la distribución del agua en la parte superior de una torre de enfriamiento. Las boquillas están diseñadas para suministrar agua en forma de rocío (spray) si es a presión o de chorro si es por gravedad.

**BORDE DEL DEPÓSITO.** Nivel superior de la pared de retención del depósito de agua fría; usualmente es el punto de referencia para las medidas de elevación en una torre de enfriamiento.

**BTU. (BRITISH THERMAL UNIT).** Es la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de una libra de agua en 1 ° F

**CABEZAL.** Tubo principal que conduce el agua a cada celda o a la tubería del sistema de distribución en cada celda.

**CÁMARA PLENA.** Espacio cerrado entre los eliminadores y el piso del ventilador en una torre de tiro inducido, o el espacio cerrado entre el ventilador y el relleno en torres de tiro forzado.

**CAPACIDAD.** La capacidad térmica es el flujo o gasto (metros cúbicos por hora, m<sup>3</sup>/hr o galones por minuto GPM) que puede manejar una torre de enfriamiento para un rango específico, una temperatura de bulbo húmedo y una aproximación determinada.

**CARCAMO.** Porción del depósito de más bajo nivel en la cual el agua fría de circulación fluye normalmente a una conexión de succión.

**CARGA DE CALOR.** Calor removido del agua de circulación en la torre de enfriamiento. Esta puede ser calculada de la siguiente manera:  $GPM \times 500 \times \text{Rango } (^\circ F)$ . Unidad (Btu /h).

**CELDA.** La subdivisión más pequeña de una torre de enfriamiento, la cual puede funcionar de manera independiente. Esta limitada por paredes exteriores o particiones. Cada celda puede tener uno o más ventiladores o cilindros de ventilador y uno o más sistemas de distribución.

**CILINDRO DEL VENTILADOR.** Estructura cilíndrica modificada en la que en su interior opera el ventilador. Fabricado de concreto o resina poliéster reforzada con fibra de vidrio.

**CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DEL LUGAR.** Como son la altitud, la humedad relativa, vientos dominantes y norte geográfico.

**CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.** Condiciones del agua, composición, sólidos disueltos y otros.

**CONTRAFLUJO.** Es el flujo de aire que viaja en dirección opuesta a la caída del agua a través de la torre de enfriamiento.

**CUBIERTA.** Elemento vertical localizado en la pared lateral o pared final de la torre de enfriamiento. Fabricado de asbesto cemento, fibra de vidrio o metal.

**DEPÓSITO DE DISTRIBUCIÓN.** Elemento estructural poco profundo localizado en la parte superior de la torre de enfriamiento para distribuir el agua caliente de circulación a las zonas de contacto de aire.

**DEPÓSITO DE AGUA FRÍA.** Elemento estructural localizado en la parte inferior de la torre de enfriamiento para recibir el agua fría de la torre y dirigirla a una línea de succión o un cárcamo. Los materiales de fabricación pueden ser madera tratada, metal, fibra de vidrio o concreto.

**DOBLE FLUJO CRUZADO.** Es una torre de enfriamiento que consta de dos secciones de relleno y una cámara plena la cual es común para ambas secciones de relleno. A través de cada sección de relleno cruza el flujo de aire en un plano perpendicular con respecto a la caída de agua.

**ELIMINADOR DE ARRASTRE.** Es un ensamble fabricado de madera, metal o PVC el cual sirve para remover la humedad localizada en la zona de descarga de aire.

**ENSAMBLE EQUIPO MECÁNICO.** Conjunto de componentes mecánicos que transmite potencia al ventilador, consiste normalmente de motor eléctrico, flecha de transmisión y reductor de velocidad.

**ENTRADA DE AIRE.** Área abierta en una torre de enfriamiento a través de la cual el aire entra a la torre de enfriamiento. En una torre de tiro inducido esta área es la cara de persianas o “louvers”.

**FLECHA DE TRANSMISIÓN.** Elemento mecánico que incluye coples flexibles diseñado para transmitir el torque del motor a un reductor de velocidad. Fabricada en acero galvanizado, acero inoxidable o fibra de carbón.

**FLUJO CRUZADO.** Flujo de aire que pasa a través del relleno en un plano perpendicular con respecto a la caída de agua.

**FLUJO DE AIRE.** Kilogramos ó libras de aire seco que fluyen a través de un metro cuadrado ó pie cuadrado de un área de relleno en un minuto, o el total de un pie cúbico por minuto de una mezcla de aire medido en la descarga de aire en una torre de enfriamiento.

**FLUJO DE AGUA.** Variable elemental; es la cantidad de agua que va a circular por la torre. Las unidades comunes en que se da son m<sup>3</sup>/h (galones por minuto GPM en el sistema inglés). Esta variable es fijada por el cliente o asesor y depende del proceso de que se trate.

**GUARDAVENTILADOR.** Malla protectora instalada en la parte superior del cilindro del ventilador.

**MALLAS DE SOPORTE.** Conjunto de componentes que dan soporte al relleno. Este componente es exclusivo de las torres de flujo cruzado, ya que las de contra flujo no lo necesitan, los materiales de fabricación más usados son fibra de vidrio, acero recubierto de PVC y acero inoxidable.

**ORIFICIO DE DISTRIBUCIÓN.** Dispositivo utilizado para convertir en gotas el flujo de circulación y distribuir de manera uniforme el agua sobre el área húmeda en la torre de enfriamiento.

**PARED FINAL.** Pared localizada al final de la estructura. Para torres de flujo cruzado es siempre la pared sólida y que no lleva “louvers” o persianas.

**PARTICIÓN.** Pared interior que subdivide a la torre de enfriamiento en celdas.

**PÉRDIDAS DE EVAPORACIÓN.** Agua evaporada del agua de circulación en el proceso de enfriamiento. Unidad: % del agua de circulación.

**PERSIANAS (LOUVERS).** Ensamblajes instalados en las entradas de aire de la torre de enfriamiento para eliminar el salpique de agua.

**PSICRÓMETRO.** Instrumento utilizado principalmente para la medición de la temperatura de bulbo húmedo. Puede ser manual o de aspiración mecánica.

**PURGA.** Porción de agua que se retira del sistema de enfriamiento para controlar las concentraciones de sales u otras impurezas del agua de circulación. Unidad: % del agua de circulación

**RANGO.** Diferencia entre las temperaturas de agua caliente y agua fría, está dada en °C ó °F.

**RECIRCULACIÓN.** Este término describe la condición en la cual una porción de la descarga de aire entra a la torre y se combina con el aire fresco. La cantidad de recirculación por el diseño de la torre, la localización de la torre y las condiciones atmosféricas. El efecto se traduce en el incremento de temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

**REDUCTOR DE VELOCIDAD.** Dispositivo formado por engranes y rodamientos que tiene por objeto reducir las revoluciones de un motor eléctrico a los requerimientos de velocidad del ventilador.

**RELLENO.** Parte del sistema interno de la torre que puede consistir en barras de salpiqueo u hojas verticales de diferentes configuraciones con objeto de afectar la superficie de transferencia entre el agua de circulación y el aire que fluye hacia la torre de enfriamiento.

**SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.** Son todas las partes de la torre de enfriamiento comenzando con la conexión de entrada, que reparten el agua caliente a la torre en las zonas donde el agua esta en contacto con el aire.

**SOPORTE DE EQUIPO MECÁNICO.** Elemento estructural que proporciona una base estable, nivelada y de fijación a los elementos del equipo mecánico

**TEMPERATURA DEL AGUA CALIENTE.** Es la temperatura del agua en circulación al entrar a la torre de enfriamiento; está dada por las condiciones del proceso y también debe ser fijado por el cliente o el asesor, dependiendo del proceso. Se da en °C o °F

**TEMPERATURA DE AGUA FRÍA.** Es la temperatura del agua en circulación al salir de la torre y al igual que la anterior, está determinada por el proceso en cuestión, también se da en °C o °F.

**TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.** Es la temperatura de equilibrio dinámico que se alcanza en la superficie del agua cuando el flujo del calor transferido a la superficie por convección se iguala con el flujo de masa transferida fuera de la superficie, es decir, es la temperatura que se alcanza en un termómetro cubierto con una mecha humedecida en forma constante y es la temperatura teórica del agua fría que se puede alcanzar con una torre infinita, se mide en °C o °F.

**TEMPERATURA DE BULBO SECO.** Es la temperatura a la entrada o adyacente a la torre de enfriamiento medida con un termómetro de bulbo seco.

**TUBO DE PITOT.** Instrumento que opera bajo el principio de diferencial de presiones. El uso principal en torres de enfriamiento es la medición del flujo de agua de circulación.

**VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO.** Válvula controlada manualmente, generalmente localizada en la línea de alimentación de agua caliente.

**VÁLVULA FLOTADORA.** Válvula que actúa por medio de un flotador generalmente utilizada para controlar el agua de repuesto.

**VENTILADOR.** Dispositivo para movimiento de aire en torres de enfriamiento de tiro mecánico. Fabricado con aspas de aluminio o de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio.

## INTRODUCCIÓN

Las máquinas y los procesos industriales generan enormes cantidades de calor que deben ser continuamente disipadas si se quiere que esas maquinas y procesos operen eficientemente. Las torres de enfriamiento permiten el control del proceso de enfriamiento mediante la evaporación controlada, reduciendo así la cantidad de agua consumida. Esto se logra cuando a la gota que se pone en contacto con el aire, se le evapora la película exterior, requiriendo para este proceso de absorber calor, el cual se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente. Es decir, el enfriamiento se realiza tanto por calor sensible (diferencia de temperatura entre el aire y el agua) como por calor latente (cambio de estado físico del agua a vapor). El objeto que se persigue en la torre es que la gota esté el mayor tiempo posible en contacto con el aire, lo cual se logra con la altura de la misma y además interponiendo obstáculos (el relleno) que la van deteniendo y al mismo tiempo la van fragmentando facilitando más el proceso evaporativo.

Al igual que en los intercambiadores naturales, las variaciones meteorológicas afectan la “performance” de la torre. Las variables meteorológicas cuyo impacto es más importante en el funcionamiento de la torre son la temperatura y la humedad relativa del aire; en menor medida la presión atmosférica y la velocidad y dirección de los vientos pueden ocasionar efectos notables.

Es importante reconocer que cerca de la mitad de la energía utilizada en una planta de procesos químicos es usada en ciclos de calentamiento y enfriamiento, por lo que estos mismos ciclos deben ser producto de un análisis profundo en sus condiciones de operación, funcionamiento de equipos y sistemas de control, debido al gran potencial de ahorro energético que representan. Además, en estos momentos, el costo del agua y la energía utilizada en la fabricación ejerce gran influencia sobre el valor final del producto terminado, por tanto, cualquier ahorro en el consumo de agua y energía que se pueda llevar a cabo en una planta de procesos químicos, traerá consigo no solamente beneficios

desde el punto de vista ambiental (reducción en los costos de operación y manufactura del producto).

La mayoría de las plantas de procesos químicos que hoy se encuentran en operación, fueron diseñadas y construidas en momentos en que los combustibles, fuente prevaeciente y dominante de energía, mantenían precios estables en el mercado y los recursos naturales eran considerados como inagotables, por lo que, las consideraciones de ahorro de agua y energía no hacían parte fundamental de los criterios de diseño de equipos y procesos. En algunos casos, el agua era considerada un recurso libre (no tenía precio ni estaba sujeta a un mercado) en ciertos análisis económicos.

## 1. SICROMETRÍA

La sicrometría estudia las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua y también por analogía los principios que determinan las propiedades y el comportamiento de las mezclas formadas por los llamados gases permanentes y los gases condensables a presión constante.

Si un gas puro o una mezcla gaseosa, se encuentra en contacto con un líquido, el gas adquiere cierta cantidad del vapor del líquido. Al durar el contacto un tiempo se logra el equilibrio después del cual ya no se vaporiza más líquido; en estas condiciones el gas está saturado con el vapor.

El vapor contenido en la fase gaseosa y que también está presente en la fase líquida es el componente condensable y nos referimos a él como vapor (A); el gas permanente es el componente no condensable y lo citaremos únicamente como (B).

Asumiendo que el comportamiento de la mezcla cumple con las leyes de los gases ideales, ya que es bajo el contenido del componente condensable en la mezcla gaseosa, los cálculos especiales para las soluciones en ambas fases se harán partiendo de las leyes de Raoult y Dalton. La presión total ejercida por la mezcla será igual a la suma de las presiones parciales del gas y del vapor:

$$P = P_A + P_B \quad (1)$$

### 1.1 HUMEDAD ABSOLUTA O SATURACIÓN ABSOLUTA

Es la relación entre la masa del vapor condensable y la masa del gas libre de vapor contenido en una masa gaseosa.

$$Y' = \frac{m_a}{m_B} = \frac{M_A N_A}{M_B N_B} = Y \frac{M_A}{M_B} = \frac{P_A}{P - P_A} \frac{M_A}{M_B} \quad (2)$$

En términos de la mezcla agua-aire es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire a una concentración dada, usualmente expresada en libras de agua por libras de aire seco. Tomando para el aire un peso molecular promedio de 28.96 Kg/Kmol.

$$Y' = \frac{18.02}{28.96} \frac{P_A}{P - P_A} = 0.622 \frac{P_A}{P - P_A} \quad (3)$$

Para el caso de un gas saturado por el vapor, se sustituye la presión parcial del vapor por la tensión del vapor o presión de vapor correspondiente a la saturación.

Para el sistema aire-agua:

$$Y'_s = 0.622 \frac{P^s}{P - P^s} \quad (4)$$

## 1.2 HUMEDAD RELATIVA O SATURACIÓN RELATIVA

Es el cociente entre la presión parcial del vapor y su presión de vapor a la misma temperatura.

$$H_r = \frac{P_A}{P^s} \quad (5)$$

Expresada en porcentaje tenemos

$$\%H_r = \frac{P_A}{P^s} 100 \quad (6)$$

### **1.3 PUNTO DE ROCÍO**

Se denomina punto de rocío de una masa de gas húmedo a la temperatura a la cuál es preciso enfriarla para alcanzar la saturación a presión constante. El punto de rocío de un gas saturado es igual a la temperatura del gas. Es también una medida indirecta de la presión de vapor y de la humedad absoluta si conocemos la presión total.

### **1.4 TEMPERATURA DE BULBO SECO**

Es la temperatura real de la mezcla gas-vapor que se obtiene colocando el bulbo del termómetro seco en contacto con el gas después de alcanzado el equilibrio.

### **1.5 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO**

Es la temperatura estacionaria alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla gas-vapor no saturada. Para determinar esta temperatura se recubre el depósito del termómetro con un algodón o envoltura parecida, empapada con líquido del vapor presente con el gas seco, y haciendo pasar rápidamente a su alrededor una corriente del gas no saturado; parte del líquido se evapora, desciende la temperatura y cuando la del algodón húmedo es inferior a la de la mezcla gas-vapor se inicia cierta transmisión de calor. La temperatura del termómetro húmedo es la que marca el termómetro cuando llega el estado estacionario, o sea que la temperatura del bulbo húmedo marque el límite de enfriamiento.

El calor cedido a la envoltura por el gas es igual al incremento de entalpía del líquido vaporizado. [5]

## **2. TORRES DE ENFRIAMIENTO**

### **2.1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO**

Las torres de enfriamiento son los equipos más económicos y eficientes para enfriar grandes cantidades de agua, al permitir el íntimo contacto de esta con el aire, utilizando una gran superficie de transferencia de masa y calor denominada empaque o relleno. Las torres reciben por la parte superior el fluido caliente proveniente de los usuarios del sistema de enfriamiento y posteriormente es distribuida sobre el empaque uniformemente con la ayuda de un sistema de boquillas o dispersores.

Este líquido caliente, desciende a través del relleno de la torre, mientras que, simultáneamente una corriente de aire asciende por el mismo, generándose así diferencias de temperatura y contenido de humedad entre los dos fluidos, que se traducen en la presencia de fenómenos simultáneos de transferencia de masa y calor. Estos fenómenos traen como resultado el calentamiento y humidificación del gas y el enfriamiento del agua.

Uno de los más importantes aspectos en la operación de una torre de enfriamiento es el tipo de empaque utilizado, pues es este directamente quien determina el área de contacto entre el agua y el aire, y por lo tanto el coeficiente de transferencia de masa y calor. Existen en el mercado, varios tipos de empaques para torres de enfriamiento; desde los listones de madera y lechos de partículas amorfas en cerámica, hasta los empaques de tipo película, que poseen grandes ventajas, como mayor área de transferencia de masa, menor caída de presión y bajo peso.

La calidad del agua que circula en la torre va cambiando con el tiempo debido a que el enfriamiento por evaporación hace que la concentración de sólidos en el agua aumente, pudiendo afectar la operación de los equipos involucrados en el sistema. Estos contaminantes provienen del aire, incrustaciones en la tubería, crecimiento microbiológico

en las torres y ensuciamiento de los equipos. Por lo tanto, se hace necesario que una parte del agua del sistema de enfriamiento sea purgada y repuesta continuamente, con el fin de mantener una concentración de sólidos en el nivel apropiado que permita operar los equipos sin inconvenientes. Además, la pérdida de agua en el sistema de enfriamiento, ocasionada por la purga continua y el arrastre de gotas de agua a través de la corriente de aire que abandona la torre, hace necesario adicionar continuamente una cantidad de agua fresca al sistema, denominada agua de reposición. [10]

## **2.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO**

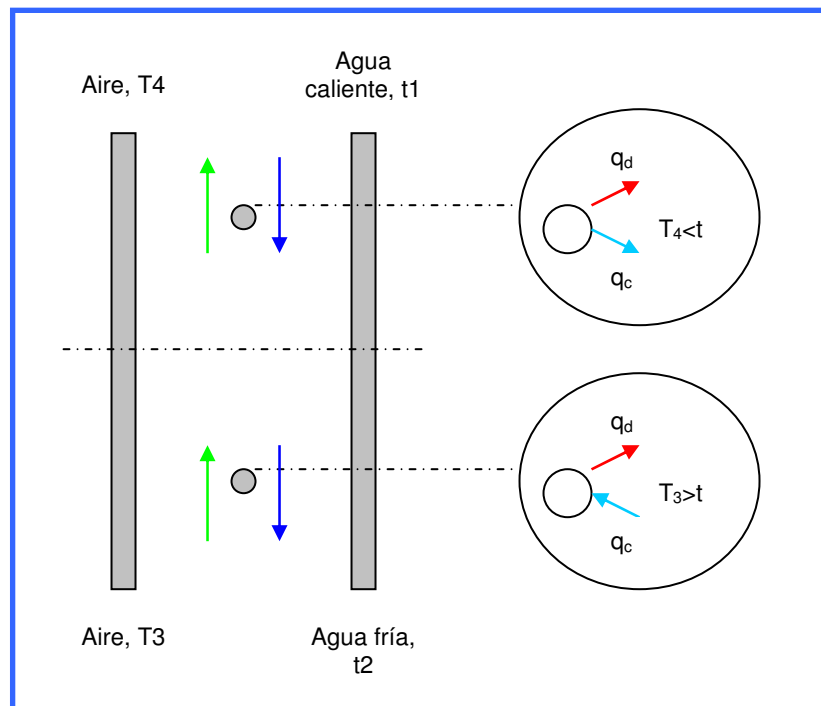
Una torre de enfriamiento es un equipo que utiliza la transferencia de calor y masa para enfriar. Consiste básicamente de una cámara en la que se deposita un relleno. El agua a ser enfriada se bombea hasta la parte superior de la torre donde se distribuye en forma de gotas por boquillas de rociado, de esta manera se expone una gran superficie de agua al contacto directo con una corriente de aire atmosférico.

El aire atmosférico es utilizado como medio enfriante por evaporación y es circulado por ventiladores, corrientes convectivas, o corrientes naturales de viento. En una torre de enfriamiento el agua caliente es enfriada al entregar calor por difusión y convección a una corriente de aire frío. La transferencia de calor por difusión es el calor transferido debido a la energía necesaria para el cambio de estado de líquido a gaseoso que experimenta una porción del agua que circula por la torre. La otra, la transferencia de calor por convección, se sucede por la diferencia de temperaturas entre el agua que fluye y la corriente de aire. Debido a que existe un contacto directo entre los dos fluidos, se eliminan así ciertas resistencias al flujo de calor, lo que conduce a que las torres de enfriamiento operen con un rendimiento térmico uniforme, y a que logren coeficientes de transferencia de calor mayor que los equipos tubulares usuales.

En una torre de enfriamiento, el agua caliente se enfría a medida que pasa a través de la torre, y su temperatura puede descender por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada, pero no más bajo que el bulbo húmedo de este aire. Considere la torre dividida en dos porciones (figura 1); en la porción superior el agua caliente se pone en contacto con el aire de salida que es más frío que el agua. En este caso la presión parcial

del agua fuera del líquido es mayor que la del aire de salida, mientras que la temperatura del agua es también mayor que la del aire de salida. Ambos potenciales sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando, por lo tanto, la entalpía del aire. En esta forma, y dependiendo de la cantidad de aire y de la rata de evaporación, es posible que la temperatura del agua descienda debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada antes de alcanzar el fondo de la torre por el que entra el aire. El hecho de que ambos potenciales puedan operar adiabáticamente en la misma dirección mientras saturan el aire, hace posible que las torres de enfriamiento sean tan efectivas para enfriar el agua. En la última porción de la torre, el agua puede poseer una temperatura igual o menor que la temperatura de bulbo seco del aire con que se pone en contacto, y la transferencia de calor sensible y de masa están en direcciones opuestas. El límite al que la temperatura del agua de salida puede llegar en una torre de enfriamiento, es el que está adiabáticamente en equilibrio con el aire de entrada, es decir, el bulbo húmedo.

**FIGURA 1.** Representación esquemática de una torre de enfriamiento en contraflujo.

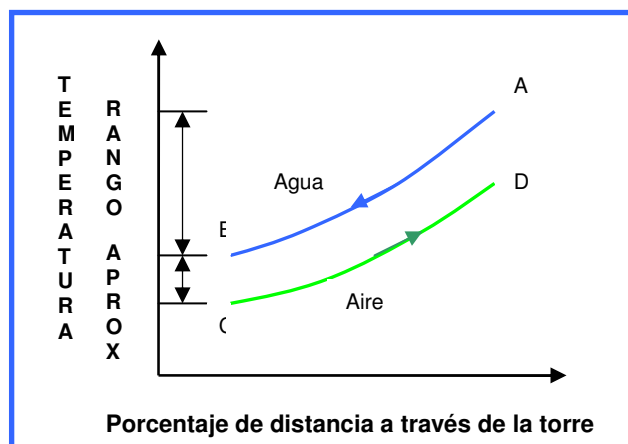


La figura 2 muestra la variación de temperatura de los flujos de aire y agua a medida que atraviesan en contraflujo la torre de enfriamiento. Las curvas indican la caída en la temperatura del agua (del punto A al punto B) y la alteración de la temperatura de bulbo húmedo del aire (del punto C al punto D) en su respectivo paso a través de la torre.

La diferencia de temperatura entre el agua de entrada y salida de la torre de enfriamiento (A-B) es el rango. Para un sistema operando en estado estable, el rango es la misma elevación de temperatura que sufre el agua en el intercambiador de calor; claro está, siendo iguales el flujo de agua que pasa por la torre y el intercambiador. De acuerdo con lo anterior el rango es determinado por la carga térmica y el flujo de agua, no por el tamaño o capacidad de la torre de enfriamiento.

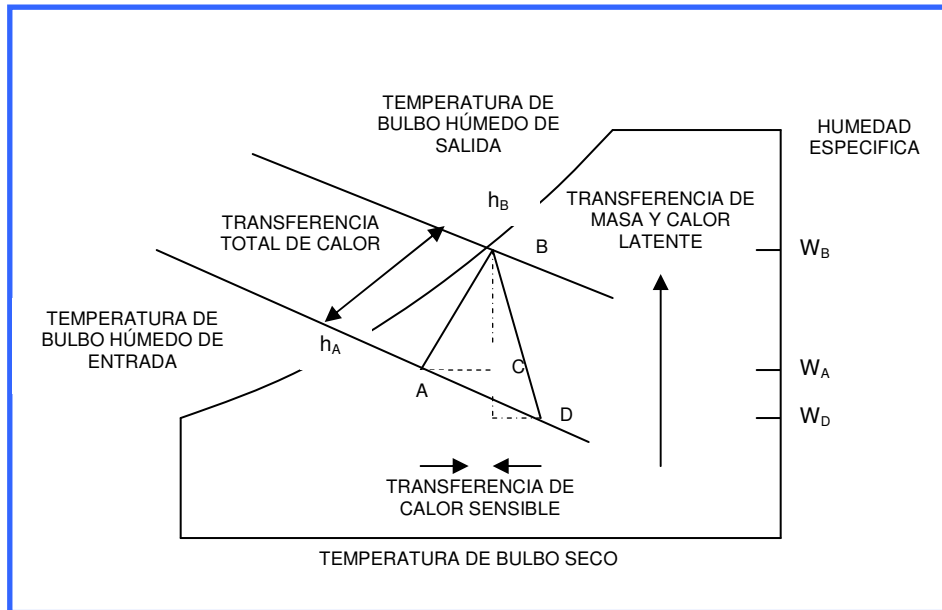
La diferencia entre las temperaturas del agua de salida y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada (B-C) se denomina aproximación al bulbo húmedo o simplemente aproximación de la torre de enfriamiento. La aproximación es una función de la capacidad de la torre de enfriamiento y entre más grande sea ésta producirá una aproximación más cercana (agua de salida más fría) para unas condiciones de carga térmica, rata de flujo, u estado del aire de entradas dadas. Por consiguiente, la cantidad de calor transferido a la atmósfera por la torre es siempre igual a la carga térmica impuesta; mientras el nivel de temperatura al cual el calor es transferido, es determinado por la capacidad térmica de la torre y la temperatura del bulbo húmedo del aire de entrada.

**FIGURA 2.** *Relación entre las temperaturas de agua y aire en una torre de enfriamiento.*



El rendimiento térmico de una torre de enfriamiento depende principalmente de la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada. La temperatura de bulbo seco y la humedad relativa, tomadas de forma independiente, tienen un efecto insignificante en el rendimiento térmico de las torres de enfriamiento de tiro mecánico, pero si afecta la rata de agua evaporada. Un análisis sicrométrico del aire que atraviesa la torre ilustra este efecto (figura 3). El aire entra a condiciones ambientales (punto A), absorbe calor y humedad del agua y sale en el punto B a condiciones de saturación (cuando la carga térmica es muy pequeña, el aire puede no salir saturado). La cantidad de calor transferido del agua al aire es proporcional a la diferencia de entalpías entre el aire de entrada y el de salida ( $h_B - h_A$ ). El cambio en la entalpía del aire puede ser determinado como función del cambio en la temperatura del bulbo húmedo, debido a que las líneas de entalpía constante corresponden casi exactamente a las líneas de temperatura del bulbo húmedo constante.

**FIGURA 3.** Análisis sicrométrico del flujo de aire a través de una torre de enfriamiento.



El vector AB en la figura 3 puede ser dividido en dos componentes, AC y CB. La componente AC representa el calentamiento sensible del aire (enfriamiento sensible del agua), mientras que la componente CB representa el calentamiento latente del aire (enfriamiento latente del agua). Si las condiciones del aire de entrada cambian a las del

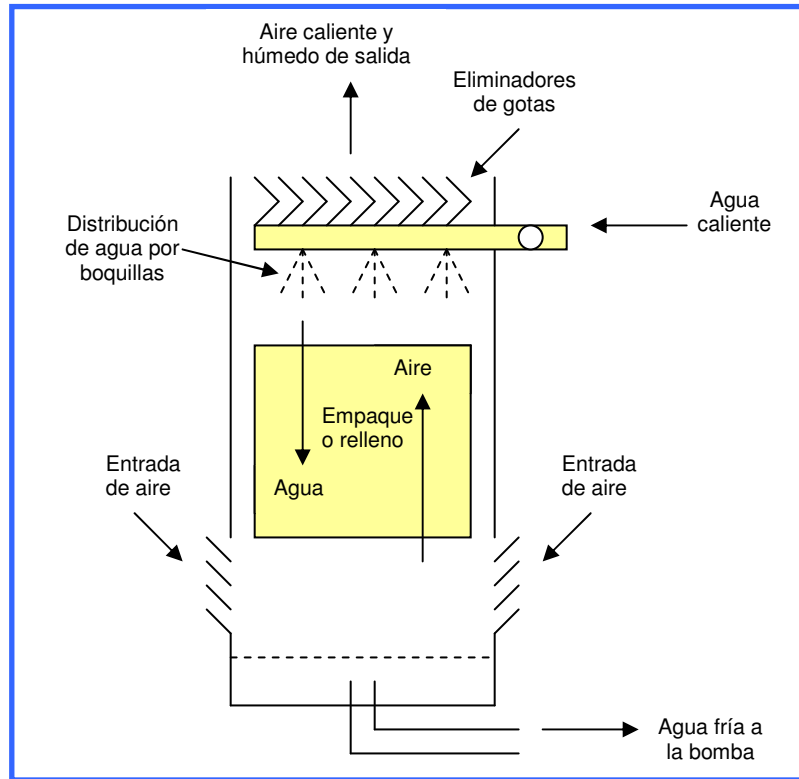
punto D; a la misma temperatura de bulbo húmedo pero a una mayor temperatura de bulbo seco; el calor total transferido permanece igual, pero las componentes sensible y latente cambian. AB representa el enfriamiento sensible del agua por evaporación y el calentamiento sensible y latente del aire. El caso BD representa de la misma manera, el enfriamiento del agua por evaporación, pero también el calentamiento latente y un enfriamiento sensible del aire.

La transferencia de masa (evaporación) ocurre solamente en la porción latente del proceso de transferencia de calor y es proporcional al cambio en la humedad específica. Debido a que la temperatura de bulbo seco o humedad relativa afecta la razón de calor sensible a latente, esta también afecta la tasa de evaporación. En la figura 3, la tasa de evaporación es menor en el caso AB ( $W_B - W_D$ ), debido a que la transferencia de calor latente (transferencia de masa) representa una porción más pequeña de la total. Esto a causa de que en el proceso DB, el calor sensible y el calor latente tienen direcciones opuestas, en cambio en el caso AB, los calores fluyen en la misma dirección. Entonces, para la misma carga de agua de enfriamiento, la cantidad de evaporación depende de la cantidad de calentamiento o enfriamiento sensible del aire. [8], [17]

### **2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO**

El criterio básico para la clasificación de las torres de enfriamiento es la existencia o no de una superficie de separación entre el agua y el aire. Así podemos considerar la existencia de contacto directo (figura 4) y torres de contacto indirecto. Las torres en contacto indirecto tienen dos circuitos de flujo separados. El circuito externo en el cual el agua es expuesta al aire a medida que cae sobre los tubos y un circuito interno en el cual el fluido a ser enfriado circula dentro de un banco de tubos. [2]

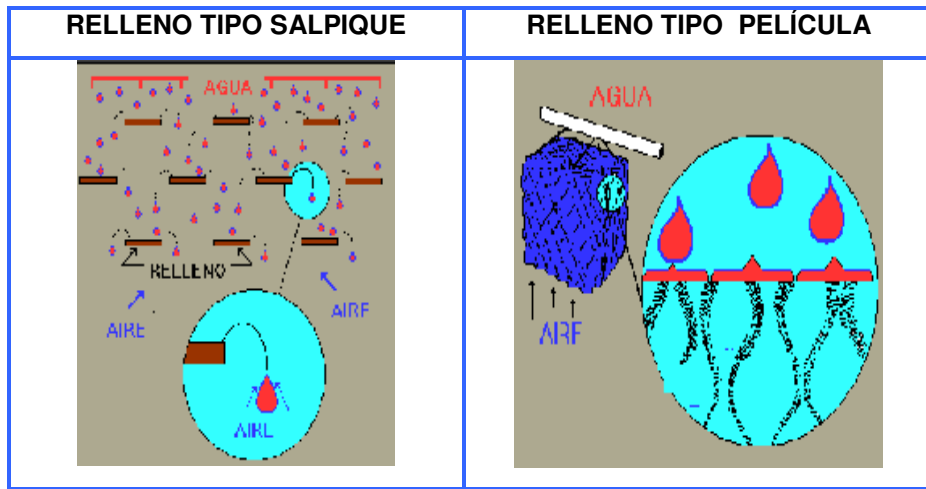
**FIGURA 4.** Torre de enfriamiento evaporativa de contacto directo.



La eficiencia de una torre de enfriamiento depende de la cantidad de superficie de agua expuesta a una corriente de aire, y para mejorar esta, la torre puede disponer de un sistema de rocío y un relleno; el sistema de rocío cuya finalidad es producir pequeñas gotas de agua, a medida que ésta pasa a través de boquillas, permite alcanzar una mayor eficiencia por unidad de volumen del equipo; el otro elemento es el empaque o relleno cuya función es aumentar la superficie disponible en la torre ya sea distribuyendo el líquido sobre tal superficie o retardando la caída de las gotas a través del aparato.

Los tipos de relleno más usados y que podemos apreciar en la figura 6 son: el empaque tipo salpique (splash) y el tipo película.

FIGURA 5. Tipos de relleno.[23]



El primero maximiza el área de contacto y el tiempo de caída al hacer que el agua caiga en forma de cascada a través de sucesivos travesaños arreglados de forma intercalada para que las gotas choquen sucesivamente contra el travesaño inferior. Este tipo de relleno se utiliza generalmente para grandes torres de enfriamiento y se fabrica en madera.

El empaque tipo película logra el mismo efecto al forzar el agua a fluir sobre delgadas láminas ubicadas verticalmente muy cerca una de la otra. Este tipo de relleno se hace más eficiente, se fabrica en PVC y son utilizados para torres de tamaños pequeños y medianos.

Cualquiera de los tipos de relleno se puede utilizar tanto en torres de contraflujo como en torres de flujo cruzado. En cuanto al rendimiento térmico se ha encontrado que las torres con empaque tipo película son más compactas; sin embargo el tipo salpique es menos sensible al sistema de distribución de agua y al aire. [17]

**2.3.1 Tipos de torres de enfriamiento de contacto directo:** este tipo de torres de enfriamiento involucra un contacto directo entre el agua caliente y la atmósfera, transfiriendo de este modo toda la carga térmica impuesta hacia la atmósfera.

### 2.3.1.1 Torres de tiro no mecánico

- **Naturalmente aspiradas:** este tipo de torres realiza la succión del aire gracias al rociado por densidad diferencial y no contienen empaque o relleno ni equipo mecánico (ventilador). El efecto de aspirado producido por el sistema de rociado, ya sea vertical u horizontalmente induce una corriente de aire en flujo paralelo a través de la torre. Debido a que las velocidades del aire (entrada y salida) son relativamente bajas estas torres son susceptibles de efectos adversos debido al viento; como consecuencia son normalmente usadas para satisfacer sistemas que requieran bajo costo y cuando las temperaturas de operación no son críticas.
- **Torres de chimenea (hiperbólicas):** este tipo de torres ha sido utilizado principalmente para instalaciones de centrales de gran potencia (asociadas con centrales nucleares). El modo de transferencia de calor puede ser por contraflujo, flujo cruzado o paralelo; el aire es inducido a la torre por diferencia en su densidad, las cuales existen entre el aire de chimenea ligeramente húmedo y caliente y el aire atmosférico externo.

Estas torres deben ser altas y de sección transversal grande. Justifican su alto costo inicial y cargos fijos con la reducción en requerimiento de potencia auxiliar (denominación de la energía del ventilador) eliminación de la recirculación, y por el fenómeno de niebla; el material comúnmente usado para la construcción de chimeneas ha sido concreto reforzado con acero. [13]

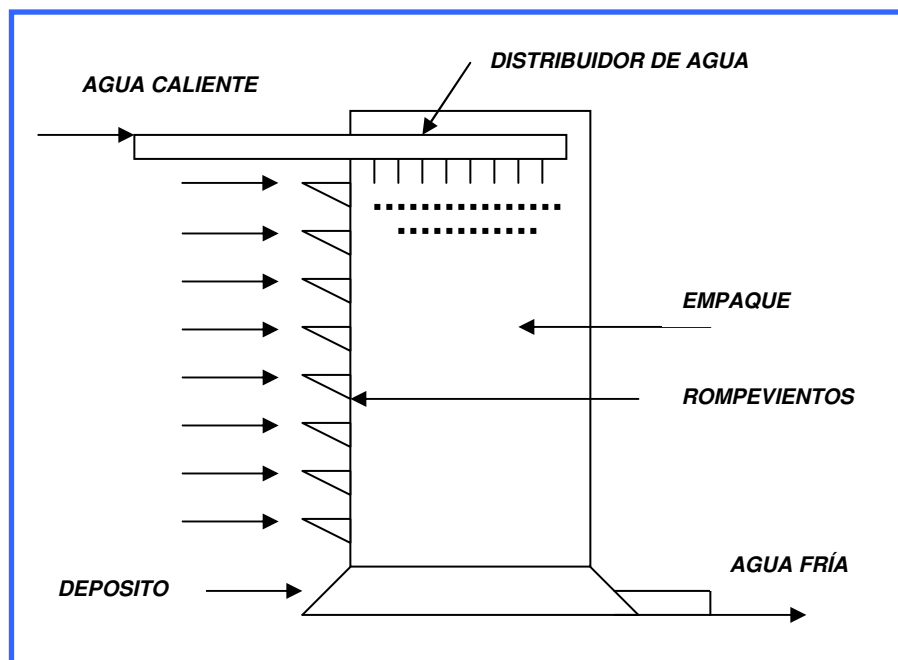
- **Torres de tipo atmosférico (figura 6):** este tipo de torres aprovecha las corrientes atmosféricas de aire. El aire penetra a través de los rompevientos en una sola dirección, cambiando con la estación del año y las condiciones atmosféricas; puesto que las corrientes atmosféricas penetran a todo lo ancho de la torre, éstas se hacen muy angostas en comparación con otros tipos, y deben ser muy largas para tener una capacidad igual.

Algunas desventajas son:

- Las pérdidas por arrastre son mayores que en otros tipos de torres.
- Utiliza los potenciales ineficientemente ya que opera en flujo cruzado.
- Costo inicial alto.
- No se pueden obtener aproximaciones muy cercanas a la temperatura de bulbo húmedo.
- Cuando las velocidades del viento son bajas deben dejar de operarse.

Una ventaja es que elimina el costo del ventilador que deben llevar las torres de tiro mecánico. [18]

**FIGURA 6.** Torre de tipo atmosférico.



**2.3.1.2 Torres de tiro mecánico:** este tipo de torres se caracteriza por poseer un ventilador el cual impulsa grandes cantidades de aire reduciendo la relación de líquido gas e incrementando la eficiencia y manejando a su vez mayores cargas térmicas con torres más compactas de sección transversal y altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la

temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de aproximación muy pequeños (hasta de 1 o 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 o 4 °C). También proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. [18]

De acuerdo a la ubicación del ventilador las torres de tiro mecánico pueden ser:

- **De tiro forzado:** en este tipo de torres el ventilador se ubica en el fondo de la torre forzando el aire a fluir y lo descarga en la parte superior (figura 7).

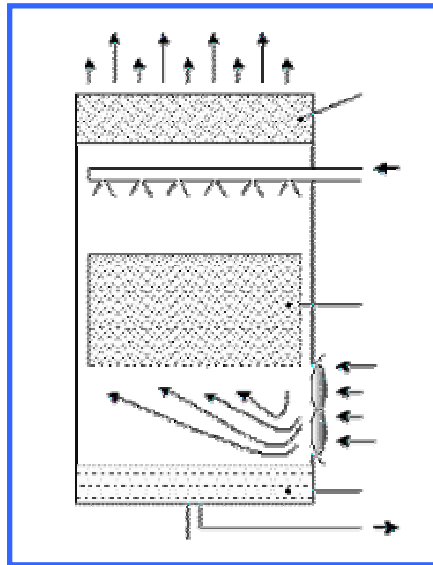
Sus principales ventajas son:

- Necesitan una mayor área que las torres de tipo atmosférico.
- Mayor eficiencia que las de tiro no mecánico.
- El soporte del equipo mecánico se ubica en el nivel del suelo, lo cual provee una mayor estabilidad y requiere una estructura interna menor.

Entre las desventajas se incluyen:

- El costo y mantenimiento de las partes móviles (equipo mecánico: ventilador, reductor de velocidad)
- Baja velocidad de aire a la salida.
- Recirculación entre el aire saturado de salida y la succión del ventilador.
- El área del eliminador de gotas queda expuesta a los rayos del sol lo cual trae como consecuencia un crecimiento de algas.
- Dificultad para evitar las fugas en las paredes de la torre debido a la presión positiva manejada. [13]

**FIGURA 7.** Torre de enfriamiento de tiro forzado. [22]



- **De tiro inducido:** en ellas el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la misma, ocasionando pérdidas de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire (figura 8).

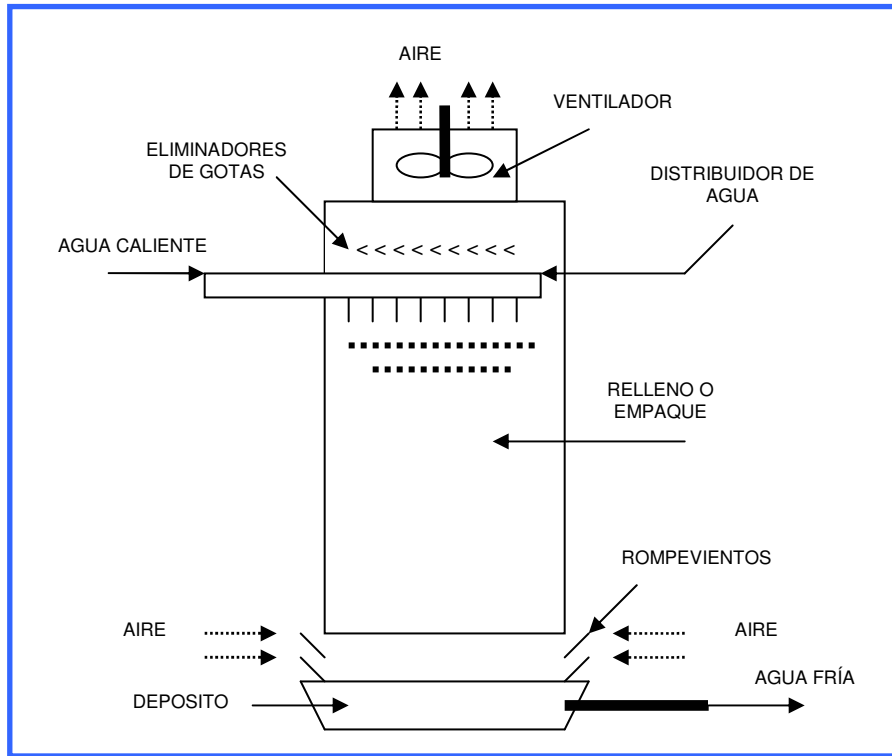
Ventajas:

- La velocidad de salida del aire es mayor reduciendo de esta manera la recirculación.
- La presión dentro de la torre es negativa simplificando los problemas de sello.
- Es el tipo de torre más utilizado en el mercado actual.

Entre sus desventajas están:

- Se necesita una fuerte estructura para soportar el equipo mecánico.
- Se hace necesario una caja reductora en ángulo recto y el eje para montar el motor eléctrico fuera de la corriente de aire. [8]

**FIGURA 8.** Torre de enfriamiento de tiro inducido.



En las torres de tiro inducido y forzado el ventilador puede ser radial o axial dependiendo de la presión exterior requerida, niveles de ruido permisibles y consumo de energía. Además son constituidas en dos configuraciones diferentes contraflujo y flujo cruzado.

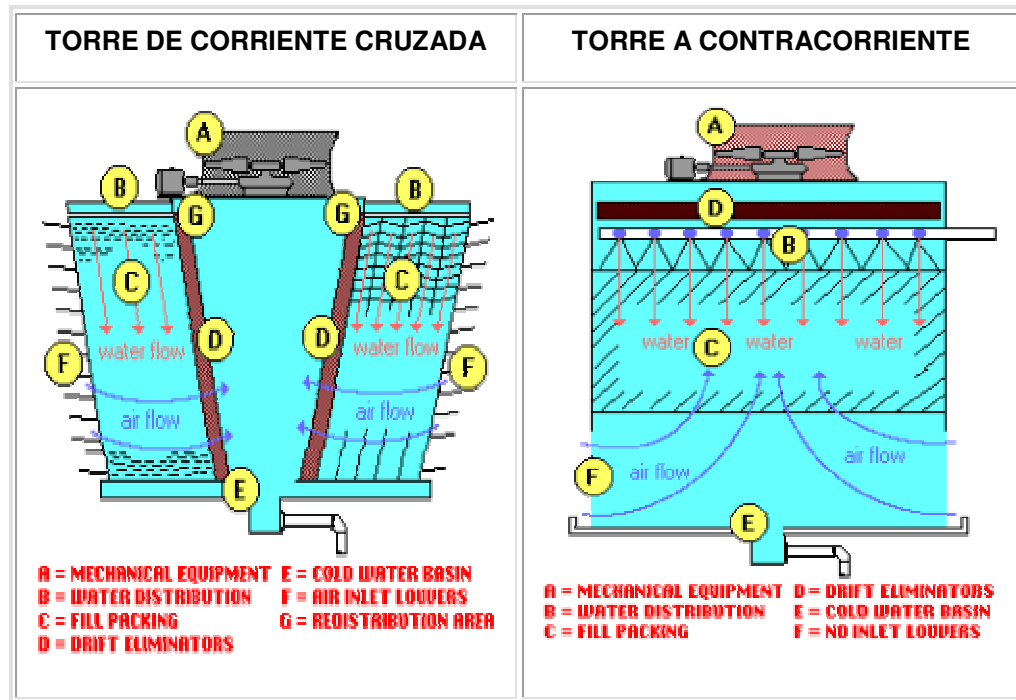
En las torres de contraflujo el aire entra a través de la parte inferior de la torre y viaja verticalmente hacia arriba a través del relleno y sale en la parte superior de la torre mientras el agua es distribuida en la parte superior de la torre y con alta velocidad atraviesa el relleno y es recolectada en el tanque (figura 8).

En las torres de flujo cruzado el aire entra a través de las persianas que se extienden desde la parte baja o tanque recolector hasta el sistema de distribución de agua y viajan a través del relleno y del eliminador de gotas; finalmente fluye verticalmente hacia arriba y es descargado. El agua fluye desde un sistema de distribución abierto

(velocidad de descarga muy pequeña) ubicado en la parte superior de la torre y hacia los lados; el agua cae a través del relleno y es recolectada en el tanque (figura 8). [18]

Las torres a flujo cruzado tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de aproximación pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente. [23]

**FIGURA 9.** Torres de enfriamiento a contracorriente y corriente cruzada. [23]



Cada configuración tiene sus ventajas y desventajas, entre las ventajas del sistema en contraflujo tenemos:

- Uso más eficiente del aire, debido a que todo el aire que atraviesa la torre está en contacto con el agua caliente que está en pequeñas gotas formadas por el sistema de rociado.

- La mínima exposición del relleno y sistema de distribución a los rayos del sol reducen el crecimiento de algas.
- La altura de la torre puede ser incrementada fácilmente para acomodarse a mayores rangos y menores aproximaciones.
- Se puede mejorar su rendimiento usando rellenos tipo película o celular.
- El control para evitar la formación de hielo es fácil.

Entre sus desventajas están:

- Maneja mayores presiones estáticas.
- Dificultad en la inspección y limpieza de las boquillas de distribución de agua.
- Requiere tuberías y sistemas de distribución para cada módulo.
- Un aumento de flujo de agua requiere un aumento en la presión de bombeo.
- Las boquillas del sistema de rociado son muy sensibles a los cambios de flujo y presión de agua.

El sistema de flujo cruzado presenta las siguientes ventajas:

- Bajas presiones estáticas.
- El sistema de distribución abierto admite fácil limpieza e inspección de las boquillas.
- Acepta grandes variaciones de flujo de agua sin efectos adversos en el diseño de las boquillas de distribución.
- Un incremento en el flujo de agua causa un mínimo incremento en la cabeza de bombeo.
- Reducción de la tubería externa debido a que existe solo una tubería de distribución.

Entre las desventajas tenemos:

- Incremento en la formación de algas debido al sistema de distribución y a que el relleno está expuesto a los rayos solares.
- Permite un menor mejoramiento de su rendimiento al usar rellenos de tipo película.
- Uso menos eficiente del aire que pasa a través del agua a baja temperatura.
- Mayor dificultad para el control de congelamiento.

- Existe mayor dificultad para incrementar la altura de la torre.

Todas las cuatro combinaciones pueden ser producidas en varios tamaños.

- ❖ Forzada en contraflujo
- ❖ Inducida en contraflujo
- ❖ Forzada en flujo cruzado
- ❖ Inducida en flujo cruzado

Existen torres especiales que contienen el sistema mecánico de tiro convencional en combinación con un intercambiador de tubos aleteados enfriado por aire, a estas torres se les conoce como torres húmedo – secas. Este tipo de torres es usado para reducir la formación de niebla en la descarga. [13]

### **2.3.2 Torres de tipo de contacto indirecto**

**2.3.2.1 Enfriadores de fluido en circuito cerrado (de tiro mecánico):** las torres de contacto indirecto requieren un intercambiador de calor de circuito cerrado (usualmente es un banco de tubos en serpentín) que es expuesto a flujos de agua y aire en contracorriente, de la misma manera que el relleno en las torres de enfriamiento. Algunas clases incluyen rellenos tipo película o salpique adicionales para aumentar el área de transferencia. Tanto los arreglos en contraflujo como en flujo cruzado son usados en torres de tiro inducido o forzado.

**2.3.2.2 Torres “Coil Shed” (de tiro mecánico):** este tipo de torres consta usualmente de una sección de banco de tubos aislado (no ventilado), el cual es localizado debajo del relleno de una torre de enfriamiento convencional. Este tipo de torres es disponible en todos los arreglos, contraflujo o cruzado con flujo inducido o forzado. Estas unidades son similares en funcionamiento a los enfriadores de circuito cerrado, excepto que siempre se requiere del relleno adicional, y la corriente de aire es dirigida solamente a la región del relleno de la torre. [18]

## 2.4 PARTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO:

Una torre de enfriamiento consta de las siguientes partes:

- Tanque o depósito de agua.
- Ventanas de aireación.
- Cuerpo de la torre.
- Cubierta.

**2.4.1 Tanque o depósito de agua:** es el recipiente en el cuál se deposita el agua enfriada, en este cuerpo se encuentran los accesorios para hacer las conexiones con:

- Tubería de succión de la bomba.
- Drenaje.
- Rebose.
- Reposición y control de nivel de agua.

El tanque generalmente se construye en muros de concreto, poliéster reforzado ó láminas metálicas. La capacidad recomendada para el tanque es de tres a cinco veces el caudal de agua recirculada por minuto. La altura recomendada para la succión de la bomba es un tercio de la altura del nivel de agua, ya que muy abajo se hace recircular al proceso todos los sedimentos asentados en el fondo del tanque, y muy arriba existe la posibilidad de succionar en vacío. Es recomendable el uso de filtro en la succión de la bomba pues el tanque es el lugar más propenso a contaminarse con muchas impurezas que viajan con el aire.

**2.4.2 Ventanas de succión de aire:** son los espacios que hay entre el tanque de agua y el cuerpo, esta es el área por donde entra el aire a la torre. En ésta área es recomendable el uso de una malla o rejilla que impida la entrada de objetos al tanque; en algunos casos es recomendable el uso de persianas de admisión para brindar una entrada suave al aire y disminuir la salpicadura fuera del equipo. Las dimensiones de estos espacios deben ser tal que proporcionen una velocidad inducida de aire menor a mil pies por minuto. Las

partes constituyentes de estas ventanas deben construirse removibles para facilitar la labor de mantenimiento.

**2.4.3 Cuerpo de la torre:** es la parte estructural del equipo, su función principal es la de formar el ducto por donde circulan los fluidos en contacto. Los materiales más usados para la construcción de esta parte son:

- Láminas de acero.
- Láminas galvanizadas.
- Poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Este último ha tenido una gran demanda en las últimas construcciones debido a su gran resistencia a la corrosión y al ataque químico.

En esta zona se encuentran alojadas otras partes componentes de la torre que son:

- El relleno o empaque.
- El sistema de distribución de agua.
- El eliminador de gotas.

**2.4.3.1 Relleno o empaque:** es la parte central de la torre donde se lleva a cabo la transferencia del calor del sistema. El relleno de empaque consiste en obstáculos o placas de diferentes formas, ubicados estratégicamente para cumplir con la función de aumentar la superficie de contacto entre el agua – aire y mantener un mayor tiempo este contacto mediante la interrupción del descenso de líquido.

Entre las características del empaque se encuentran:

- ⇒ Proporcionar una superficie interfacial grande entre el agua y el aire para efectos de mayor intercambio de calor. El valor de la superficie del empaque por unidad de volumen debe ser grande. El relleno es un parámetro de mucha atención para lograr un alto rendimiento por unidad de volumen.
- ⇒ El empaque debe permitir el paso de grandes volúmenes de fluido a través de pequeñas secciones transversales de la torre sin recargo o inundación.

- ⇒ Producir una caída de presión baja del aire. Esta debe ser en lo posible, producida únicamente por la fricción en la película.
- ⇒ Ser químicamente inerte con respecto a los fluidos que se están procesando.
- ⇒ Poseer una estructura fuerte para permitir el fácil manejo e instalación.
- ⇒ Bajo precio respecto a los demás componentes del equipo.
- ⇒ Los materiales más usados para la fabricación del relleno son madera y plástico.

Algunos tipos de empaque comunes son:

- Tipo multicelda: fabricado en PVC o CPVC, con alta resistencia al ataque químico, característica que permite tenerlo en contacto con aguas limpias, duras o contaminadas. Su diseño similar a una colmena, permite un íntimo contacto entre los flujos de agua y aire, lográndose gran transferencia de calor y masa por volumen ocupado.
- “Splash Bar” (Salpique): compuesto de barras en metal, madera o PVC, es fácil de desmontar y diseñado para operar con aguas sucias o con alto contenido de sólidos.
- Tipo Cerámico: es recomendable para operar con aguas que tienen altas cargas químicas o altas temperaturas y que alteren o destruyan los rellenos de material plástico.

**2.4.3.2 Sistema de distribución de agua:** este sistema se encarga, como su nombre lo dice, en distribuir el agua en toda la sección transversal de la torre teniendo en cuenta el tipo de relleno utilizado. El rociado puede realizarse mediante boquillas, orificios o ranuras.

Los requerimientos de un sistema de distribución pueden ser resumidos así:

- ⇒ El sistema debe esparcir el agua uniformemente sobre toda el área de relleno.
- ⇒ Si es posible, el sistema deberá ser auto ajustable para manejar diferentes flujos de agua.
- ⇒ El sistema debe estar diseñado para poder trabajar con el mínimo mantenimiento.
- ⇒ Las pérdidas de presión producidas por el sistema deben ser mínimas.
- ⇒ El material escogido no se debe ver influenciado por las eventuales temperaturas presentes en el sistema.

**2.4.3.3 Eliminadores de gotas:** pequeñas gotas de agua son removidas por la inercia de la corriente de aire y expulsadas, lo que hace que la eficiencia del aparato sea rebajada, para reducir el arrastre hacia fuera de esas gotas es necesario colocar trampas que las hagan volver al relleno y así evitar el desperdicio de agua. Los eliminadores de gotas son necesarios especialmente si la remoción de humedad es hecha a una profundidad del relleno cerca de la distribución de agua. Algunos tipos de torres de enfriamiento donde la velocidad del aire es relativamente baja no requieren eliminadores.

Las láminas eliminadoras pueden ser hechas en madera, metal, plástico y asbestos. Las torres modernas utilizan una porción del mismo relleno de la torre como eliminadores de gotas.

**2.4.4 Cubierta de la Torre y Ventilador:** la cubierta es la parte superior de la torre por donde se da salida al aire saturado y caliente; generalmente tiene forma de campana; y en las torres de tiro inducido es allí donde se soporta el extractor o ventilador con su respectivo sistema de transmisión de movimiento.

- Ventilador: es el mecanismo que suministra el aire haciéndolo subir a través del relleno y del agua que cae. Los ventiladores en las torres de tiro inducido trabajan con aire húmedo, y los materiales utilizados para este propósito deben ser tratados y seleccionados perfectamente para cumplir con esta función. Los ventiladores son usados generalmente en torres de enfriamiento para vencer cabezas de presión estáticas entre 0.25 y 2.5 pulgadas de columna de agua. Sin embargo, en la práctica se pueden aplicar para otros rangos de caída de presión.

Según las necesidades y diseños de torres se pueden encontrar ventiladores de hélice, axial ó centrífugo accionados por motores que deben protegerse del agua y en lo posible estar provistos de guardapolvo. Las instalaciones eléctricas deben ser cuidadosamente forradas. La transmisión de movimiento puede hacerse mediante correas, cajas reductoras, o directamente al eje del ventilador.

El volumen de aire desplazado, la presión en pulgadas de agua y la potencia del ventilador son parámetros ligados directamente por las revoluciones del eje como se muestra en las siguientes relaciones:

$$V \propto n$$
$$P \propto n^2$$
$$H_p \propto n^3$$

Donde:

V: volumen en CFM.

P: presión en pulgadas de agua.

H<sub>p</sub>: caballos de potencia.

n: revoluciones por minuto del eje del ventilador. [17], [18], [23]

## 2.5 ECUACIONES BÁSICAS DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO:

En el año de 1925, el alemán Merkel publica un artículo en el que se desarrolla las ecuaciones básicas de balance de energía y sobre las cuales se basa el concepto de rendimiento de una torre de enfriamiento en contraflujo. Este trabajo fue menospreciado durante mucho tiempo, hasta que el artículo fue traducido al inglés por “Nottage” en 1941. Desde entonces el modelo ha sido ampliamente utilizado y aceptado como el estándar de teoría básica de torres de enfriamiento; e incluso las normas del **Cooling Towers Instituto (CTI)** lo adoptan para la evaluación de las torres de enfriamiento.

Las ecuaciones diferenciales del modelo de Merkel expresan un balance de energía y describe los procesos simultáneos de transferencia de calor y masa a través de la relación de Lewis. De estas ecuaciones se deriva una expresión adimensional para calcular el rendimiento de una torre de enfriamiento. Con el objeto de tener una expresión fácilmente manejable se realizan ciertas suposiciones y aproximaciones sacrificando la exactitud de los resultados. Sin embargo se pueden realizar ciertas modificaciones para disminuir el porcentaje de error. [13]

**2.5.1 Desarrollo de la ecuación:** el calor es removido del agua por transferencia de calor sensible debido a una diferencia de temperaturas y por el calor latente equivalente de la transferencia de masa la cual resulta de la evaporación de una porción del agua que circula por la torre. Merkel combina estos dos procesos en un único proceso basado en las diferencias de entalpía como potencial de transferencia.

El análisis considera una torre de enfriamiento que tiene un área transversal unitaria ( $1\text{pie}^2$ ); un volumen de enfriamiento  $V$  ( $\text{pie}^3$ ), una superficie de agua expuesta al aire por unidad de volumen  $a$  ( $\text{pie}^2/\text{pie}^3$ ). Además un flujo de agua por unidad de área  $L$  ( $\text{lb}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2)$ ) y de aire ( $\text{lb}/\text{h}/\text{pie}^2$ ) a través de la torre.

## NOMENCLATURA

A	Área de contacto aire-agua por unidad de volumen, $\text{pie}^2 / \text{pie}^3$
$C_{pa}$	Calor específico del aire seco, $\text{Btu}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$
$C_{pg}$	Calor específico del aire húmedo, $\text{Btu}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$
$C_{pw}$	Calor específico del agua líquida, $\text{Btu}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$
$C_v$	Calor específico del vapor de agua, $\text{Btu}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$
G	Flujo másico del aire seco, $\text{lb}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2)$
h	Entalpía del aire húmedo a una temperatura T, $\text{Btu}/\text{lb}$ de aire seco
$h^H$	Entalpía del aire húmedo saturado a una temperatura de agua t, $\text{Btu}/\text{lb}$ de aire seco.
$h''$	Entalpía del aire húmedo a una temperatura $T'$ , $\text{Btu}/\text{lb}$ de aire seco
$h_c$	Coeficiente de transferencia de masa, $\text{lb}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2)$
$h_t$	Coeficiente de transferencia de calor, $\text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F})$
$H_o$	Calor latente de vaporización a una temperatura de referencia $T_0$ , $\text{Btu}/\text{lb}$
K	$h_{c,p}$ , $\text{lb}/(\text{pie}^2 \cdot \text{h})$
L	Flujo másico de agua, $\text{lb}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2)$ de área de piso
NTU	Número de unidades de transferencia de calor $KaV/L$ , adimensional
q	Rata total de transferencia de calor, $\text{Btu}/\text{h}$
$q_s$	Rata de transferencia de calor sensible, $\text{Btu}/\text{h}$
t	Temperatura del agua, $^\circ\text{F}$

T	Temperatura del aire húmedo donde la temperatura del agua es t, °F
T'	Temperatura del aire húmedo en la película de interfase, °F
T <sub>0</sub>	Temperatura de referencia para la entalpía del aire y agua, °F
V	Volumen de la torre, pie <sup>3</sup>
X	Humedad absoluta del aire húmedo, lb agua/lb de aire seco
X <sup>H</sup>	Humedad absoluta del aire húmedo saturado a la temperatura del agua, lb agua/lb aire seco.
X''	Humedad absoluta del aire húmedo a la temperatura de interfase T, lb agua/lb aire seco.

#### Símbolos Griegos

$\rho$  Densidad del aire seco

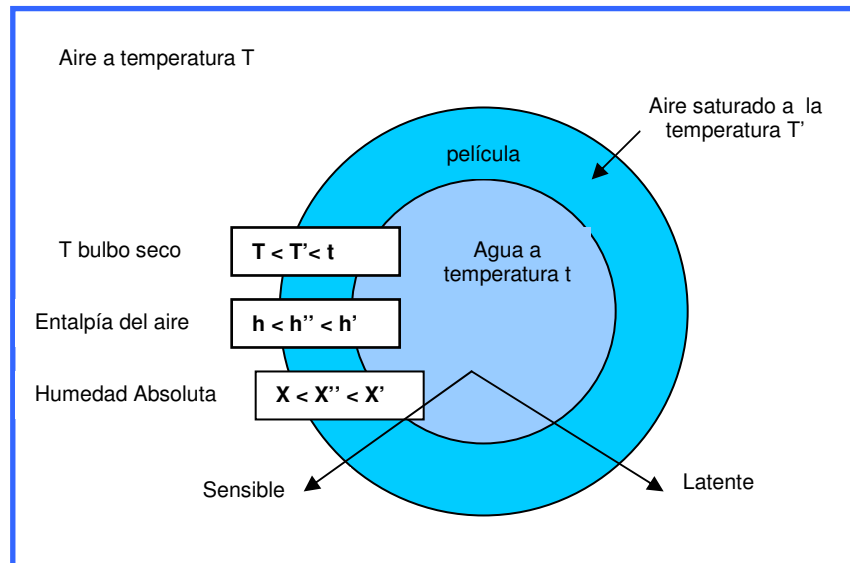
#### Subíndices

- 1 Condición del agua entrando en la parte superior de la torre
- 2 Condición del agua saliendo por la parte inferior de la torre
- 3 Condición del aire de entrada en la parte inferior de la torre
- 4 Condición del aire de salida en la parte superior de la torre

#### Superíndices

- <sup>H</sup> Saturado a la temperatura t
- ' Condiciones del aire a la temperatura del agua t
- '' Condiciones del aire de la interfase

**FIGURA 10.** Relaciones de transferencia de calor y masa.



Se adoptara un modelo unidimensional, asumiendo que el estado del aire y el agua varia solo con la posición vertical de la torre. Considerando una sección diferencial de la torre de volumen  $dV$ . De la conservación de la masa resulta:

$$dL = GdX \quad (1)$$

Asumiendo flujo adiabático, la conservación de energía exige que:

$$C_{pw} d(tL) = Gdh \quad (2)$$

Combinamos las ecuaciones (1) y (2), tenemos:

$$Gdh = C_{pw} (Ldt + tGdX) \quad (3a)$$

- Primera suposición de Merkel: Al analizar la ecuación (3a) podemos decir que la carga de gas  $G$ , permanece constante a través de la torre debido a que esta se basa únicamente en el aire seco. La carga del liquido no es constante debido a la evaporación del agua en el aire seco. Si las pérdidas por evaporación s menores al 2%

del agua circulada a la torre, el flujo de agua puede considerarse constante sin introducir un error serio. La ecuación (3a) se reduce a:

$$Gdh = C_{pw} Ldt \quad (3b)$$

La entalpía del aire húmedo a la temperatura T, es dada por:

$$h = C_{pa} (T-T_0) + X[ C_{pv} (T-T_0) + H_0 ] \quad (4)$$

Para encontrar el volumen diferencial de la torre dV en el cual sucede el cambio de temperatura dt, es necesario considerar las tasas de transferencia de calor y masa entre el agua y el aire húmedo en la posición de la torre donde la temperatura del agua es t. Esta porción de agua esta rodeada por una película de aire a una temperatura T', y la corriente de aire tiene una temperatura de bulbo seco T, una humedad absoluta X y una entalpía h. El gradiente de temperatura es tal que:  $T < T' < t$  (figura 10).

Basado en los coeficientes totales en lugar de las películas individuales, la transferencia de calor sensible del agua al aire es:

$$dq_s = h_t adV(t-T) \quad (5)$$

La cantidad de calor latente (o por difusión) es:

$$dq_1 = H_0 dL \quad (6)$$

Donde dL es la cantidad de agua evaporada en dV,

- Segunda suposición del modelo de Merkel: la película de interfase de aire (figura 10) se supone saturada con vapor de agua a una temperatura T', la cual tiene una humedad absoluta correspondiente X". El procedimiento es ignorar cualquier resistencia a la transferencia de masa del agua a la película de interfase, pero

considerando la transferencia de masa de vapor de la película de interfase a la corriente de aire como:

$$dL = h_c(X''-X)p_a dV \quad (7)$$

La ecuación anterior representa la cantidad de masa que se difunde de la película de interfase al aire; el potencial para esta transferencia es la diferencia de concentraciones o de presiones parciales del material que se difunde (agua en nuestro caso). En esta ecuación la rata de masa evaporada se expresa en función de un potencial de humedades absolutas; debido a que humedad absoluta se puede considerar como proporcional a la presión parcial, al menos para los rangos que se presentan en aplicaciones de torres de enfriamiento.

- Tercera suposición del modelo de Merkel: las condiciones de la película de interfase del aire ( $T'$ ,  $H'$ ,  $X''$ ) son indeterminables para todos los propósitos prácticos. Para vencer esta dificultad se asume la temperatura  $T'$  igual a  $t$ , es decir, la película de interfase de aire se considera saturada a la temperatura del agua  $t$ . Entonces la ecuación (7) queda de la forma:

$$dL = h_c(X^H-X)p_a dV \quad (8)$$

Lewis<sup>2</sup> pudo observar que la relación entre el coeficiente de calor y el de masa,  $ht/K$ , estaba presente casi en cualquier problema de contacto directo, e hizo indicaciones respecto a esta relación y el grupo adimensional  $h_i / KC_p$ , se le conoce como el número de Lewis ( $Le$ ). Este número conduce a la información de que, el coeficiente de transferencia de calor es al coeficiente de transferencia de masa lo que el valor de los calores específicos del medio que sirve tanto para la transferencia de masa como de calor. Para el caso de un sistema aire agua el valor de ( $Le$ ) es aproximadamente 1. Es decir que se requiere un potencial  $1/C_{pg}$  veces mayor para transferir un número dado de Btu de calor sensible que para transferir igual número de Btu mediante transferencia de masa. Luego entonces:

---

<sup>2</sup> W. H. Walker, W. K. Lewis, W.H. Adams, and E.R. Gilliland, "Principles of chemical engineering" 3<sup>rd</sup> edition, Mc Graw Hill, Book Company, inc; New York, 1937.

$$\frac{h_t}{\rho C_{pg} h_c} \cong 1 \quad (9)$$

La rata total de transferencia de calor, calor latente y sensible está dada por la ecuación:

$$dq = dq_s + dq_l \quad (10)$$

Reemplazando (5), (6), (8) y (9) en (10) resulta:

$$dq = h_c \rho a dV [C_{pg}(t-T) + H_0(X^H - X)] \quad (11)$$

La ecuación (4) puede ser reagrupada de la forma

$$h = (C_{pa} + X C_{pv})T + X(H_0 - C_{pv}T_0) - C_{pa}T_0 \quad (12)$$

Donde el término que multiplica a T es  $C_{pg}$ , calor específico del aire húmedo, el cual se puede considerar constante y difiere muy poco de calor específico del aire seco  $C_{pa}$ .

Escribiendo la ecuación (12) para aire saturado a una temperatura t, y sustrayendo la ecuación (12) resulta el potencial entálpico entre el aire saturado de la película de interfase y la corriente de aire húmedo.

$$h^H - h = C_{pg}(t - T) + (H_0 - C_{pv}T_0)(X^H - X) \quad (13)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (11), tenemos:

$$dq = h_c \rho a dV [(h^H - h) + C_{pv}T_0(X^H - X)] \quad (14)$$

El segundo término entre corchetes se desprecia según el modelo de Merkel, debido a que es relativamente pequeño (contribuye en el orden de 2%). La ecuación (14) resulta entonces:

$$dq = h_c p a dV (h^H - h) \quad (15)$$

Ahora según el balance de energía para la corriente de aire

$$dq = G dh \quad (16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (15) y (16) en la ecuación (3b) resulta:

$$K a dV (h^H - h) = C_{pw} L dt \quad (17)$$

Y de la ecuación (1) en la ecuación (8)

$$K a dV (X^H - X) = G dX \quad (18)$$

Donde K ha sido escrito por  $h_c p$ .

Las ecuaciones (1), (3b), (17) y (18) son las expresiones básicas que gobiernan el rendimiento de una torre de enfriamiento en contraflujo; éstas se pueden escribir de la forma integral entre la temperatura de entrada y salida del agua.

$$\frac{K a V}{C_{pw} L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{(h^* - h)} \quad (19)$$

$$C_{pw} L (t_1 - t_2) = G (h_4 - h_3) \quad (20)$$

La ecuación (20) sirve para calcular la condición de entalpía del aire de salida  $h_4$ , y la ecuación (19) la característica de la torre  $KaV/L$  a partir de  $t_1, t_2, T_3^H, L/G$ ; el modelo de Merkel no utiliza la temperatura de bulbo seco del aire de entrada debido a que se considera que la entalpía solo varía con la temperatura de bulbo húmedo. [7], [13] [18]

### 2.5.2 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN BÁSICA

En la práctica de torres de enfriamiento el valor de la integral de la ecuación (19) se denomina comúnmente como el **número de unidades de transferencia** o **NTU**.

$$NTU = \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_{pw} dt}{(h^* - h)} \quad (21)$$

Este valor representa el número de veces que el potencial promedio de entalpía ( $h^H-h$ ) debe dividirse por el cambio total deseado en la temperatura del agua ( $t_1-t_2$ ); y es una medida del grado de dificultad de la tarea. Entonces, una unidad de transferencia se define como:

$$\frac{C_{pw}(t_1 - t_2)}{(h^* - h)_{avg}} = 1 \quad (22)$$

De experimentos en un tipo particular de torre con una altura  $Z$ , es posible determinar el número de unidades de transferencia que se logran para unas condiciones establecidas; y la altura de una sola unidad de transferencia HTU será:

$$HTU = \frac{Z}{NTU} \quad (23)$$

De la misma manera si se conoce la altura de una unidad de transferencia para un tipo dado de empaque, la altura total requerida para la torre, para un servicio dado, puede entonces calcularse.

Como se mencionó, la ecuación adimensional (19), es la base para el cálculo de rendimiento de una torre de enfriamiento. El lado derecho de la ecuación contiene solamente las condiciones termodinámicas para el proceso de enfriamiento. Esta parte se puede determinar con las condiciones inicial y final del agua y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada. El lado izquierdo de la ecuación es independiente de las condiciones termodinámicas en la torre y es determinado por las características del diseño de la torre ( $KaV$ ) y el flujo de líquido  $L$ .

El coeficiente de difusión para un flujo dado de aire ( $G$ ) depende solamente del tipo de superficie provisto en la torre. Esta superficie es usualmente una combinación de la superficie de película y la disposición al azar de las gotas. Debido a que no se dispone de la información de cada tipo de superficie, el coeficiente de difusión no se puede conocer. Lo anterior se obvia calculando  $ka$  como un solo factor para un tipo particular de empaque a flujos específicos para los fluidos que componen el sistema. Si embargo, en los últimos años se han publicado artículos en los que se presenta el desarrollo de un modelamiento numérico de una torre de enfriamiento que calcula el valor de  $ka$  de una forma teórica y puramente matemática<sup>3</sup>.

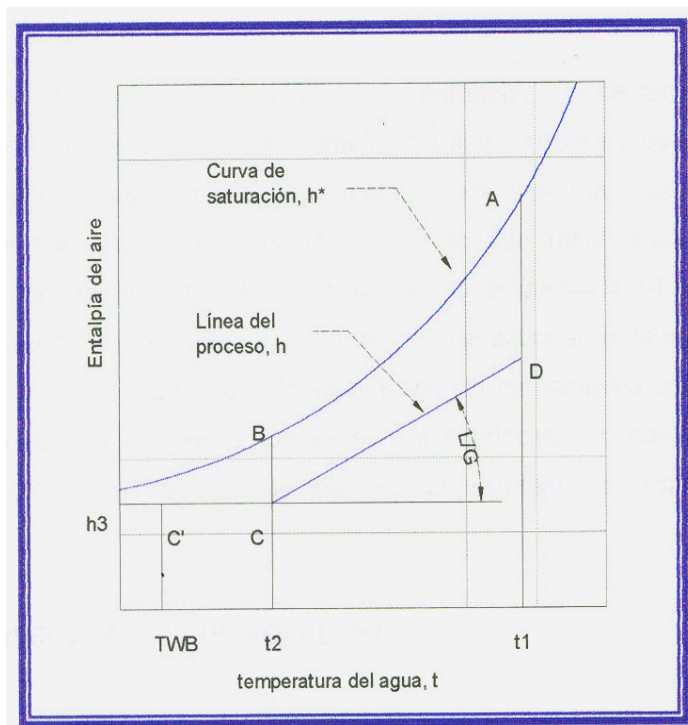
Una representación gráfica del término a la derecha de la ecuación (19) es decir, las NTU, se muestran en la figura (11), en la cual la temperatura del agua  $t$  es seleccionada como abcisa y la entalpía  $h$  como ordenada. La línea de saturación  $h^H$  representa las entalpías del aire saturado a las temperaturas del agua y que se pueden considerar que existen en la película de aire en la superficie del agua. Debido que las entalpías de saturación también incluyen las humedades de saturación, ésta línea es equivalente a la presión de vapor del agua fuera de ésta. De la ecuación (3b), podemos integrar entre las condiciones de frontera de la torre y obtener una ecuación de una línea recta que relacione la entalpía del aire con la temperatura  $t$  del agua a través de la torre (Ec. 20). La cual representa la línea de operación del aire.

$$h_4 = h_3 + C_{pw}(t_1 - t_2) \quad (24)$$

---

<sup>3</sup> A. A. DREYER, P. J. ERENS, Modelling of cooling tower splash pack. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 39, N/1, pp 109-123,1996.

**FIGURA 11.** Diagrama de enfriamiento en contraflujo.



En el mismo diagrama de enfriamiento en contraflujo, el agua entrando a la parte superior de la torre a  $t_1$  es rodeado por una película de interfase que se asume saturada con vapor de agua a la temperatura del agua. Esto corresponde al punto A en la curva de saturación. A medida que el agua es enfriada hasta  $t_2$ , la entalpía de la película de interfase sigue la trayectoria de la curva de saturación hasta el punto B.

El aire entrando por la base de la torre a una temperatura de bulbo húmedo  $T_{WB}$  tiene una entalpía correspondiente a C' en la curva de saturación. El potencial de transferencia en la base de la torre es representado por la distancia vertical BC. El calor removido del agua es adicionado al aire de modo que su entalpía se incrementa a través de la línea recta CD, teniendo una pendiente igual a  $L/G$  y terminando en un punto vertical debajo del punto A. Un cambio en las condiciones de proceso de tal manera que la línea de operación CD se mueva hacia abajo para incluir una mayor área entre ella misma y la línea de saturación, significa que menos unidades de transferencia (NTU) y menor altura se requieren para cualquier tipo de torre.

La temperatura mínima a la que el agua puede enfriarse en una torre de enfriamiento corresponde a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Este no es un límite práctico, puesto que la presión de vapor en el agua y en el aire será la misma cuando el agua alcance la temperatura de bulbo húmedo, resultando un potencial de transferencia igual a cero para el que se necesita una torre infinita. La diferencia entre la temperatura del agua a la salida de la torre  $t_2$  y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada se llama aproximación en una torre de enfriamiento. Puesto que muchas torres de enfriamiento operan sobre casi el mismo rango de agua, la aproximación es el índice principal de qué tan difícil será la operación, así como una indicación del número de unidades de transferencia que se requerirán. [18]

### 2.5.3 MÉTODOS APROXIMADOS DE SOLUCIÓN

Para hallar el número de unidades de transferencia (NTU), debemos integrar la ecuación (21), cuyos términos  $h^H$  y  $h$  no son funciones simples de la temperatura del agua  $t$ . Además esta ecuación no es suficiente puesto que el valor de la entalpía del aire  $h$ , en función de la temperatura del agua  $t$ , no se conoce y por lo tanto no se puede obtener una solución matemática directa. El procedimiento usual es integrar la ecuación (21) en conexión con el balance de calor expresado por la ecuación (3b) cuya integración sobre las condiciones de frontera nos da la ecuación (24).

El proceso de cálculo de las NTU, se puede realizar por cualquiera de los siguientes métodos:

- Integración gráfica.
- Integración numérica.
- Método de Tchebycheff.
- Diferencia media logarítmica.
- Curvas de desempeño.

**2.5.3.1 Integración Gráfica:** este método consiste en calcular gráficamente el área formada por las curvas de entalpía de saturación del aire a la temperatura del agua y la

línea de proceso. Este método es muy dispendioso e inexacto; por lo tanto su uso no es muy frecuente.

**2.5.3.2 Integración Numérica:** el proceso de integración numérica se realiza por el método de cuadratura, en el cual el área ABCD (figura 11) es dividida en una serie de áreas incrementales correspondientes a sucesivos incrementos de cambio de temperatura. Los cálculos para una torre en contraflujo inician en la parte inferior de la torre, debido a que es el único punto donde se conocen tanto las condiciones del aire como las del agua.

**2.5.3.3 Método Numérico de Tchebycheff:** uno de los métodos más sencillos de integración numérica y que presenta una buena aproximación es el método de Tchebycheff, el cuál se explica en detalle en el capítulo 4.

**2.5.3.4 Método de la Diferencia Media Logarítmica:** cuando no se dispone de cartas de desempeño de las torres (que veremos más adelante), la integración numérica o grafica puede llegar a ser muy dispendiosa si se quieren calcular las NTU para varias condiciones.

El método de la diferencia media logarítmica consiste en reemplazar las curvas de entalpías saturadas  $h^H$  (figura 11) por una línea recta, como se muestra en la figura 12, y que posea la misma área bajo la curva. La posición de esta línea puede ser definida introduciendo una corrección de entalpía  $\delta h$ , donde:

$$\delta h = \frac{h_3^H + h_4^H - 2h_m^H}{4} \quad (25)$$

Donde  $h_3^H$  y  $h_4^H$  son los valores de la entalpía de saturación a la temperatura del agua a las condiciones de entrada y salida, y  $h_m^H$  es el valor de  $h^H$  evaluado a la temperatura

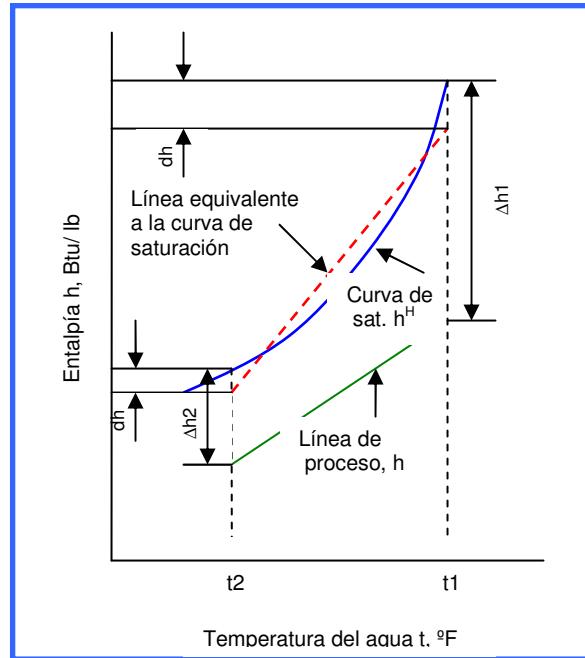
media del agua  $(t_1+t_2)/2$ . Si  $\Delta h_2$  y  $\Delta h_1$  son las diferencias de entalpía, a las condiciones de entrada y salida entre las curvas  $h^H$  y  $h$  como se puede ver en la figura 12, una diferencia media logarítmica de entalpías se puede definir como:

$$\Delta h_m = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{2.3 \text{Log}[(\Delta h_1 - \delta h)/(\Delta h_2 - \delta h)]} \quad (26)$$

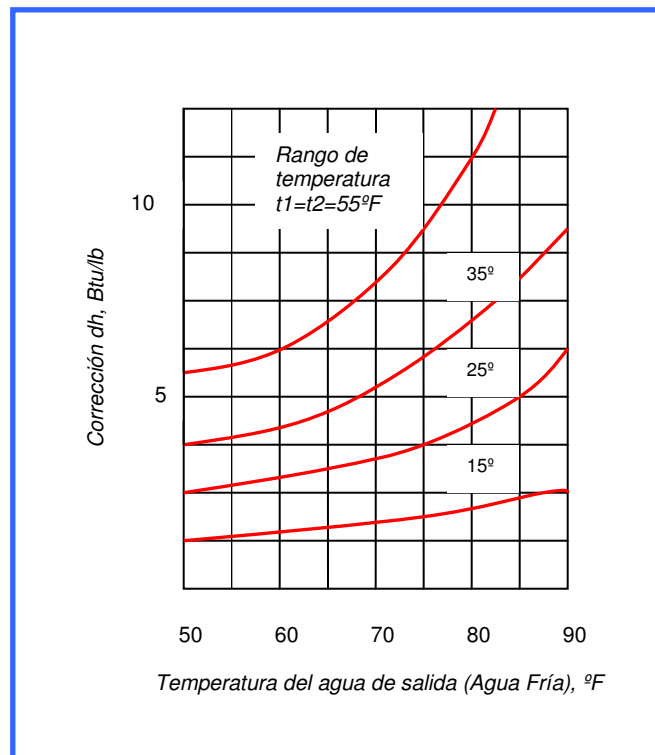
La carta de la figura 13 muestra los valores de corrección de entalpía  $\delta h$ , como una función de la temperatura del agua de salida para una serie de rangos. La característica de la torre puede ser calculada como:

$$\frac{KaV}{L} = \frac{t_1 - t_2}{\Delta h_m} \quad (27)$$

**FIGURA 12.** Método de la diferencia media logarítmica.



**FIGURA 13.** Valores de corrección  $\delta h$ .

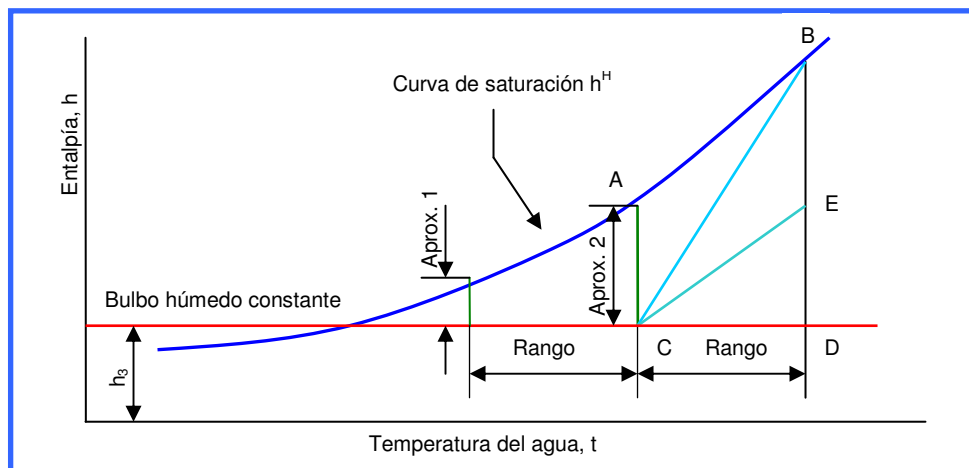


El error involucrado al calcular la característica de la torre usando este método es pequeño y generalmente aceptable.

**2.5.3.5 Curvas de Desempeño:** las curvas de desempeño o rendimiento se crearon para cubrir la necesidad que tenía la industria de torres de enfriamiento de seleccionar sus equipos con un método rápido y sin recurrir a integraciones largas y tediosas. Se necesitaba un método que permitiera la determinación de los desempeños de las torres (NTU) para diferentes temperaturas de bulbo húmedo y para cualquier variación de las condiciones de operación. Entonces, se calcularon de manera numérica el valor de las NTU, para diferentes condiciones y los resultados se ordenaron en curvas las cuales pueden ser usadas para predecir el desempeño de una torre de enfriamiento bajo una variación amplia de las condiciones de servicio.

Para construir estas curvas de desempeño, se elige como ordenada el valor de las NTU, que es igual a  $KaV/L$ , debido a que es el valor requerido; y la relación  $L/G$  como abcisa por ser una de las características más importantes de diseño. Como parámetro de las curvas de desempeño se elige la aproximación, mientras que la temperatura húmeda y el rango se mantienen constantes para cada curva. La figura 14 muestra como se pueden calcular estas curvas mediante métodos de integración numérica.

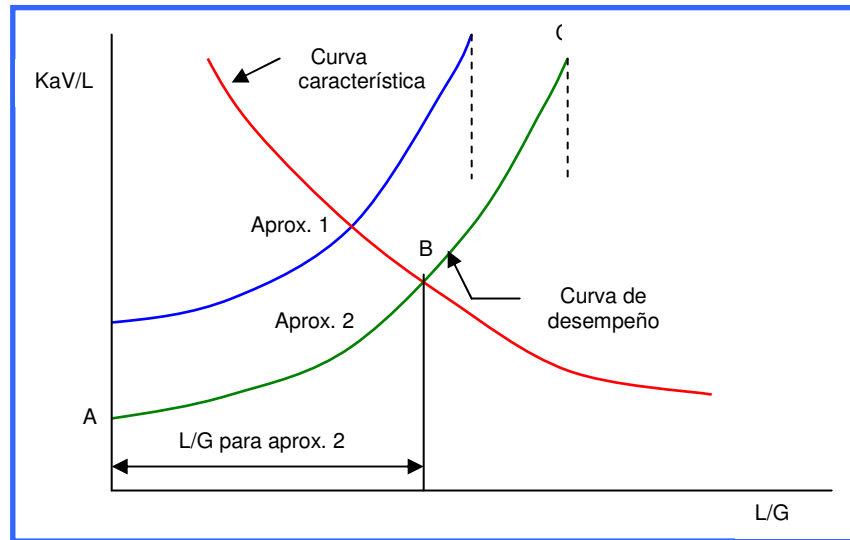
**FIGURA 14.** Método para el desarrollo de las curvas de desempeño.



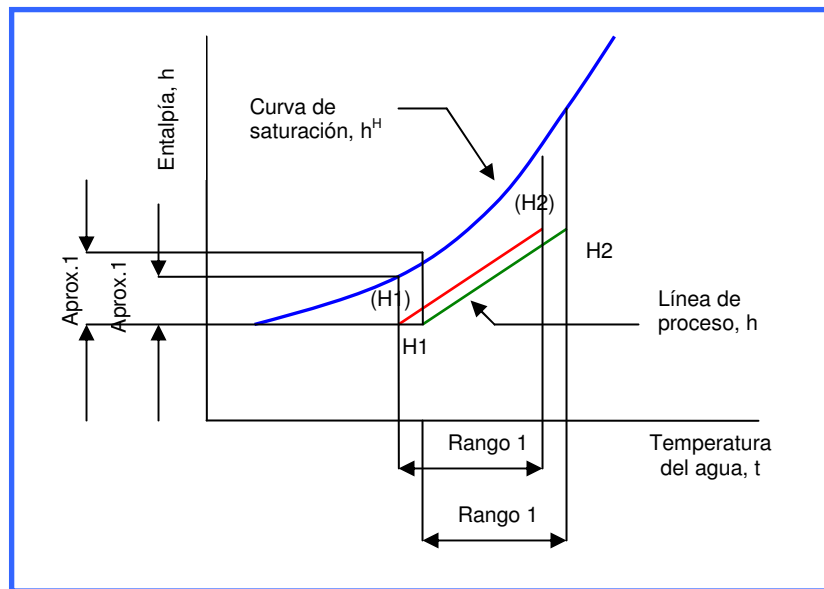
En esta figura se observan dos aproximaciones, 1 y 2 para una entalpía constante  $h_3$ , y rango constante. Se determinan dos puntos los cuales son los límites de operación para una curva de aproximación constante. El primero es cuando  $L/G = 0$ , correspondiente al área ABCD la cual da el menor valor de integral o NTU, para las condiciones impuestas de rango, bulbo húmedo y aproximación (Debido a que es la mayor área y representa la máxima diferencia de potencial). Sin embargo, este límite corresponde a un valor infinito del flujo de aire  $G$ , y que podemos observar en la figura 15 como el punto A. El segundo punto es determinado por la línea de operación CB y su correspondiente pendiente  $L/G$  (figura 14). Debido a que en el punto B (figura 14) el potencial es cero, el valor de las NTU llega a ser infinito, lo que se representa en la figura 15 como una asíntota para ese valor de  $L/G$ . En medio de estos límites, cualquier número de líneas de operación tales como CE, puede ser trazado y calculado el valor de las NTU para su correspondiente valor de  $L/G$ , que se muestra como en el punto B en la figura 15.

En la misma figura 15 (aproximación 1 < aproximación 2) podemos ver que la curva de la aproximación 1 presenta valores más altos de NTU que la curva de aproximación 2 para el mismo valor de  $L/G$ ; esto es el resultado de que las mismas condiciones de rango y bulbo húmedo llevar la aproximación a un valor menor representa una dificultad mayor del proceso (aumento de NTU) debido a que el potencial de entalpías disminuye (figura 16).  
[17], [6]

**FIGURA 15.** Ejemplo de intersección de las curvas de rendimiento con la curva característica de la torre.



**FIGURA 16.** Diagrama del proceso indicando cambio en la aproximación.



#### 2.5.4 MÉTODO DE MICKLEY

El método gráfico de Mickley se basa en las siguientes ecuaciones:

$$GC_s dT_g = hga(T_i - T_g)dZ \quad (28)$$

Donde:

$G$ : flujo de gas.

$C_s$ : calor húmedo o calor de mezcla.

$hg$ : coeficiente de transferencia de calor de la fase gaseosa.

$T_i$ : temperatura en la interfase gas-líquido.

$T_g$ : temperatura del gas.

$$GdH = KgaM_B(H_i - H_g)dZ \quad (29)$$

Donde:

$M_B$ : peso molecular del aire.

$H_i$ : entalpía de la interfase gas-líquido.

$H_g$ : entalpía del gas.

Dividiendo la ecuación 26 en la ecuación 27, e invirtiendo las ecuaciones se obtiene.

$$\frac{dH}{dT_g} = \frac{KgaM_B}{hga} C_s \left[ \frac{(H_i - H_g)}{(T_i - T_g)} \right] \quad (30)$$

Como el calor húmedo o calor de mezcla es igual a

$$C_s = \frac{hga}{KgaM_B} \quad (31)$$

Remplazando la ecuación (31) en (30) tenemos. [21]

$$\frac{dH}{dT_g} = \frac{H_i - H_g}{T_i - T_g} \quad (32)$$

## 2.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Refiriéndonos a la ecuación 19, hemos podido calcular en el numeral anterior el lado derecho de la ecuación (NTU), es decir, el potencial necesario de transferencia de calor y masa para unas condiciones de bulbo húmedo, rango, aproximación y un valor elegido de L/G. El problema ahora consiste en determinar la torre que pueda cumplir con estas condiciones (NTU); lo que significa que debe tener un valor característico (KaV/L) determinado por el relleno y tamaño, y que debe igualar al potencial requerido (NTU).

Las curvas características de las torres son determinadas por las características de diseño de la torre la cual fija el tipo y cantidad de superficie provista, la velocidad relativa de los dos fluidos, y sus características físicas. Desgraciadamente, no existe teoría aun que permita calcular KaV del solo diseño. Pruebas de KaV para varios tipos de torre han sido hechas y publicadas. Sin embargo, debido a la falta de una teoría general, tales pruebas no pueden ser generalizadas y representan las características de diseños específicos. Actualmente, la práctica en torres de enfriamiento es aún dependiente de todos los diseños de torres, en orden a encontrar sus características. Aunque los datos publicados no son suficientes para desarrollar una teoría general de características de torres, ellos son muy útiles porque nos permiten visualizar la tendencia general de las variaciones de los principales factores de la característica de la torre; la variación de KaV con L, G y posiblemente  $t_1$ .

El tipo mas común de curva característica es la que se observa en la figura 15, en la que el valor adimensional de KaV/L se grafica con L/G. La característica es representada frecuentemente como una sola curva que ignora los efectos de la variación en la velocidad del aire. La curva promedio corresponde aproximadamente a:

$$\frac{kaV}{L} = \left( \frac{L}{G} \right)^n \quad (33)$$

El exponente  $n$  varia dentro de un rango de  $-0.35$  a  $-1.1$ , y un valor promedio esta entre  $-0.55$  y  $-0.65$ . Debido a que experimentalmente se ha observado que el efecto de la variación en la velocidad del aire es pequeño, se deja el factor  $L/G$  como parámetro para la curva característica. La curva de la figura 15 nos muestra como los valores de la característica de la torre disminuyen a medida que  $L/G$  se incrementa. Esta torre en particular nos daría para las condiciones de bulbo húmedo y rango, un valor de  $KaV/L$  necesario para cumplir con una aproximación 2, si trabajase con una relación de flujos  $(L/G)_1$  (punto A). Si a la misma torre se le aumenta el flujo de aire lo cual significa disminuir  $L/G$ ; entonces si todas demás condiciones permanecieran constantes esto significaría aumentar las NTU, o el potencial requerido de transferencia, pero como la torre no esta diseñada para suplir este valor de NTU, la torre podrá enfriar la misma cantidad de agua con el mismo rango pero con una aproximación menor.

De lo anterior, podemos concluir, que el punto de intersección entre la curva característica y la curva de desempeño de la torre indica la relación  $L/G$  a la cual la torre debe operar para cumplir con los requerimientos de rango, bulbo húmedo y aproximación que representa esa curva, y es el punto donde el potencial de transferencia requerido es igual al que puede suministrar el equipo.

Las pruebas de torre de enfriamiento son realizadas en pequeñas torres, es decir, con un área transversal pequeña donde ningún factor de escala se involucra y la teoría de semejanza no es aplicable. De hecho la teoría de la torre se basa en la idea de que una gran torre es la suma de un numero de pequeñas torres cada una con un área transversal unitaria ( $1 \text{ m}^2$ ), y que además, cada metro cuadrado recibe la misma cantidad de aire y agua y no se espera ninguna diferencia entre una torre pequeña y una grande. Sin embargo, en una torre pequeña, el efecto del agua que fluye sobre las paredes reduce el rendimiento total y puesto que con el incremento del área transversal, se reduce el porcentaje de agua que fluye por las paredes, se espera un incremento en el rendimiento de grandes unidades.

Las experiencias realizadas en laboratorio y que han sido publicadas muestran que los coeficientes de rendimiento  $KaV/L$  varían al cambiar los valores de temperatura, especialmente con la temperatura de agua de entrada. Los coeficientes disminuyen a medida que la temperatura del agua caliente se incrementa. El problema es frecuentemente solucionado realizando las pruebas a temperatura de agua caliente constante. [2], [17]

## 2.7 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EN EL DISEÑO

El estudio de los efectos del cambio de las condiciones del proceso en la altura y sección transversal del equipo, o en el costo de su operación se hace muy importante con el objeto de diseñar la torre más eficiente, es decir, la más económica que cumpla con los requerimientos. En la figura 17 se muestran seis de las consideraciones que afectan el diseño de una torre de enfriamiento, las cuales se analizan mediante el diagrama de entalpía-temperatura, debido a que el área entre las líneas de saturación y operación es una medida del potencial total. A menor área, mayor la altura de la torre requerida para cumplir con las condiciones de proceso.

La figura 18 nos presenta de otra forma las tres principales variables en el diseño y como estas influyen el tamaño de la torre de enfriamiento.

**2.7.1 Sequedad del aire:** ya se ha hablado de la importancia de la temperatura de bulbo húmedo en las torres de enfriamiento, dejando a un lado la influencia de la temperatura de bulbo seco. En la práctica de diseño de torres de enfriamiento, el valor de las NTU se calcula suponiendo que el aire se encuentra adiabáticamente saturado, es decir, que la temperatura de bulbo húmedo y seco son iguales, por lo que la entalpía del aire de entrada se halla como la entalpía del aire saturado a la temperatura de bulbo húmedo. Ahora bien, si calculamos la entalpía del aire de entrada como aire no saturado, para la misma temperatura de bulbo húmedo, su valor sería menor que en caso saturado trayendo como consecuencia que la línea de operación se baje insignificadamente de

$(H_1)-(H_2)$  a  $H_1-H_2$ , lo que a su vez representa un leve aumento del potencial de entalpía (Figura 17a).

**2.7.2 Aproximación Limite:** las dos líneas de operación de la figura 17b. tienen el mismo cociente  $L/G$  (misma pendiente), e iguales rangos de 35 °F para la eliminación de la misma cantidad de calor del proceso. La línea de operación  $(H_1)-(H_2)$  trata de hacer el mismo enfriamiento que  $H_1-H_2$  y con el mismo aire de entrada (el mismo bulbo húmedo), pero entre las temperaturas de 115 y 80 °F en lugar de 120 y 85 °F. El área entre la curva de saturación y la línea de operación se disminuye considerablemente para el proceso de 115 a 80 °F, lo que significa mayor NTU y trae como resultado una torre mas grande. Esto también se puede observar en la figura 18.

**2.7.3 Cambio de la relación  $L/G$ :** en el caso donde se requieren áreas de piso pequeñas, puede ser necesario emplear cargas de líquido relativamente grandes sin aumentar la cantidad de aire. Esto disminuirá la sección transversal de la torre, pero aumenta la pendiente la línea de operación  $H_1-H_2$  a  $(H_1)-(H_2)$  como en la figura 17c, resultando en una disminución del potencial y una torre más alta. Esta es la observación simple de que si circula menos aire por libra de agua, menor es el enfriamiento.

**2.7.4 Localización del Rango de Operación:** en la figura 17d, se muestra una línea de operación  $H_1-H_2$  con un rango de 105 a 70 °F. Supóngase que se desea diseñar una torre con el mismo aire de entrada, pero para enfriar agua de 95 a 60 °F. Esto sería imposible con el mismo cociente  $L/G$ , ya que la línea de operación  $(H_1)-(H_2)$  interceptaría la línea de saturación. Obviamente la transferencia de calor se detendría en la intersección  $(H_2)$ , puesto que el potencial sería cero en ese punto. Se requerirá un cociente  $L/G$  considerablemente menor, lo que a su vez significa que debe circularse mas aire para la eliminación de la misma cantidad de calor.

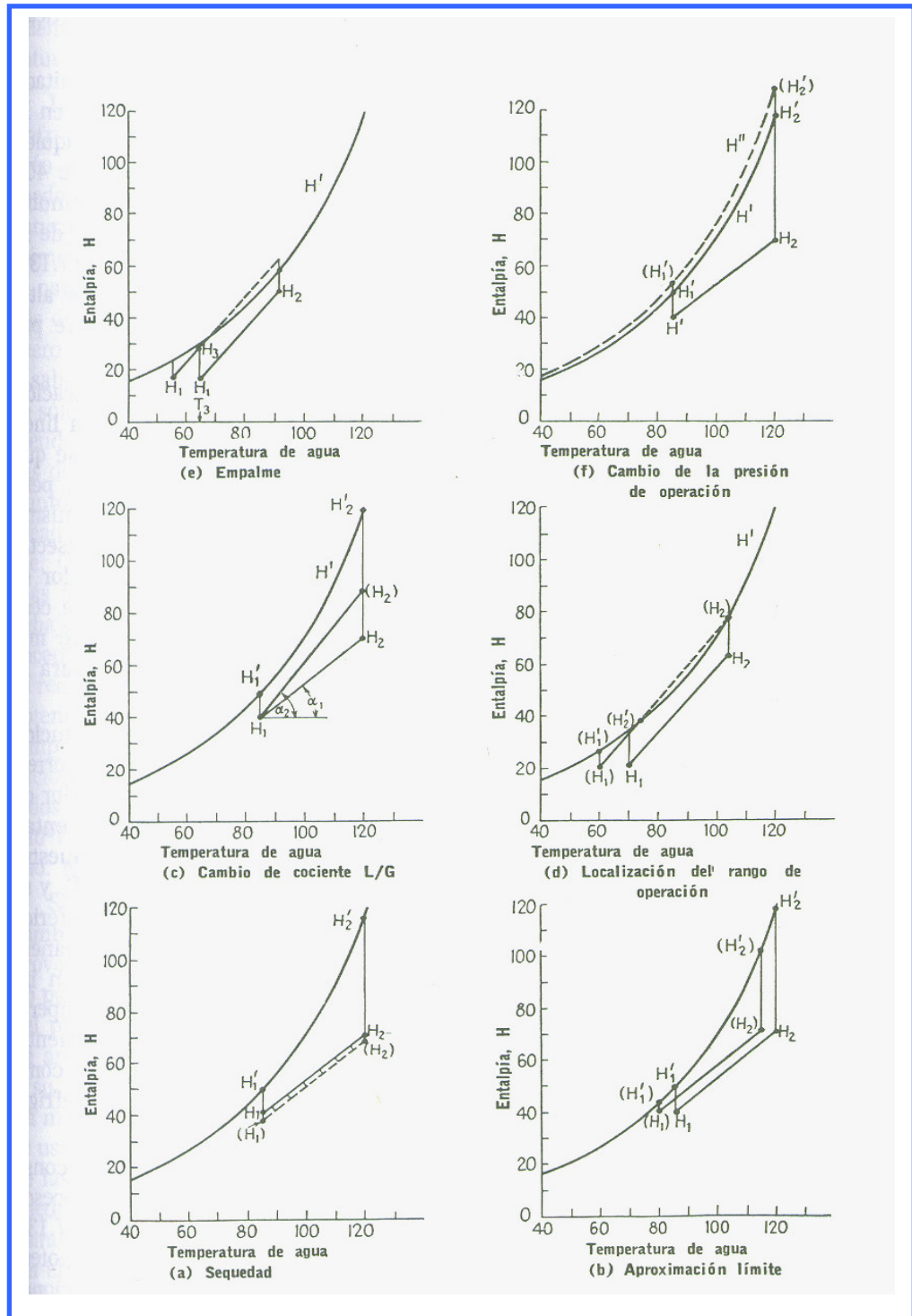
**2.7.5 Empalme:** uno de los medios de contrarrestar el reducido coeficiente  $L/G$  del numeral anterior, puede ser el uso de dos torres. Esto se llama empalme, (staging). El

agua en la parte superior de la primera torre esta caliente y entra en contacto con aire de entalpía  $H_2$  a lo largo de la línea de operación  $H_1$ - $H_2$  como se muestra en la figura 17e. El agua sale del depósito a una temperatura  $T_3$  y se bombea hacia una segunda torre, la que también usa aire atmosférico a entalpía  $H_1$ . La segunda torre opera entre  $H_1$  y  $H_3$ . De esta manera ambas líneas de operación pueden tener grandes pendientes sin interceptar la línea de saturación. Los cargos fijos y costos de operación aumentan el costo del agua considerablemente, pero el agua producida de esta manera deberá considerarse como agua helada, y su costo y rango comparados con el agua refrigerada.

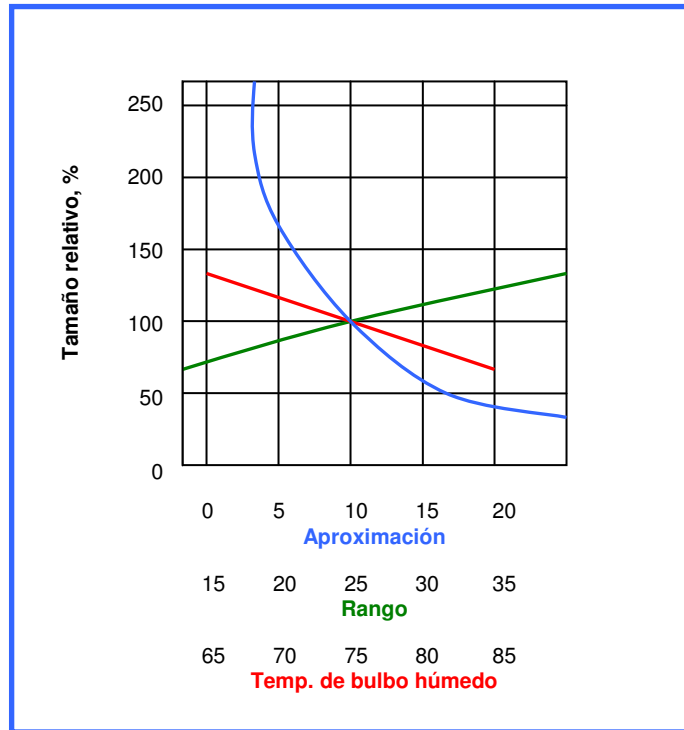
**2.7.6 Elevación:** a medida que la presión atmosférica se hace menor como se ve en la figura 17f, los valores de las entalpías de saturación se incrementan, trayendo como consecuencia que la línea de saturación se suba, lo que a su vez aumenta el potencial y reduce el tamaño requerido de la torre si las otras condiciones son constantes. Esto se debe a que la presión parcial del agua es fija mientras que la presión total ha disminuido. La humedad del aire saturado a elevación considerable es también mayor. [13]

La figura 18 nos muestra la tendencia general del efecto que tiene la temperatura de bulbo húmedo, el rango y la aproximación en el tamaño de la torre, los cálculos fueron referenciados al tamaño de una torre evaluada a 75 °F de bulbo húmedo, 25 °F de rango y una aproximación de 10 °F. Podemos ver en esta misma figura, como para unas condiciones de bulbo húmedo y rango constantes, la variación de la aproximación trae como consecuencia grandes cambios en el tamaño de la torre, una explicación a esto se presenta en el numeral 2.5.3.2. La aproximación es el factor que presenta una influencia mayor sobre el tamaño de la torre.

**FIGURA 17.** Efecto de las variables de diseño en el tamaño del potencial.

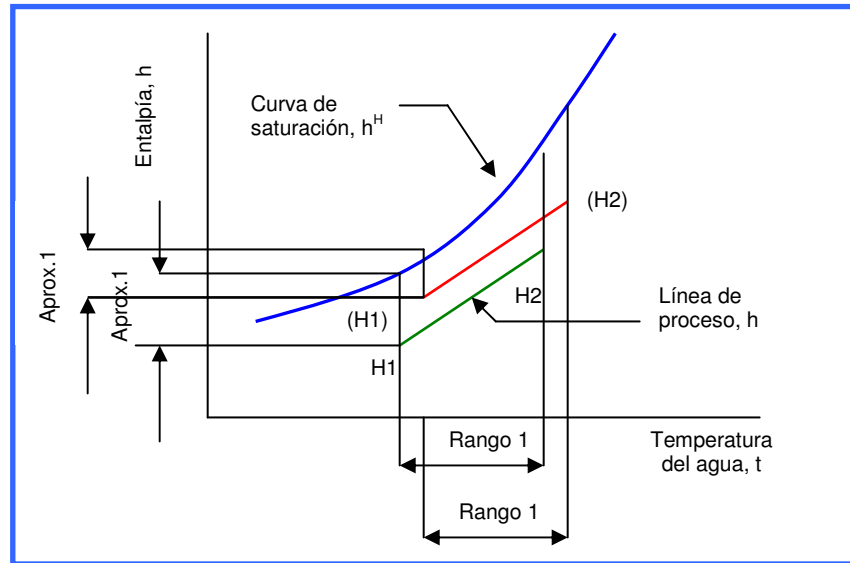


**FIGURA 18.** Efecto de la variación de los requerimientos de desempeño sobre el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.



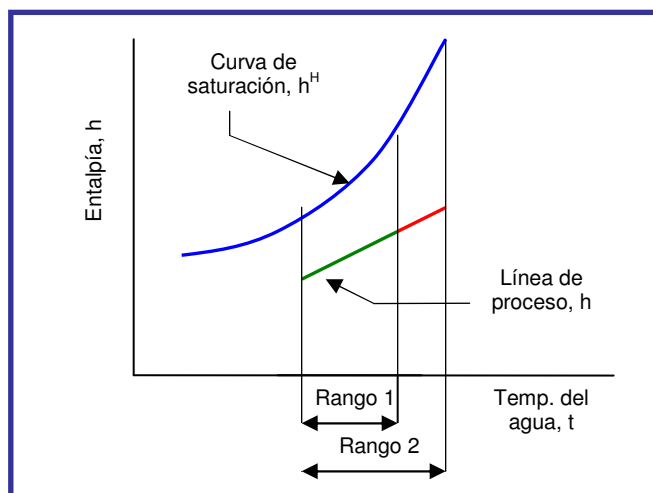
Para condiciones de rango y aproximación constantes, vemos como un aumento en la temperatura de bulbo húmedo traerá como consecuencia una disminución en el tamaño de la torre. En la figura 19 se muestra que para mantener la aproximación constante la temperatura de salida del agua debe aumentar el mismo valor que aumente el bulbo húmedo, lo que significa que el área entre las curvas de saturación y proceso se desplazará más hacia la derecha que hacia arriba y aprovechando el aumento en la pendiente de la curva de saturación tendrá un potencial total mayor (mayor área) el proceso  $(H_1)-(H_2)$  que  $H_1-H_2$ , y a mayor área, menor serán las NTU, y por consiguiente menor el tamaño de la torre.

**FIGURA 19.** Efecto de la variación del bulbo húmedo en el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.



Por último vemos también en la figura 18 como para condiciones de bulbo húmedo y aproximación constantes, un aumento en el rango conduce a un aumento en el tamaño relativo de la torre.

**FIGURA 20.** Efecto de la variación del rango en el tamaño relativo de una torre de enfriamiento.



La figura 20 muestra el diagrama entalpía-temperatura que explica este caso. Allí observamos un aumento del área como consecuencia del aumento del rango, de lo cual resulta que el potencial promedio de entalpía  $(h^H-h)_{avg}$  no cambia mucho, pero las NTU si se incrementan por el cambio en el rango de temperaturas del agua, por lo tanto esto requiere de una mayor área. Un aumento en el rango para una carga de líquido constante representa un aumento en la cantidad de calor que la torre debe disipar. [13], [18]

## 2.8 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

Ya que una torre de enfriamiento usa la atmósfera como medio de enfriamiento, está sujeta a las variables de ésta. Cuando se opera al bulbo húmedo de diseño, la torre deberá producir agua en el rango y temperatura especificados por el fabricante. Sin embargo, cuándo el bulbo húmedo baja, es lo mismo que aumentar el potencial en la torre. Si la carga de calor en la torre y los valores de L y G circulados a través de ella se mantienen constantes, el agua pasa por el mismo número de grados de enfriamiento (se mantiene el rango), pero las temperaturas de entrada y salida serán menores que las de diseño. La torre de enfriamiento sólo es capaz de remover la misma carga de calor de agua reduciendo automáticamente la diferencia de potencial. Las temperaturas del agua disminuyen de acuerdo al bulbo húmedo.

Si en alguna forma las cargas de aire y agua en una torre se cambian, el número de unidades de transferencia que la torre es capaz de proveer, también se alteran. Ordinariamente las cargas en una celda no pueden cambiarse considerablemente. De hecho, una variación de 20% del promedio de carga de agua del diseño es el máximo que puede realizarse, ya que las gotas se producen por boquillas, las que a su vez se han escogido para un flujo dado a carga determinada. La máxima capacidad de descarga será del 120% de diseño y cuando se usa menos del 80% de la carga de diseño, se reduce la dispersión de las gotas junto con la cantidad total de agua. Algunas veces, cuando el bulbo húmedo de operación es menor que el bulbo húmedo de diseño, es deseable usar el incremento de potencial para producir más agua de enfriamiento de la temperatura de diseño original. [13], [7]

### 3. MODELO MATEMÁTICO

Para realizar el análisis de una torre de enfriamiento de tiro mecánico a contracorriente fue necesario tener en cuenta dos modelos matemáticos, el primero representa el comportamiento interfacial en cada punto de la torre y el segundo representa una forma sencilla de obtener la torre característica.

#### 3.1 MODELO OPERACIONAL

Está conformado por ecuaciones de tipo:

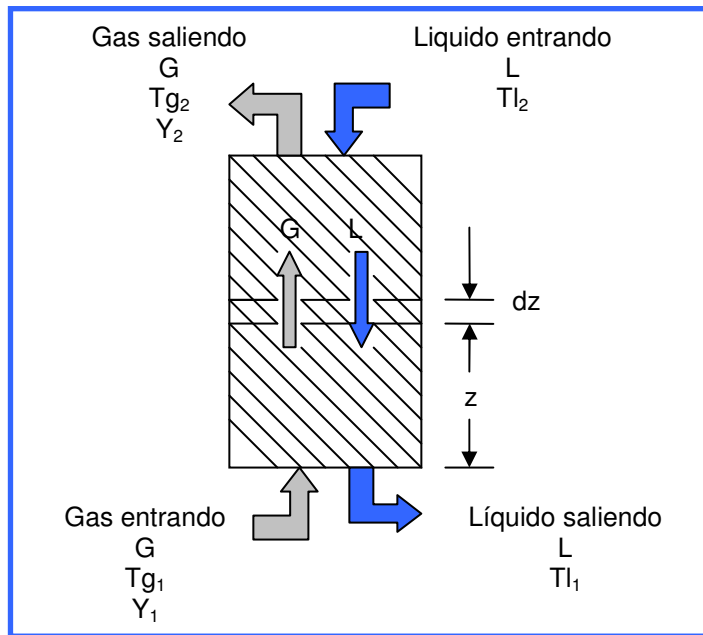
- Diferenciales Ordinarias Lineales de primer orden simultáneas (la razón de transferencia de calor desde el volumen de líquido a la interfase gas-líquido, la razón de transferencia de calor desde la interfase gas-líquido al volumen de gas, la razón de transferencia de masa en términos del Flux y el coeficiente de transferencia de masa y el balance de energía).
- Algebraico (la relación de equilibrio entre la humedad y la temperatura en la interfase gas-líquido).

A continuación se describe el modelo matemático utilizado para elaborar la simulación del comportamiento interfacial en cada punto de una torre de enfriamiento de tiro mecánico a contracorriente.

Las ecuaciones de diseño para operaciones de contacto gas-líquido son fácilmente desarrolladas y se componen de un balance de energía sencillo unido a expresiones de velocidades de transferencia de masa y calor.

La figura 21 ilustra esquemáticamente la torre y define la notación utilizada.

**FIGURA 21.** Torre a contracorriente gas-líquido.



Los flujos de gas y líquido son expresados como velocidades de masa, además se asume que la rata de evaporación es bastante baja mientras que la velocidad del líquido permanece constante. La velocidad del gas está especificada sobre una base de gas seco y por consiguiente también permanece constante.

Considerando dentro de la torre un elemento diferencial de volumen, de altura  $dZ$ , donde:

$Tg$ : temperatura del gas.

$Y$ : humedad del gas.

$Hg$ : entalpía del gas.

$Tl$ : temperatura del líquido.

$Hl$ : entalpía del líquido.

$Ti$ : temperatura en la interfase gas-líquido.

$Yi$ : humedad en la interfase gas-líquido.

Haciendo un balance de energía sobre éste elemento de volumen nos dará:

$$GdH_g = LdH_l \quad (1)$$

Esta expresión puede ser reorganizada en términos de la humedad y temperatura del gas y el líquido así:

$$H_l = C_l(T_l - T_{ref}) \quad (2)$$

$$H_g = C_s(T_g - T_{ref}) + Y\Delta H_{evap} \quad (3)$$

Donde:

$C_l$ : calor específico del líquido.

$C_s$ : calor húmedo o calor de mezcla. A bajas humedades, es aproximadamente igual al calor específico del gas seco.

$\Delta H_{evap}$ : calor latente de vaporización del líquido.

Diferenciando y sustituyendo en el balance de energía, ecuación (1), se obtiene:

$$G(C_s dT_g + \Delta H_{evap} dY) = L C_l dT_l \quad (4)$$

En la diferenciación, la dependencia de  $C_s$  sobre la humedad es omitida.

Existen tres expresiones de la velocidad de transferencia que pueden ser enunciadas. Primero, la razón de transferencia de calor desde el volumen de líquido a la interfase gas-líquido:

$$L C_l dT_l = h_l (T_l - T_i) a dZ \quad (5)$$

Donde:

$h_l$ : coeficiente de transferencia de calor de la fase líquida. Es el área disponible para la transferencia de calor por unidad de volumen de la torre.

Segundo, la razón de transferencia de calor desde la interfase gas-líquido al volumen del gas:

$$GCsdTg = hg(Ti - Tg)adZ \quad (6)$$

Donde:

$hg$ : coeficiente de transferencia de calor de la fase gaseosa.

Finalmente, la razón de transferencia de masa puede ser expresada en términos del Flux y el coeficiente de transferencia de masa:

$$N_A = (N_A + N_B)x_{Ao} + Kx(x_{Ao} - x_{A\infty}) \quad (7)$$

Donde:

$N_A$ : flux de líquido.

$N_B$ : flux de gas seco.

$x_{Ao}$ : fracción molar interfacial del vapor A en el gas.

$x_{A\infty}$ : fracción molar del volumen del vapor A en el gas.

$Kx$ : coeficiente de transferencia de masa.

El flux del gas libre de vapor,  $N_B$ , es cero en éste caso particular, por tanto la razón molar de evaporación está dada por:

$$W_A(1 - x_{Ao}) = KxS(x_{Ao} - x_{A\infty}) \quad (8)$$

Donde:

$S$ : área superficial exterior.

Si se desprecia la diferencia entre  $(1-x_{Ao})$  y  $(1-x_{A\infty})$ :

$$N_A(1 - x_{Ao}) = Kx(x_{Ao} - x_{A\infty}) \quad (9)$$

$$N_A = Kx(M_B / M_A)(Y_i - Y) \quad (10)$$

$$GdY = M_A N_A = KxM_B (Y_i - Y)adZ \quad (11)$$

Esta ecuación incluye la suposición adicional de que el área disponible para la transferencia de masa es la misma que la disponible para la transferencia de calor.

Las ecuaciones 4, 5, 6 y 11 junto a las condiciones límite en el fondo de la torre y la relación de equilibrio entre la humedad y la temperatura en la interfase gas-líquido

$$Y_i = f(T_i, p_i) \quad (12)$$

proporciona un modelo matemático completo del proceso físico. Para mayor claridad se reescriben las ecuaciones así:

$$\frac{dTg}{dZ} + \frac{Hvap}{GCs} \frac{dY}{dZ} = \frac{LCl}{GCs} \frac{dTl}{dZ} \quad (13)$$

$$\frac{dTl}{dZ} = \frac{hla}{LCl} (Tl - Ti) \quad (14)$$

$$\frac{dTg}{dZ} = \frac{hga}{GCs} (Ti - Tg) \quad (15)$$

$$\frac{dY}{dZ} = \frac{KxM_B a}{G} (Y_i - Y) \quad (16)$$

$$Y_i = f(T_i, p_i) \quad (17)$$

Estas cuatro ecuaciones diferenciales y la relación de equilibrio forma un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas  $Tg(Z)$ ,  $Tl(Z)$ ,  $Y(Z)$ ,  $Ti(Z)$  y  $Yi(Z)$ . [21]

Para la resolución de estas ecuaciones fue necesario recurrir al método de Newton-Raphson (para la relación de equilibrio entre la humedad y la temperatura en la interfase gas-líquido) y al método de Runge Kutta de cuarto orden ( para la razón de transferencia de calor desde el volumen de líquido a la interfase gas-líquido, la razón de transferencia de calor desde la interfase gas-líquido al volumen de gas y la razón de transferencia de masa en términos del Flux y el coeficiente de transferencia de masa).

A continuación se describe cada uno de ellos:

**3.1.1 Método de Newton-Raphson:** el método de Newton-Raphson (o simplemente de Newton) es uno de los más poderosos y conocidos métodos numéricos para resolver el problema de encontrar raíces  $f(x)=0$ .

Existen muchas formas para exponer el método de Newton; la más común es considerar la técnica gráfica. Otra posibilidad es deducir este método como una simple técnica para obtener una convergencia más rápida que la que ocurre con otros tipos de iteraciones funcionales.

Una tercera forma de presentar el método de Newton está basado en los polinomios de Taylor y es el que se utilizará en el presente trabajo.

Supóngase  $f \in C^2 [a,b]$ . Sea  $x \in [a,b]$  una aproximación a  $p$  tal que  $f'(x) \neq 0$  y  $|\bar{x} - p|$  es "pequeño". Considere el polinomio de Taylor de primer grado desarrollado alrededor de  $\bar{x}$ ,

$$f(x) = f(\bar{x}) + (x - \bar{x})f'(\bar{x}) + \frac{(x - \bar{x})^2}{2} f''(\xi(x)) \quad [1]$$

Donde  $\xi(x)$  se encuentra entre  $x$  y  $\bar{x}$ . Puesto que  $f(p)=0$ , esta ecuación, con  $x=p$ , dará,

$$0 = f(\bar{x}) + (p - \bar{x})f'(\bar{x}) + \frac{(p - \bar{x})^2}{2} f''(\xi(p)) \quad [2]$$

El método de Newton se obtiene suponiendo que, puesto que  $|p - \bar{x}|$  es pequeño, el término que involucra a  $(p - \bar{x})^2$  es despreciable y que

$$0 \approx f(\bar{x}) + (p - \bar{x})f'(\bar{x}) \quad [3]$$

Despejando p en ésta ecuación resulta

$$p \approx \bar{x} - \frac{f(\bar{x})}{f'(\bar{x})} \quad [4]$$

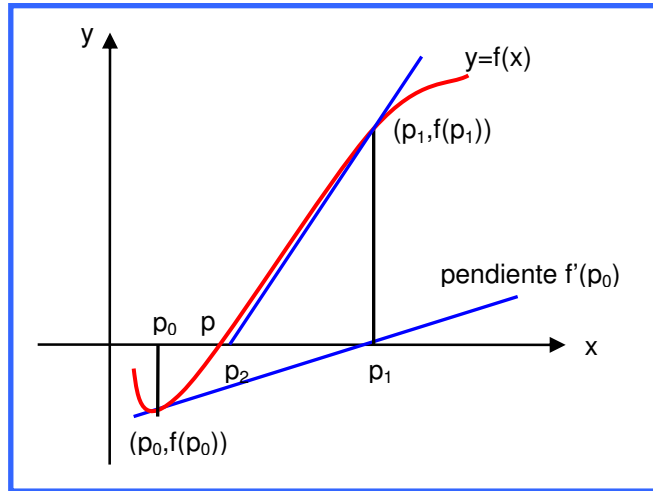
De este modo se tiene una idea del método de Newton-Raphson que empieza con una aproximación inicial  $p_0$  y genera la sucesión  $\{p_n\}$ , definida por

$$p = p_{n-1} - \frac{f(p_{n-1})}{f'(p_{n-1})} \quad n \geq 1 \quad [5]$$

La figura 21 ilustra cómo las aproximaciones se obtienen usando tangentes sucesivas.

Empezando con una aproximación inicial  $p_0$ , la aproximación  $p_1$  corresponde a la intersección con el eje "x" de la recta tangente a la gráfica de f en  $(p_0, f(p_0))$ . La aproximación  $p_1$  corresponde a la intersección con el eje x de la recta tangente a la gráfica de f en  $(p_0, f(p_0))$ . La aproximación  $p_2$  corresponde a la intersección con el eje x de la tangente a la gráfica de f en  $(p_1, f(p_1))$ , y así sucesivamente. [1]

**FIGURA 22.** Representación gráfica del Método de Newton-Raphson.



Para aplicar éste método a nuestro caso es necesario hacer unas simplificaciones que se describen a continuación:

$$\frac{dTg}{dZ} + \frac{\lambda}{GCs} \frac{dY}{dZ} = \frac{LCl}{GCs} \frac{dTl}{dZ} \quad (18)$$

Reemplazando (14), (15) y (16) en (18) tenemos

$$\frac{hga}{GCs} (Ti - Tg) + \frac{\lambda}{GCs} \left( \frac{KxM_B a}{G} \right) (Yi - Y) = \frac{LCl}{GCs} \frac{hla}{LCl} (Tl - Ti) \quad (19)$$

Multiplicando a ambos lados por GCs y agrupando

$$(hga + hla)Ti + \frac{\lambda KxM_B a}{G} f = hlaTl + hgaTg + \frac{\lambda KxM_B a}{G} Y \quad (20)$$

Haciendo  $\alpha = hga + hla$  (21)

$$\beta = \frac{\lambda KxM_B}{G} \quad (22)$$

$$\alpha T_i + \beta f - hlaT_l - hgaT_g - \beta Y = 0 = f(T_i) \quad (23)$$

Planteando la ecuación de equilibrio para el sistema aire-agua

$$f = Y_i = 4.761 * 10^{-3} \exp[(5.789 * 10^{-2})T_i] \quad (24)$$

Reemplazando (24) en (23)

$$f(T_i) = \alpha T_i + \beta[4.761 * 10^{-3} \exp((5.789 * 10^{-2})T_i)] - hlaT_l - hgaT_g - \beta Y \quad (25)$$

Derivando

$$f'(T_i) = \alpha + [\beta * 4.761 * 10^{-3} * 5.789 * 10^{-2} \exp((5.789 * 10^{-2})T_i)] \quad (26)$$

Finalmente planteamos el método de Newton-Raphson con las ecuaciones (24), (25), (26) y una aproximación inicial  $T_{is}=0$ .

$$T_{is} = T_i - \frac{f(T_i)}{f'(T_i)} \quad (27)$$

$$Diferencia = |T_i - T_{is}| \quad (28)$$

### 3.1.2 Método de Runge-Kutta de cuarto orden

$$K_{1,i} = h\hat{f}_i(t_j, W_{1,j}, \dots, W_{m,j}) \quad [1]$$

$$K_{2,i} = h\hat{f}_i\left(t_j + \frac{h}{2}, W_{1,j} + \frac{1}{2}K_{1,1}, W_{2,j} + \frac{1}{2}K_{1,2}, \dots, W_{m,j} + \frac{1}{2}K_{1,m}\right) \quad [2]$$

$$K_{3,i} = hf\left(t_j + \frac{h}{2}, W_{1,j} + \frac{1}{2}K_{2,1}, W_{2,j} + \frac{1}{2}K_{2,2}, \dots, W_{m,j} + \frac{1}{2}K_{2,m}\right) \quad [3]$$

$$K_{4,i} = hf\left(t_j, W_{1,j} + K_{3,1}, W_{2,j} + K_{3,2}, \dots, W_{m,j} + K_{3,m}\right) \quad [4]$$

$$W_{i,j+1} = W_{i,j} + \frac{1}{6}[K_{1,i} + 2K_{2,i} + 2K_{3,i} + K_{4,i}] \quad [5]$$

Este método tiene un error de truncamiento local de  $O(h^4)$  siempre que la solución  $y(t)$  cuente con cinco derivadas continuas. La razón para introducir la terminología  $K_1, K_2, K_3, K_4$  en el método, es para eliminar la necesidad de anidamientos sucesivos en la segunda variable de  $f(t,y)$ . [1]

Aplicando éste método a nuestro caso tenemos:

- ✓ Razón de transferencia de masa (ecuación (16))

$$K_{1,1} = h\left(\frac{KxM_B}{G}\right)(Y_i - Y(i)) \quad (29)$$

$$K_{2,1} = h\left(\frac{KxM_B}{G}\right)[Y_i - (Y(i) + 0.5K_{1,1})] \quad (30)$$

$$K_{3,1} = h\left(\frac{KxM_B}{G}\right)[Y_i - (Y(i) + 0.5K_{2,1})] \quad (31)$$

$$K_{4,1} = h\left(\frac{KxM_B}{G}\right)[Y_i - (Y(i) + K_{3,1})] \quad (32)$$

$$Y_{(i+1)} = Y(i) + \frac{1}{6}(K_{1,1} + 2K_{2,1} + 2K_{3,1} + K_{4,1}) \quad (33)$$

- ✓ Razón de transferencia de calor desde la interfase gas-líquido al volumen del gas (ecuación (15))

$$K_{1,2} = h \left( \frac{hga}{GCs} \right) (Tin - Tg(i)) \quad (34)$$

$$K_{2,2} = h \left( \frac{hga}{GCs} \right) [Tin - (Tg(i) + 0.5K_{1,2})] \quad (35)$$

$$K_{3,2} = h \left( \frac{hga}{GCs} \right) [Tin - (Tg(i) + 0.5K_{2,2})] \quad (36)$$

$$K_{4,2} = h \left( \frac{hga}{GCs} \right) [Tin - (Tg(i) + K_{3,2})] \quad (37)$$

$$Tg_{(i+1)} = Tg(i) + \frac{1}{6} (K_{1,2} + 2K_{2,2} + 2K_{3,2} + K_{4,2}) \quad (38)$$

- ✓ Razón de transferencia de calor desde el volumen de líquido a la interfase gas-líquido (ecuación (14))

$$K_{1,3} = h \left( \frac{hla}{LCl} \right) (Tl(i) - Tin(i)) \quad (39)$$

$$K_{2,3} = h \left( \frac{hla}{LCl} \right) [(Tl(i) + 0.5K_{1,3}) - Tin] \quad (40)$$

$$K_{3,3} = h \left( \frac{hla}{LCl} \right) [(Tl(i) + 0.5K_{2,3}) - Tin] \quad (41)$$

$$K_{4,3} = h \left( \frac{hla}{LCl} \right) [(Tl(i) + K_{3,3}) - Tin] \quad (42)$$

$$Tl_{(i+1)} = Tl(i) + \frac{1}{6} (K_{1,3} + 2K_{2,3} + 2K_{3,3} + K_{4,3}) \quad (43)$$

### 3.2 MODELO TERMODINÁMICO

Está basado en la teoría de Merkel que se describe a continuación.

La función básica de una torre de enfriamiento es enfriar agua por mezcla íntimamente con aire. Este enfriamiento está acompañado por una combinación de transferencia de calor sensible entre el aire y el agua y la evaporación de una pequeña cantidad de agua. Este tipo de transferencia de calor está representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t2}^{t1} \frac{1}{(hw - ha)} dt \quad (44)$$

Donde:

$KaV/L$ : torre característica.

$t1$ : temperatura del agua caliente (°F ó °C).

$t2$ : temperatura del agua fría (°F ó °C).

$h_w$ : entalpía de la película de aire saturada a la temperatura del agua caliente ( $t1$ ) (J/kg de aire seco ó BTU/lb de aire seco).

$h_a$ : entalpía del aire de enfriamiento a la temperatura de bulbo húmedo (J/kg de aire seco ó BTU/lb de aire seco).

Su análisis incluye la transferencia de calor sensible y latente dentro de un proceso de transferencia de calor y masa global basado en la diferencia de entalpía y define los requerimientos de la torre de enfriamiento.

El lado derecho de ésta ecuación es función de las propiedades del agua y del aire y por tanto, dependiente de las dimensiones de la torre, mientras que el lado izquierdo es función de las características de la torre y su empaque.

Termodinámicamente también se cumple que el calor removido del agua puede ser igual al calor absorbido por el aire.

$$L(t_1 - t_2) = G(h_2 - h_1) \quad (45)$$

De otra forma:

$$h_2 = h_1 + \frac{L}{G}(t_1 - t_2) \quad (46)$$

Donde:

$h_2$ : entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida (J/kg de aire seco ó BTU/lb de aire seco).

$h_1$ : entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo de entrada (J/kg de aire seco ó BTU/lb de aire seco).

$L/G$ : razón líquido-gas (lb/lb ó Kg/Kg). [9]

El valor de la torre característica ( $KaV/L$ ) puede ser resuelto por varios métodos como se explicó en el numeral 2.4, sin embargo, para nuestro caso utilizaremos el método de integración numérica de cuatro puntos de Tchebycheff. Este método para evaluar numéricamente la integral

$$\int_a^b y dx \quad [1]$$

usa valores de “y” para valores determinados de “x” dentro del intervalo  $[a,b]$ , la suma de estos valores de “y” multiplicados por un intervalo de tiempo constante  $(b-a)$  dará el valor de la integral.

$$\int_a^b y dx = \frac{(b-a)}{4} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad [2]$$

Donde:

$y_1$ : valor de "y" a "x"= $a+0.1(b-a)$ .

$y_2$ : valor de "y" a "x"= $a+0.4(b-a)$ .

$y_3$ : valor de "y" a "x"= $b-0.1(b-a)$ .

$y_4$ : valor de "y" a "x"= $b-0.4(b-a)$ .

Para evaluar  $KaV/L$  en nuestro caso tenemos:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{(h_w - h_a)} \cong \frac{t_1 - t_2}{4} \left[ \frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \quad (47)$$

Donde:

$\Delta h_1$ : valor de  $(h_w - h_a)$  a  $t_2+0.1(t_1-t_2)$ .

$\Delta h_2$ : valor de  $(h_w - h_a)$  a  $t_2+0.4(t_1-t_2)$ .

$\Delta h_3$ : valor de  $(h_w - h_a)$  a  $t_1-0.4(t_1-t_2)$ .

$\Delta h_4$ : valor de  $(h_w - h_a)$  a  $t_1-0.1(t_1-t_2)$ . [19]

## 4. RESULTADOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

En este capítulo se explica cómo está desarrollado el algoritmo con el cuál el usuario tiene contacto.

Aquí el usuario aprenderá la forma de manipular al herramienta; qué se puede obtener y qué se necesita para lograrlo. Para tal fin se muestra el panel frontal de control y visualización de resultados. Lo anterior se complementa con las gráficas de resultados arrojadas por el programa.

Nuestro SubVI tiene 9 opciones: Información, Datos de entrada, Teoría de Merkel, Perfil de Temperatura 1, Perfil de Temperatura 2, Perfil de Humedad, Resultados, Parada y Fallas, todas estas paletas se muestran en la figura 23.

A continuación se va a estudiar cada una de las opciones.

a) Información: nos muestra la información básica del programa. Su diagrama de bloques se observa en la figura 24.

Figura 23. Panel de control del programa.

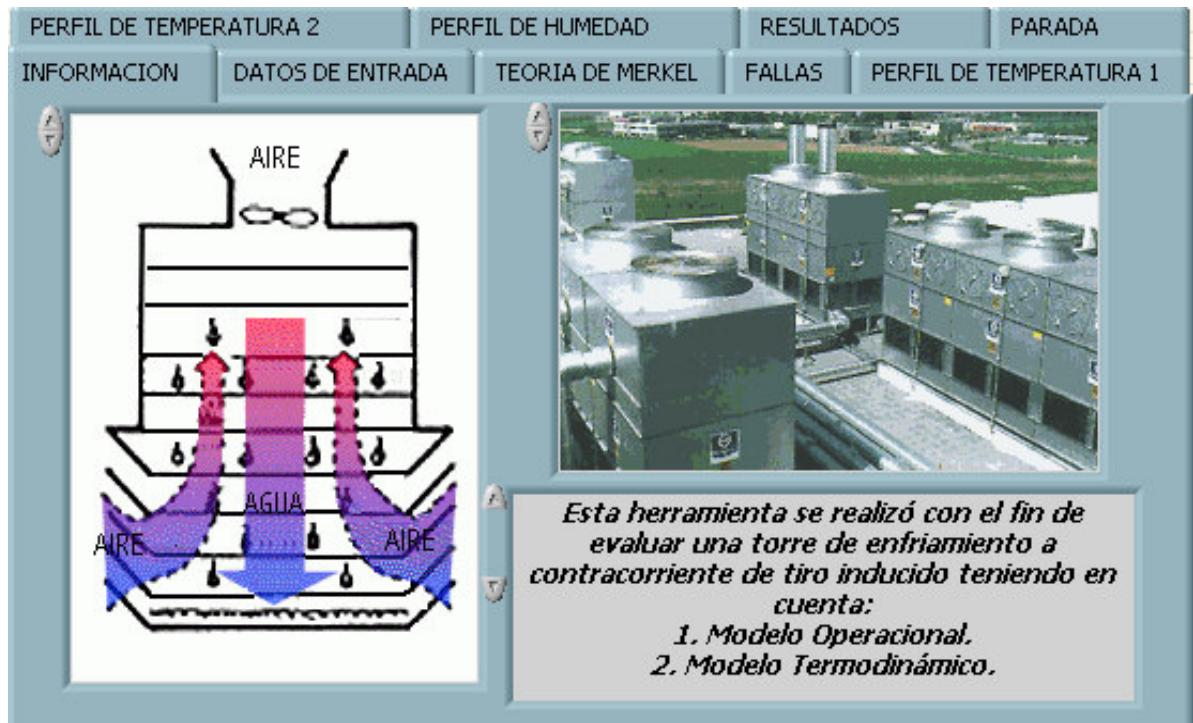
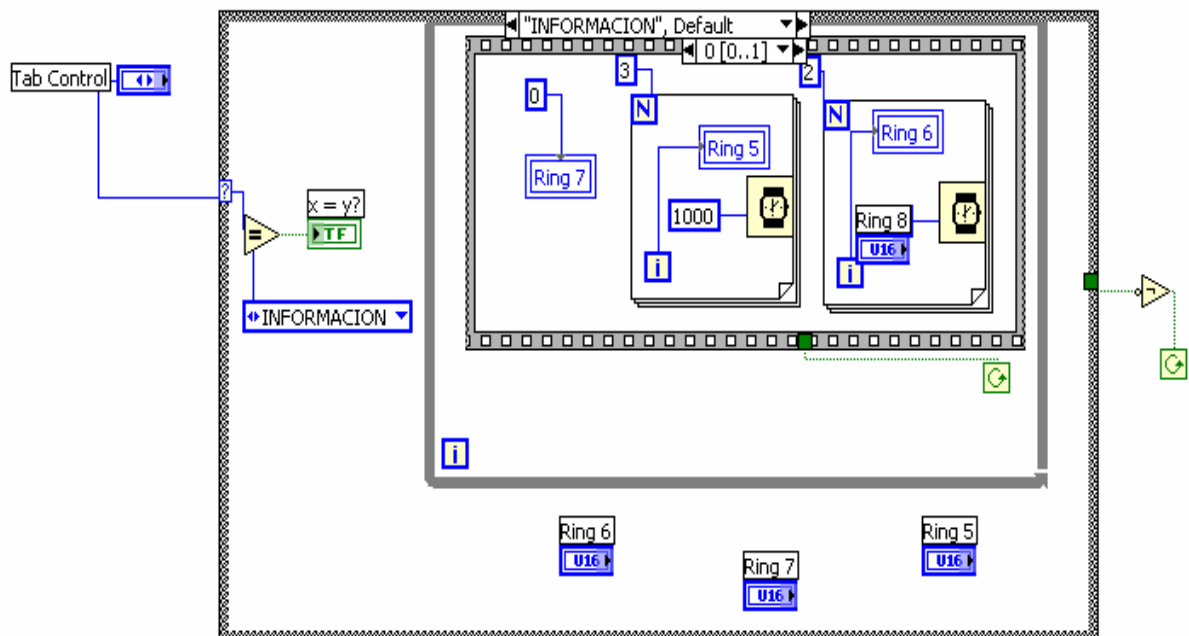


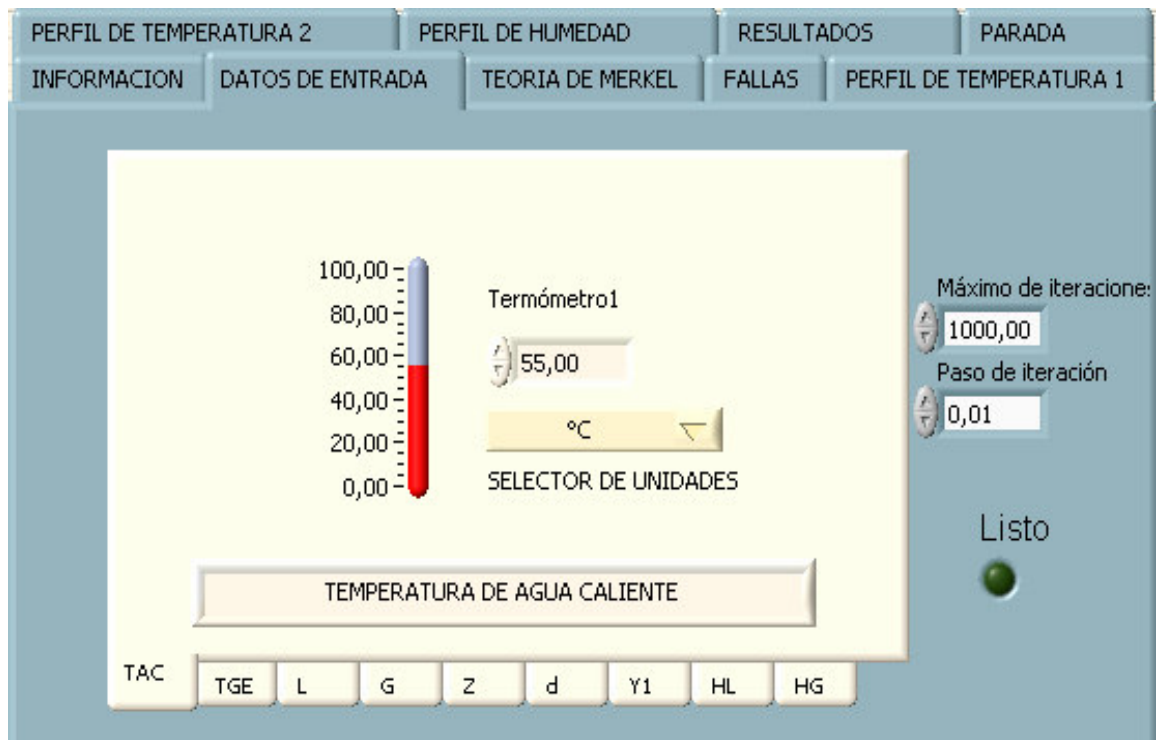
Figura 24. Diagrama de bloques explicando la opción Información.



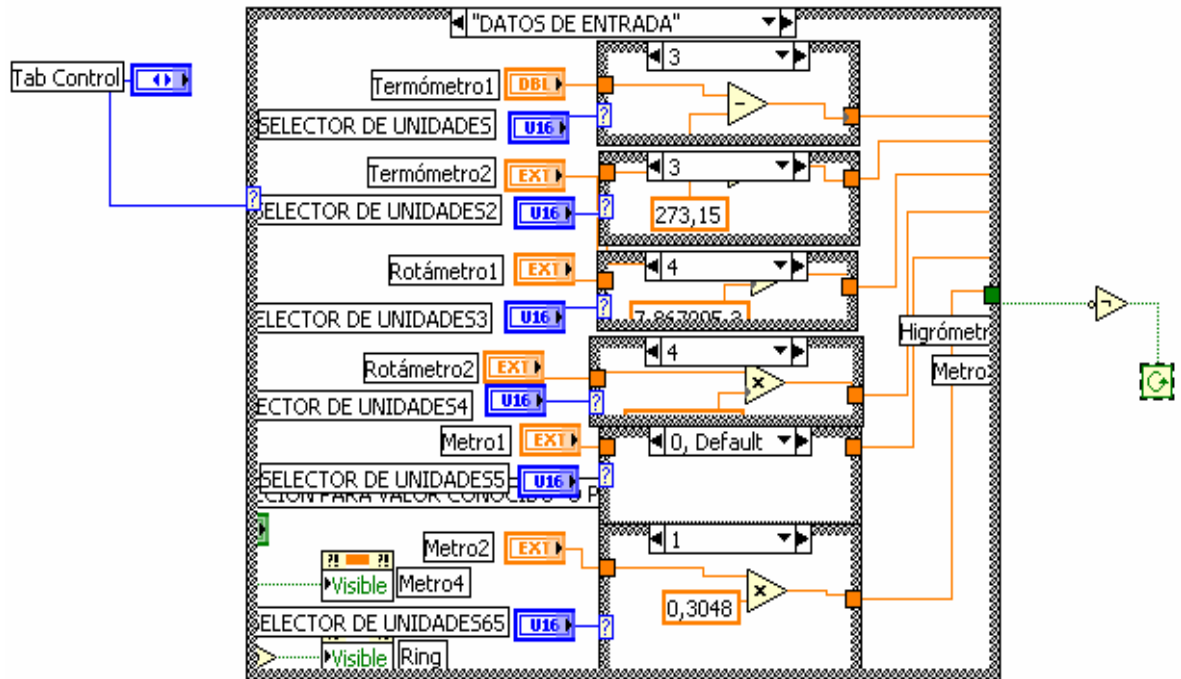
En esta figura se puede observar que se utiliza un “Case structure” que contiene un “Stacked sequence structure” para alternar las gráficas y el texto de la animación, a su vez, éste contiene un “For Loop” que permite controlar el tiempo de visualización de la animación.

b) Datos de Entrada: contiene las opciones que el usuario debe ingresar o escoger. Su panel frontal se muestra en la figura 25 y contiene un “Round Led” que cambia de color cuando el programa ha finalizado su ejecución. El diagrama de bloques se muestra en la figura 26.

**Figura 25.** Panel de control de la opción Datos de Entrada.



**Figura 26.** Diagrama de bloques explicando la opción Datos de Entrada.



En la figura 26 se puede observar que se utiliza un “Case structure” que contiene las unidades en las que se manejan los datos de entrada.

c) Teoría de Merkel: contiene los componentes necesarios para calcular la torre característica (los valores de dichos componentes deben ser ingresados por el usuario) y la gráfica correspondiente a los perfiles de entalpía para el agua y el aire. Su panel frontal se muestra en la figura 27 y el diagrama de bloques se muestra en la figura 28.

Figura 27. Panel de control de la opción Teoría de Merkel.

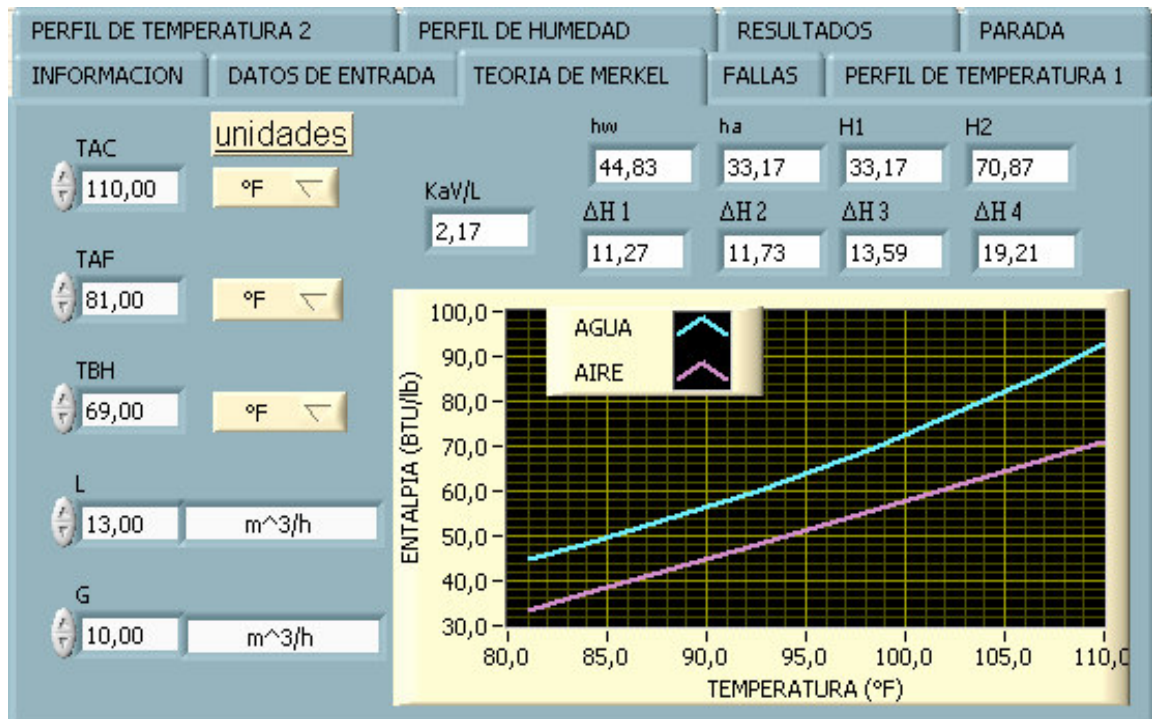
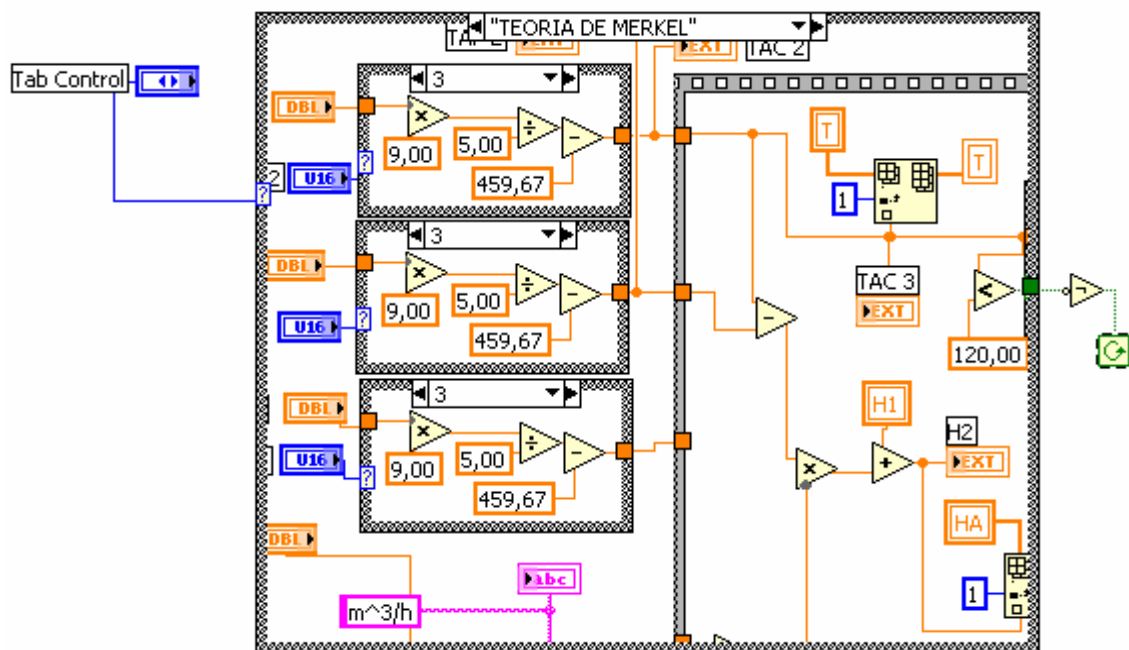


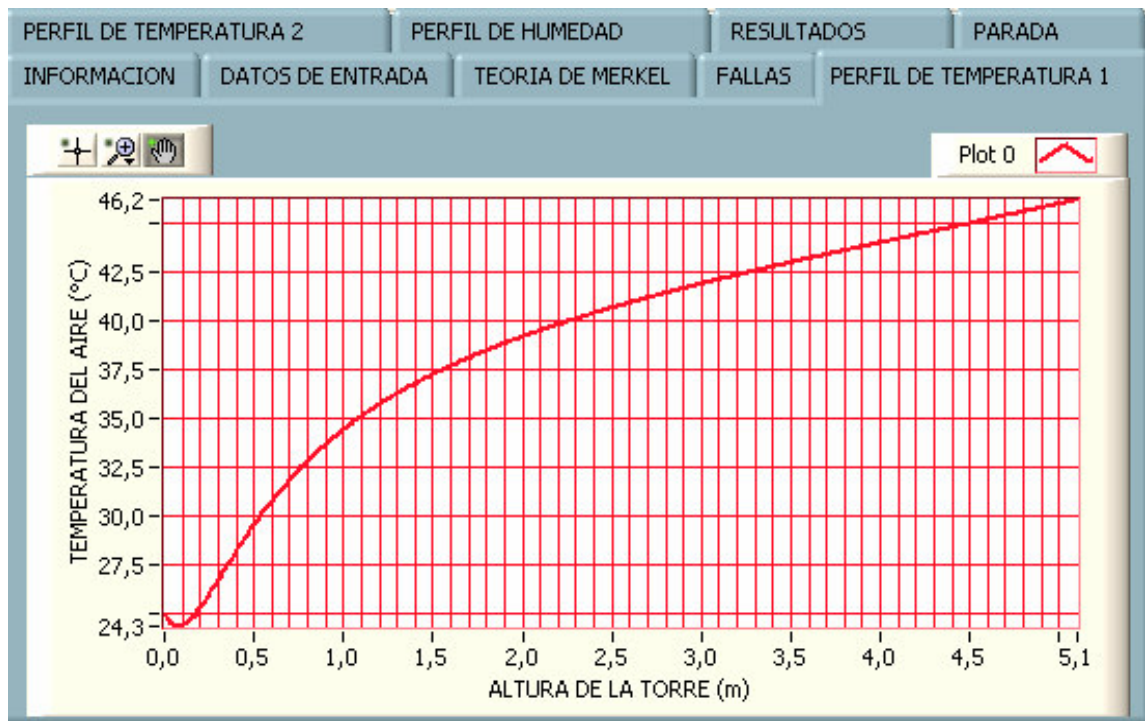
Figura 28. Diagrama de bloques explicando la opción Teoría de Merkel.



En la figura 28 se observa un “Case structure” que contiene las unidades de los componentes de la teoría de Merkel, adicionalmente encontramos un “Stacked sequence structure” que contiene los procedimientos necesarios para desarrollar la ecuación de Merkel por el método de Tchebycheff (descrito en el numeral 3.2).

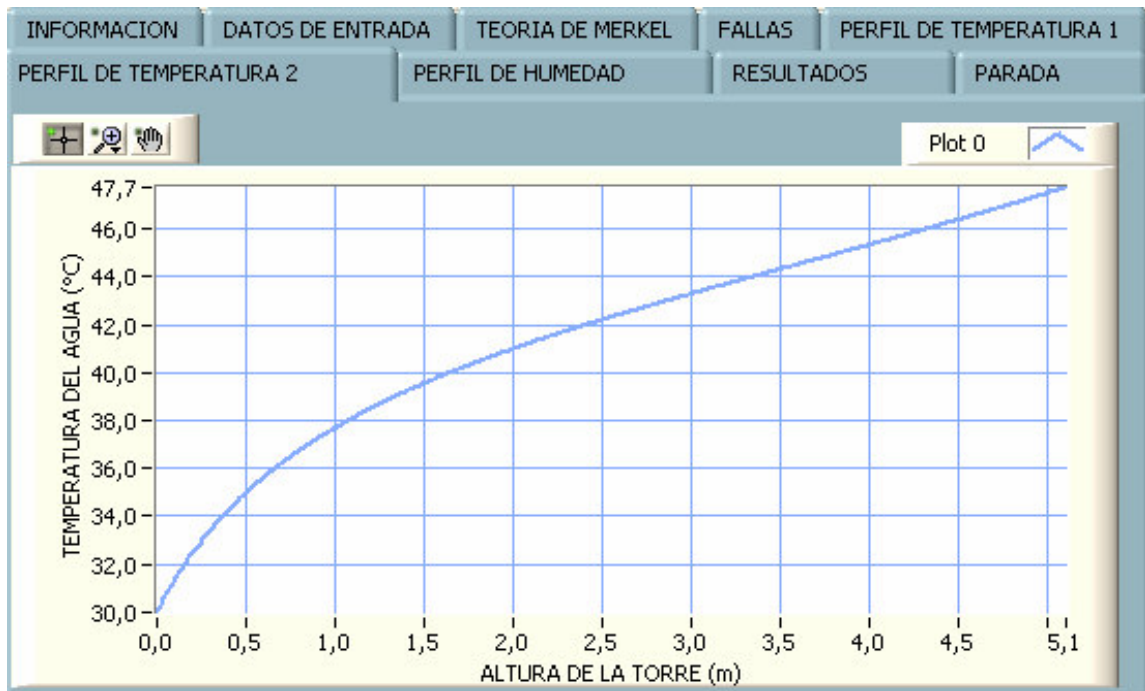
d) Perfil de Temperatura 1: contiene la gráfica del comportamiento de la temperatura del aire a través de la torre. Su panel frontal se muestra en la figura 29.

**Figura 29.** Panel frontal de la opción Perfil de Temperatura 1.



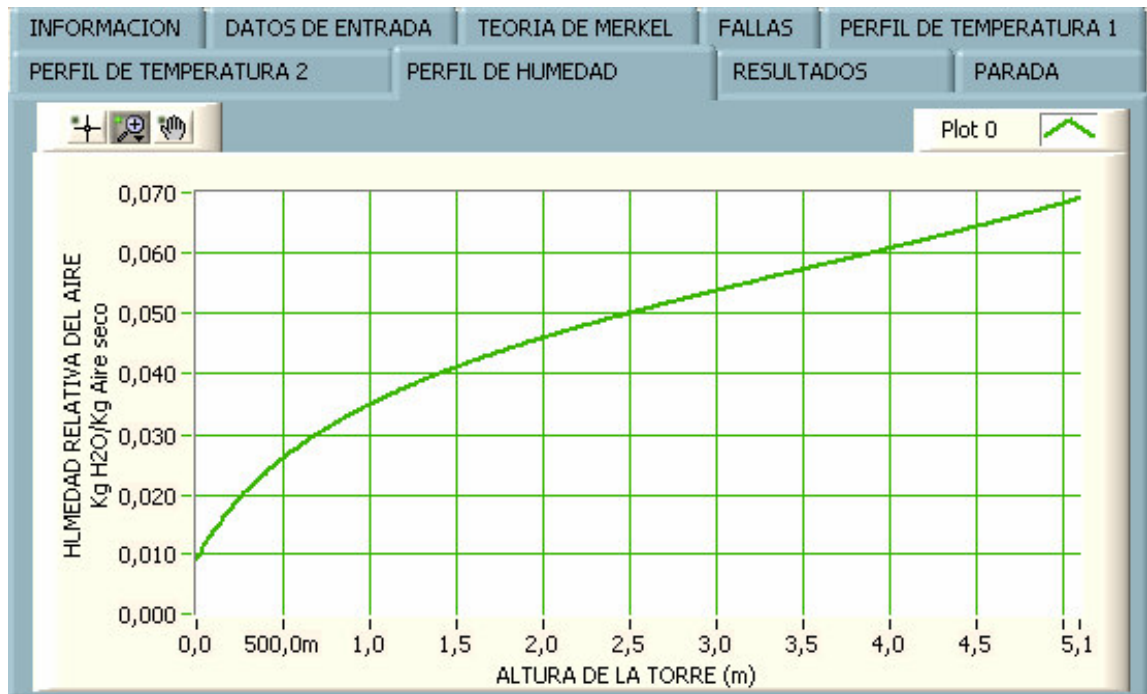
e) Perfil de Temperatura 2: contiene la gráfica del comportamiento de la temperatura del agua a través de la torre. Su panel frontal se muestra en la figura 30.

Figura 30. Panel frontal de la opción Perfil de Temperatura 2.



f) Perfil de Humedad: contiene la gráfica del comportamiento de la humedad del aire a través de la torre. Su panel frontal se muestra en la figura 31.

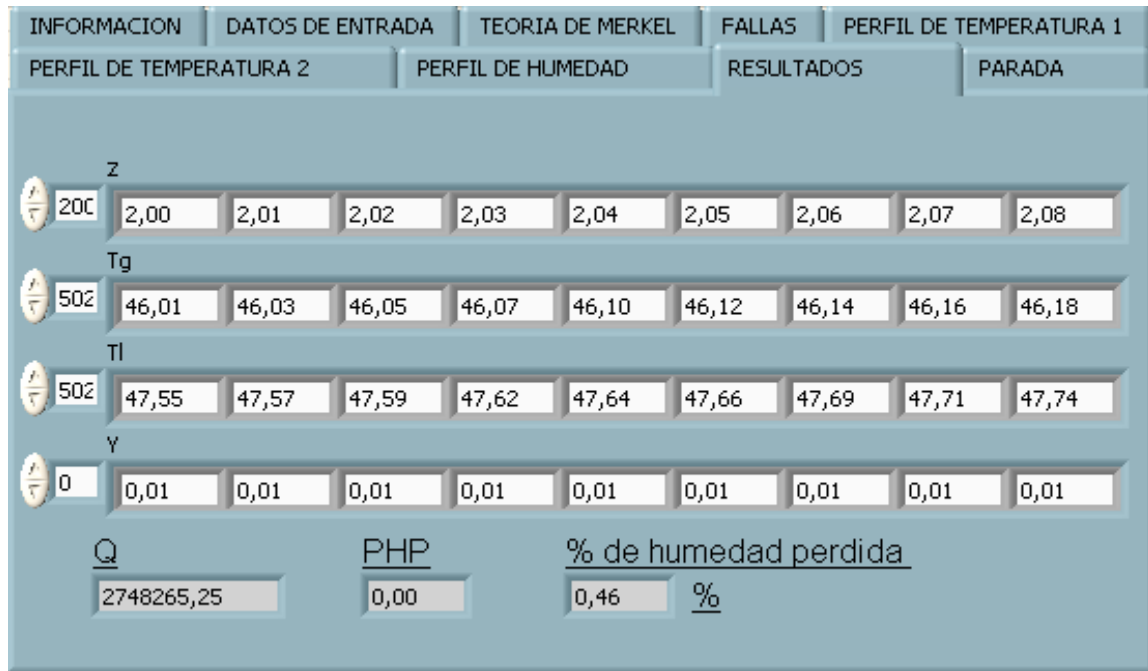
Figura 31. Panel frontal de la opción Perfil de Humedad.



g) Resultados: contiene los datos que se graficaron en los perfiles y muestra el valor del calor retirado y el porcentaje de humedad perdida en la torre. Su panel frontal se muestra en la figura 32.

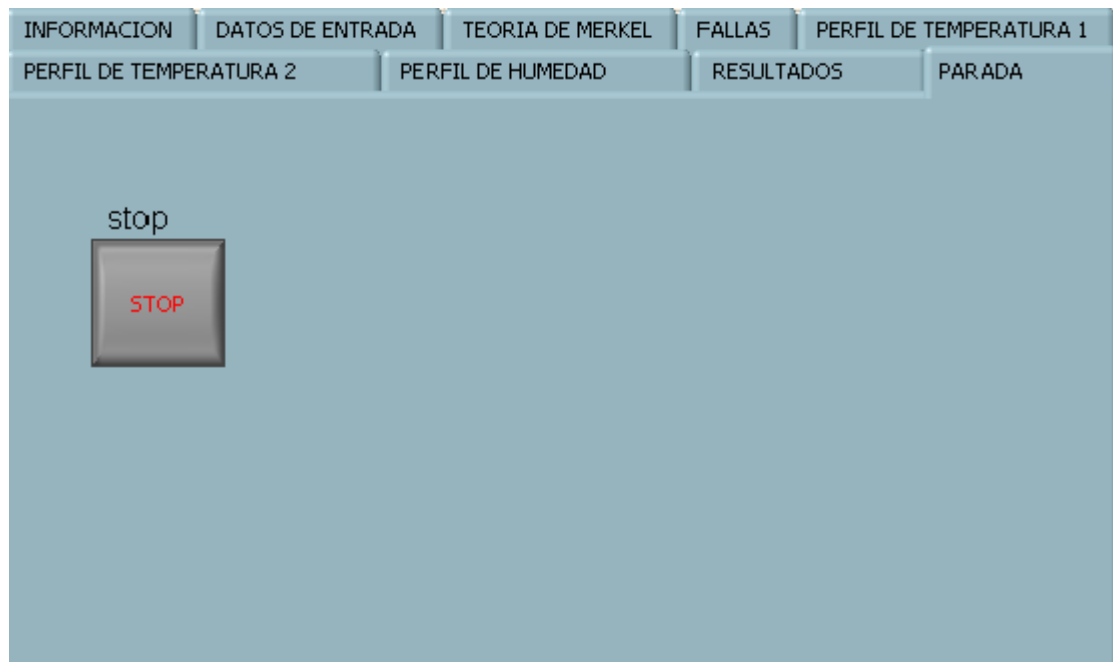
En los resultados de la humedad no se observan cambios debido a la cantidad de puntos que tiene en cuenta el algoritmo (dado por el paso elegido).

**Figura 32.** Panel frontal de la opción Resultados.



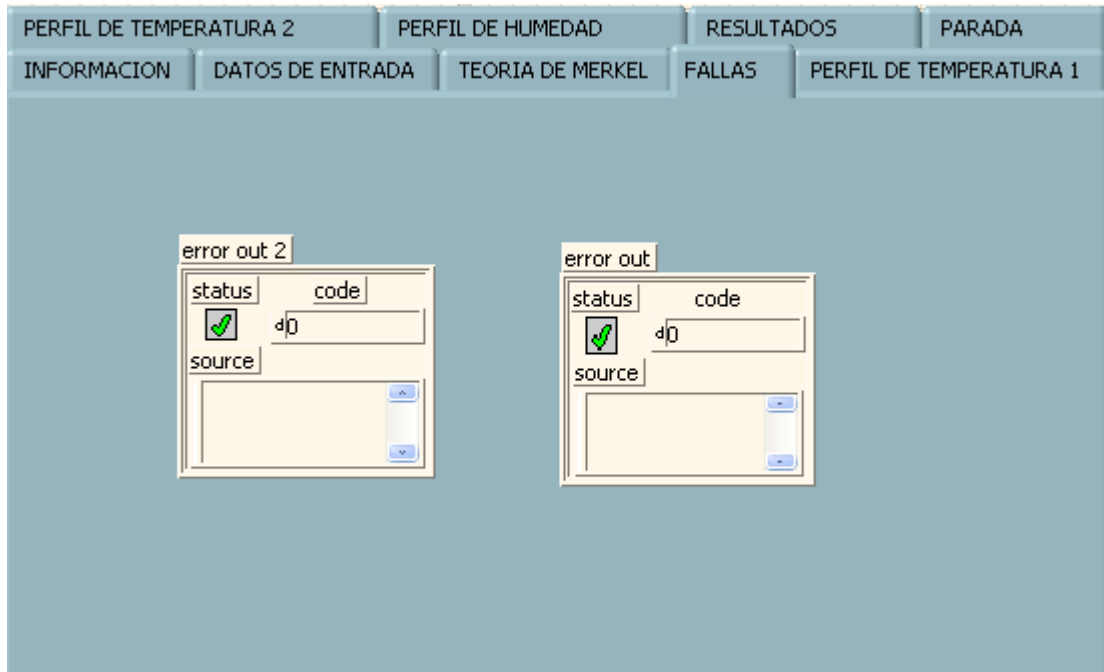
h) Parada: contiene un “Stop Button” que detiene la ejecución del programa. Su panel frontal se muestra en la figura 33.

**Figura 33.** Panel frontal de la opción Parada.



i) Fallas: muestra los errores que se crean en el momento de la ejecución del programa. Su panel frontal se muestra en la figura 34.

**Figura 34.** Panel frontal de la opción Fallas.



## 4.2 CASO DE ESTUDIO

Puesto que el fin último del “Cálculo del perfil de temperatura y humedad de una torre de enfriamiento a contracorriente de tiro inducido” es saber a ciencia cierta que tan eficiente (cuánto está enfriando) es una torre de enfriamiento de la industria de procesos y adicionalmente saber cuál es el valor de la torre característica y los perfiles de entalpía para el aire y el agua; procedemos a enunciar el caso de estudio.

Se requiere que 30000 Kg/h de agua refrigerante fluyan a través del equipo de condensación; para volver a utilizar el agua se planea enfriarla mediante el contacto con aire en una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente. Las condiciones de operación son:

- Temperatura del agua caliente (TAC): 55°C.

- Temperatura del gas a la entrada (TGE): 25°C.
- Flujo de agua (L): 30000 Kg/h.
- Flujo de aire entrante (G): 6680 Kg/h
- Altura de la torre (Z): 5.1 m.
- Diámetro de la torre (d): 2.16 m.
- Humedad relativa (Y1): 0.0089 Kg de Agua/kg de aire seco.
- Coeficiente de transferencia de masa para el agua (HL): 18000 w/m<sup>3</sup>°C.
- Coeficiente de transferencia de masa para el aire: se escoge de acuerdo al tipo de empaque ( en nuestro caso fue un empaque de madera horizontal)

Se desea conocer el valor de la torre característica partiendo de

- Temperatura del agua fría (TAF): 81°F.
- Temperatura del agua caliente (TAC): 110°F.
- Temperatura de bulbo húmedo (TBH): 69°F.

Se desea saber si la torre está operando eficientemente (cuánto calor fue removido y el porcentaje de agua perdido) y cuál es el comportamiento de la temperatura del agua, la temperatura del aire y la humedad a través de la torre.

Los resultados obtenidos para el caso de estudio se muestran en los paneles frontales del numeral 4.1.

Para un análisis de resultados eficiente del modelo operacional fue necesario hacer otras pruebas partiendo de las mismas condiciones de operación que se encuentran tabuladas en el siguiente cuadro.

**Cuadro1.** *Resultados obtenidos para diferentes empaques.*

TIPO DE EMPAQUE	PLÁSTICO RECTO VERTICAL	PLÁSTICO VERTICAL ACANALADO	MADERA VERTICAL	MADERA HORIZONTAL
Q (Btu/lb)	82346	83739	84506	83182
% de humedad perdida	1.82	1.84	1.83	1.83

Los resultados obtenidos en el modelo Termodinámico se muestran en los anexos del análisis estadístico que se describe en el siguiente capítulo.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados que se realizó en el presente trabajo se divide en dos grupos, el primero de ellos se aplicó al modelo operacional y el segundo al modelo termodinámico.

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO OPERACIONAL

Al realizar distintos ensayos para observar el comportamiento de los perfiles de humedad y temperatura que arroja el programa se obtuvo:

- El rango que es la diferencia entre la temperatura de entrada del líquido y la temperatura de salida, es menor para el tipo de empaque plástico: recto vertical.
- El calor removido a través de la torre obtuvo su valor más óptimo para el empaque de madera: vertical; esto debido principalmente a que la aproximación (diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo) es mayor.
- El porcentaje de agua perdida para el proceso continuo de enfriamiento, muestra que es menor para el empaque plástico: recto vertical debido a que proporciona una mayor superficie interfacial entre líquido y el gas.
- La torre característica que es un parámetro de comparación proporciona un valor para el empaque de madera: vertical, mayor lo que es indicativo que el volumen fraccionario vacío,  $\epsilon$ , o fracción de espacio vacío en el lecho empacado es más grande.
- Los perfiles de temperatura muestran un crecimiento exponencial por el lado del gas y de igual manera un decrecimiento por el lado del líquido; lo que infiere pensar que la transferencia tanto de masa como de calor ocurren de manera simultánea, este proceso de transferencia resulta bastante eficiente para cada tipo de empaque, que ofrecen una menor caída de presión para el gas y un flujo mayor.

## 5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO TERMODINÁMICO

Este análisis de resultados presenta ciertas complicaciones de tipo operacional, debido a que se pretende hacer la comprobación de la exactitud y eficiencia de la herramienta que construimos con base en el modelo termodinámico, para ello decidimos ponerlo a prueba comparándolo con el demo **CTI toolkit de Cooling Tower Institute** que es ampliamente utilizado y bastante confiable.

La tarea de comparación se debe dar con base en un parámetro que sea común a los dos programas y que se pueda medir, en éste caso el % de error originado luego de comparar el valor de la torre característica arrojado por el “Cálculo del perfil de temperatura y humedad de una torre de enfriamiento a contracorriente de tito inducido” con el valor arrojado por el demo **CTI Toolkit de Cooling Tower Institute**; sin embargo, éste parámetro no arroja ninguna luz acerca de si se cumple el objetivo y las expectativas que se tienen del programa, pues para saber esto es necesario hacer infinito número de pruebas e infinito número de combinaciones ya que las variables que controlan el modelo son varias y con un amplio rango de valores para cada una, labor que es imposible; por tanto se procede a utilizar el análisis estadístico, más conocido como inferencia estadística.

Antes de aplicar cualquier método se debe conocer si el tipo de datos que se tienen se adaptan a una distribución estadística que se debe suponer. Para esto se hará la prueba de la bondad de ajuste ji-cuadrada, no sin antes definir dos parámetros importantes como son la población y la muestra.

La población a analizar es el conjunto de posibles números en los que pueda caer el % de error, y la muestra es un número infinito de ensayos con base en los cuales se pretende hacer una inferencia sobre la población; esta muestra es de 30 datos y se va a someter a la prueba de la bondad de ajuste ji-cuadrada descrita a continuación suponiendo que los datos se comportan según la distribución normal (o en forma normal).

**5.2.1 Prueba de bondad del ajuste:** cuando en los procedimientos de prueba de hipótesis no se sabe cuál es la distribución de la población o distribución de probabilidad,

y se desea probar la hipótesis de que una distribución en particular será un modelo satisfactorio de la población se utiliza la bondad del ajuste que se basa en la distribución ji-cuadrada.

**5.2.1.1 Prueba ji-cuadrada de bondad del ajuste:** el procedimiento de prueba requiere una muestra aleatoria de tamaño  $n$  proveniente de la población cuya distribución de probabilidad es desconocida. Estas  $n$  observaciones se acomodan en un histograma de frecuencia, el cuál tiene  $k$  intervalos de clase. Sea  $O_i$  la frecuencia observada en el  $i$ -ésimo intervalo de clase. De la distribución de probabilidad propuesta, se calcula la frecuencia esperada en el  $i$ -ésimo intervalo de clase, lo cuál se denota por  $E_i$ . El estadístico de prueba es

$$X_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

Puede demostrarse que, si la población sigue la distribución propuesta,  $X_0^2$  tiene, de manera aproximada, una distribución ji-cuadrada con  $k-p-1$  grados de libertad, donde  $p$  representa el número de parámetros de la distribución propuesta estimada por los estadísticos muestrales. Esta aproximación mejora a medida que  $n$  aumenta. Debe rechazarse la hipótesis de que la distribución de la población es la distribución propuesta, si el valor calculado del estadístico de prueba es  $X_0^2 > X_{\alpha, k-p-1}^2$ .

Un aspecto que debe notarse en la aplicación de éste procedimiento de prueba es el relacionado con la magnitud de las frecuencias esperadas. Si estas frecuencias son muy pequeñas, entonces el estadístico de prueba no reflejará el alejamiento entre lo observado y lo esperado, sino sólo la pequeña magnitud de las frecuencias esperadas. No hay ningún acuerdo general con respecto al valor mínimo de las frecuencias esperadas, pero los valores 3,4 y 5 son los que más se utilizan como mínimos.

Por último, no es necesario que los intervalos de clase tengan el mismo ancho. [14]

**5.2.1.2 Elaboración de la prueba ji-cuadrada:** a partir de nuestros datos muestrales podemos generar la frecuencia observada, para ello escogemos el número de intervalos ( $k=9$ ) y generando los intervalos de clase, tenemos

**Cuadro 2.** Frecuencias observadas y esperadas.

Nº	INTERVALO DE CLASE		FRECUENCIA OBSERVADA	FRECUENCIA ESPERADA
	DE	A		
1	1.066	1.305	1	3.33
2	1.305	1.500	2	3.33
3	1.500	1.580	3	3.33
4	1.580	1810	5	3.33
5	1810	1.940	8	3.33
6	1.940	2.170	5	3.33
7	2.170	2.420	3	3.33
8	2.420	2.615	2	3.33
9	2.615	2.854	1	3.33

La frecuencia esperada ( $E_i$ ) para una distribución normal está dada por

$$E_i = n p_i = 30 * (1/9) = 3.33$$

Donde

$n$ : número de datos (30).

$p_i$ : probabilidad de ocurrencia del intervalo (1/9).

Luego el estadístico de prueba será igual a

$$X_0^2 = 12.60$$

Y el estadístico ji-cuadrada de bondad de ajuste tendrá  $k-p-1=9-2-1=6$  grados de libertad y el nivel de significancia es  $\alpha=0.025$  (2.5%), por tanto

$$X_{0.025,6}^2 = 14.45$$

Como  $X_0^2 \langle X_{\alpha, k-p-1}^2$  se acepta la hipótesis de que los datos provienen de una distribución normal (ver anexo 1 y 4).

Una vez aplicada la prueba de la bondad de ajuste y sabiendo que la población no obedece a una distribución normal, se aplica la prueba del intervalo de confianza. Esta prueba se aplica utilizando como variable de estudio el error porcentual promedio, es decir, buscamos un intervalo en el cuál está el error generado por la diferencia entre los dos programas.

La razón por la cuál estimamos primero un intervalo de confianza es que un número no es tan significativo como un intervalo, sin embargo, luego verificaremos si dentro de éste intervalo se encuentra el valor del parámetro (error porcentual).

**5.2.2 Intervalos de confianza:** una estimación por intervalos de un parámetro desconocido  $\theta$  es un intervalo de la forma  $l \leq \theta \leq u$ , donde los puntos extremo  $l$  y  $u$  dependen del valor numérico de la estadística  $\hat{\theta}$  para una muestra en particular, y de la distribución de muestreo de  $\hat{\Theta}$ . Puesto que muestras diferentes producen valores distintos de  $\hat{\theta}$  y, en consecuencia, valores diferentes de los puntos extremos  $l$  y  $u$ , estos puntos son valores de variables aleatorias, por ejemplo,  $L$  y  $U$ , respectivamente. De la distribución de muestreo de  $\hat{\Theta}$  es posible determinar los valores de  $L$  y  $U$  tales que la siguiente proposición de probabilidad es verdadera:

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \quad (2)$$

Donde  $0 < \alpha < 1$ . Por tanto, se tiene una probabilidad de  $1 - \alpha$  de seleccionar una muestra que produzca un intervalo que contiene el valor verdadero de  $\theta$ .

El intervalo resultante

$$l \leq \theta \leq u \quad (3)$$

Se conoce como **intervalo de confianza** del  $100(1-\alpha)$  por ciento para el parámetro desconocido  $\theta$ . Las cantidades  $l$  y  $u$  reciben el nombre de **límites de confianza inferior y superior**, respectivamente, y  $1-\alpha$  es el **coeficiente de confianza**. La interpretación de un intervalo de confianza es que, si se recopila un número infinito de muestras aleatorias y se calcula un intervalo de confianza del  $100(1-\alpha)$  por ciento para  $\theta$ , para cada una de las muestras, entonces el  $100(1-\alpha)$  por ciento de esos intervalos contienen el valor verdadero de  $\theta$ .

Entonces se tiene una muestra aleatoria y se calcula un intervalo de confianza. Puesto que éste intervalo puede o no contener el valor verdadero de  $\theta$ , no es razonable asociar un nivel de probabilidad a éste evento específico. La proposición adecuada es que el intervalo observado  $[l,u]$  contiene el valor verdadero de  $\theta$  con una confianza de  $100(1-\alpha)$ . Esta proposición tiene una interpretación de frecuencia; esto es, no se sabe si es correcta para la muestra en particular, pero el método utilizado para obtener el intervalo  $[l,u]$  proporciona proposiciones correctas el  $100(1-\alpha)$  de las veces.

El intervalo de confianza de la ecuación (2) recibe el nombre más apropiado de **intervalo de confianza bilateral**, ya que especifica los límites inferior y superior de  $\theta$ . En ocasiones, puede resultar más apropiado un **intervalo de confianza unilateral**.

- Un **intervalo de confianza unilateral inferior** del  $100(1-\alpha)$  para  $\theta$  está dado por el intervalo

$$l \leq \theta \quad (4)$$

Donde el límite inferior de confianza  $l$  se elige de modo que

$$P(L \leq \theta) = 1 - \alpha \quad (5)$$

- Un **intervalo de confianza unilateral superior** del  $100(1-\alpha)$  para  $\theta$  está dado por el intervalo

$$\theta \leq u \quad (6)$$

Donde el límite de confianza superior  $u$  se escoge de modo que

$$P(L \leq U) = 1 - \alpha \quad (7)$$

La longitud  $u-l$  del intervalo de confianza observado es una medida importante de la calidad de la información obtenida de la muestra. El semiintervalo  $\theta - l$  ó  $u - \theta$  se conoce como **precisión del estimador**. Entre más grande sea el intervalo de confianza, mayor es la seguridad de que el intervalo en realidad contenga el valor verdadero de  $\theta$ . Por otra parte, entre más grande sea el intervalo, menor información se tiene acerca del valor verdadero de  $\theta$ . En una situación ideal, se tiene un intervalo relativamente pequeño con una confianza grande. [14]

### 5.2.2.1 Intervalo de confianza para la media de una distribución normal, varianza

**desconocida:** supóngase que se desea encontrar un intervalo de confianza para la media de una distribución, pero que la varianza no es conocida. De manera específica, supóngase que se tiene una muestra aleatoria de tamaño  $n$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , y que  $\bar{X}$  y  $S^2$  son la media y la varianza muestrales, respectivamente. Una posibilidad sería remplazar  $\sigma$  en las fórmulas del intervalo de confianza para la media ( $\mu$ ) con varianza conocida (que se describen a continuación) con el valor calculado de la desviación estándar muestral  $s$ .

Si  $\bar{x}$  es la media muestral de una muestra aleatoria de tamaño  $n$  de una población con varianza conocida  $\sigma^2$ , un intervalo de confianza para  $\mu$  del  $100(1-\alpha)$  por ciento está dado por:

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \sigma / \sqrt{n} \quad (8)$$

Donde  $z_{\alpha/2}$  es el punto de la distribución normal estándar que corresponde al porcentaje  $\alpha/2$ .

Para muestras tomadas de una población normal, o para muestras de tamaño  $n \geq 30$ , sin importar la forma que tenga la población, el intervalo de confianza dado por la ecuación (8) proporciona buenos resultados. Sin embargo, para muestras pequeñas tomadas de poblaciones que no son normales, no es posible esperar que el nivel de confianza  $1-\alpha$  sea exacto.

Para producir un intervalo de confianza válido, debe hacerse una hipótesis más fuerte con respecto a la población de interés. La hipótesis usual es que la población está distribuida de manera normal. Esto conduce a intervalos de confianza basados en distribuciones  $t$ . De manera específica, sea  $X_1, X_2, \dots, X_n$  una muestra aleatoria tomada de una distribución normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  desconocidas, y la distribución de muestreo de la estadística

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \quad (9)$$

Es la distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad.

Sea  $t_{\alpha/2, n-1}$  el punto crítico superior que corresponde al porcentaje  $\alpha/2$  de la distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad, entonces

$$P(-t_{\alpha/2, n-1} \leq T \leq t_{\alpha/2, n-1}) = 1 - \alpha \quad (10)$$

Remplazando (9) en (10)

$$P(-t_{\alpha/2, n-1} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \leq t_{\alpha/2, n-1}) = 1 - \alpha \quad (11)$$

Reordenando

$$P(\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} S / \sqrt{n}) = 1 - \alpha \quad (12)$$

La comparación entre las ecuaciones (2) y (12) conduce a la siguiente definición del intervalo de confianza bilateral del  $100(1-\alpha)$  por ciento para  $\mu$ .

Si  $\bar{x}$  y  $s$  son la media y la desviación estándar de una muestra aleatoria tomada de una distribución normal con varianza  $\sigma^2$  desconocida, entonces un intervalo de confianza del  $100(1-\alpha)$  por ciento para  $\mu$  está dado por

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} s / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} s / \sqrt{n} \quad (13)$$

Donde  $t_{\alpha/2, n-1}$  es el punto crítico superior que corresponde al porcentaje  $\alpha/2$  de la distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad. [14]

**5.2.2.2 Prueba del intervalo de confianza:** nuestro caso de estudio consiste en evaluar la efectividad de la evaluación de la teoría de Merkel para obtener el valor de la torre característica (KaV/L) en el algoritmo respecto a la del demo **CTI Toolkit de Cooling Tower Institute**. Para ello fue necesario calcular el porcentaje de error entre los valores de KaV/L para el “Cálculo del perfil de temperatura y humedad de una torre de enfriamiento a contracorriente de tiro forzado” y los del demo **CTI Toolkit** para una muestra de 30 datos (ver anexo 2). Los datos de la muestra se encuentran en la tabla adjunta.

**Cuadro 3.** Datos de la muestra utilizados para la prueba del intervalo de confianza.

<b>n</b>	30
<b>MEDIA (<math>\bar{x}</math>)</b>	1.8998405 % ó 0.018998405
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR (s)</b>	0.3759069 % ó 0.003759069
<b>INTERVALO DE CONFIANZA</b>	98%

- El punto porcentual de la distribución  $t$  de la estadística está dado por (ver anexo 5):

$$t_{0.01, 29} = 2.462$$

- El límite inferior es

$$\mu = 0.018998405 - ((2.462 * 0.003759069) / \sqrt{30}) = 0.017106672$$

- El límite superior es

$$\mu = 0.018998405 + ((2.462 * 0.003759069) / \sqrt{30}) = 0.020890137$$

- Por tanto, el intervalo de confianza del 98% es

$$1.71\% \leq \mu \leq 2.09\%$$

Entonces, se tiene una confianza del 98% de que el error porcentual promedio se encuentra entre el 1.71% y el 2.09 %.

Después de aplicar la bondad del ajuste y de saber cuál es el intervalo de confianza, decidimos arriesgarnos un poco más para saber el comportamiento del “Cálculo del perfil de temperatura y humedad de una torre de enfriamiento a contracorriente de tiro inducido” aplicando la prueba de hipótesis y saber a ciencia cierta de qué orden se espera sea el error siempre que se use el algoritmo al compararla con el demo CTI Toolkit.

**5.2.3 Introducción a la hipótesis estadística:** muchos problemas de ingeniería requieren que se tome una decisión entre aceptar o rechazar una proposición sobre algún parámetro. Esta proposición recibe el nombre de **hipótesis**, y el procedimiento que conduce a la toma de una decisión sobre la hipótesis se conoce como **prueba de hipótesis**. Este es uno de los aspectos más útiles de la inferencia estadística, puesto que muchos tipos de problemas de toma de decisiones, pruebas o experimentos en el mundo de la ingeniería pueden formularse como problemas de prueba de hipótesis.

Es conveniente considerar la prueba de hipótesis estadísticas como la etapa de análisis de datos de un experimento comparativo, en el que el ingeniero está interesado, por

ejemplo, en comparar la media de una población con un valor especificado. Razón por la cuál decidimos aplicar la prueba de hipótesis estadística.

Formalmente, una **hipótesis estadística** es una proposición sobre los parámetros de una o más poblaciones. Puesto que se emplean distribuciones de probabilidad para representar poblaciones, también es posible considerar una hipótesis estadística como una proposición sobre la distribución de probabilidad de una variable aleatoria. Lo usual es que la hipótesis involucre a uno o más parámetros de esta distribución. También es importante recalcar que las hipótesis siempre son proposiciones sobre la población o distribución bajo estudio, no proposiciones sobre la muestra.

Para llevar a cabo la prueba de hipótesis es necesario formular:

- # **Hipótesis nula ( $H_0$ )**, que es la hipótesis que desea probarse. En el estudio de la prueba de hipótesis siempre se plantea de modo que especifique un valor exacto del parámetro.
- # **Hipótesis alternativa o hipótesis alternativa bilateral ( $H_a$ )**, que especifica valores de media  $\mu$  que pueden ser mayores o menores que la hipótesis nula. En el estudio de la prueba de hipótesis permite que el parámetro tome varios valores.

El rechazo de  $H_0$  siempre conduce a la aceptación de  $H_a$ .

Por lo general el valor del parámetro de la población especificado en la hipótesis nula se puede determinar de tres maneras:

- ✓ Puede ser resultado de la experiencia pasada o del conocimiento del proceso, o incluso de pruebas o experimentos previos. Por tanto, el objetivo de la prueba de hipótesis usualmente es determinar si ha cambiado el valor del parámetro.
- ✓ Puede obtenerse a partir de alguna teoría o modelo que se relaciona con el proceso bajo estudio. En este caso, el objetivo de la prueba de hipótesis es verificar la teoría o modelo.
- ✓ Proviene de consideraciones externas, tales como especificaciones de diseño o de ingeniería. Aquí, el objetivo usual de la prueba de hipótesis es probar el cumplimiento de las especificaciones.

Los procedimientos de **prueba de hipótesis** dependen del empleo de la información contenida en una muestra aleatoria de la población de interés. Si esta información es consistente con la hipótesis, se concluye que ésta es verdadera; sin embargo, si esta información es inconsistente con la hipótesis, se concluye que ésta es falsa. Debe hacerse hincapié en que la verdad o falsedad de una hipótesis en particular nunca puede conocerse con certidumbre, a menos que pueda examinarse toda la población. Como usualmente esto es imposible, es necesario desarrollar un procedimiento de prueba de hipótesis teniendo en cuenta la probabilidad de llegar a una conclusión equivocada.

La prueba de hipótesis involucra:

- ✓ La toma de una muestra aleatoria.
- ✓ El cálculo de un estadístico de prueba o estadígrafo.
- ✓ El uso de éste estadístico para tomar una decisión sobre la hipótesis nula.

El procedimiento de toma de decisión sobre la hipótesis puede conducir a una de dos conclusiones erróneas:

- # **Error tipo I:** es el rechazo de  $H_0$  cuando ésta es verdadera. La probabilidad de cometer un error de éste tipo se denota con la letra  $\alpha$  y se conoce con el nombre de **nivel o tamaño de significancia de la prueba**.
- # **Error tipo II:** es la aceptación de la hipótesis nula cuando ésta es falsa. La probabilidad de cometer un error de éste tipo se denota con la letra  $\beta$ .

Por tanto, al probar cualquier hipótesis estadística, existen cuatro situaciones diferentes que determinan si la decisión final es correcta o errónea. Estas situaciones se describen a continuación:

**Cuadro 4.** Decisiones en la prueba de hipótesis.

DECISIÓN	$H_0$ ES VERDADERA	$H_0$ ES FALSA
Aceptar $H_0$	No hay error	Error tipo II
Rechazar $H_0$	Error tipo I	No hay error

**5.2.3.1 Procedimiento general para la prueba de hipótesis:** se recomienda utilizar los siguientes pasos al aplicar la metodología de prueba de hipótesis:

1. Del contexto del problema, identificar el parámetro de interés.
2. Establecer la hipótesis nula  $H_0$ .
3. Especificar una hipótesis alternativa  $H_a$  apropiada.
4. Seleccionar un nivel de significancia  $\alpha$ .
5. Establecer un estadístico de prueba apropiado.
6. Establecer la región de rechazo para el estadístico.
7. Calcular todas las cantidades muestrales necesarias, sustituirlas en la ecuación para el estadístico de prueba, y calcular el valor correspondiente.
8. Decidir si debe o no rechazarse  $H_0$  y notificar esto en el contexto del problema. [14]

**5.2.3.2 Prueba de hipótesis sobre la media de una distribución normal y varianza desconocida de una población:** cuando se prueban hipótesis sobre la media ( $\mu$ ) de una población cuando  $\sigma^2$  es desconocida, es posible utilizar los procedimientos de prueba para el caso en que la prueba se realiza sobre la media y la varianza es conocida, siempre y cuando el tamaño de la muestra sea grande ( $n \geq 30$ ).

**5.2.3.3 Desarrollo del procedimiento de prueba:** supóngase que la población de interés tiene una distribución normal con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  desconocidas. Se desea probar la hipótesis de que  $\mu$  es igual a una constante  $\mu_0$ . Supóngase que se tiene disponible una muestra aleatoria de tamaño  $n$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , y sea  $\bar{X}$  y  $S^2$  la media y la varianza muestrales, respectivamente.

- Para la hipótesis alternativa bilateral

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad (14)$$

$$H_a : \mu \neq \mu_0$$

El procedimiento de prueba se basa en el estadístico

$$T_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (15)$$

El cuál tiene una distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad ( $v$ ) si  $H_0: \mu = \mu_0$  es verdadera. Para probar  $H_0: \mu = \mu_0$  de la ecuación (14), se calcula el valor del estadístico de prueba  $t_0$  de la ecuación (15) y se rechaza  $H_0$  si

$$t_0 > t_{\alpha/2, n-1} \quad (16)$$

$$t_0 < -t_{\alpha/2, n-1} \quad (17)$$

Donde  $t_{\alpha/2, n-1}$  y  $-t_{\alpha/2, n-1}$  son los puntos superior e inferior que corresponden al porcentaje  $100\alpha/2$  de la distribución  $t$  con  $n-1$  grados de libertad.

- Para la hipótesis alternativa unilateral

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad (18)$$

$$H_a : \mu > \mu_0$$

Se calcula la estadística de prueba  $t_0$  de la ecuación (15), y se rechaza  $H_0$  si

$$t_0 > t_{\alpha, n-1} \quad (19)$$

- Para la otra alternativa unilateral

$$H_0 : \mu = \mu_0 \quad (20)$$

$$H_a : \mu < \mu_0$$

Se rechaza  $H_0$  si <sup>[13]</sup>

$$t_0 < -t_{\alpha, n-1} \quad (21)$$

**5.2.3.4 Elaboración de la prueba de hipótesis:** nuestro caso de estudio consiste en evaluar la efectividad de la evaluación de la teoría de Merkel para obtener el valor de la torre característica (KaV/L) en el “Cálculo del perfil de temperatura y humedad de una torre a contracorriente de tiro inducido” respecto a la del demo **CTI Toolkit de Cooling Tower Institute** teniendo en cuenta que se desea probar la hipótesis de que el error porcentual promedio es menor al 3%. Para ello fue necesario calcular el porcentaje de error entre el caso 1 y el 2 para una muestra de 30 datos (ver anexo hoja de Excel). Esta prueba se aplica para saber si la muestra se acomoda a la distribución que será usada. Para éste fin se exige un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 2.5%. Los datos de la muestra se encuentran en la tabla adjunta (ver anexo 3).

**Cuadro 5.** Datos de la muestra utilizados en la prueba de hipótesis.

<b>N</b>	30
<b>MEDIA (<math>\bar{x}</math>)</b>	1.89984% ó 0.0189984
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR (s)</b>	0.37591% ó 0.0037591

La solución con el empleo del procedimiento descrito en el numeral 4.2.3.1 para la cola inferior es la siguiente.

1. El parámetro de interés es el error porcentual promedio,  $\mu$ .
2.  $H_0: \mu=0.02$
3.  $H_a: \mu < 0.02$ . Se desea rechazar  $H_0$  si el error porcentual promedio es menor que 0.02.
4.  $\alpha = 0.025$ .
5. El estadístico de prueba es

$$t_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}}$$

6. Rechazar  $H_0$  si  $t_0 < t_{0.025,29} = -2.045$ . (ver anexo 5)
7. Cálculos. Puesto que  $\bar{x} = 0.0189984$ ,  $s=0.0037591$ ,  $\mu_0=0.02$  y  $n=30$ , se tiene que

$$t_0 = \frac{0.0189984 - 0.02}{0.0037591 / \sqrt{30}} = -1.459$$

8. Conclusiones: dado que  $t_0 = -1.459 > -2.045$ , se acepta  $H_0$  y se concluye que, con un nivel de significancia de 0.025 (2.5%), el error porcentual promedio que arroja el algoritmo comparada con el demo del CTI es del 2%.

## 6. RECOMENDACIONES OPERACIONALES

Algunas de las recomendaciones operacionales comunes en la operación de las torres de enfriamiento, se presentan a continuación:

Nomenclatura:

Indicación del problema (I.P)

Efectos en la operación (E.O)

Problema (P)

Solución (S)

### 6.1 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A TRAVÉS DE LA TORRE

**Cuadro 6.** *Recomendaciones operacionales de la distribución de agua en la torre.*

<b>I.P</b>	Se presentan cascadas o flujos anormales de agua en ciertas zonas.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento
<b>P</b>	Fallas en el depósito de agua caliente, debido a boquillas tapadas ó boquillas con la roseta rota.
<b>S</b>	<p>1. Esta situación se puede corregir instalando boquillas nuevas. Para las torres de flujo cruzado se deberán arreglar las cajas de salpique, tratando de repararlas y dejarlas en forma similar a como se encontraban en el diseño original.</p> <p>2. Depósito de agua caliente: Es necesario observar en torres de flujo cruzado si el agua se distribuye en forma pareja con un nivel (tirante) mínimo de 0.1 m (4"), así mismo es importante notar que no exista formación de remolinos y que el agua salga de las cajas de salpique con baja velocidad permitiendo que el depósito de agua caliente se vaya llenando suavemente.</p> <p>3. Boquillas: Las boquillas deberán de estar completas en número y condición física, es decir deberán tener la roseta que forma el paraguas, condición principal para iniciar el proceso de enfriamiento, así mismo deberán tener insertada la reducción calculada para el flujo de recirculación de agua que se está manejando. En el caso de torres de contra-flujo se deberá revisar que las boquillas no se encuentren tapadas y produzcan el efecto de paraguas arriba descrito. En general en ambos tipos de torres se deberán limpiar o reponer las boquillas faltantes.</p> <p>4. Cajas de salpique: En torres de madera deben estar completas para producir la reducción de velocidad del agua que sale del cabezal de distribución que es el objetivo de estas cajas en el sistema de distribución. En torres de concreto es común que se encuentren mal diseñadas o mal construidas para lo cual es conveniente construir una caja de desborde cerrada alrededor de la caja de</p>

	salpiquen con objeto de reducir totalmente la velocidad.  5. Válvulas de control de flujo: Simplemente es necesario revisar que se encuentren completas que no estén inhabilitadas y que reduzcan o aumenten el flujo según se desee.
<b>I.P</b>	1. Bloqueo del sistema de distribución y las boquillas gracias a grandes masas de algas.  2. Taponamiento y obstrucción en tuberías y equipos por parte de las bacterias.  3. Aumento en la velocidad de corrosión sobre las superficies metálicas.
<b>E.O</b>	1. Incremento del consumo de energía eléctrica.  2. Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Crecimiento de microorganismos como algas, hongos y bacterias. Crecimiento de algas en los eliminadores de arrastre y sistemas de distribución de agua.
<b>S</b>	Realizar control del crecimiento microbiológico utilizando biocidas que eliminen los microorganismos o que inhiban su crecimiento. Existen dos grandes tipos de biocidas, los biocidas oxidantes entre los que se encuentran el hipoclorito de sodio, el ozono y los compuestos bromo clorados, y los no oxidantes como los compuestos órgano azufrados, los tiocarbamatos, tensoactivos, los tiocianatos y los compuestos organosulfurados.

## 6.2 RELLENO

**Cuadro 7. Recomendaciones operacionales del relleno.**

<b>I.P</b>	Falta de mantenimiento en el relleno.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento
<b>P</b>	El relleno está incompleto, roto ó doblado por la acción de los fuertes flujos de agua.
<b>S</b>	1. Esta situación se corrige con el arreglo del sistema de distribución é instalando los perfiles ó tabletas faltantes.  2. En el caso de torres de contra-flujo instalar las parrillas ó paquetes de relleno faltantes, por el del mismo tipo.  3. En caso de realizar algún cambio del relleno original es conveniente asegurarse de que el nuevo tipo haya sido probado en equipos en operación y realizar el cambio (no combinado) en secciones completas, es decir medias celdas mínimo en torres de flujo cruzado o la sección empacada completa en torres de contra-flujo para poder comparar las bondades del nuevo empaque instalado. De está forma el operador sin entrar en pruebas de comportamiento especializadas se dará cuenta inmediatamente si el cambio tuvo los efectos de mejoría esperados.
<b>I.P</b>	Falta de relleno en secciones de la torre, relleno caído y desalineado, suciedad en el relleno.

<b>E.O</b>	Incremento del consumo de energía eléctrica y de agua, reducción en la capacidad de enfriamiento
<b>P</b>	Reducción del área de contacto agua-aire para llevar a cabo el enfriamiento.
<b>S</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Instalar el relleno faltante de acuerdo al diseño.</li> <li>2. Solicitar pruebas y garantías de los materiales de construcción tanto del relleno como de las mallas.</li> <li>3. Después de realizar el mantenimiento en los motores, reductores y ventiladores, asegurarse de limpiar el aceite que se derrame, así como los materiales utilizados (estopas, franelas, etc.)</li> </ol>
<b>I.P</b>	Existe una zona del empaque donde no hay transferencia de masa.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Se forma una zona de neblina dentro del empaque que satura el aire antes de terminar éste su recorrido por la torre, desperdiciándose así parte de la longitud del empaque.
<b>S</b>	Aumentar el flujo de aire para que la relación L/G disminuya logrando una mayor eficiencia de la torre y por tanto aumenta la capacidad de enfriamiento.

### 6.3 ELIMINADORES DE ROCÍO

**Cuadro 8.** *Recomendaciones operacionales de los eliminadores de rocío.*

<b>I.P</b>	Lluvia constante que se produce alrededor de la torre.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento y pérdidas de agua por arrastre.
<b>P</b>	Eliminadores operando inadecuadamente o en mal estado. Esta falla se debe a que se encuentran secciones de eliminadores rotas, dobladas o faltantes, debido al paso del tiempo ó porque el diseño de los eliminadores no es el adecuado.
<b>S</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lo primero que se deberá arreglar es el completar ó cambiar las piezas faltantes y observar si al tener los eliminadores de acuerdo al diseño original continúa la lluvia, en este caso el cambio de eliminadores es el único camino para corregir el problema.</li> <li>2. Se deberá analizar el perjuicio que está ocasionando el arrastre y decidir si es soportable ó es indispensable cambiarlos para evitar posibles daños en los equipos aledaños ó problemas de obstrucción de visibilidad que puedan crear algún peligro.</li> </ol>

## 6.4 EQUIPO MECÁNICO

### 6.4.1. Ventiladores:

**Cuadro 9.** *Recomendaciones operacionales de los ventiladores.*

<b>I.P</b>	Se producen ruidos peculiares fáciles de identificar ya que no es un sonido suave y parejo y además se siente el exceso de vibración en la estructura.
<b>E.O</b>	Baja eficiencia en los ventiladores, exceso de consumo de corriente eléctrica, debilitamiento en la estructura y disminución en el flujo de aire.
<b>P</b>	Ventiladores desbalanceados.
<b>S</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se requiere rebalancear el ventilador posiblemente por un especialista.</li> <li>2. Asegurarse que los ventiladores están bien balanceados, completos incluyendo la cubierta de la maza y debidamente protegidos por interruptores de vibración los cuales deben estar en condición operable y con la sensibilidad adecuada la cual la puede ir ajustando el operador en forma muy sencilla golpeando con diferente fuerza el ventilador, el reductor o el motor, hasta tener el valor adecuado de tal manera que no se esté parando constantemente la operación del equipo mecánico.</li> <li>3. Si no se está logrando el enfriamiento adecuado y el amperaje de placa no se ha alcanzado es posible aumentar la cantidad de aire y consecuentemente el enfriamiento, aumentando el ángulo de ataque (ver anexo V), hasta cerca del valor de placa de los motores. Si el usuario no tiene experiencia se recomienda contratar a un especialista.</li> </ol>
<b>I.P</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Taponamiento y obstrucción en tuberías y equipos por parte de las bacterias.</li> <li>2. Aumento en la velocidad de corrosión sobre las superficies metálicas.</li> </ol>
<b>E.O</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Incremento del consumo de energía eléctrica.</li> <li>2. Reducción en la capacidad de enfriamiento.</li> </ol>
<b>P</b>	Crecimiento de microorganismos como algas, hongos y bacterias. Crecimiento de algas en las aspas de los ventiladores. Crecimiento de hongos en las cámaras de aire de los ventiladores.
<b>S</b>	Realizar control del crecimiento microbiológico utilizando biocidas que eliminen los microorganismos o que inhiban su crecimiento. Existen dos grandes tipos de biocidas, los biocidas oxidantes entre los que se encuentran el hipoclorito de sodio, el ozono y los compuestos bromo clorados, y los no oxidantes como los compuestos órgano azufrados, los tiocarbamatos, tensoactivos, los tiocianatos y los compuestos organosulfurados.

#### 6.4.2. Reductor de velocidad:

**Cuadro 10.** *Recomendaciones operacionales del reductor de velocidad.*

<b>I.P</b>	Ruidos extraños.
<b>E.O</b>	Mal funcionamiento del ventilador.
<b>P</b>	Mal funcionamiento del ventilador.
<b>S</b>	Se deberán enviar para su servicio o para su revisión y mantenimiento.

#### 6.4.3 Flechas de transmisión de potencia:

**Cuadro 11.** *Recomendaciones operacionales de las flechas de transmisión de potencia.*

<b>I.P</b>	Ruidos extraños.
<b>E.O</b>	Baja eficiencia en la operación, exceso de consumo de corriente eléctrica, debilitamiento en la estructura y disminución en el flujo de aire.
<b>P</b>	Vibración trepidatoria.
<b>S</b>	Al realizar una reparación menor las flechas se puede reinstalar sin problemas y en caso de notar anomalías realinear todo el acoplamiento.

#### 6.4.4. Paredes laterales, persianas y cuerpo de la torre:

**Cuadro 12.** *Recomendaciones operacionales de paredes, persianas y cuerpo de la torre.*

<b>I.P</b>	Mediante la inspección visual.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Paredes laterales y persianas en mal estado.
<b>S</b>	En las torres de edad son de asbesto cemento, si no se encuentran muchas dañadas se pueden instalar nuevamente de asbesto-cemento teniendo cuidado de que las ondas de las laminas sean similares a la onda original y teniendo cuidado de sellar perfectamente las uniones para evitar fugas.
<b>I.P</b>	No se está logrando el enfriamiento requerido.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	El tiempo de contacto entre el agua y el aire es insuficiente.
<b>S</b>	Mantener una altura mínima en la torre, esto se logra con las siguientes indicaciones:  1. Cuando se requiere una aproximación de temperatura de bulbo húmedo entre 8 y 11 °C y un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C bastará con una torre en la que el agua se desplaza de 4.6 a 6.1 m desde el sistema de distribución hasta el depósito.

	<p>2. Cuando se necesita una aproximación moderada y un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C una torre en la que el agua recorra de 7.6 a 9.1 m es adecuada.</p> <p>3. Cuando se tiene una aproximación de 4.4 °C (crítico) con un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C se necesitará una torre en la que el agua recorra de 10.7 a 12.2 m.</p> <p>En general, se debe diseñar una torre de enfriamiento con una aproximación de 2.8 °C siempre y cuando se cuente con una torre en la que el agua se desplace de 10.7 a 12.2 m.</p>
<b>I.P</b>	<p>1. Desgaste o incrustaciones sobre las paredes de las tuberías y equipos.</p> <p>2. Altos promedios de purga de lodos.</p> <p>3. Prematuro reemplazo de tubos.</p> <p>4. Incremento de la carga de sólidos suspendidos.</p>
<b>E.O</b>	<p>1. Incremento del consumo de energía eléctrica.</p> <p>2. Reducción en la capacidad de enfriamiento.</p> <p>3. Disminución del área efectiva de transferencia de calor.</p> <p>4. Incremento de la caída de presión.</p>
<b>P</b>	Corrosión.
<b>S</b>	<p>1. Mantener la velocidad del agua ya que a bajas velocidades se favorece la acumulación de sedimentos, atrapando burbujas de aire, e iniciando así una celda de corrosión por diferencial de concentración de oxígeno; y a altas velocidades, se desprenden las capas protectoras de corrosión formadas por los inhibidores, facilitando el contacto entre el metal y el agua con alto contenido de oxígeno.</p> <p>2. Suavizar el agua de reposición del sistema utilizando resinas de intercambio iónico o productos químicos estabilizantes como el carbonato de sodio e hidróxido de sodio, o añadiendo al agua una solución de polímeros que favorezcan la formación de complejos insolubles de las sales de calcio y magnesio, impidiendo de esta manera su precipitación sobre las paredes de tuberías y equipos.</p>

#### 6.4.5. Estructura de madera:

**Cuadro 13.** *Recomendaciones operacionales de la estructura de madera.*

<b>I.P</b>	<p>1. Las secciones que más fácilmente se dañan con los años son aquellas que están en la zona de eliminadores de rocío tanto para torres de flujo-cruzado como torres de contra-flujo. Una revisión sencilla consiste en tratar de encajar un punzón en diferentes secciones de la madera; si el punzón entra con facilidad es señal que</p>
------------	---

	<p>la madera está ya deteriorada y que deberá cambiarse la columna, travesaño o larguero revisado.</p> <p>2. Al mismo tiempo que se va revisando en forma sencilla la estructura, se debe también revisar el estado de los conectores estructurales y la tornillería. Cuando ha habido exceso de vibración producida por de ajustes del equipo mecánico, toda la estructura vibra también y la tornillería va abocardando el orificio en donde está instalada, permitiendo el inicio del deterioro de la madera. Es necesario observar el avance de ese deterioro y el estado de corrosión de la tornillería. Si está avanzado esté último es recomendable cambiar toda la tornillería para evitar daño general en la estructura y asegurarse que el equipo mecánico esté bien balanceado y alineado.</p>
<b>E.O</b>	Debilitamiento en la estructura de la torre.
<b>P</b>	Estructura de madera dañada.
<b>S</b>	<p>1. Al solicitar madera de repuesto para las partes dañadas es muy importante especificar que ésta venga tratada después de fabricada y con el tratamiento a presión a base de sales siguiendo los lineamientos del CTI y de la AWPA*, solicitando inclusive los resultados de los análisis y realizando una simple inspección en la madera recibida comprobando la penetración y la retención de la solución en la misma.</p> <p>2. La misma revisión se deberá realizar en otros componentes de madera teniendo mucho cuidado de reponer las piezas en mal estado sobre todo en el caso de la escalera, barandales y pasillos por razones de seguridad.</p>

## 6.5 FLUJO DE AIRE

**Cuadro 14.** *Recomendaciones operacionales del flujo de aire.*

<b>I.P</b>	Ruidos extraños.
<b>E.O</b>	Incremento del consumo de energía eléctrica.
<b>P</b>	Elevada potencia consumida de los motores.
<b>S</b>	Como la potencia consumida depende del cubo de la velocidad del ventilador y ésta última es proporcional al caudal del aire, por tanto, la mejor manera de controlar la velocidad es utilizar motores de 2 o más velocidades, los más comunes son los de doble velocidad con 4/8 polos o 4/6 polos. Los de 4/8 son capaces de una operación a máxima o media velocidad y los de 4/6 a máxima y dos tercios de velocidad. Para torres con más de tres celdas se logra un ahorro instantáneo máximo de un 70 % comparado con el caso de mantener el ventilador encendido sin ningún tipo de control de caudal de aire.
<b>I.P</b>	Formación de neblina (fogging) y bruma.
<b>E.O</b>	<p>1. Reducción en la capacidad de enfriamiento.</p> <p>2. Incremento del consumo de energía eléctrica.</p>

<b>P</b>	El aire caliente saturado que sale de la torre se descarga a la atmósfera fría produciéndose condensación. Esto puede causar una niebla densa que al descender por una zona de la planta incrementa los riesgos de seguridad.
<b>S</b>	1. Acondicionar chimeneas en los ventiladores para reducir la niebla en la parte inferior de la torre.  2. Diseñar un sistema de enfriamiento húmedo-seco.  3. Si se desea mantener un rango fijo para el agua de enfriamiento la niebla se puede reducir mediante recirculación de parte del agua del depósito hacia la parte superior de la torre donde se combina con el agua caliente de los usuarios de la torre.
<b>I.P</b>	Se requiere eliminar la misma cantidad de calor con el mismo flujo de aire de entrada y el mismo cociente L/G pero con rangos entre diferentes temperaturas.
<b>E.O</b>	No se logra la capacidad de enfriamiento requerida.
<b>P</b>	Torre infinita debido a que la línea de operación intercepta la línea de saturación.
<b>S</b>	Se debe circular más aire para lograr un cociente L/G menor y así eliminar la misma cantidad de calor.
<b>I.P</b>	No se está logrando el enfriamiento requerido.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento, por tanto, del rendimiento de la torre.
<b>P</b>	La temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre se encuentra por encima de la temperatura del aire.
<b>S</b>	Recircular una porción del aire que entra a la torre.
<b>I.P</b>	La temperatura del agua fría que sale de la torre disminuye.
<b>E.O</b>	Incremento del consumo de energía eléctrica.
<b>P</b>	La temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre disminuye.
<b>S</b>	1. Disminuir el flujo de agua siempre y cuando el proceso al cuál da servicio disminuye sus necesidades de enfriamiento, ya sea por baja carga o porque se encuentra fuera de operación en alguno de sus equipos.  2. Disminuir el flujo de aire reduciendo la potencia del ventilador (reduciendo la velocidad o manteniéndose fuera de operación).

## 6.6 FLUJO DE AGUA

**Cuadro 15.** *Recomendaciones operacionales del flujo de agua.*

<b>I.P</b>	Caudal de agua cayendo en forma de cascadas.
<b>E.O</b>	Incremento del consumo de energía eléctrica.
<b>P</b>	Distribución inadecuada de agua en el depósito de agua.
<b>S</b>	Como el caudal real de agua necesario para satisfacer la demanda de frío puede ser menor que el de diseño, entonces a menor caudal de agua a enfriar, se necesitará menor flujo de aire y por consiguiente habrá ahorro de energía.
<b>I.P</b>	El agua que sale de una torre a contraflujo con boquillas de dispersión presenta altas temperaturas.

<b>E.O</b>	Baja capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Torre de poca altura.
<b>S</b>	1. Aumentar el tiempo de contacto, por tanto, la altura de la torre. 2. Rellenar la torre para hacer más lenta la caída de agua y evitar costos por el tamaño de la misma.
<b>I.P</b>	Se requieren áreas de piso pequeñas por tanto emplean cargas de líquido relativamente grandes sin aumentar la cantidad de aire.
<b>E.O</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Disminución de la sección transversal de la torre, disminución del potencial y por tanto debe aumentar el tamaño de la torre.
<b>S</b>	Circular más aire por libra de agua.
<b>I.P</b>	Se requiere eliminar la misma cantidad de calor con igual flujo de aire de entrada pero con rangos entre diferentes temperaturas.
<b>E.O</b>	No se logra la capacidad de enfriamiento requerida.
<b>P</b>	Cociente L/G reducido.
<b>S</b>	Usar dos torres donde el agua que sale de la primera torre entre a la segunda torre.
<b>I.P</b>	Reducción del área superficial efectiva.
<b>E.O</b>	Disminuye notablemente la capacidad de enfriamiento.
<b>P</b>	Inundación.
<b>S</b>	Disminuir el flujo de agua para lograr un área superficial efectiva.
<b>I.P</b>	El agua caliente se enfría debajo de la temperatura de enfriamiento requerida.
<b>E.O</b>	No se logra la capacidad de enfriamiento requerida.
<b>P</b>	La torre está recibiendo agua más fría que para la que fue diseñada.
<b>S</b>	Se reduce por una derivación el flujo de agua fría de manera que se use menos agua para obtener la temperatura de diseño a la salida. Luego se recombina el agua de salida a temperatura constante con el agua de la derivación antes de regresar a la torre de enfriamiento.
<b>I.P</b>	El agua de circulación presenta sedimentos.
<b>E.O</b>	1. Recirculación de los sedimentos asentados en el fondo del tanque o depósito de agua 2. Reducción de la capacidad de transferencia de calor e incremento de los costos de operación. 3. Incremento en la caída de presión.
<b>P</b>	Reducción en la capacidad de enfriamiento.
<b>S</b>	1. Hacer la succión de la bomba a 1/3 de la altura del nivel de agua. 2. Usar un filtro en la succión puesto que el tanque es el lugar más propenso a contaminarse con muchas impurezas que viajan con el aire. Este puede ser un filtro lateral que disminuye los costos de mantenimiento debido a menor frecuencia de limpieza en los cambiadores de calor, disminuye las purgas que conlleva a reducir los costos en los químicos y reduce los sólidos suspendidos en el agua de circulación. Cabe resaltar que un pequeño porcentaje del flujo total, generalmente de 1 a 5 % es enviado hacia los filtros.

## 6.7 CICLOS DE CONCENTRACIÓN

**Cuadro 16.** *Recomendaciones operacionales de los ciclos de concentración.*

<b>I.P</b>	Elevada concentración.
<b>E.O</b>	1. Incremento del consumo de agua. 2. Incremento de los costos de tratamiento y agua.
<b>P</b>	Elevada concentración de sales en la corriente de purga.
<b>S</b>	Diseñar el sistema de manera que el contenido de sal en el agua que circula la torre esté limitada, generalmente debe tener 3-7 ciclos de concentración. Por debajo de 3 ciclos, las velocidades de las corrientes de alimentación y purga aumentan rápidamente incrementando los costos por consumo de agua.
<b>I.P</b>	Se observan purgas fuertes en la torre de enfriamiento.
<b>E.O</b>	Reducción del rendimiento de la torre.
<b>P</b>	Bajos ciclos de concentración.
<b>S</b>	Cerrar las purgas hasta concentrar el sistema a los valores normales (3-7 ciclos).
<b>I.P</b>	Aumento del contenido de sólidos suspendidos y depósitos en equipos y líneas.
<b>E.O</b>	Reducción del rendimiento de la torre.
<b>P</b>	Altos ciclos de concentración.
<b>S</b>	Purgar el sistema ya sea mediante purga de fondo o purga continua con el fin de normalizar los ciclos de concentración (3-7).

## 7. CONCLUSIONES

La realización de cualquier actividad requiere siempre de una evaluación de acuerdo con las metas propuestas teniendo en cuenta las experiencias vividas durante la realización de la misma.

Es importante resaltar que aunque partimos de una fundamentación teórica adecuada, nos enfrentamos a un problema que nos pareció complejo, pero nos ofreció la posibilidad de adquirir conocimientos que serán de incalculable valor en nuestra vida profesional.

- La interpretación de fenómenos físico-mecánicos y más aún su simulación requieren de una fundamentación teórica y del manejo de modelos matemáticos, que permitan su valoración cuantitativa. Es así como se realizó un estudio de la teoría básica del fenómeno de transferencia de calor y masa como parte esencial del proceso que ocurre al interior de la torre de enfriamiento.
- Una vez que la teoría básica se conoce y es fácil identificar las variables de funcionamiento de las torres de enfriamiento, es posible verificar la influencia que puede tener cualquiera de ellas en la curva de funcionamiento de la torre de enfriamiento, esto se ve reflejado en los resultados de la teoría de Merkel que arroja el algoritmo.
- El comportamiento de una torre de enfriamiento depende en gran parte del tipo de relleno que esta utilice. Se plantea de esta manera el uso de cuatro tipos de relleno y la facilidad de que el usuario escoja entre ellos o proponga otro tipo de relleno diferente del cuál conoce sus características.
- Cooling Tower Institute (CTI) es una entidad de gran reconocimiento a nivel internacional que supervisa y verifica el funcionamiento de los sistemas de

enfriamiento, en especial torres de enfriamiento; motivo por el cuál se tomó como punto de comparación.

- Para elegir los métodos utilizados para resolver los modelos matemáticos fuimos muy exigentes, evitando principalmente el incremento de errores; meta que fue alcanzada satisfactoriamente, esto se refleja en los porcentajes de error obtenidos al comparar el algoritmo con el demo **CTI Toolkit**. Sin embargo, cabe resaltar que los perfiles de temperatura para el aire y el agua, y el perfil de humedad, presentan fallas al inicio debido a que se parte de un punto inicial que nos aleja del comportamiento ideal, situación que se muestra claramente en dichos perfiles.
- Las posibles fuentes de error se enfocan sin lugar a duda en la regresión utilizada para ajustar los datos de equilibrio del sistema aire-agua, la regresión para ajustar los datos de entalpía del aire húmedo a 1 atm y la no efectividad del 100% de los métodos utilizados para resolver el modelo matemático (Newton-Raphson, Runge-Kutta cuarto orden y Tchebycheff). Sin embargo, los resultados obtenidos fueron satisfactorios.
- Un complemento indispensable al algoritmo son las recomendaciones operacionales de las torres de enfriamiento por ello se trató de sintetizar las más importantes y eficientes.
- La implementación de Labview acompañada de un Script en Matlab es un poco más complejo que la utilización de Labview, sin embargo, la interacción que se logró desarrollar con las dos herramientas (Labview-Matlab) junto con el hecho de analizar los datos con el método de Newton-Raphson, Runge-Kutta cuarto orden y Tchebycheff permiten afirmar que la herramienta es confiable en el análisis de torres de enfriamiento a contracorriente de tiro inducido.
- Por otra parte se considera que el algoritmo desarrollado es versátil, fiable, visualmente agradable y tiene como ventaja que se puede seguir expandiendo en la simulación y análisis de otros tipos de cálculos e incluso del diseño de la torre.

- El agua posee innumerables cualidades como medio de transferencia de calor, sin embargo, su utilización para sistemas de enfriamiento, puede ocasionar problemas serios de corrosión, incrustación y crecimiento microbiológico a los equipos y tuberías, alterando las condiciones de operación de los procesos y en casos extremos ser la causa de paradas de emergencia de una planta de procesamiento. Con el fin de evitar este tipo de inconvenientes, se deben implementar medidas, como la adición al agua de productos inhibidores de corrosión, incrustación y crecimiento microbiológico. Por ello se vio la necesidad de adicionar al presente trabajo de grado un apéndice que contiene los principales tratamientos que deben hacerse al agua.

## RECOMENDACIONES

- Se propone el desarrollo de un software simulador de diferentes tipos de torres que permitan no sólo evaluar su funcionamiento, sino diseñar la torre, labor que no se llevó a cabo ya que no se planteó como objetivo del trabajo de grado, sin embargo, se dejan buenas bases y un avance para hacerlo.
- Implementar el análisis fisicoquímico del agua de circulación como una opción de la herramienta.
- Realizar el análisis del modelo matemático con otros métodos de mayor precisión.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BURDEN, Richard L. y FAIRES, Douglas. Análisis Numérico. 2<sup>a</sup> ed. Grupo editorial Iberoamérica. Estados Unidos de América, 1993. p. 59-60, 260-267.
2. BURGER, R. Cooling Tower Technology. 3<sup>rd</sup> Ed. Penn Well Publishing Company. 1995. p. 39-40, 48-50.
3. ----- Cooling Tower Technology: Maintenance, Upgrading and rebuilding. 2<sup>nd</sup> Ed. Fairmont Press, Inc. 1989.
4. COOLING TOWER INSTITUTE. CTI code tower, estandar specification. Acceptance test procedure for industrial water-cooling towers. Part I and II, 1967.
5. DÍAZ, Hugo y GALINDO, Alonso. Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de bajo costo y alto rendimiento. Bucaramanga, 1980. p. 1-6. Trabajo de grado (Ingenieros Mecánicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
6. FRAAS, Arthur P. y OZISIK, Necati. Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons: New York, 1965. p. 246-247.
7. GURNEY, J.D. y COTTER, I.A. Cooling Towers. London, Maclaren and Sons Ltda. 1996. p. 45, 78-81.
8. HENSLEY, J. Cooling Tower Fundamentals. 2<sup>nd</sup> ed. MCT. 1985. p. 18-20, 30-35.
9. ----- Maximize Tower Power. En: Chemical Engineering. (Febrero. 1992); p. 74-80.
10. HERRO, H. and PORT, R. The Nalco Guide to cooling water systems failure analysis. New York: Mc Graw Hill Book Co. 1993. 420 p.
11. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Normas Colombianas para la presentación de Tesis de grado. Bogotá: ICONTEC. 2002.
12. KEMMER, Frank N. y MCCALLION, John. Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. p. 38.21- 38.25.

13. KERN, Donad Q. Procesos de transferencia de calor. MC. GRAN Hill. 1970. p. 661-664, 670-675, 692-694, 695.
14. MONTGOMERY, Douglas C, y RUNGER, George C. Probabilidad y Estadística aplicada a la ingeniería. Mc Graw Hill Interamericana editores, S.A. México, 1996. 323-363, 371-452 p.
15. NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, Guía de iniciación rápida de LabVIEW. 1999.
16. NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, Manual de referencia de funciones y VIs. 1998.
17. NIEVES, Carlos H. y RUEDA, Gerson M. Torre de enfriamiento, modelo para pruebas de laboratorio. Bucaramanga, 1998. p. 19-24, 33-41, 41-49. Trabajo de grado (Ingenieros Mecánicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
18. NOLTAGE,H.B. Merkels cooling diagram as a performance correlations for air-water evaporative cooling systems. ASHVE Transaction, 1941. p. 47-429.
19. PERRY, Robert H. Manual del Ingeniero Químico. 6<sup>a</sup> Ed. Mc. Grew Hill. 2001. 12.14 p.
20. ROSALER, Robert C. The Standard Handbook of Plant Engineering. 2<sup>nd</sup> Ed. Mc. Graw Hill: New York, 1995.
21. TREYBALL, R. Operaciones de transferencia de masa. 3<sup>a</sup> ed. Mc. Graw Hill: New York, 1980. p. 274-281, 289-292.
22. [www.cti.org](http://www.cti.org)
23. [www.conae.gob](http://www.conae.gob)
24. [www.ecoingenieria.homestead.com/files/tiroforzado.htm](http://www.ecoingenieria.homestead.com/files/tiroforzado.htm)

## **APENDICES**

## APÉNDICE 1. TRATAMIENTO DE AGUAS

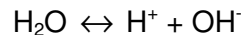
Todas las aguas naturales contienen diversas cantidades de materiales suspendidas o disueltas y gases disueltos.

La cantidad de minerales disueltos en el agua varía entre 300lb/1000gal en el agua de mar, hasta 0.5-10lb/1000gal en fuentes de agua fresca. El tipo y la cantidad de impurezas en el agua fresca varían con la fuente (lago, río, aljibe, etc) y también con la región (costa, valle, montaña, etc).

Al caer las aguas lluvias pueden absorber gases tales como dióxido de carbono, dióxido de sulfuro, nitrógeno, polvo y otras impurezas contenidas en el aire y también disolver sustancias minerales de la tierra formando sales las cuales son la base de las aguas duras como también de la corrosión. Las aguas duras resultan de la presencia de sales de calcio y magnesio los cuales son solubles en agua bajo condiciones normales de temperatura. El agua puede también disolver sales no duras tales como sulfato o cloruro de sodio que son altamente corrosivas.

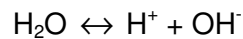
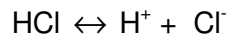
### 1. ACIDEZ Y ALCALINIDAD (PH DEL AGUA)

El agua se disocia de la siguiente forma

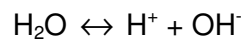
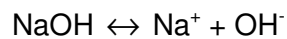


Una pequeña parte del agua se considera que se halla siempre parcialmente disociada con un número de iones libres de Hidrógeno (H) e iones hidróxido (OH<sup>-</sup>). Como quiera la cantidad de agua sin disociar es muy grande con relación a la cantidad total, el producto de los iones de hidrógeno (ácidos) por los iones hidrófilos (álcalis) es igual a la constante

$1 \cdot 10^{-14}$ . El agua pura es neutra, y por lo tanto el número de iones  $H^+$  es igual a la de iones  $OH^-$  en un volumen dado y la concentración de cada uno de ellos es igual a  $10^{-7}$ . Cuando se mezcla agua pura con un ácido, los iones de hidróxido, por lo tanto la solución tiene características ácidas por ejemplo:



También, cuando se disuelve agua pura con una cierta cantidad de bases los iones de  $OH^-$  exceden en una cierta cantidad a los iones  $H^+$  dando como resultado una solución con características básicas.



Para expresar la acidez o alcalinidad del agua se utiliza el término PH, cuyo valor es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno. Para el agua pura, la concentración  $H^+$  es  $1 \cdot 10^{-7}$  y así el PH es tomado como 7, el cual es el punto neutro de la escala.

Cuando aumenta la concentración de iones hidrógeno, su recíproco se hace más pequeño por consiguiente, el Log es más pequeño, dando como resultado un PH menor a 7, lo cual es una característica de las soluciones ácidas. Si la concentración de iones hidrógeno se disminuye el PH tiene un valor mayor que 7, esto es característica de las soluciones alcalinas. Un PH menor que 7 implica una tendencia a la corrosión.

## **2. IMPUREZAS DEL AGUA**

Las impurezas que se encuentran en las aguas naturales pueden clasificarse como:

- Sólidos disueltos

- Gases disueltos
- Sustancias en suspensión

El agua es un buen solvente, disuelve las rocas y los suelos, los gases del aire y los gases expedidos por sustancias orgánicas del subsuelo. Mantiene en suspensión las sustancias de la tierra. Está también sujeta a contaminación por los desechos industriales, aceites y materiales de procesamiento. En general, el tipo de impurezas que contiene el agua depende de la sustancia con que entre en contacto y la cantidad de impurezas depende del tiempo que dure ese contacto.

### **A) Sólidos Disueltos**

Los minerales que el agua capta de las rocas, consisten principalmente de Carbonato de Calcio (Caliza), Carbonato de Magnesio (Dolomita), Sulfato de Calcio (Yeso), Sulfato de Magnesio (Sal Epsomita), Sílice(Arena), Cloruro de Sodio (Sal común), Sulfato de Sodio (Sal Glaubert) y pequeñas cantidades de Hierro, Manganeso, Fluoruros, Aluminio y otras sustancias. Los desechos de minas y ciertos procesos industriales, hacen que las aguas superficiales sean muy ácidas, mientras que los minerales del subsuelo hacen que las aguas subterráneas sean muy alcalinas. Algunas veces se encuentran nitratos en el agua y en muchos casos esto se asocia con la contaminación por aguas negras.

Las aguas que contienen grandes cantidades de Calcio y Magnesio se denominan “duras”. Los compuestos de Calcio y Magnesio reaccionan con el jabón y forman coágulos en el agua. Estos compuestos son a los que se refiere la dureza del agua. La cantidad de dureza de las aguas naturales puede variar de varias ppm (partes por millón) a cerca de 500 ppm. Como los compuestos de Calcio y Magnesio son relativamente insolubles en agua, tienden a precipitarse causando incrustaciones y depósitos que originan problemas.

### **B) Gases Disueltos**

El agua disuelve cantidades variables del aire el cual está compuesto por 21% de Oxígeno, 78% de Nitrógeno, 1% de otros gases (incluyendo 0.03 a 0.05% de Oxido de Carbono). El Oxígeno es soluble en el agua a la temperatura ambiente y a la presión

atmosférica hasta el límite de 9 ppm. La solubilidad del Oxígeno disminuye cuando la temperatura del agua sube, pero en agua bajo presión puede mantener grandes cantidades de Oxígeno disuelto. Aunque el Nitrógeno está disuelto en las aguas naturales, es un gas inerte y tiene un pequeño efecto en el carácter de las aguas usadas en calderas. El agua normalmente no absorbe más de 10 ppm de Dióxido de Carbono del aire. El Dióxido de Carbono puede estar disuelto en el agua hasta un límite mucho mayor; sobre todo, debido a la penetración de la vegetación y de las sustancias orgánicas del subsuelo. El Sulfuro de Hidrógeno y el Metano pueden disolverse en algunas aguas, pero esto no ocurre generalmente. Estos gases, sin embargo, pueden ser importantes cuando aparecen como contaminantes.

### **C) Sustancias en suspensión**

Las aguas naturales pueden contener turbidez, color y precipitados minerales, lo mismo que aceites y otros desechos. El color se debe a las sustancias vegetales descompuestas. La turbidez puede deberse a material orgánico muy finamente dividido y a microorganismos; así como también a cieno y arcilla. Los aceites, sebos, grasas, aguas negras y otros desechos pueden contaminar las fuentes de agua.

## **2.1 IMPUREZAS DEL AGUA QUE FORMAN DEPÓSITOS**

Los depósitos son rara vez compuestos de un solo elemento, sino que generalmente son una mezcla de varias sustancias minerales, productos de corrosión y otras contaminaciones. Los depósitos más comunes en tuberías, intercambiadores, condensadores, evaporadores, torres de enfriamiento y calderas son: Carbonato de Calcio, Sulfatos de Calcio, Silicatos de Calcio, Hidróxido de Magnesio, Silicato de Magnesio, Oxido de Hierro y sílice. Los lodos que se depositan en los equipos, aunque el agua haya sido tratada, pueden contener también Fosfatos de Calcio y de Magnesio.

### **A) Características de los depósitos de Carbonato**

Un depósito de Carbonato es usualmente granular y de una conformación muy porosa. Los cristales de Carbonato de Calcio son grandes, pero generalmente están unidos entre

sí por partículas muy finas u otros materiales, de tal manera que el depósito parece denso y uniforme. Un depósito de Carbonato se puede identificar fácilmente, porque al agregar una solución ácida, produce una efervescencia en la incrustación.

### **B) Características de los depósitos de Sulfato**

Un depósito de Sulfato es mucho más duro y más denso que un depósito de Carbonato, debido a que los cristales son más pequeños y se unen entre sí más fácilmente. Un depósito de Sulfato es quebradizo y no se pulveriza fácilmente, además no produce efervescencia con soluciones ácidas.

### **C) Características de los depósitos de Silicato**

Un gran depósito de Silicato es muy duro, casi como porcelana. Los cristales de Sílice son pequeñísimos y forman una incrustación muy densa y muy difícil de distinguir a simple vista. Es una incrustación muy quebradiza y muy difícil de pulverizar, no es soluble en Acido Clorhídrico.

### **D) Características de los depósitos de Hierro**

El Hierro se deposita debido a la corrosión o a la contaminación del agua con el Hierro, y su color es muy oscuro. El Hierro que se deposita en los equipos metálicos es magnético y soluble en ácido, dando una solución de color café oscuro.

## **2.2 IMPUREZAS DEL AGUA QUE PRODUCEN CORROSION**

En términos generales, la corrosión es el regreso de un metal a su forma mineral de origen. Por ejemplo, el Hierro se revierte a Oxido de Hierro con la oxidación. El proceso de corrosión, sin embargo es una reacción electroquímica muy compleja y que puede tomar muchas formas.

La corrosión puede producir un ataque general sobre una amplia superficie del metal. También se produce corrosión en forma de picaduras localizadas en la superficie del metal.

La corrosión puede ocurrir como resultado de la acción de agua con bajo PH, y con la presencia de Oxígeno y Dióxido de Carbono disuelto en el agua.

Las altas temperaturas y los esfuerzos a que está sometido el metal contribuyen a acelerar la corrosión. En los sistemas de vapor y de condensados la corrosión es el resultado de la contaminación con Oxígeno y con Dióxido de Carbono. Los contaminantes específicos tales como los gases del Azufre y de Amoníaco pueden aumentar el ataque sobre las aleaciones de Cobre del sistema (tuberías, Chumaceras, etc).

La corrosión ocasiona generalmente dos tipos de dificultades, la primera es el deterioro del metal y la segunda es la formación de depósitos de productos corrosivos. Generalmente la corrosión uniforme de las superficies de metal casi no sucede. Lo más común es que se presenta localizada en forma de picaduras o de desprendimiento de material.

### **3. METODOS PARA ELIMINAR LAS IMPUREZAS DEL AGUA**

Los fines principales perseguidos por el acondicionamiento o tratamiento de agua son quitar las materias solubles, las materias en suspensión y eliminar los gases.

No existe ningún procedimiento simplista ni producto químico apropiado para el tratamiento de toda clase de aguas. Cada caso debe considerarse individualmente.

Un proceso riguroso de tratamiento del agua puede incluir Clarificación, Coagulación, Precipitación, métodos de intercambio iónico, dealcalización, desmineralización, deaireadores y evaporadores.

A continuación se describirá en forma general los diferentes tipos de tratamiento de aguas.

### **3.1 CLARIFICACION**

La clarificación es un método para eliminar las sustancias suspendidas y el color del agua. Los materiales en suspensión pueden ser grandes partículas que se asientan fácilmente. En estos casos, el equipo de clarificación simplemente constará de un recipiente decantador y de filtros. Lo más frecuente sin embargo, es que las materias suspendidas son partículas tan pequeñas que no se asientan y que se pasan por los huecos de los filtros.

Para eliminar estas sustancias (coloidales) tan finas, hay que usar sustancias coagulantes.

### **3.2 COAGULACION**

La coagulación es reunir en forma de masa, las partículas muy finas y las sustancias coloidales del agua; estas masas así formadas se asientan rápidamente y pueden ser filtradas.

Las sustancias coloidales tienen superficie exterior muy grande, la cual las mantiene en suspensión y además siempre tratan de permanecer separadas porque tienen cargas eléctricas negativas. De allí que para lograr su coagulación hay que producir un núcleo positivo artificial que atraerá a su alrededor todas las cargas negativas de las sustancias coloidales.

Los coagulantes más comunes son sales de Hierro y de Aluminio, tales como Sulfato Férrico, Cloruro Férrico, Sulfato de Aluminio (Alúmina) y Aluminato de Sodio. Los iones Férrico y Aluminio, cada uno tiene tres cargas eléctricas positivas y por tanto su efectividad está relacionada con su capacidad de reaccionar con las partículas coloidales cargadas negativamente. El uso apropiado de estos coagulantes forma un precipitado en el agua, el cual actúa como una especie de red que atrapa las sustancias en suspensión. Los polielectrolitos se usan también para éstos propósitos. Se trata de una sustancias en forma de cadena de moléculas de cargas eléctricas positivas.

En algunos casos los polímeros orgánicos y ciertos tipos de arcillas son usados en los procesos de coagulación y sirven como aditivos coagulantes.

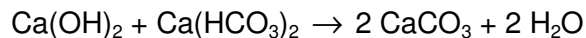
Estos aditivos ayudan a que los coágulos sean más pesados y se asienten más rápidamente.

### **3.3 PRECIPITACION**

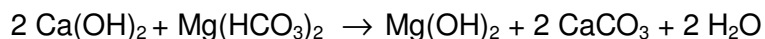
En los procesos de precipitación las sustancias químicas suministradas reaccionan con los minerales disueltos en el agua, produciendo sustancias relativamente insolubles. Los métodos de precipitación se usan para reducir la dureza disuelta, la alcalinidad y la sílice. El ejemplo más común de tratamiento por precipitación es el de suavización del agua con cal-soda.

#### **3.3.1 Suavización con Cal**

La cal hidratada (Hidróxido de Calcio) reacciona con los bicarbonatos solubles de Calcio y Magnesio y forma precipitados insolubles; las reacciones químicas son :



Cal + Bicarbonato de Calcio → Carbonato de Calcio + Agua



Cal + Bicarbonato de Magnesio → Hidróxido de Magnesio + Carbonato de Calcio

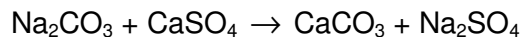
La mayoría de los Carbonatos de Calcio y de los Hidróxidos de Magnesio se manifiestan en forma de lodos y pueden eliminarse por decantación y filtración. La cal, por consiguiente, puede usarse para reducir la dureza presente en el agua en forma de bicarbonato; así como para disminuir la cantidad de alcalinidad bicarbonato.

La cal reacciona con el Sulfato de Magnesio y con el Cloruro de Magnesio y precipita Hidróxido de Magnesio, pero en este proceso se forman Sulfatos de Calcio y Cloruros de

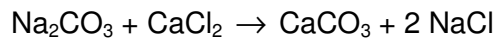
Calcio que son solubles. Por tanto, la cal no es efectiva para eliminar Sulfatos de Calcio y Cloruros de Calcio.

### 3.3.2 Suavización con Soda

La soda "Ash" (soda-ceniza) se usa para reducir la dureza no bicarbonato (también llamada dureza sulfato o dureza permanente). Las reacciones químicas son:



Soda Ash + Sulfato de Calcio → Carbonato de Calcio + Sulfato de Sodio



Soda Ash + Cloruro de Calcio → Carbonato de Calcio + Cloruro de Sodio

El Carbonato de Calcio formado por la reacción tiende a manifestarse como lodo. El sulfato de Sodio y el Cloruro de Sodio son altamente solubles y no producen incrustaciones.

### 3.3.3 Métodos de suavización con Cal – Soda

Los dos tipos generales son intermitentes (tipo baño) y continuos. El método más antiguo de suavización intermitente consiste en mezclar los productos químicos con el agua en un tanque el tiempo suficiente para que la reacción se efectúe y los lodos se depositen, posteriormente se drena el agua limpia. El método más moderno de suavización Cal-Soda incluye el uso de tanques subdivididos con comportamientos especiales para:

- Proporcionar sustancias químicas con el agua que entra continuamente.
- Retener la mezcla para permitir que se efectúe la reacción y se precipiten los lodos.
- Drenar continuamente el agua.

Los tratamientos Cal-Soda también se pueden clasificar como calientes y fríos, dependiendo de la temperatura del agua. Los procesos de suavización en caliente aumentan la velocidad de la reacción química y dan mejor calidad del agua.

### **3.4 INTERCAMBIO IONICO**

Cuando una sal se disuelve en el agua, forma partículas con carga eléctrica positiva (cationes) y partículas con carga eléctrica negativa (aniones).

Por ejemplo, al disolver Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en agua se forma un catión (ion positivo)  $\text{Ca}^{++}$  y un anión (ion negativo) Carbonato ( $\text{CO}_3^-$ ). Las dos cruces de la fórmula del Calcio significan dos cargas positivas eléctricas y los dos signos menos de la fórmula del Carbonato significan dos cargas negativas eléctricas.

El mismo fenómeno sucede con muchas otras sustancias y se utiliza como un medio para suavizar el agua, sustituyendo los cationes de Calcio y Magnesio, los cuales producen incrustaciones y reemplazándolos por cationes de sodio, los cuales no producen incrustaciones.

Los aniones también se pueden eliminar del agua, por medio de resinas intercambiadoras.

La acción de eliminar los aniones y los cationes del agua se llama desmineralización y se logra usando materiales que tengan la propiedad de intercambiar las sustancias que producen incrustaciones por otras que no las producen.

Los materiales de intercambio iónico usualmente tienen la forma de glóbulos o de cristales, los cuales forman un lecho de varios pies de espesor, a través del cual pasa el agua.

Hay dos clases de materiales intercambiadores de iones que son:

- Materiales de intercambio de cationes.
- Materiales de intercambio de aniones.

### **3.4.1 Materiales de intercambio de cationes**

Reaccionan únicamente con iones con cargas positivas tales como Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) o Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ).

Los suavizadores de ZEOLITA son intercambiadores de cationes compuestos básicamente de sodio, aluminio y sílice. Hay otros tipos de intercambiadores de cationes compuestos por resinas ó por sustancias orgánicas.

Los intercambiadores de cationes operan en un ciclo de Sodio-Hidrógeno, es decir, que pueden reemplazar todos los cationes del agua, por Sodio o por Hidrógeno.

### **3.4.2 Materiales de intercambio de aniones**

Reaccionan únicamente con iones con cargas negativas, tales como carbonatos ( $\text{CO}_3^-$ ) o sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ).

Los materiales usados son generalmente de naturaleza orgánica y son de dos tipos básicos:

- a) De base débil: no eliminan el dióxido de carbono (gas carbónico) ni la sílice; pero si eliminan los aniones ácidos fuertes por absorción. Estos intercambiadores operan en ciclo carbonato.
- b) De base fuerte: pueden reducir la sílice y el gas carbónico, hasta valores mínimos. Estos intercambiadores operan en ciclo hidróxido.

Los materiales de intercambio iónico tienen una capacidad limitada de eliminación de los iones. Cuando su capacidad se copia, deben regenerarse. Esto es básicamente el proceso inverso del intercambio de iones. En el caso de un intercambiador de cationes de ciclo de sodio, se adiciona sal común ( $\text{NaCl}$ ) para restablecer la capacidad del Sodio, o se adiciona una solución ácida para restablecer la capacidad del Hidrógeno.

Los intercambiadores de aniones, usualmente se regeneran con Soda Cáustica NaOH (Hidróxido de Sodio), o Hidróxido de Amonio (NH<sub>4</sub>OH), para restaurar los iones hidróxido. Algunas veces se usa Soda Ash (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y Cloruro de Sodio (NaCl).

La regeneración consiste en tratar el material intercambiador con una solución concentrada de regenerante. El material intercambiador libera los iones que ha capturado del agua y son eliminados de la unidad, quedando listo o “recargado” para ser usado otra vez.

### **3.5 DEALCALIZACIÓN**

Es un proceso para reducir la alcalinidad del agua. Consiste en pasar el agua a través de un intercambiador de aniones de ciclo de cloro. El intercambiador elimina los iones alcalinos tales como carbonatos o bicarbonatos y los reemplaza por iones cloro. Este proceso debe ser precedido por una suavización por intercambio de cationes.

### **3.6 DESMINERALIZACIÓN**

Consiste en pasar el agua a través de intercambiadores de ambos tipos (aniones y cationes). El intercambio de cationes opera con el ciclo de hidrógeno o sea que el hidrógeno sustituye todos los cationes. El intercambio de aniones opera con el ciclo hidróxido, o sea que el hidróxido reemplaza a todos los aniones. El flujo final consta de iones de hidrógeno y iones hidróxido o agua.

La desmineralización tiene lugar de diversas maneras: en el proceso de lecho mixto los materiales de intercambio de aniones y de cationes están íntimamente mezclados en una unidad; en los procesos de lecho múltiple, el equipo consta de lechos de intercambio de cationes, lechos de intercambio de aniones de base fuerte y de base débil y desgasificadotes.

### **3.7 AERACIÓN**

La aeración se practica en el tratamiento de agua por tres razones principales:

- Para introducir oxígeno del aire.
- Para dejar que se escapen los gases disueltos como el bióxido de carbono y el ácido sulfhídrico.
- Para eliminar las sustancias volátiles que causan olor y sabor.

La introducción del oxígeno constituye la primera etapa en el proceso de eliminación de hierro y manganeso por filtración. La eliminación del bióxido de Carbono mediante la aeración es un método para hacer que la acción corrosiva de las aguas de un abastecimiento sea mínima. En la práctica es difícil disminuir la concentración del gas por debajo de 5 ppm, por aeración solamente debido a la presencia normal de este gas en la atmósfera. También es limitada la efectividad de la aeración para eliminar olores y sabores, no pudiendo considerarse como sustituto del control preventivo o de procesos de tratamiento más adecuados.

#### ***Métodos de aeración:***

La aeración puede llevarse a cabo por métodos diversos, se ha encontrado que el más eficaz consiste en usar aspersores por medio de los cuales el agua se pulveriza en la atmósfera, hasta formar una neblina o gota muy pequeña. Otro método consiste en descargar el agua por una tubería elevada que la lleva a una serie de artenas o charolas, de las que cae el agua a través de pequeños agujeros del fondo o derramándose por el borde. Una modificación a este procedimiento consiste en dejar que el agua salpique y escurra por una serie de artenas o lechos que contengan coque o piedra triturada. Otro método consiste en forzar el paso de aire comprimido dentro del agua que se va a tratar.

En la aeración a través de charolas, las rejillas están espaciadas de tal manera que el agua de una rejilla cae al centro de la siguiente inferior. Para una aeración eficiente es muy importante que el agua fluya de charola en charola en forma de película delgada.

En lugar de que el aerador tenga pocas charolas bastante espaciadas, una mejor aeración se obtiene con un número mayor de charolas y con poca altura entre ellas.

El menor número de charolas que se usa es de cuatro, y el mayor es de cerca de dieciocho. El flujo de agua generalmente es de 5 a 10 gpm/pie<sup>2</sup> correspondiendo los flujos menores con las alturas más reducidas de los aeradores.

### **3.8 DEAIREACION**

La deaireación del agua se lleva a cabo mezclando el agua íntimamente con el vapor en un calentador deaireador. Parte del vapor es sacado junto con la mayor parte del oxígeno disuelto en el agua.

Hay dos tipos de deaireadores de vapor:

- a) El de tipo de aspersion, en el cuál un chorro de vapor se mezcla íntimamente con el agua de alimentación que es rociada dentro de la unidad.
- b) El de bandeja, en el cual el agua de entrada cae sobre una serie de bandejas haciendo que el flujo de agua se rompa en pequeñas gotas y permita el íntimo contacto con el vapor que entra.

### **3.9 EVAPORACIÓN**

El agua, algunas veces se trata previamente por evaporación para producir vapor relativamente puro, el cual se condensa después y se usa para fines de alimentación de calderas o condensadores de tipo cerrado. Los evaporadores son de varios tipos, el más simple es un tanque de agua a través del cuál pasan tubos espirales con vapor, los cuales calientan el agua a su punto de ebullición.

Algunas veces para aumentar la eficiencia, el vapor del primer tanque se pasa por medio de espiras a un segundo tanque de agua, para producir calentamiento adicional y más evaporación. Otro tipo de evaporadores es el de expansión (flash) que opera bajo condiciones de vacío parcial, causando una disminución del punto de ebullición del agua y evaporándola a bajas temperaturas.

Los evaporadores tienen ventajas cuando se puede conseguir fácilmente vapor como fuente de calor. Tienen la ventaja especial sobre la desmineralización, cuando los sólidos disueltos en el agua cruda son muy altos.

#### **4. CONTROL DE LA CORROSIÓN E INCRUSTACIÓN**

La corrosión en los sistemas del agua de enfriamiento de recirculación se controla empleando uno o más de cuatro inhibidores principales y una variedad de complementos menores. Los cuatro inhibidores básicos son cromatos, zinc, ortofosfatos y polifosfatos. Los complementos menores incluyen molibdatos, nitritos, nitratos, varios compuestos orgánicos de nitrógeno, silicatos y productos orgánicos naturales.

Los primeros productos compuestos químicos para el tratamiento de aguas de enfriamiento de recirculación fueron los polifosfatos inorgánicos y algunos materiales orgánicos naturales. El concepto consistía en añadir una pequeña cantidad de ácido para controlar el índice de estabilidad hasta un valor ligeramente formador de incrustación.

Los polifosfatos y los materiales orgánicos naturales se añadieron al programa para proporcionar protección contra la corrosión e inhibición de incrustaciones. La inhibición de incrustaciones e originó en el uso de los polifosfatos como un tratamiento umbral. Además, el polifosfato se combinaba con el calcio para formar un inhibidor catódico que reducía la tasa de corrosión. Los materiales orgánicos naturales tendían a mantener la superficie metálica relativamente limpia y a ayudar al inhibidor en el establecimiento de una película protectora. También dispersaban los sólidos suspendidos y modificaban los precipitados de calcio y fosfato tricálcico si tendían a desarrollarse sobre las superficies calientes.

Este concepto de agua de enfriamiento se usa todavía en muchos sistemas en operación. Sin embargo, un aspecto crítico de este enfoque de tratamiento es la conversión potencial del polifosfato a ortofosfato; si esto ocurre, los ortofosfatos resultantes se combinan con el calcio para formar fosfato tricálcico. Esto puede ser muy problemático si la cantidad precipitada es grande. Para hacer que esto sea mínimo, se mantiene el agua a un pH relativamente bajo. Con este sistema el pH es difícil de controlar.

El siguiente tratamiento de agua de enfriamiento fue el de cromato, un inhibidor de corrosión excepcionalmente confiable. Al principio, el cromato se aplicaba en dosis muy altas, con frecuencia en el intervalo de 200-300 mg/l como  $\text{CrO}_4$ . Se añadía ácido al sistema para bajar el pH entre 6 y 7 y evitar la precipitación del carbonato de calcio. Este tratamiento era muy efectivo tanto en la inhibición de incrustaciones como en la protección contra la corrosión. Pero tenía el inconveniente de que el ataque por picaduras tendía a ocurrir si el residuo de cromato disminuía. Se halló que si el cromato se combinaba con otros inhibidores, en particular con los de tipo catódico (por ejemplo zinc y polifosfatos), el nivel de cromato podía reducirse a 20-30 mg/l de  $\text{CrO}_4$ , con mejores resultados que los obtenidos a 200-300 mg/l de  $\text{CrO}_4$  usado solo. En el enfoque del cromato sinergizado también se empleaba ácido, controlando con frecuencia el pH entre 6 y 7. Una ventaja adicional del cromato sinergizado era el margen de seguridad que daba contra el ataque por picaduras si el cromato se subalimentaba momentáneamente.

Se considera que estas formulaciones de cromato sinergizado todavía se hallan entre los mejores inhibidores de corrosión actualmente en uso. Sin embargo, las crecientes presiones ambientales están forzando el desarrollo de formulaciones innovadoras de cromato sinergizado que permitan llevar los niveles de cromato en un sistema de recirculación bastante por debajo de 10 mg/l  $\text{CrO}_4$ , sin dejar de dar protección aceptable contra la corrosión. Para lograr resultados con este enfoque, el pH del sistema debe controlarse con precisión, lo mismo que los dispersantes y biocidas usados para mantener limpio el sistema. Una limitación obvia para este enfoque está en que no existe el almacén de protección del que se dispone con los niveles más altos de  $\text{CrO}_4$ . Por lo tanto, la contaminación del proceso, la actividad microbiana sin control, el ensuciamiento y la depositación, perturbarían al sistema mucho más rápidamente que a niveles más tradicionales de 20 a 30 mg/l de cromato.

Aunque el cromato un trabajo notable durante años, las crecientes preocupaciones ambientales han ejercido presión impulsando a que se investiguen nuevos inhibidores de corrosión que potencialmente tengan un menor impacto ambiental. Un primer resultado de estas investigaciones fue el desarrollo de combinaciones de zinc y productos orgánicos. Puesto que el zinc, un inhibidor catódico, tiene menor fuerza de película que el cromato, el pH del sistema para un programa organo-zinc se aumentó hasta entre 7 y 8 para hacer

que el agua fuera menos corrosiva, permitiendo que el zinc formara una barrera inhibidora satisfactoria. La parte orgánica del tratamiento era un dispersante para mantener al sistema libre de depósitos, alentando así la formación de una película adecuada de zinc. Además de dispersar, algunos tipos de productos orgánicos aumentaban la solubilidad del zinc al mayor pH requerido para este método de tratamiento. Estos programas fueron adecuados en muchas plantas industriales, pero debido a que la película inhibidora no era tan efectiva como la de cromato al pH de operación, dichos programas no reemplazaron en forma importante a los tratamientos tipo cromato tradicionales.

Más tarde, llegó un concepto innovador en la química del agua de enfriamiento con la introducción de los compuestos organo-fosforados. Igual que los polifosfatos inorgánicos, éstos previenen la formación de incrustaciones por el efecto umbral. Sin embargo, ahí termina la semejanza; los polifosfatos inorgánicos se convierten fácilmente en ortofosfatos, con mayor tiempo de retención, temperatura y ataque microbiológico. Los compuestos organo-fosforados no se convierten en las condiciones normales de las torres de enfriamiento excepto si están bajo un severo ataque microbiológico. Más aún, a diferencia de los polifosfatos inorgánicos, los compuestos organo-fosforados son capaces, en general, de inhibir la precipitación del carbonato de calcio y de otras especies que forman incrustaciones, a pH más alto y a mayor alcalinidad que los tolerados por los polifosfatos inorgánicos. Este desarrollo abrió la puerta a lo que ahora se conoce como enfoque alcalino de tratamiento de los sistemas de agua de enfriamiento.

El concepto básico de tratamiento consiste en elevar el pH del sistema en operación hasta 7.5-9.0, reduciendo así en forma importante la corrosividad natural del agua de recirculación. Después se añade un compuesto organo-fosforado al sistema para prevenir la formación de carbonato de calcio. Este enfoque se apoya en la alcalinidad natural del agua y en la elevación del pH para inhibir la corrosión.

La experiencia ha mostrado que aunque el mayor pH da un agua menos corrosiva, con frecuencia esta reducción no es de la magnitud suficiente para proteger todos los sistemas de acero suave, en especial los cambiadores de calor de acero suave con un alto flujo de calor o con bajas velocidades de flujo. En estos sistemas se tienen todavía

que complementar los materiales organo-fosforados con la aplicación de inhibidores de corrosión como el zinc, el ortofosfato, el polifosfato, el cromato o combinaciones de ellos.

La gran ventaja que dan los compuestos organo-fosforados sobre los tratamientos anteriores es que la corrosividad reducida del agua permite mantener menos residuos de los inhibidores aplicados y lograr al mismo tiempo tasas aceptables de corrosión. Otra ventaja particular del concepto alcalino de tratamiento es la reducción sustancial o la eliminación ocasional de la alimentación del ácido. Esto, desde luego, depende de la química del sistema.

En el cuadro 1 se listan algunas de las variables más importantes que deben controlarse en los sistemas de enfriamiento. La dureza del calcio y magnesio definen la tendencia incrustante del agua. La alcalinidad total, el pH y la temperatura definen las concentraciones de los iones carbonato y bicarbonato en el agua, y también la solubilidad del carbonato de calcio. Todas estas variables deben controlarse dentro de intervalos aceptables para cada sistema a fin de asegurar una operación libre de incrustaciones. Las concentraciones de sulfatos y de sílice deben también controlarse a niveles razonables para prevenir la formación de incrustaciones de yeso y de sílice.

**Cuadro 1.** *Variables importantes del agua de enfriamiento.*

<b>VARIABLE</b>	<b>EFFECTOS</b>
Ca, Mg	Definen la tendencia del agua a incrustar.
Alcalinidad, pH y temperatura	Definen la concentración del carbonato y bicarbonato, y la solubilidad del carbonato de calcio.
SO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>	Deben controlarse para prevenir las incrustaciones de sulfato y silicato.
Sólidos suspendidos	Causan ensuciamiento, requieren dispersantes
Contaminantes: hidrocarburos, glicoles, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Causan ensuciamiento y crecimiento microbiano, alta demanda de cloro, precipitan a los tratamientos químicos.

Muchos sistemas contienen sólidos suspendidos que se concentran en la torre y causan ensuciamiento. Se pueden usar dispersantes para controlar esto, una vez que el problema se ha definido apropiadamente. Algunos de los sólidos pueden provenir del reemplazo,

otros pueden haber sido lavados del aire, y otros pueden ser productos de precipitación o masas microbianas. Si los sólidos suspendidos son excesivos, se evidencian tubos tapados, por tanto, debe añadirse un sistema de filtros al circuito para filtrar una porción del agua de circulación que sea aproximadamente igual a la tasa de evaporación.

En cuadro 1 se listan algunos de los principales componentes químicos de que se dispone para el tratamiento del agua de enfriamiento. Al utilizar esta carta debe notarse que ninguno de ellos es útil por sí mismo. Por ejemplo, es difícil o imposible un buen control de la corrosión en un sistema sucio, incrustado. Un buen control de la incrustación y del ensuciamiento para mantener superficies limpias reduce al mínimo la dosificación de inhibidores de corrosión. Muchos productos químicos ayudan a resolver más de un problema, como se muestra en la tabla. Si uno de estos productos químicos en particular es o no la mejor elección para un sistema dado, ello dependerá de las condiciones específicas en ese sistema.

**Cuadro 2.** *Componentes químicos usados en el tratamiento de aguas.*

COMPONENTES QUIMICOS	EVITA O PREVIENE			
	CORROSION	INCRUSTACION	ENSUCIAMIENTO	MICROBIOS
Cromatos	*			
Zinc	*			
Molibdatos	*			
Silicatos	*			
Polifosfatos	*	*		
Esteres de poliol		*	*	
Fosfonatos		*	*	
Productos orgánicos naturales		*	*	
Poliacrilatos		*	*	
Biocidas no oxidantes			*	*
Cloro				*
Ozono				*

## 5. CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO

El control de depósitos en los sistemas de aguas de enfriamiento es absolutamente esencial para el mantenimiento de las tasas de transferencia de calor. Sin embargo, el

control de los depósitos es a menudo más difícil en los sistemas alcalinos que en los sistemas de menor pH. El agua de reemplazo puede contener sólidos disueltos, de los que cualquiera puede contribuir al ensuciamiento. Un sistema puede quedar fuertemente contaminado con microbios; por ejemplo, un agua de reemplazo con alta DBO, tal como un efluente municipal o industrial, es particularmente susceptible de ensuciar a partir de bacterias formadoras de lama.

El agua cruda y el aire inoculan a un sistema con materia orgánica coloidal, sedimentos, hierro soluble y microbios. El sulfuro de hidrógeno, el dióxido de azufre y el amoníaco pueden entrar desde la atmósfera a la planta.

La mayor parte de los agentes químicos de control de incrustaciones comúnmente usados controlan también el ensuciamiento, pero no todos son igualmente buenos para dispersar toda clase de depósitos. La selección del dispersante apropiado para cualquier sistema en operación se basa en el análisis real de un depósito.

Los productos orgánicos naturales y sintéticos, incluyendo ligninas sulfonadas, taninos y agentes activos de superficie, se aplican por lo general para dispersar óxidos hidratados y depósitos orgánicos. Algunos materiales de la familia de los acrilatos son dispersantes para los sedimentos, la arena, los óxidos duros de hierro y otros depósitos inorgánicos.

Los compuestos organo-fosforados, incluyendo los ésteres de poliol y los fosfanatos, son dispersantes para los precipitados de carbono de calcio y sulfato de calcio. Sin embargo, una vez que los depósitos se forman, cualquier acción de remoción de incrustaciones efectuadas por estos dispersantes se lleva a cabo lentamente, por lo que el mejor enfoque consiste en evitar que se formen las incrustaciones en primer lugar.

## **6. CONTROL MICROBIANO**

Los depósitos microbianos presentan un caso especial de ensuciamiento. En el tratamiento se requieren a menudo biocidas para matar las colonias de microbios y dispersantes para aflojarlas y sacarlas por lavado. El biocida que se emplea más comúnmente en todos los sistemas es el cloro. Se cree que el cloro es menos efectivo a

un pH superior a 8 que a uno por debajo de 7 debido al bien conocido equilibrio del hipoclorito. Sin embargo, todavía es un biocida efectivo y resulta indispensable en muchos programas de tratamiento de agua de enfriamiento.

Existen problemas asociados con el uso del cloro. Puede reaccionar con algunos materiales orgánicos, en particular con los compuestos fenólicos. El cloro puede aplicarse a la mayor parte de los sistemas de recirculación sin peligro de deslignificar la madera de las torres si los residuos de cloro no exceden de 1 mg/l. Rara vez es necesario mantener el cloro libre residual arriba de 0.2-0.3 mg/l para controlar los crecimientos microbianos, en casi todos los sistemas.

Aunque el cloro es un excelente agente exterminador, existen algunas limitaciones notables para el cloro que hacen necesario el uso de biocidas no oxidantes en buena parte de los sistemas. El cloro no es penetrante, así que puede lograr el exterminio superficial de un depósito microbiano, pero no penetra la capa de lama para remover y matar a los organismos que están bajo ella. Esto representa un contraste con los biocidas no oxidantes y con los biodispersantes selectivos, que sí tienen capacidad de penetración.

## APÉNDICE 2. MANEJO DE LABVIEW

### 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los lenguajes de programación han aumentado de poder y flexibilidad en sus aplicaciones para un desarrollo óptimo de un programa. Los programadores demandan más aplicaciones como maximización del sistema, facilidad de acceso, compartir tareas, compatibilidad con muchos paquetes para que el usuario final esté en contento y satisfecho de la tarea que hizo el programador.

Muchos de los lenguajes de programación están trabajando con un paradigma del lenguaje escrito, donde el programador necesariamente debe aprender la mayoría de las palabras claves y la importancia que estas tienen en el desarrollo del programa. Una ausencia o una mala escritura de un signo o una palabra en el lenguaje, puede causarle al programador tiempo innecesario que puede perjudicar a él o a la empresa contratista.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un lenguaje de programación de propósito general con librerías extendidas de funciones para cualquier tarea de programación, como es el lenguaje C o Basic; pero con la característica que es totalmente gráfico, utilizando para estos el lenguaje de programación G para crear diagramas en forma de bloques, facilitando de esta manera el entendimiento y manejo de dicho lenguaje para el diseñador y programador tipo Scada.

LabVIEW es una herramienta diseñada especialmente para monitorear, controlar, automatizar y realizar cálculos complejos de señales análogas y digitales capturadas a través de tarjetas de adquisición de datos, puertos seriales y GPIBs (buses de intercambio de propósito general).

Incluye librerías para adquisición, análisis, presentación y almacenamiento de datos, junto con otras prestaciones como la conectividad con otros programas como Matlab que se especializa en el manejo matemático; también provee numerosos mecanismos para la conexión a códigos externos o software a través de DLLs, distribución de librerías, active X y otras. Adicionalmente numerosas cajas de herramientas adicionales son aprovechadas para una variedad de aplicaciones que requiera el diseñador o programador.

Las tareas que puede desarrollar LabVIEW oscilan desde la solución de problemas comunes de programación en lenguajes tradicionales (C++, pascal, etc) hasta tareas específicas mencionadas a continuación y para las cuales es recomendado.

#### # **Adquisición de datos**

- **GPIB:** *General Purpose Interfase Bus.* Es un sistema (bus normalizado) para el control de instrumentos electrónicos a través de un computador.
- **VXI:** Es una plataforma de desarrollo para el análisis y adquisición de datos en investigación y control de aplicaciones industriales. Permite el manejo de múltiples ranuras y/o múltiples periféricos, conectados a un PC.
- **A/D y D/A:** Es la conversión análoga a digital y digital a análoga.
- **SCIX:** *Signal Conditioning Extension for Instrumentation.* Es un sistema acondicionado de señales externas de bajo nivel.
- **SERIAL:** Interfaz de comunicaciones serial, protocolos RS-232, RS-485/432. Son dispositivos usados para el procesamiento de datos.
- **PLC:** *Programmable Logia Controller.* Es un controlador utilizado en la industria para el monitoreo y control de aplicaciones.

#### # **Análisis de Datos**

- **HIQ:** Es el software de la National Instruments, para el análisis numérico y visualización de datos, disponible para windows 95/NT y compatible con LabVIEW.

- **DSP:** *Digital Signal Processing*. Tiene que ver con el procesamiento de señales digitales.
- **Estadísticas, Arreglos aritméticos y ajuste de curvas:** Son las librerías especializadas, incorporadas dentro de LabVIEW para el análisis de datos.

## # Visualización de datos

LabVIEW permite visualizar los datos de manera gráfica y numérica, además permite guardarlos en archivos apropiadamente. También tiene incorporado el manejo de protocolos normalizados de comunicaciones TCP/IP, TCP, UDP, PPC, Apple Events.

## 2. FILOSOFIA DEL LABVIEW

LabVIEW es un lenguaje completamente gráfico, dando como resultado que es totalmente parecido a un instrumento, por ello a todos los programas creados en LabVIEW se les llama VIs (Instrumentos virtuales).

Existen dos conceptos básicos en LabVIEW, el panel frontal (*Front Panel*) y el diagrama de bloque (*Block Diagram*).

El panel frontal es la interfase interactiva del usuario de un VI, debido a que simula el panel de un instrumento físico, de esta manera el usuario sabe de forma precisa cuál es el es real estado actual de dicho instrumento y los valores de las señales que se estén midiendo.

El diagrama de bloques es la unión de todos los controles y variables, el diagrama de bloques se puede definir como la solución pictórica a un problema de programación, siendo además el código fuente para un VI.

LabVIEW tiene la característica de descomposición modular, ya que cualquier VI que se ha diseñado puede convertirse fácilmente en un módulo que puede ser usado como una

sub-unidad dentro de otro VI. Esta peculiaridad podría compararse a la característica de procedimiento en los lenguajes de programación estructurada.

Es un sistema abierto, en cuanto que cualquier fabricante de tarjetas de adquisición de datos o instrumentos en general puede proporcionar el driver de su producto en forma de un VI dentro del entorno de LabVIEW en lenguajes como C y C++, estos módulos son conocidos como Sub-VI y no difieren a los VIs creados con LabVIEW salvo por la interfaz del lenguaje en el que han sido programados.

Es multitarea, ya que genera desempeño y fiabilidad fuera de las tareas complicadas de programación. Es muy seguro en aplicaciones con plataformas PC, sistemas operativos como Microsoft Windows NT, Windows 95, Windows 2000, Windows XP, Sun Solaris, entre otros.

Las ventajas de un sistema con multitarea son:

- ❖ Eficiencia de la CPU.
- ❖ Mejor confiabilidad.
- ❖ Toma ventajas de máquinas con multiprocesos.
- ❖ Mejor funcionamiento.

LabVIEW es un programa de multitareas muy simple de usar, porque la tecnología de multitareas es difícil de implementar. LabVIEW es un lenguaje de programación de diagramas de flujo, que se puede programar en paralelo y ejecutar los bloques simultáneamente y en tareas por separado. El usuario no necesita aprender un nuevo lenguaje para poder hacer un programa con multitareas debido a que se construye en el formato base de programación de LabVIEW que es un instrumento virtual (VI).

LabVIEW tiene una serie de librerías de “drivers” de los instrumentos que se encuentran en un laboratorio común por ejemplo osciloscopios, multímetros, plataformas Mac Os, contadores, temporizadores, etc. Mediante el menú *Instrument Wizard*, el usuario puede reconocer un instrumento que este conectado al computador, inmediatamente LabVIEW instala el “driver” y genera un ejemplo en pantalla de un instrumento virtual del aparato que está conectado al computador. También LabVIEW permite modificar el diagrama de bloques del instrumento virtual generado, o utilizarlo dentro de otra aplicación; generando así flexibilidad y simplicidad al programar.

### **3. PANEL FRONTAL**

El panel frontal tendrá la forma de un instrumento real y podrá ser maniobrado por el operador de acuerdo a sus necesidades. En el panel frontal se tiene entonces un conjunto de objetos encargados de la labor de arreglar matemáticamente los datos de entrada o aquellos capturados por la tarjeta. Además permite ejercer un control en el entorno donde se manipulan dichos datos, es decir; identificado el dispositivo para la captura de señales digitales, se selecciona el canal rastreador y la velocidad de rastreo de los datos numéricos, los cuáles se pueden interpretar a través de banderas de señalización o de monitores de registro. La figura 1 muestra un ejemplo de un panel frontal.

### **4. DIAGRAMA DE BLOQUES**

Se define de manera genérica como el anverso o parte trasera del instrumento. Este contiene los objetos necesarios para adquirir, procesar, graficar y controlar el instrumento virtual. Los objetos utilizados se denominan funciones, constantes, subVIs, terminales, etc., cada control o indicador del panel frontal tendrá respectivamente como objeto en la ventana de diagramación un icono; su forma y color dependerá del tipo de control o de indicador. La figura 2 muestra un ejemplo de un diagrama de bloques.

Figura 1. Panel frontal en LabVIEW.

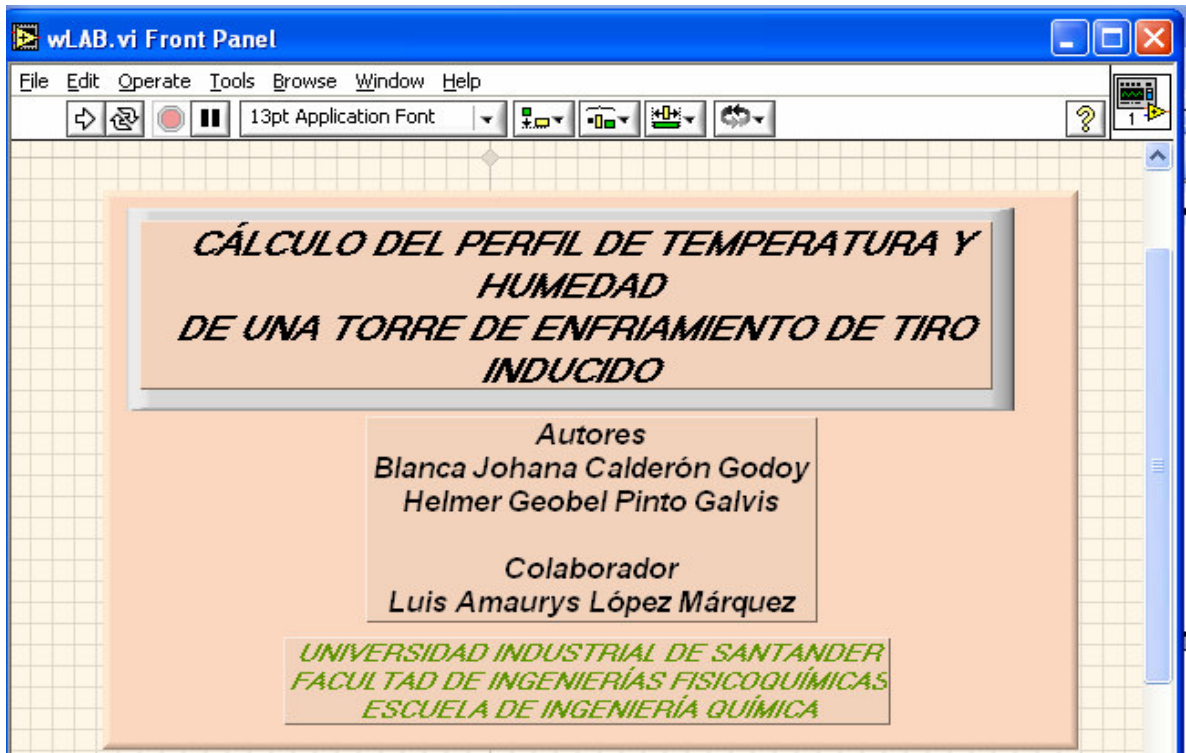
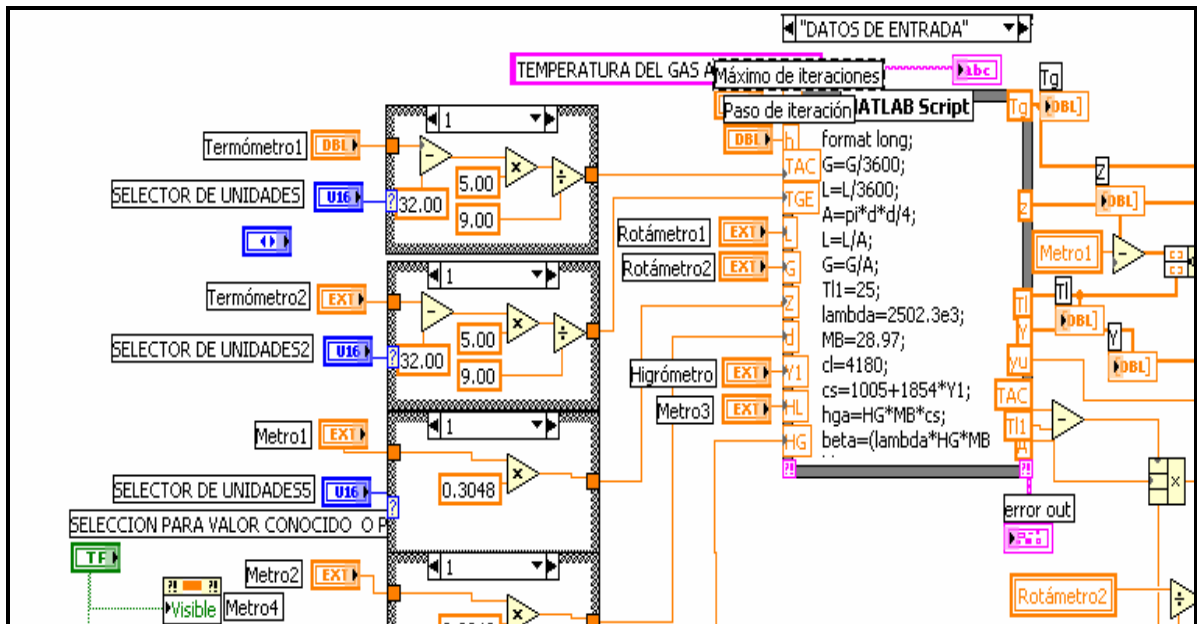


Figura 2. Diagrama de bloques o panel de programación.



## 5. BARRA DE MENÚS

La mayoría de los programas de hoy en día tienen la propiedad de visualizar una barra de herramientas donde le permiten al usuario, desarrollar diferentes aplicaciones que él necesita hacer para cumplir su objetivo. LabVIEW permite al programador hacer estas barras de una forma fácil y gráfica.

Las barras de menús en Labview son tres:

- **La paleta de herramientas:** es común para el panel frontal y el diagrama de bloques.
- **La paleta de controles:** es utilizada en el panel de control.
- **La paleta de funciones:** es utilizada en el diagrama de bloques.

**La paleta de herramientas.** Con esta barra se puede crear, modificar, y suprimir errores de los VIs. Usando las herramientas localizadas en la paleta. La figura 3 muestra esta paleta.

**Figura 3.** Paleta de herramientas de LabVIEW.



**Herramienta Dedo/Operativa:** Cambia el valor de un control o selecciona el texto dentro de un control.



**Herramienta Flecha/Posición/Tamaño:** Permite posicionar, cambiar de tamaño y seleccionar objetos.



**Herramienta Texto/Etiqueta:** Permite modificar o crear un texto.



**Herramienta de Cableado:** Permite cablear los objetos en el diagrama de bloque.



**Herramienta Menú Local:** Permite aparecer el menú emergente del objeto seleccionado.



**Herramienta Mano:** Permite mover la ventana sin utilizar la barra deslizador.



**Herramienta Punto de Parada:** Permite definir los puntos de parada en los VIs, las funciones, los lazos, las secuencias y las estructuras.



**Herramienta de Sondeo:** Permite ver los valores que van por los cables.



**Herramienta Gotero:** Copia los colores para luego pegarlos con la herramienta Pincel/Color.



**Herramienta Pincel/Color:** Permite definir el color de ambos planos de un objeto (fondo y primer plano).

**La paleta de controles.** Con esta paleta usted puede controlar los indicadores del panel frontal. Cada opción en la paleta muestra una sub-paleta con las cuales se puede modificar o crear un nuevo panel. La figura 4 muestra esta paleta.

**Figura 4.** Paleta de controles ubicada en el panel frontal.



A continuación se desglosa cada una de las opciones dentro de la paleta de control, es decir, cada botón de la paleta anterior es una sub-paleta que se explica en la tabla 1.

**Tabla 1.** Componentes de la paleta **CONTROLS**.

	<p>Contiene indicadores y controles para insertar datos numéricos en el panel frontal. Los controles pueden ser modificados por el usuario, los indicadores no. Los controles de perillas hacen parte de los controles numéricos y permiten controlar datos en forma similar al movimiento de perillas reales.</p>
--	--



Contiene indicadores y controles con valores booleanos, falso o verdadero, encendido o apagado, 1 ó 0, etc.



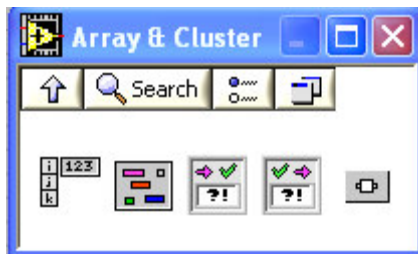
Contiene indicadores y controles para paths y strings.



Contiene indicadores y controles para un menú de listas y tablas.



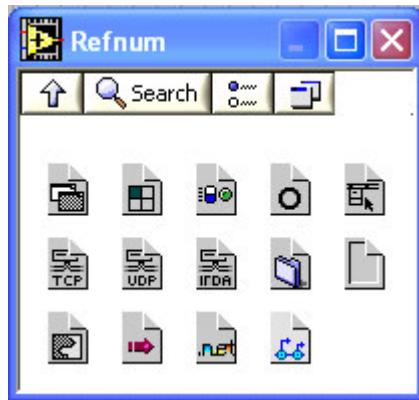
Contiene indicadores y controles para un menú de alarmas (ring) y numeración.



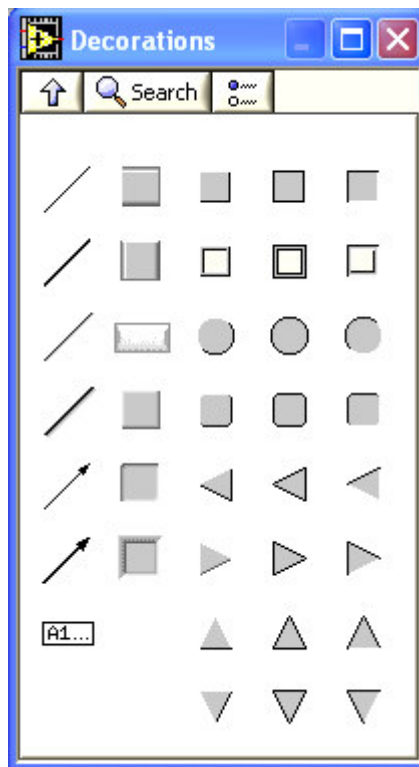
Contiene indicadores y controles que se agrupan de acuerdo al tipo de dato.



Contiene gráficas que reproducen gráficas o caracteres en tiempo real.



Contiene indicadores para el manejo de archivos.



Contiene gráficos de objetos para adornar el panel frontal.

**La paleta de funciones.** Con esta paleta usted puede construir un diagrama de bloques, esta paleta contiene sub-paletas que de acuerdo a su función facilitan el manejo de los diagramas, la figura 5 muestra esta paleta.

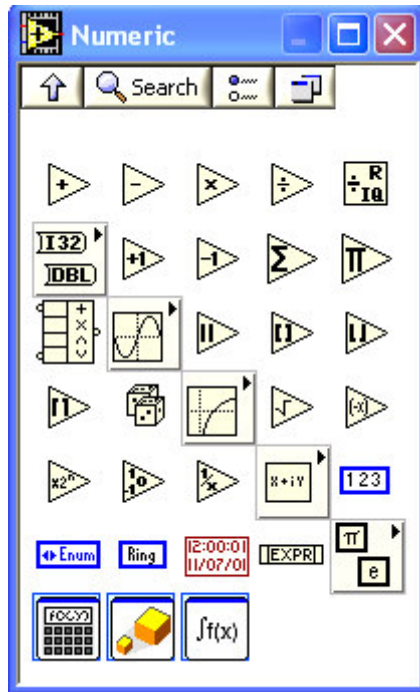
**Figura 5.** Paleta de Funciones ubicada en el diagrama de bloques.



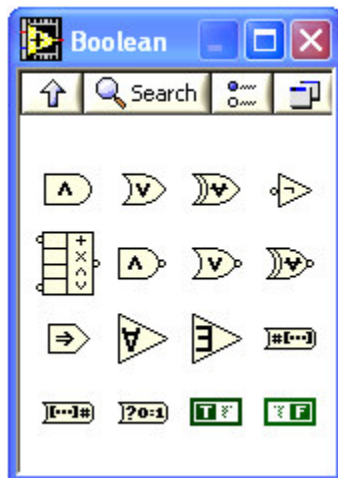
A continuación se desglosa cada una de las opciones dentro de la paleta de Funciones, es decir, cada botón de la paleta anterior es una sub-paleta que se explica en la tabla 2.

**Tabla 2.** Componentes de la paleta **FUNCTIONS**.

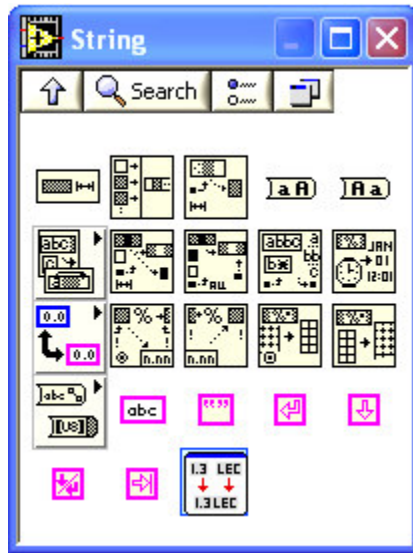
	<p>Contiene programas para el control de estructuras tales como For Loop, White Loop, Secuencia, Case, etc.</p>
--	---



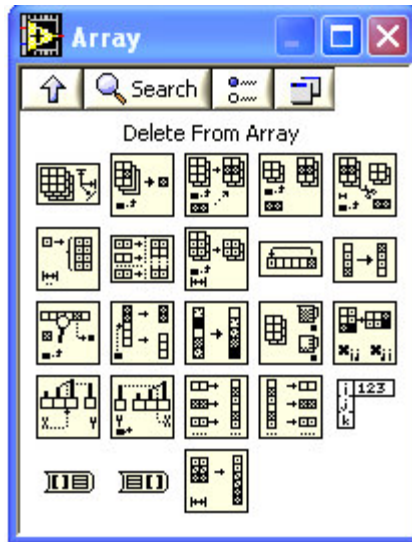
Contiene funciones numéricas como algoritmos, logaritmos, aritmética y trigonometría.



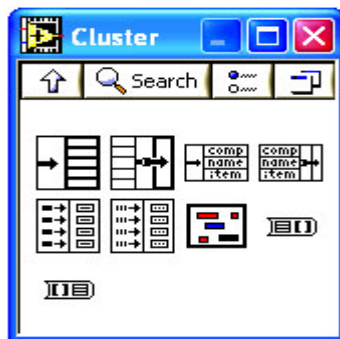
Contiene funciones de lógica booleano tal como and, or, not, etc.



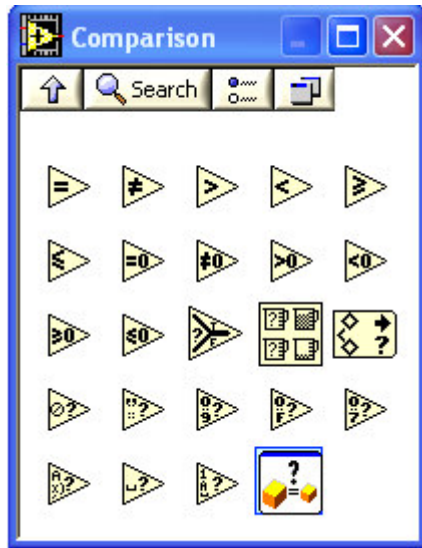
Contiene funciones para manipular los strings.



Contiene funciones para procesar los arreglos.



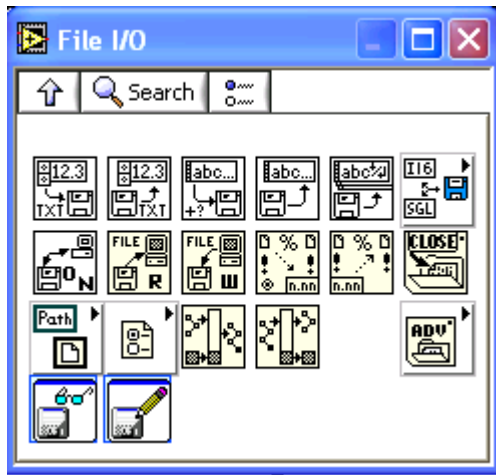
Contiene funciones para el manejo de clusters, es decir el agrupamiento de señales.



Contiene funciones para compara números, lógica booleana y strings.



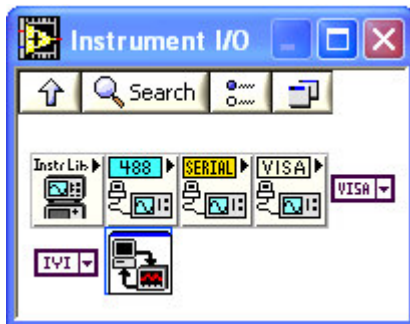
Contiene funciones para el diálogo entre ventanas, tiempos de retardo y mensajes.



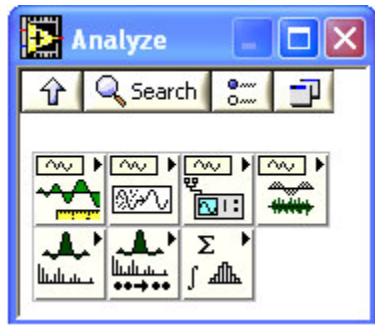
Contiene funciones y SubVIs para los archivos de entrada y salida.



Consiste en una red de trabajo.



Contiene los VIs para los GPIB, puerto serial y VISA de control de instrumentos.



Contiene los VIs para el análisis de las señales presentes en la aplicación. Tales como estadística, curva de Gauss, etc.



Contiene funciones misceláneas tales como el llamado a librerías, control de VIs, manipulación de datos, etc.

**ANEXO A. PRUEBA CHI-CUADRADA DE  
BONDAD DEL AJUSTE**

Nº	DATOS ORDENADOS	INTERVALO N°	INTERVALO DE CLASE		FRECUENCIA OBSERVADA	FRECUENCIA ESPERADA	$(O_i - E_i)^2 / E_i$
			DE	A			
1	1,066	1	1,066	1,305	1	3,333333333	1,633333333
2	1,355	2	1,305	1,500	2	3,333333333	0,533333333
3	1,459	3	1,500	1,580	3	3,333333333	0,033333333
4	1,541	4	1,580	1,810	5	3,333333333	0,833333333
5	1,569	5	1,810	1,940	8	3,333333333	6,533333333
6	1,573	6	1,940	2,170	5	3,333333333	0,833333333
7	1,593	7	2,170	2,420	3	3,333333333	0,033333333
8	1,733	8	2,420	2,615	2	3,333333333	0,533333333
9	1,754	9	2,615	2,854	1	3,333333333	1,633333333
10	1,770				30		12,6
11	1,800						
12	1,813						
13	1,819						
14	1,828						
15	1,836						
16	1,843						
17	1,848						
18	1,865						
19	1,877						
20	1,945						
21	2,017						
22	2,076						
23	2,097						
24	2,150						
25	2,174						
26	2,227						
27	2,376						
28	2,525						
29	2,612						
30	2,854						

<b>NUMERO DE DATOS</b>	30
<b>PARAMETROS UTILIZADOS</b>	2
<b>NUMERO DE INTERVALOS</b>	9
<b>GRADOS DE LIBERTAD</b>	6
<b>ALFA</b>	0,025

<b>PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE CHI 2</b>	
<b>TABLA CHI</b>	14,45
<b>ESTADIGR AFO DE</b>	12,6

<b>ANALISIS</b>
<b>No ES ACEPTADA</b>

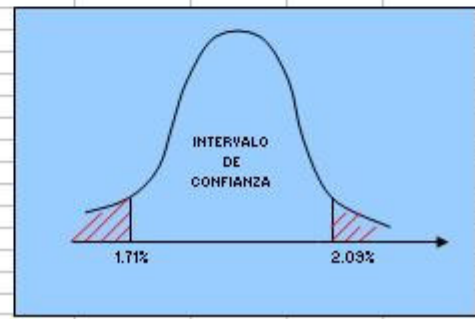
INTERVALO DE CLASE	FRECUENCIA
1	1
2	2
3	3
4	5
5	8
6	5
7	3
8	2
9	1

## **ANEXO B. PRUEBA DEL INTERVALO DE CONFIANZA**

### DATOS DE LA MUESTRA

N°	DATOS INICIALES CTI				DATOS INICIALES SIMULACION					K <sub>2</sub> P/Z		
	HWT (°F)	CWT (°F)	WBT (°F)	L/G	HWT (°F)	CWT (°F)	WBT (°F)	L (lb/h)	G (lb/h)	CTI	MULACION	ERROR
1	110	80	75	0,10	110	80	75	1000	10000,000	1,75376	1,73000	1,35480
2	110	80	75	0,15	110	80	75	1100	7500,000	1,79821	1,77000	1,56878
3	112	81	75	0,18	112	81	75	1200	6500,000	1,66429	1,64000	1,00000
4	112	81	76	0,24	112	81	76	1300	5500,000	1,85249	1,82000	1,75386
5	114	82	76	0,23	114	82	76	1400	4800,000	1,72660	1,70000	1,54060
6	114	82	76	0,27	114	82	76	1500	5500,000	1,70362	1,68000	1,73255
7	116	83	77	0,38	116	83	77	1600	4200,000	1,77307	1,74000	1,86513
8	116	83	77	0,44	116	83	77	1700	3900,000	1,82933	1,79000	2,14997
9	118	84	77	0,43	118	84	77	1800	3700,000	1,71129	1,68000	1,82845
10	118	84	78	0,53	118	84	78	1900	3600,000	1,87900	1,84000	2,07557
11	120	85	78	0,59	120	85	78	2000	3400,000	1,76205	1,73000	1,81890
12	120	85	78	0,64	120	85	78	2100	3300,000	1,80933	1,77000	2,17373
13	122	86	79	0,63	122	86	79	2200	3200,000	1,81330	1,78000	1,83643
14	122	86	79	0,74	122	86	79	2300	3100,000	1,86355	1,83000	1,80033
15	124	87	79	0,80	124	87	79	2400	3000,000	1,75100	1,72000	1,77042
16	124	87	80	0,86	124	87	80	2500	2900,000	1,94052	1,91000	1,57277
17	126	88	80	0,33	126	88	80	2600	2800,000	1,82684	1,79000	2,01660
18	126	88	80	1,08	126	88	80	2700	2500,000	1,99620	1,96000	1,81345
19	114	83	76	0,37	114	83	76	2800	2900,000	2,30008	2,24000	2,61208
20	116	84	76	1,16	116	84	76	2900	2500,000	2,38009	2,32000	2,52463
21	118	85	77	1,00	118	85	77	3000	3000,000	2,04284	2,00000	2,09708
22	120	86	78	0,31	120	86	78	3100	3400,000	1,87465	1,84000	1,84835
23	110	83	79	0,76	110	83	79	3200	4200,000	2,54036	2,48000	2,37604
24	112	81	77	0,70	112	81	77	3300	4700,000	2,75126	2,69000	2,22662
25	114	82	75	0,62	114	82	75	3400	5500,000	1,91730	1,88000	1,94544
26	116	83	76	0,56	116	83	76	3500	6300,000	1,81342	1,78000	1,84293
27	118	84	77	1,24	118	84	77	3600	2900,000	2,87197	2,79000	2,85414
28	120	85	78	0,46	120	85	78	3700	8000,000	1,65099	1,62000	1,87706
29	122	86	79	0,39	122	86	79	3800	9800,000	1,56493	1,54000	1,59304
30	124	87	80	0,44	124	87	80	3900	8800,000	1,56670	1,55000	1,06593

INTERVALO DE CONFIANZA		
	<b>DATOS DE LA MUESTRA</b>	
<b>INTERVALO CONFIANZA</b>	96,00%	
<b>MEDIA</b>	0,0189398405	
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	0,003759069	
<b>NUMERO DE DATOS</b>	30	
<b>ALFA</b>	0,01	
<b>LIMITE INFERIOR</b>	0,017106672	
<b>LIMITE SUPERIOR</b>	0,020890137	
171%	<b>&lt;MEDIA&lt;</b>	209%



## **ANEXO C. PRUEBA DE HIPÓTESIS**

## PRUEBA DE HIPOTESIS

N°	DATOS INICIALES CTI				DATOS INICIALES SIMULACION					K <sub>α</sub> VIZ		t ERROR
	HWT (°F)	CWT (°F)	WBT (°F)	L/G	HWT (°F)	CWT (°F)	WBT (°F)	L (lb/l)	G (lb/l)	CTI	SIMULACION	
1	110	80	75	0,10	110	80	75	1000	10000,000	1,75376	1,73000	1,35480
2	110	80	75	0,15	110	80	75	1100	7500,000	1,79821	1,77000	1,56878
3	112	81	75	0,18	112	81	75	1200	6500,000	1,66429	1,64000	1,00000
4	112	81	76	0,24	112	81	76	1300	5500,000	1,85249	1,82000	1,75386
5	114	82	76	0,29	114	82	76	1400	4800,000	1,72660	1,70000	1,54060
6	114	82	76	0,27	114	82	76	1500	5500,000	1,70962	1,68000	1,73255
7	116	83	77	0,38	116	83	77	1600	4200,000	1,77307	1,74000	1,86513
8	116	83	77	0,44	116	83	77	1700	3900,000	1,82933	1,79000	2,14397
9	118	84	77	0,49	118	84	77	1800	3700,000	1,71129	1,68000	1,82845
10	118	84	78	0,53	118	84	78	1900	3600,000	1,87900	1,84000	2,07557
11	120	85	78	0,59	120	85	78	2000	3400,000	1,76205	1,73000	1,81890
12	120	85	78	0,64	120	85	78	2100	3300,000	1,80933	1,77000	2,17373
13	122	86	79	0,69	122	86	79	2200	3200,000	1,81330	1,78000	1,83643
14	122	86	79	0,74	122	86	79	2300	3100,000	1,86355	1,83000	1,80033
15	124	87	79	0,80	124	87	79	2400	3000,000	1,75100	1,72000	1,77042
16	124	87	80	0,86	124	87	80	2500	2900,000	1,94052	1,91000	1,57277
17	126	88	80	0,93	126	88	80	2600	2800,000	1,82684	1,79000	2,01660
18	126	88	80	1,08	126	88	80	2700	2500,000	1,99620	1,96000	1,81345
19	114	83	76	0,97	114	83	76	2800	2900,000	2,30008	2,24000	2,61208
20	116	84	76	1,16	116	84	76	2900	2500,000	2,38009	2,32000	2,52469
21	118	85	77	1,00	118	85	77	3000	3000,000	2,04284	2,00000	2,09708
22	120	86	78	0,91	120	86	78	3100	3400,000	1,87465	1,84000	1,84835
23	110	83	79	0,76	110	83	79	3200	4200,000	2,54036	2,48000	2,37604
24	112	81	77	0,70	112	81	77	3300	4700,000	2,75126	2,69000	2,22662
25	114	82	75	0,62	114	82	75	3400	5500,000	1,91730	1,88000	1,94544
26	116	83	76	0,56	116	83	76	3500	6300,000	1,81342	1,78000	1,84293
27	118	84	77	1,24	118	84	77	3600	2900,000	2,87197	2,79000	2,85414
28	120	85	78	0,46	120	85	78	3700	8000,000	1,65099	1,62000	1,87706
29	122	86	79	0,39	122	86	79	3800	9800,000	1,56493	1,54000	1,59304
30	124	87	80	0,44	124	87	80	3900	8800,000	1,56670	1,55000	1,06593

DATOS MUESTRA	
MEDIA	0,0189964
DESVIACION ESTANDART	0,0037591
N° DATOS	30
NIVEL DE SIGNIFICANCIA	0,025

DATOS POBLACION	
MEDIA	0,0200000
DESVIACION ESTANDAR	DESCONOCIDA
DISTRIBUCION T	NIVEL GRADO 0,025
EST. COMPARACION	29
	-2,045

ESTADIGRAFO (t <sub>α</sub> )	T DE STUDENT
	-1,459

**ANALISIS**

**H<sub>0</sub> ES ACEPTADA**

**ANEXO D. PUNTOS PORCENTUALES DE  
LA DISTRIBUCIÓN CHI-CUADRADA**

**PUNTOS PORCENTUALES  $\chi^2_{\alpha, v}$  DE LA DISTRIBUCION CHI CUADRADA**

$\alpha \backslash v$	0,995	0,990	0,975	0,950	0,900	0,500	0,100	0,050	0,025	0,010	0,005
1	0	0	0	0	0,02	0,45	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,01	0,02	0,05	0,10	0,21	1,39	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	0,07	0,11	0,22	0,35	0,58	2,37	6,25	7,81	9,35	11,34	12,84
4	0,21	0,30	0,48	0,71	1,06	3,36	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	0,41	0,55	0,83	1,15	1,61	4,35	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	0,68	0,87	1,24	1,64	2,20	5,35	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	0,99	1,24	1,69	2,17	2,83	6,35	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28
8	1,34	1,65	2,18	2,73	3,49	7,34	13,36	15,51	17,53	20,09	21,95
9	1,73	2,09	2,70	3,33	4,17	8,34	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	2,16	2,56	3,25	3,94	4,87	9,34	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	2,60	3,05	3,82	4,57	5,58	10,34	17,28	19,68	21,92	24,72	26,76
12	3,07	3,57	4,40	5,23	6,30	11,34	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	3,57	4,11	5,01	5,89	7,04	12,34	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	4,07	4,66	5,63	6,57	7,79	13,34	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	4,60	5,23	6,26	7,26	8,55	14,34	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	5,14	5,81	6,91	7,96	9,31	15,34	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	5,70	6,41	7,56	8,67	10,09	16,34	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	6,26	7,01	8,23	9,39	10,86	17,34	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	6,84	7,63	8,91	10,12	11,65	18,34	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	7,43	8,26	9,59	10,85	12,44	19,34	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
21	8,03	8,90	10,28	11,59	13,24	20,34	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40
22	8,64	9,54	10,98	12,34	14,04	21,34	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80
23	9,26	10,20	11,69	13,09	14,85	22,34	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18
24	9,89	10,86	12,40	13,85	15,66	23,34	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56
25	10,52	11,52	13,12	14,61	16,47	24,34	34,38	37,65	40,65	44,31	46,93
26	11,16	12,20	13,84	15,38	17,29	25,34	35,56	38,89	41,92	45,64	48,29
27	11,81	12,88	14,57	16,15	18,11	26,34	36,74	40,11	43,19	46,96	49,64
28	12,46	13,56	15,31	16,93	18,94	27,34	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99
29	13,12	14,26	16,05	17,71	19,77	28,34	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34
30	13,79	14,95	16,79	18,49	20,60	29,34	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67
40	20,71	22,16	24,43	26,51	29,05	39,34	51,81	55,76	59,34	63,69	66,77
50	27,99	29,71	32,36	34,76	37,69	49,33	63,17	67,50	71,42	76,15	79,49
60	35,53	37,48	40,48	43,19	46,46	59,33	74,40	79,08	83,30	88,38	91,95
70	43,28	45,44	48,76	51,74	55,33	69,33	85,53	90,53	95,02	100,43	104,21
80	51,17	53,54	57,15	60,39	64,28	79,33	96,58	101,88	106,63	112,33	116,32
90	59,20	61,75	65,65	69,13	73,29	89,33	107,57	113,15	118,14	124,12	128,30
100	67,33	70,06	74,22	77,93	82,36	99,33	118,50	124,34	129,56	135,81	140,17

**ANEXO E. PUNTOS PORCENTUALES  
DE LA DISTRIBUCIÓN T**

**PUNTOS PORCENTUALES  $t_{\alpha, v}$  DE LA DISTRIBUCION t**

$\alpha \backslash v$	0,40	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	127,321	318,309	636,619
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089	22,327	31,599
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,215	12,924
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,93	4,318
13	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,85
21	0,257	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,256	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,256	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,256	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,256	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,45	3,725
26	0,256	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,256	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,69
28	0,256	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,256	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,659
30	0,256	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
40	0,255	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
60	0,254	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915	3,232	3,460
120	0,254	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860	3,160	3,373

## **ANEXO F. CÓDIGO FUENTE DE MATLAB**

```

clc, clear all, close all
disp('      PROGRAMA PARA DETERMINAR LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y
HUMEDAD ABSOLUTA      ')
disp('      EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO AGUA-AIRE      ')
disp('      DE TIRO MECANICO A CONTRACORRIENTE      ')
disp('      ')
disp('Los Datos de Equilibrio del Sistema Aire-Agua son validos en el intervalo T=(10,65)')
disp('      ')
TAC=input ('Ingrese la temperatura de entrada del agua en °C      ');
TEG=input ('Ingrese la temperatura de entrada del aire en °C      ');
%°C
L= input ('Ingrese el flujo de liquido en kg/h      ');
L=L/3600;      %kg/s m2
G=input ('Ingrese el flujo de gas en kg/h      ');
G=G/3600;      %kg/s m2
TI1=25;      %°C
Z= input ('Ingrese la Altura de la torre en m      ');      %m
d=input ('Ingrese el Diametro de la Torre en m      ');
A=pi*d*d/4;
L=L/A;
G=G/A;
Y1=input ('Ingrese la humedad relativa del aire en kgH2O/Kgaireseco      ');
disp ('      ')
disp('Digite el valor del coeficiente de transferencia de masa para el agua en w/m3°C si lo
conoce,')
disp('de lo contrario digite "0"; en cuyo caso se asume este valor igual a 18000 w/m3°C.')
hla=input ('      ');
kxa=0;
disp ('      ')
if hla==0
    hla=18000;
end
disp('Digite "1" si conoce el valor del coeficiente de transferencia de masa para el gas (kxa) [
kgmol/(s*m3)].')
disp('      "2" si desea seleccionarlo de una lista de acuerdo al tipo de empaque')
Kx=input ('      ');
disp ('      ');
if Kx==1;
    kxa=input ('Ingrese el valor del coeficiente      ');      %kgmol/s m3
    Kxx=0;
elseif Kx==2;
    disp ('(Digite "1" si su empaque es Plastico: Recto vertical')
    disp ('      "2" si su empaque es Plastico: Vertical acanalado')
    disp ('      "3" si su empaque es de Madera: Vertical')
    disp ('      "4" si su empaque es de Madera: Horizontal')
    Kxx=input ('      ');
    if Kxx==1
        kxa=L*.19*(L/G)^(-.8)*(16.0185/29);
    elseif Kxx==2

```

```

    kxa=L*.23*(L/G)^(-.7)*(16.0185/29);
elseif Kxx==3
    kxa=L*.21*(L/G)^(-.5)*(16.0185/29);
elseif Kxx==4
    kxa=L*.148*(L/G)^(-.5)*(16.0185/29);
end
else
disp ('Wrong Input')
break
end
lambda=2502.3e3;           %J/kg
MB=28.96;                 %KG/kgMOLaire
cl=4180;                  %J/kg °C
cs=1005+1884*Y1;         %J/kg °C
hga=kxa*MB*cs;           %w/m3 °C
beta=(lambda*kxa*MB)/G;
alfa=hla+hga;
h=0.01;
lter=Z/h;
lter=ceil(lter);
Tg(1)=TEG;
Y(1)=Y1;
Ti=TEG;
Tis=0;
z(1)=0;
num=0;
tol=1;
while (abs(tol)>0.01 & num<1000)
    Tl(1)=Tl1;
for i=1:lter
    z(i+1)=z(i)+h;
    diferencia=1;
    numero=1;
    while diferencia>0.001 & numero<100
        f=4.761e-3*exp(5.789e-2*Ti);
        fTi=alfa*Ti+beta*f-hga*Tg(i)-hla*Tl(i)-beta*Y(i);
        dfTi=alfa+(4.761e-3*5.789e-2*beta*exp(5.789e-2*Ti));
        Tis=Ti-fTi/dfTi;
        diferencia=abs(Ti-Tis);
        Ti=Tis;
        numero=1+numero;
    end
    yi=f;
    Tin=Ti;
    k11=h*(kxa*MB/G)*(yi-Y(i));
    k21=h*(kxa*MB/G)*(yi-(Y(i)+0.5*k11));
    k31=h*(kxa*MB/G)*(yi-(Y(i)+0.5*k21));
    k41=h*(kxa*MB/G)*(yi-(Y(i)+k31));
    Y(i+1)=Y(i)+1/6*(k11+2*k21+2*k31+k41);

```

```

k12=h*(hga/(G*cs))*(Tin-Tg(i));
k22=h*(hga/(G*cs))*(Tin-(Tg(i)+0.5*k12));
k32=h*(hga/(G*cs))*(Tin-(Tg(i)+0.5*k22));
k42=h*(hga/(G*cs))*(Tin-(Tg(i)+k32));
Tg(i+1)=Tg(i)+1/6*(k12+2*k22+2*k32+k42);

k13=h*(hla/(L*cl))*(Tl(i)-Tin);
k23=h*(hla/(L*cl))*(-Tin+(Tl(i)+0.5*k13));
k33=h*(hla/(L*cl))*(-Tin+(Tl(i)+0.5*k23));
k43=h*(hla/(L*cl))*(-Tin+(Tl(i)+k33));
Tl(i+1)=Tl(i)+1/6*(k13+2*k23+2*k33+k43);

Ti=Tg(i);
end
tol=TAC-Tl(Iter+1);
if tol>0
    Tl1=Tl1+0.01;
else
    Tl1=Tl1-0.01;
end
num=num+1;
if num==1000
    disp(' ')
    disp('Se sobrepaso el Maximo de Iteraciones')
    tol
end
end
plot(z,Tg,'rx-',z,Tl,'bx-')
title('PERFILES DE TEMPERATURA DEL GAS Y EL LIQUIDO EN LA TORRE ');
ylabel('TEMPERATURA(°C)');
xlabel('ALTURA(m)');
legend('Tg','Tl')

figure
plot(z,Y)
title('PERFIL DE HUMEDAD ABSOLUTA DEL GAS EN LA TORRE ');
ylabel('HUMEDAD ABSOLUTA(kg Agua/kg Aire seco)');
xlabel('ALTURA(m)');

disp(' ');
disp('RESULTADOS');
Temp_Liquido_Salida = Tl1;
Temp_Liquido_Salida
Temp_Gas_Salida = Tg(Iter);
Temp_Gas_Salida
hw=cs*(Temp_Liquido_Salida+0.1*(Tentra-Temp_Liquido_Salida));
Capacidad_enfriamiento = L*A*cl*(Tentra-Temp_Liquido_Salida);
Capacidad_enfriamiento

```

%%      Calculo de KaV/L      %%

PHP=(G/L)\*(Y(lter+1)-Y1);  
Porcentaje\_H2O\_Perdida=PHP\*100;  
HTU=G/(kxa\*MB);  
NTU=Z/HTU;  
Torre\_Caracteristica = NTU;  
Torre\_Caracteristica  
HTU  
Porcentaje\_H2O\_Perdida