

**DISEÑO OPERACIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO
ADIABÁTICA DE AGUA DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO
CONTRACORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO**

JONATAN RICARDO RESTREPO GARCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

**DISEÑO OPERACIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO
ADIABÁTICA DE AGUA DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO
CONTRACORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO**

Trabajo realizado para optar al Título de Ingeniero Químico

Realizado por:

JONATAN RICARDO RESTREPO GARCIA

Bajo la dirección de:

PhD. ARLEX CHAVES GUERRERO

Codirector(a):

PhD. MARIA PAOLA MARADEI GARCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

Dedicatoria

Todos los seres humanos compartimos un mismo ideal, todos luchamos por alcanzar la excelencia, son muchos los tropiezos, fracasos y victorias que día tras día nos convierten en mejores personas.

La Ingeniería es vocación, no se puede ser totalmente grande o totalmente pequeño en el proceso de consolidar el conocimiento adquirido a través de los años de trabajo arduo, esfuerzo y dedicación, simplemente porque no hay manera de cuantificar aquello de lo que seguramente somos capaces de lograr, solo si lo hacemos con Amor y verdadera intención.

Con nostalgia, alegría y humildad recordaré por siempre el día en el que ingenuamente emprendí éste recorrido que hoy termina, cerrando una etapa más en el diario vivir.

Ser Ingeniero es un honor, un motivo de alegría, un triunfo más y una manera privilegiada de encontrar un lugar en el mundo, una razón para ser cada día mejor y contribuir al desarrollo de nuestra sociedad.

Por eso, quiero dedicar éste trabajo a DIOS, nuestro padre celestial, porque solo a través de su Amor incondicional, he aprendido a derramar lágrimas por mi semejante, a nunca rendirme, a aprender a perdonar y a hacer un uso adecuado de la Ciencia y la técnica como herramientas necesarias para comprender y relacionar los fenómenos que ocurren día tras día y que una vez fueron motivo de curiosidad y hoy son el fruto de la investigación y trabajo de personas que una vez como Yo, se plantearon un mundo diferente.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, porque sin el nada de esto hubiera sido posible, porque gracias a él ocupo un lugar privilegiado en éste mundo, siendo libre de escoger por vocación y voluntad propia mi camino a seguir.

A mí querida UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, porque a través de mi experiencia dentro de ésta, he tenido la oportunidad de desarrollar, consolidar y descubrir mis propias habilidades, para ofrecer un mundo mejor a quienes vienen detrás de mí y Hoy me confiere el título de Ingeniero, el cual llevaré con orgullo a donde vaya.

A mis PADRES, porque sus sacrificios y sufrimientos me han enseñado el significado del Amor y me han impulsado a seguir adelante, porque además han depositado un voto de confianza y sus propios sueños en mí, lo cual me permite ser un Ingeniero integral y me dan esperanza a futuro.

A mis directores y colaboradores de proyecto: PhD. ARLEX CHAVÉS GUERRERO y PhD. MARÍA PAOLA MARADEI GARCÍA, porque sin ellos y sus oportunos consejos esto no hubiera sido posible, además, porque su paciencia y sapiencia me han inspirado a esforzarme por alcanzar mis metas a través de los años.

A mis HERMANAS y AMIGOS, por aquellos cálidos momentos que enriquecieron mi paso por la Universidad e hicieron todo más fácil y edificante

A las Empresas EDOSPINA S.A e INAL S.A por su excelente atención y disposición para el desarrollo de éste proyecto.

A todos aquellos que por extensión no podría nombrar, pero que han hecho una parte significativa en éste proceso.

CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO	17
1.1.1 Torres de tiro mecánico	17
1.2 Fundamentos de transferencia de masa	18
1.2.1 Teoría de Merkel	19
1.3 COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO	19
1.3.1 Estructura y carcasa	19
1.3.2 Relleno	20
1.3.3 Cuenca o depósito de agua enfriada	20
1.3.4 Eliminadores de rocío	20
1.3.5 Persianas y boquillas	20
1.3.6 Ventiladores	21
1.4 DESEMPEÑO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO	21
2. METODOLOGÍA	23
2.1 MÉTODO DE DISEÑO DE LA ALTURA DEL EMPAQUE	23
2.1.1 Demanda de la torre y número de Merkel	23
2.2 MÉTODO DE DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	26
2.2.1 Método de diferencia media logarítmica LMTD	26
2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE	27
2.3.1 Diseño conceptual de línea de tuberías, accesorios y potencia de bombeo	27
2.3.2 Selección del tamaño y tipo de ventilador	28
2.3.3 Materiales y Suministros:	28
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
3.1 Cálculo de la altura del empaque para la torre de refrigeración	30
3.2 Dimensionamiento del intercambiador de calor	31
3.3 Dimensionamiento de la bomba, tuberías, válvulas y accesorios	33
3.4 Potencia para el motor del ventilador axial	33
3.5 Instrumentación, control y operabilidad de la torre	34
4. MODELO OPERACIONAL	36
5. ESTIMATIVO DE COSTOS	40

CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema General de configuración, tomado de referencia [3]	18
Figura 2. Diagrama Bloques del proceso de diseño.....	23
Figura 3. Representación gráfica de la curva característica	24
Figura 4. Curva característica y recta de operación.....	26

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del sistema Aire- Vapor de Agua a 654,14 kPa.....	30
Tabla 2. Resumen de parámetros obtenidos y condiciones operativas	31
Tabla 3. Resumen parámetros de integración para la altura empacada de la torre	31
Tabla 4. Condiciones de operación	32
Tabla 5. Parámetros de diseño del intercambiador de calor.....	32
Tabla 6. Dimensiones y condiciones de operación del intercambiador	33
Tabla 7. Costos de equipamiento y suministros	40
Tabla 8. Costos de construcción, montaje y accesorios.	40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Teoría de merkel, enfriamiento de agua con aire	44
ANEXO B. Determinación de las condiciones mínimas de operación y condiciones de humedad del aire	45
ANEXO C. Calor latente de vaporización del agua	47
ANEXO D. Cotización propuesta para construcción de INAL S.A	48
ANEXO E. Catálogo suminitros de EDOSPINA S.A	49

LISTADO DE VARIABLES

L = Flujo másico del agua [kg/s].

G = Flujo másico del aire [kg/s].

L' = Densidad de flujo másico "Flux" de agua [kg/ s m²].

G' = Densidad de flujo másico "Flux" de aire [kg/ s m²].

K_{xa} = Coeficiente de transferencia de masa en el relleno [kg/ s m²].

V = Volumen del relleno total [m³].

H' = Entalpía específica del Gas aire [kJ/kg].

H_i =Entalpía específica en la Interfase [kJ/kg].

ΔP = Caída de Presión en la torre de enfriamiento [Pa].

T_{BH} =Temperatura de Bulbo húmedo del aire [°C]

T_{BS} = Temperatura de bulbo seco del aire [°C].

KaV/L = Número de Merkel [Adimensional].

Y'_w = Saturación Másica del aire húmedo.

h_c = Coeficiente de transferencia de calor en la torre de enfriamiento.

C_p = Calor específico [kJ/kg K].

Nu = Número adimensional de Nusselt.

Re = Número adimensional de Reynolds.

Pr =Número adimensional de Prandtl.

K = Conductividad térmica del acero [W/m² K].

U = Velocidad del agua en la línea de tuberías [m/S].

r_o = Radio interno de tubería [m].

r_n = Radio externo de tubería [m].

T =Temperatura [°C]

Q = Flujo de calor [J/s].

U = Coeficiente global de transferencia de calor [J/ m² K s].

A = Área requerida para la transferencia de calor [m²].

A_{trans} = Área transversal de tubería [m^2].

ΔT_{ml} = Temperatura media logarítmica [$^{\circ}\text{C}$].

g = Gravedad (m/s^2).

L = Longitud total de la línea de tuberías [m].

F = Coeficiente de fricción de Fanning.

F_c = Factor de corrección del intercambiador de calor [adimensional].

Z = Altura del empaque o relleno [m]

Z_1 = Altura de diseño sistema hidráulico [m].

K = Coeficiente de resistencia característico del accesorio.

P_s = Presión estática [pulgadas de H_2O]

q = Caudal volumétrico de agua [m^3/min]

F_t = Coeficiente de fricción en condiciones de flujo turbulento.

Letras Griegas:

Φ = Humedad relativa del aire.

ρ = Densidad [kg/m^3].

μ = Viscosidad [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

λ_0 = Calor latente de vaporización del agua.

RESUMEN

Título: DISEÑO OPERACIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO ADIABÁTICA DE AGUA DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO CONTRACORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO¹.

Autor: Jonatan Ricardo Restrepo Garcia².

Palabras Claves: torre de enfriamiento, diseño operacional, tiro inducido, laboratorio, flujo contracorriente.

Descripción: Las torres de enfriamiento se han venido desarrollando paulatinamente con el desarrollo y adecuación de nuevas tecnologías, los dispositivos de enfriamiento evaporativo han sido por décadas estudiados, implementados y dispuestos bajo las consideraciones y restricciones operativas adecuadas dentro de un sistema determinado de control. Existen gran variedad de configuraciones para los procesos de enfriamiento del agua, dependiendo de la manera en la cual se diseña y ajusta las necesidades energéticas y de flujo. El tiro inducido es la configuración más apropiada en el estudio y aplicación para las torres de enfriamiento de tamaño pequeño debido a que favorece una distribución uniforme del aire, aumentando en consecuencia la eficiencia del dispositivo.

El presente trabajo desarrolla el diseño operacional para una torre de enfriamiento de tiro inducido a fin de ser implementada y adecuada dentro del laboratorio de procesos y operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Las ecuaciones de diseño del equipo en general se basan en la teoría del Potencial Entálpico descrita y desarrollada por Merkel, conforme a las normas establecidas por el Cooling Tower Institute. El diseño desarrollado envuelve además los equipos accesorios tales como Intercambiador de calor, tipo tubos y carcasa, ventilador axial, bomba centrífuga, accesorios y tuberías con su respectiva instrumentación y equipos para la medición y control, El tipo de relleno de arreglo tipo hexagonal de PVC validado por las correlaciones para la transferencia de masa y energía comúnmente reportadas.

1 Tesis de Grado

2 Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química

Director: PhD. Arlex Chavés Guerrero.

ABSTRACT

Title: OPERATIONAL DESIGN FOR A COUNTER-CURRENT ADIABATIC INDUCED MECHANICAL DRAFT WATER COOLING TOWER IN LABORATORY SCALE².

Author: Jonatan Ricardo Restrepo Garcia¹.

Keywords: cooling tower, operational design, induced draft, laboratory device, counter - current flow.

Description: Cooling towers have been gradually developed with the improvement and adjustment of high-technologies, the evaporative cooling devices have been widely studied for several years, applied and set under operational constraints and considerations fixed into a determined control system. There are great varieties of settings for the cooling water processes. Depending on the way it's designed and adjusted to attempt power requirements and capacity. Induced Draft is the best setting into the study and application for small cooling .towers because of the support it provides to a steady air flow distribution; therefore, increasing effectiveness for this device.

The present document develops the operational design for an induced draft cooling tower in order to be applied for the process and unit operations laboratory in the chemical engineer department at Universidad industrial de Santander. The general design equations are based in the enthalpy potential theory proposed by Merkel according the established rules by the Cooling Tower Institute. Moreover it includes all the equipment and others supplies like Shell and tubes Heat exchanger, axial Fan, centrifugal pump, pipelines with the respective instruments and equipment needed for measuring and controlling. The type of PVC filling packing to be used is honeycomb arrangement, validated by the heat and mass transfer correlations commonly reported.

1 Project of Degree

2 Chemical Engineering Department.

Advisor: PhD. Arlex Chavés Guerrero.

INTRODUCCIÓN

La instrumentación, diseño y simulación de dispositivos de enfriamiento de agua ha constituido a lo largo del desarrollo de las operaciones unitarias un marco de referencia en el estudio, comprensión y aplicación de la fenomenología de los mecanismos de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento [1]. Los equipos de enfriamiento de sistemas simples como lo es el sistema aire y vapor de agua constituyen una base fundamental en estudios preliminares de gran aplicación a nivel industrial.

Las unidades de laboratorio que envuelven los fenómenos de transferencia asociados sirven de herramienta para la consolidación de los conocimientos adquiridos en el aula de clase, son un punto de referencia en el proceso de aprendizaje y el uso adecuado de la ingeniería; ya que describen un modelo operacional a escala de un proceso industrial de gran aplicación y por lo cual una necesidad latente en los programas de pregrado.

El objetivo es diseñar una unidad de laboratorio en contracorriente de tiro inducido; siendo como variable de diseño característica la altura del empaque, buscando favorecer el ahorro del agua y la facilidad en las mediciones dentro del proceso. También se plantea el diseño de una unidad de intercambio de calor de tubos y carcasa para calentar el agua a la temperatura de entrada escogida mediante el método de diferencia media logarítmica LMTD.

El estudiante estará en la capacidad de recolectar la información necesaria que describa la transferencia de masa y energía dentro de la torre, adquiriendo experiencia en medición de propiedades, obteniendo valores de coeficientes de transferencia de masa, condiciones de temperatura de bulbo húmedo y seco necesarias para determinar una relación de flujos de líquido y vapor conocida, ajustable y medible.

Se incluye además, el análisis de costos respectivo para su construcción por proveedores locales y nacionales de experiencia certificada como son INAL S.A y EDOSPINA S.A y un modelo de guía de laboratorio para que sea adecuado dentro del Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, en la Universidad Industrial de Santander.

1. MARCO TEÓRICO

Las operaciones unitarias constituyen la base primaria en el estudio, análisis, mejoramiento, diseño e implementación de equipos o dispositivos a diferentes escalas operativas (laboratorio, planta piloto y nivel industrial). Por tal razón éste capítulo revisa los conceptos teóricos y criterios de ingeniería para un óptimo y adecuado diseño de una torre de enfriamiento.

1.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las operaciones de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento ocurridas en sistemas de contacto líquido y vapor, constituyen un enfoque generalizado que han contribuido a lo largo del tiempo al mejoramiento e implementación de nuevos dispositivos mecánicos dentro de los procesos industriales actuales. Siendo así, herramientas versátiles en el estudio de la fenomenología para la transferencia de energía y materia simultánea. Tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial a través del intercambio calórico latente y sensible de una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo equipo [1].

En base a la disposición de las corrientes y los mecanismos usados para favorecer el contacto del aire con el agua, existen variadas configuraciones como se mencionarán brevemente:

1.1.1 Torres de tiro mecánico

Se caracterizan por la aspersion del agua caliente, que es suministrada a la torre mediante boquillas o por el uso de compartimientos de orificios que permiten circular el agua a lo largo del empaque o relleno característico. Estos son comúnmente fabricados en madera e impregnados de fungicidas bajo presión. Otra característica importante reside en la fracción de vacío en el relleno superior al 90% lo cual asegura una caída de presión baja [2].

De acuerdo al modo en que la corriente gaseosa o aire es extraída del interior de la torre se conocen básicamente, dos configuraciones:

- **Tiro Inducido:** Usadas ampliamente debido a que son altamente eficientes, el aire es succionado a través de la torre por medio de un ventilador dispuesto en la parte superior; lográndose una distribución uniforme del aire a través del empaque.
- **Tiro Forzado:** La velocidad de descarga es baja, lo cual reduce la efectividad de la torre, el ventilador está dispuesto en la parte inferior, lo cual conlleva a recirculación del aire caliente y húmedo, el aire es descargado en la parte superior.

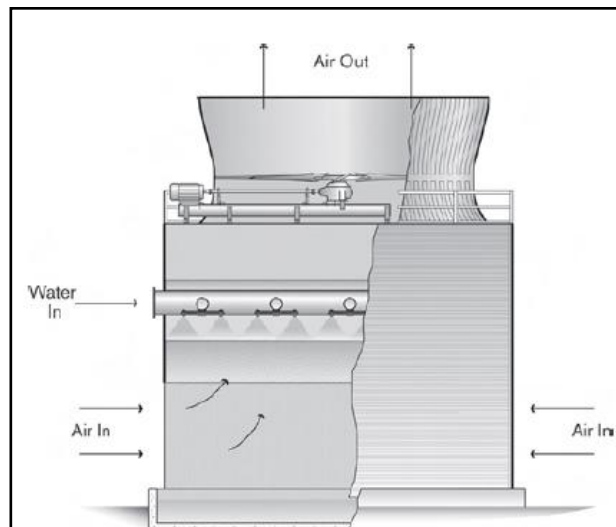


Figura 1. Esquema General de configuración, tomado de referencia [3]

1.2 Fundamentos de transferencia de masa

Una torre de enfriamiento puede ser considerada como un intercambiador de calor de contacto directo, en el cual el agua y el aire están en régimen pelicular. El uso de un coeficiente de transferencia de calor convectivo para la descripción del proceso de transferencia de energía en este sistema es complicado, ya que no existe un método estándar para calcular exactamente la superficie total de contacto entre el agua y el aire [4-5]. Adicionalmente, resulta difícil obtener soluciones analíticas rigurosas debido al acoplamiento de transporte de cantidad de movimiento, energía y masa. Es por eso que, comúnmente, se hace necesario la realización de un estudio experimental acompañado de un análisis adimensional para la determinación del coeficiente

de transferencia de masa global del empaque, lo que permite el diseño de equipos específicos [5].

1.2.1 Teoría de Merkel

La investigación temprana en los dispositivos de enfriamiento se ha visto enfrentada a lidiar con las restricciones y consideraciones surgidas a partir de la transferencia simultánea de materia y energía dentro de los dispositivos de enfriamiento. La teoría de Merkel sobrelleva estas limitaciones fenomenológicas combinando las dos resistencias en un único proceso basado en el Potencial Entálpico [4].

Merkel desarrolló una teoría para torres de enfriamiento referente a la transferencia de masa (evaporación de una pequeña porción de agua) y la transferencia de calor sensible entre el aire y el agua en un equipo de enfriamiento en contracorriente. La teoría considera el flujo de masa y energía del volumen de agua en la interfase y desde la interfase hacia los alrededores de la masa de aire. El flujo cruza estos dos límites, cada uno representando una resistencia debida a los gradientes de temperatura, entalpía y relación de humedad.

Merkel demostró que la transferencia total de calor es directamente proporcional a la diferencia entre la entalpía del aire saturado a la temperatura del líquido (agua), y la entalpía de aire en el punto de contacto con el agua (ver Anexo A).

1.3 COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Los componentes básicos de una torre de enfriamiento incluyen la carcasa y su estructura, relleno, cuenca de agua fría, eliminadores de rocío o separadores de gotas, entrada del aire, persianas, boquillas y ventiladores como se describe a continuación.

1.3.1 Estructura y carcasa

En su mayoría las torres poseen formas estructurales que soportan la instrumentación adicional en la carcasa (motores, ventiladores y otros

componentes), en algunos diseños más pequeños, tales como algunas unidades de fibra de vidrio, la carcasa debe ser esencialmente el mismo marco.

1.3.2 Relleno

En su mayoría las torres emplean rellenos (fabricados de plástico o madera) para facilitar la transferencia de calor, maximizando el contacto directo entre el agua y el aire, existen a su vez dos tipos de rellenos:

-RELLENO TIPO SALPIQUE: El agua cae continuamente sobre sucesivas capas de barras horizontales, rompiéndose en pequeñas gotas, mientras que humedecen la superficie del relleno. Rellenos plásticos tipo salpique favorecen la transferencia de calor mucho mejor que los fabricados en madera.

-RELLENO FÍLMICO: consiste en unas delgadas y cercanamente espaciadas superficies plásticas (PVC) sobre las cuales el agua es dispersada formando una película en contacto con el aire. Estas superficies pueden ser planas, corrugadas en forma de colmena (honeycomb) o de otros patrones de configuración y disposición, la eficiencia de éste tipo de relleno es mayor debido a la uniformidad para la transferencia de calor y además disminuye el volumen.

1.3.3 Cuenca o depósito de agua enfriada

Ésta es localizada en o cerca al fondo de la torre, recibiendo el agua enfriada que fluye hacia abajo a lo largo del relleno. Usualmente posee un sumidero o punto bajo para la conexión de descarga de agua fría.

1.3.4 Eliminadores de rocío

Estos capturan las gotas de agua atrapadas en el flujo de aire que de otro modo serían pérdidas en la atmosfera.

1.3.5 Persianas y boquillas

Las persianas son canales laterales cuyo propósito en el diseño del equipo es equalizar el flujo de aire dentro del relleno, muchos diseños en contra corriente no requieren persianas.

Las boquillas dispersan el aire para humedecer el relleno, una distribución uniforme de agua en el relleno es esencial para alcanzar la apropiada humidificación de toda la superficie del relleno, las boquillas pueden ser fijadas y repartidas en patrones cuadrados o circulares o ser parte de un montaje rotacional como pilar en algunas torres de sección transversal circular.

1.3.6 Ventiladores

Estos pueden ser de tipo axial y centrífugo y han sido empleados en torres de enfriamiento, a fin de introducir dentro de la misma el flujo de aire requerido para su funcionamiento.

Un ventilador no automático de hojas ajustables puede ser usado en un amplio rango de potencias (kW) debido a que el ventilador puede ajustarse para enviar el flujo deseado de aire al más bajo consumo de energía o potencia de trabajo, los ventiladores automáticos pueden cambiar las condiciones de carga.

1.4 DESEMPEÑO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Los factores más importantes a fin de determinar el desempeño de las torres de refrigeración o enfriamiento son:

- **Rango:** Es la diferencia entre la temperatura del agua a la entrada de la torre y la temperatura a la salida-
- **Acercamiento:** Es la diferencia entre la temperatura del agua a la salida de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente, éste es un mejor indicador del desempeño de la torre de enfriamiento.

El mínimo acercamiento usado comercialmente es de 3 °C. No debe usarse un valor inferior [4].

- **Eficiencia:** Es un valor porcentual, la razón de el rango de enfriamiento y el rango ideal de enfriamiento, es decir:

$$\text{Rango} / (\text{Rango} + \text{Acercamiento})$$

- **Capacidad de enfriamiento:** hace referencia al intercambio calórico entre el agua y el aire en kJ/h como resultado de la velocidad de flujo de agua, calor específico y la diferencia de temperaturas.
- **Pérdidas por evaporación:** Es entendida como el flujo volumétrico de agua evaporado por la carga calórica transferida en la torre de enfriamiento [4], teóricamente por cada 1000000 kcal liberadas, la cantidad evaporada es de 1.8 m³. Una relación empírica es usada con frecuencia como sigue:

$$Evap. \left[\frac{m^3}{h} \right] = 0,00085 * 1,8 * Velocidad \ de \ Circulación \left[\frac{m^3}{h} \right] * Rango \ (1)$$

- **Relación Líquido/Gas:** Es la relación existente entre el flujo de agua y aire que circulan a lo largo del circuito de enfriamiento, es la base fundamental para la determinación de la curva característica de una torre de enfriamiento y por la cual los parámetros de diseño son establecidos, un cambio en esta condición requiere el ajuste y adecuación de todo el dispositivo a fin de asegurar la mayor eficiencia del dispositivo.

Desde el punto de vista de la termodinámica y el equilibrio de fases, el calor removido del agua debe ser equivalente al calor absorbido por el aire en los alrededores, este principio define la línea operacional de una torre de enfriamiento (ver Anexo A).

- **Temperatura de bulbo húmedo:**

La temperatura de bulbo húmedo del aire entrando a la torre de enfriamiento determina los niveles de temperatura operativa dentro de una planta, proceso o sistema, es también la temperatura mínima que se puede alcanzar dentro del circuito de enfriamiento [4].

2. METODOLOGÍA

El diseño tanto operativo como conceptual de una torre de enfriamiento involucra una serie de etapas que permiten establecer las relaciones empíricas, metodológicas que definen el desarrollo del modelo operacional del dispositivo en funcionamiento, los parámetros de diseño se basan conforme a los postulados del Cooling Tower Institute [6] como se describe esquemáticamente a continuación.

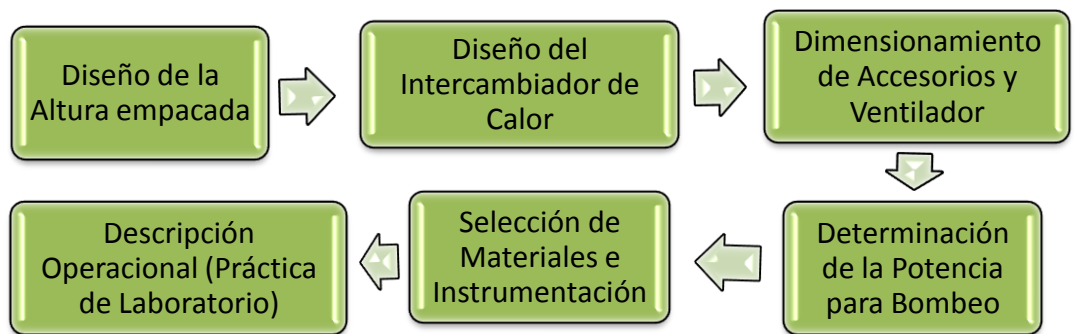


Figura 2. Diagrama bloques del proceso de diseño.

Dentro del circuito de enfriamiento se plantea a su vez el diseño de un intercambiador de calor tipo tubos y carcasa, debido a la necesidad de suministrar agua caliente en el tope de la torre de enfriamiento.

2.1 MÉTODO DE DISEÑO DE LA ALTURA DEL EMPAQUE

2.1.1 Demanda de la torre y número de Merkel

La demanda de la torre define la capacidad de la misma dentro del rango de enfriamiento previamente establecido y también las condiciones límites dentro del dispositivo, por medio de los resultantes números adimensionales que relacionan las variables para la transferencia de masa y calor. (Reynolds, Prandtl, Schdmit y Lewis) [6].

Como paso preliminar a éste diseño se escogió el material y tipo de relleno, usando como criterio favorecer las dimensiones adecuadas para la unidad de laboratorio [8]. La velocidad de transferencia de masa, expresada a través de

los coeficientes para el tipo de empaque, determina a su vez la demanda térmica y la relación líquido a gas (L/G). Se analizaron las características de varios tipos de relleno conforme a la información obtenida en la literatura [12].

Se seleccionó relleno fílmico de PVC de arreglo hexagonal tipo colmena (honeycomb) [11] debido al amplio uso que se ha dado a éste arreglo en el diseño y construcción de torres de enfriamiento en la industria nacional, lo cual facilita su adquisición y disposición.

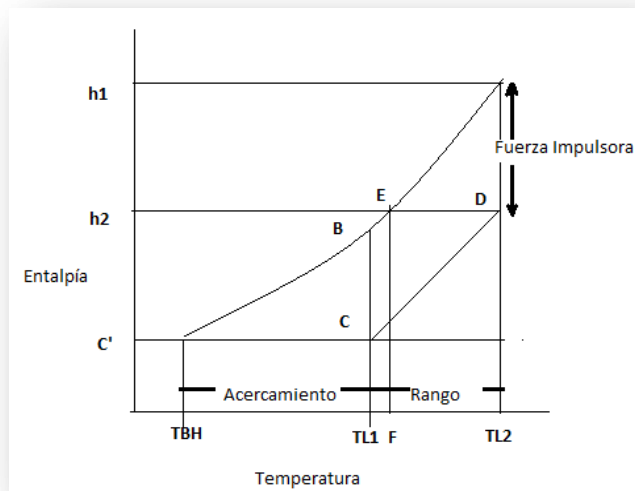


Figura 3. Representación gráfica de la curva característica

En base a la selección del tipo de relleno se define la curva característica, determinada por la relación adimensional establecida por Merkel, que relaciona la fuerza impulsora o gradiente que favorece la transferencia de masa del vapor de agua en el aire con el coeficiente de transferencia característico del tipo de relleno [8-10], como describe la siguiente ecuación:

$$\frac{KxaV}{L} = \int_{H1}^{H2} \frac{dH'}{H' - Hi} \quad (2)$$

El coeficiente de transferencia Kxa y la caída de presión en el relleno son determinados por medio de correlaciones reportadas por Goshayshi y Misenden para este tipo de empaque [11].

$$Kxa \left[\frac{Kg}{m^2s} \right] = 1,98 * (L')^{0,45} * (G')^{0,6} \quad (3)$$

$$\Delta P [Pa] = 27,8 * (L')^{0,35} * (G')^{0,55} \quad (4)$$

Las cuales son válidas para un flujo de agua por unidad de área L' de (0,45-2,22) kg/m s^2 .

La curva característica de la figura 3 se resolvió numéricamente con el método de integración de Simpson 1/3 para un total de 45 segmentos en el rango de enfriamiento preestablecido y una tolerancia de 1×10^{-04} . Se escogió arbitrariamente un rango de 15°C para un temperatura de entrada del agua caliente en el tope de la torre de 43°C y en el fondo de 28°C con el fin de asegurar condiciones operativas y determinar la capacidad nominal de la torre (1 tonelada nominal se entiende como la capacidad para enfriar 3 gpm desde los 35°C hasta los $29,4^\circ\text{C}$ y es una referencia que identifica las torres de enfriamiento en la industria).

Las condiciones atmosféricas, de presión y de temperatura se estimaron para una altura promedio de la ciudad de Bucaramanga de 1200 msnm, una temperatura de bulbo húmedo (TBH) de $19,7^\circ\text{C}$ y condiciones de humedad relativa del aire a la entrada entre el 75-80%, estableciendo una temperatura de bulbo seco (TBS) de $22,2^\circ\text{C}$.

La psicrometría fue usada para estimar las condiciones de bulbo húmedo, mediante pruebas iterativas tomado como primera estimación la TBS de convergencia por medio de la ecuación psicrométrica, que mide la temperatura de saturación del ambiente, es decir 100% de humedad relativa (ver Anexo B)

$$Y'_w - Y' = \frac{hc/Kx_a}{\lambda_w} * (T - T_w) \quad (5)$$

El flujo másico de agua de alimentación se fijo en $0,55 \text{ kg/s}$ ya que éste será regulado por la apertura de las válvulas para tuberías de 1" de diámetro interno y es caracterizado por el número adimensional de Reynolds, en régimen turbulento medio, debido a que se plantea un flujo promedio de líquido dentro del laboratorio una vez llenada la cuenca de agua (ver Anexo D).

La variación de las propiedades termodinámicas se asumen constantes debido a que no existe una diferencia significativa en el intervalo de temperatura de aplicación, a excepción del calor latente de vaporización λ_w (ver Anexo C). El flujo másico de aire entrante fue establecido para un factor de diseño de 2,4 en el punto de corte en donde la línea de operación y curva de equilibrio determinan el flujo mínimo de gas (ver Anexo B).

2.2 MÉTODO DE DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

2.2.1 Método de diferencia media logarítmica LMTD

Para cualquier tipo de intercambiador de calor a diseñar, la incógnita es el área de intercambio, que finalmente fija el tamaño del equipo, su peso en material, y el número de tubos.

El cálculo de área de transferencia fue efectuado por el método LMTD o diferencia de temperatura media logarítmica de sus siglas en inglés:

$$Q = U * A * \Delta T_{ml} \quad (6)$$

El parámetro U describe la tasa de transferencia de calor global y depende de la naturaleza de los flujos, T_{ml} , es la temperatura media logarítmica y A, el área de transferencia de calor buscada, y son determinados en éste diseño por medio de las ecuaciones (6) y (7) para:

-Tubos de 1" de diámetro interno en acero inoxidable AISI 304.

-El fluido primario es el agua que entra a 28 °C

-El fluido secundario vapor de agua provisto por una caldera piro tubular de 30 BHP ubicada en el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, para un flujo másico de diseño de 0,29 kg/s de vapor saturado a 171,8 °C.

$$\frac{1}{roU} = \frac{1}{roho} + \sum_{j=1}^n \frac{\ln(r_j/r_{j-1})}{K_{j-1}} + \frac{1}{rnhn} \quad (7)$$

La variación de temperatura logarítmica ΔT_{ml} representa la diferencia media en Kelvin lo cual presenta un factor de corrección F_c , cuyo valor depende del intercambiador y que en nuestro caso se halla gráficamente para el tipo de configuración 1-2 de intercambiador de calor de paso simple, a partir de los valores X y Z.

$$\Delta T_{ml} = F_c * \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (8)$$

$$\Delta T_1 = T_{c1} - T_{f1} \quad \text{y} \quad \Delta T_2 = T_{c2} - T_{f2} \quad (9)$$

Para cada caso, conociendo la capacidad calorífica del fluido a calentar, su masa y la temperatura a la cual se desea llevar, se puede calcular la potencia a entregar en kW para lograr el aumento de temperatura, así:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (10)$$

Igualando este flujo de calor de la ecuación (10) en las corrientes frías (f) y calientes (c), se determina la temperatura a la salida del vapor y finalmente el área de transferencia de la cual se deduce la longitud de tubos al interior de la carcasa.

Los coeficientes locales h_o y h_n fueron calculados por medio de la correlación de **Dittus- Boelter** para las condiciones determinadas por las relaciones adimensionales de Nusselt, Prandtl y Reynolds dentro del respectivo intervalo de validación, mediante la ecuación (11).

$$Nu = \frac{h_o K}{D_i} = 0,023 * (Pr)^{\frac{1}{3}} * (Re)^{\frac{4}{5}} ; \quad Re > 10000 \wedge 0,6 < Pr < 160 \quad (11)$$

2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AIRE

2.3.1 Diseño conceptual de línea de tuberías, accesorios y potencia de bombeo:

Con el fin de seleccionar la bomba para la recirculación del agua en la torre de enfriamiento, se determina la altura dinámica total H_m , los términos correspondientes a un balance de energía mecánica, más los términos correspondientes a las pérdidas primarias, debidas a la fricción, y secundarias generadas por los accesorios:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \sum \frac{fLV_1^2}{2gD} + \sum \frac{KV^2}{2g} = H_m \quad (12)$$

El punto de referencia para este diseño se ha establecido en la distancia (0,30 m) por debajo de la cuenca de agua donde se ubicará la bomba de tipo centrífugo de conexiones de $\frac{3}{4}$ " a 1". Además, en el balance se incluyen las pérdidas de fricción dentro de la tubería para tubos lisos cédula 40 de acero

comercial, 3 codos de 90° y 3 válvulas tipo globo según configuración (ver Anexo D).

Se propone usar una bomba centrífuga dentro del circuito de enfriamiento y recirculación de agua para la reposición debida a la evaporación de agua en las condiciones de la interfase. Además, el costo de ésta es inferior en comparación con otros tipos de bomba.

2.3.2 Selección del tamaño y tipo de ventilador

La selección del ventilador requerido se efectuó a partir de sus características funcionales, como capacidad de flujo de aire (m³/min) y de la cabeza total, realizada por el mismo a las condiciones estándar, según el AMCA (American Air Moving and Conditioning Association Inc.).

Conocida la demanda de capacidad, q , y la presión estática, P_s , mediante la ecuación (13) se determina la potencia estática, APE , para el manejo del aire y de la ecuación (14) la potencia de motor a partir de la eficiencia.

$$APE = \frac{q * \Delta P_s}{6356} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{APE}{BHP} \quad (14)$$

El valor de eficiencia establecido para el diseño es del 30% dadas las condiciones de flujo que determinan su tamaño. La eficiencia depende directamente del tamaño o diámetro del ventilador y aunque a mayor eficiencia se consideran más adecuados, en este diseño se busca favorecer un tamaño pequeño, ideal para su manejo adecuado dentro de la unidad de laboratorio.

2.3.3 Materiales y Suministros

Las unidades internas de la torre de enfriamiento se escogieron a partir de la investigación y contacto realizado con empresas de manufactura de estos equipos en los cuales se escoge EDOSPINA S.A por su experiencia certificada en torres de enfriamiento.

Las boquillas distribuidoras de agua seleccionadas son fabricadas en ABS, tipo centrífugo, inatascables, de servicio pesado, para distribuir el agua caliente en forma uniforme sobre el relleno, evitando zonas secas. Se seleccionó diámetro de orificio 1" para una configuración de 3 boquillas (ver archivos planos 1 y 2), la torre tiene eliminadores de rocío en su parte superior, fabricados con PVC auto extingible. Para minimizar las pérdidas por arrastre de gotas a menos del 0,005% del flujo de agua en recirculación, las conexiones para entrada y salida de agua son en PVC, roscadas o unión Z.

El material de la carcasa es poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP), para evitar los problemas relacionados a la corrosión por el agua y el ambiente.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Cálculo de la altura del empaque

Las propiedades del sistema aire-vapor de agua se fijaron como se muestra en la tabla 1 en base a los datos reportados ampliamente en la literatura para el sistema aire-vapor de agua [1] y para las condiciones de operación, conforme a los datos reportados en la tabla 2.

CONDICIONES DE OPERACIÓN:	
PM del Agua [kg/kmol]	18,02
PM Aire[kg/kmol]	28,97
λ_0 [kJ/kg]	2502,3
Cpa [kJ/kg°C]	1,8723
Cpb [kJ/kg°C]	1,0035
Ps ₁ [kPa]	2,678
P(kPa)	654,138
Ps ₂	8,636

Tabla 1. Propiedades del sistema Aire- Vapor de Agua a 654,14 kPa

T _{L2}	43
T _{L1}	28
T _{g1} (Bulbo Seco)	22,2
T _{g2}	32,28
Φ	0,8
Y' ₁	0,015
L' [kg/s]	0,5481
G' _{s min} [kg/s]	0,21
H' ₁ [kJ/kg]	62,16
H's [kJ/kg]	202,4
ΔP [Pa]	130,6
G's [kg/s]	0,5
H' ₂ [kJ/kg]	130,8
K _{xa} [kg/sm ³]	12,1
K _{xa} [m ⁻¹]	2,05
a torre [m ²]	0,09
D [m]	0,34
KaV/L	1,36
KaL/V	107,05

Tabla 2. Resumen de parámetros obtenidos y condiciones operativas

El número adimensional de Merkel se estimó en 1,36 cercano al 1,45 suministrado como parámetro de diseño del tipo de relleno en el cual se basa el modelo operacional, conforme a empresas nacionales como lo es EDOSPINA S.A (Ver anexo E).

H	1,56
N	45
ΔH	1,56
ΔT	0,341
HTUa	0,487
NTUa	1,363
Z [m]	0,66

Tabla 3. Resumen parámetros de integración para la altura empacada de la torre

El resultado de la integración numérica de la curva característica se resume en la tabla 3. En esta se especifica el número de segmentos y tamaño de paso. Se reporta igualmente la altura de una unidad de transferencia HTUA, y el número de unidades de transferencia del diseño, NTUA. El desarrollo numérico se realizó por diferencias finitas a partir del cambio de entalpia en el tope y el fondo de la torre, como se muestra en la Figura 4, y de la cual se puede inferir las condiciones óptimas y favorables para éste diseño.

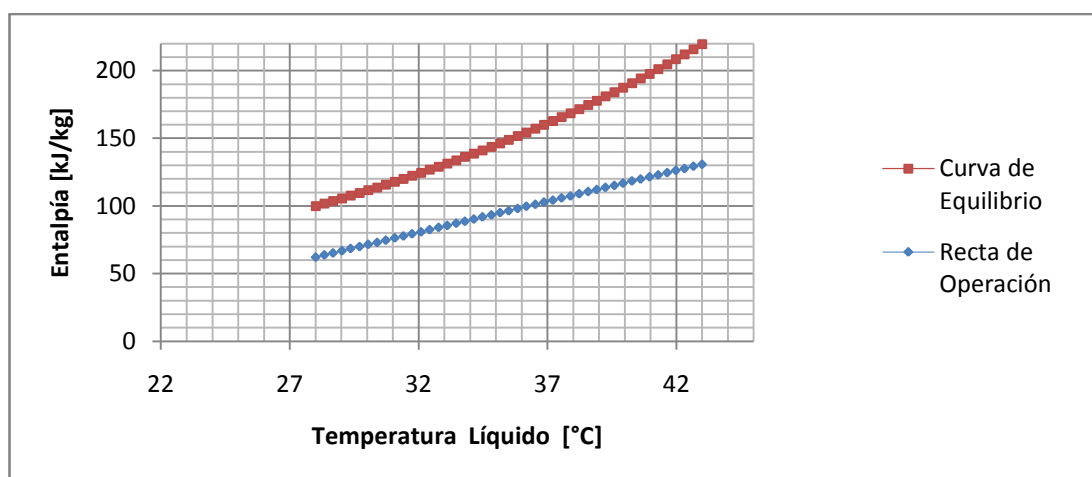


Figura 4. Curva característica y recta de operación

3.2 Dimensionamiento del intercambiador de calor

En las tablas 4 y 5 se resumen las condiciones de diseño del intercambiador, así como los parámetros adimensionales que caracterizan los flujos.

Propiedades:	Agua a 24 °C	Vapor a 171,8°C
ρ [kg/m ³]	997	4,16
μ [Pa*s]	8,54E-04	1,5E-05
K [W/m K]	0,614	0,032
C_p [J/kg K]	4180	2495
Flujo [kg/s]	0,548	0,295
Kacero [W/m K]	15,1	Acero Inox. AISI 304

Tabla 4. Condiciones de operación

	Interno	Externo
Diámetro de tubo [m]	0,0254	0,0334
Área de tubo [m ²]	5,07E-05	8,76E-4
Pr	5,8	1,2
Velocidad [m/s]	1,1	81,1
Re	32172	750906
h_i ó h_o	2879,7	1171,561
$1/U$	1,45E-03	
U [J/m² K s]	687,71	

Tabla 5. Parámetros de diseño del intercambiador de calor

Conforme al método de cálculo descrito en el capítulo anterior se determina el coeficiente global de transferencia de calor U , por medio de las relaciones adimensionales (Re , Pr y Nu). Los resultados se reportan en la tabla 6. Se determinan entonces 14 tubos de acero inoxidable AISI 304 de diámetro 0,0254 m espaciados entre sí, conforme a diseño (ver archivo plano 2), para una configuración 1-2 del Intercambiador de paso simple.

T_{f2} [°C]	28,0
T_{c1} [°C]	171,8
T_{c2} [°C]	125,1
ΔT_{ml}	111,1
ΔT_f	15
Q Agua [kJ/s]	34,7
Área de transferencia de calor	0,45
L [m]	0,31
T_{f1} [°C]	43,0
N° Tubos:	14
f_c	0.989

X	0,104
Z	3,107

Tabla 6. Dimensiones y condiciones de operación del intercambiador

3.3 Dimensionamiento de la bomba, tuberías, válvulas y accesorios

Para la determinación de la cabeza de la bomba, se consideraron las pérdidas debidas a la fricción y accesorios, con las relaciones reportadas para codos de 90° ($K= 30 \cdot Ft$) y válvulas tipo globo ($K=3 \cdot Ft$) con un coeficiente de fricción de 0,023 conforme al diagrama de Moody [14], como se describe a continuación:

- Las pérdidas primarias, para una longitud total de tubería de 1" Cédula 40 de 2,5026 m

$$hL1 = \frac{0,023 \cdot (2,5026) \cdot (1,0833)^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,0254} = 0,14$$

- Las pérdidas debidas a los accesorios.

$$hL2 = \frac{30 \cdot 0,023 \cdot (1,0833)^2}{2 \cdot 9,8} \cdot 3 + \frac{3 \cdot 0,023 \cdot (1,0833)^2}{2 \cdot 9,8} \cdot 3 = 0,14$$

Por lo tanto, conforme al balance de energía mecánica a la salida del intercambiador y la entrada de agua caliente a la torre, la capacidad de la bomba se expresa en unidades de altura dinámica (metros de columna de agua) y fue calculada en $H_m = 1,76m$

3.4 Potencia para el motor del ventilador axial

A partir de las ecuaciones (13) y (14) para un caudal $0,425 \text{ m}^3/\text{s}$ y una caída de presión estática de 0,54 pulgadas de H_2O (correspondiente a la caída de presión a lo largo de la torre), se calculó la potencia del motor en 0,25 HP, teniendo en cuenta una eficiencia del 30 % (especificada por el fabricante SIEMENS modelo 2CC2 404-5YC3, 1800 rpm, diámetro 0,35 m y motor reductor Sinfín-Corona Motox 1,4 kW)

3.5 Instrumentación, control y operabilidad de la torre

El sistema de monitoreo y control de las propiedades físicas se realizará mediante la siguiente instrumentación dentro del circuito de enfriamiento provista por Lanzetta & Rengifo CIA LTDA.

a. CONTROLADOR PID TEMPERATURA DO-89556-00, TC, 1/16-DIN:

Permite fijar las condiciones de temperatura del agua en el intercambiador de calor para establecer el flujo de agua de recirculación o entrada de agua caliente a la torre.

b. MANÓMETROS Y HIGROMETROS:

Son acoplados para observar implícitamente la velocidad de flujo de aire a través del tubo Pitot y la presión del vapor de alimentación en el intercambiador de calor.

Simultáneamente se realizan las mediciones de humedad relativa porcentual del aire y la temperatura del ambiente por medio de los higrómetros

c. BOMBA TIPO CENTRÍFUGO MAGNÉTICA DO-72012-20 EN POLIPROPILENO

Es el instrumento por el cual se bombea el agua caliente a la torre de refrigeración, para un flujo de diseño de 8,7 GPM, éste tipo de bomba está diseñada para un máximo de 11,4 GPM, y suministro eléctrico de 115 VAC, 3200 rpm y 1/38 HP para conexiones de tubería de 1 pulgada.

d. MEDIDOR DE FLUJO DE AIRE TIPO TUBO PITOT Modelo 160S-18

La medición del flujo de aire provisto por el ventilador axial se realizará por medio de la inserción de un tubo Pitot en el tope de la torre para conexión de 1/16 pulgada y el acoplamiento de los respectivos manómetros para determinar la presión dinámica. Dentro de las variadas disposiciones se escoge tipo "S" para facilitar las mediciones de los manómetros.

e. MEDIDOR DE FLUJO DE ÁREAVARIABLE-Rotámetro

Fabricado en polipropileno (NPT) de fácil lectura para ajustar el flujo de agua que entra al dispositivo de enfriamiento, conexiones de 1 pulgada para un rango de flujo de 1 a 10 GPM.

4. MODELO OPERACIONAL

En éste capítulo se plantea un modelo para el uso e implementación de la torre de enfriamiento, en base a las condiciones de diseño, instrumentación y operación; así como las recomendaciones más importantes para su puesta en marcha y mantenimiento preventivo.

I. OBJETIVOS

- Estudiar los fenómenos de transporte asociados al proceso de enfriamiento de agua con aire que ocurren simultáneamente (Masa y Calor).
- Entender y aplicar los conceptos de: humedad absoluta y relativa, temperatura de bulbo húmedo y seco, calor latente y sensible.
- Hacer un uso adecuado de la psicrometría para relacionar las propiedades termodinámicas y de humedad que son la base del planteamiento de los balances de materia y energía requeridos.
- Obtener la información necesaria que permita hacer el escalamiento a nivel industrial de la operación unitaria de humidificación.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uno de los procesos de mayor aplicación a nivel industrial para el enfriamiento del agua es el llevado a cabo por medio de equipos de humidificación de aire por contacto directo en la interfase gas-liquido. Las torres de enfriamiento es la más conocida, dentro de éstas el intercambio calórico ocurre básicamente por 2 mecanismos: a) Transferencia de calor sensible al aire, b) Evaporación del agua de recirculación misma.

El agua caliente fluye a través de la torre por medio de un sistema de aspersión mecánica (Boquillas) que distribuye el flujo de agua a través del conjunto de placas horizontales, verticales o corrugadas denominadas, empaque o relleno, donde por acción de la gravedad hace contacto directo con el flujo de aire entrante por medio de persianas y la acción aspirante de un ventilador axial dispuesto en la parte superior, asegurando el tiempo de

contacto requerido para la transferencia y consecuente enfriamiento evaporativo del agua.

Los parámetros de diseño más importantes dentro de un circuito de enfriamiento son “*El Acercamiento*” el cual es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada, y “*El Rango*” que define la capacidad de enfriamiento y es la diferencia entre las temperatura a la entrada y salida de la torre.

El modelo matemático que describe y desarrolla la operación dentro de la torre, se basa principalmente en balances diferenciales a los largo de la torre.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Ajuste el flujo de agua que entra a la torre por medio de la apertura parcial de las válvula de globo en el depósito de agua para mantener una flujo másico de 0,5481 kg/s, asegurándose de mantenerlo constante a lo largo del experimento.
- Inicie el circuito de calentamiento y enfriamiento hasta que la temperatura del agua entrante al intercambiador de calor sea de 28 °C.
- Por medio del reductor de velocidad del ventilador de la torre ajuste el flujo másico de aire a 0, 503 kg/s, realizando pequeñas variaciones en la velocidad de rotación del ventilados (rpm) a lo largo experimento.
- Introduzca el tubo Pitot hasta el fondo del ducto principal para leer en los manómetros la caída de presión dinámica.
- Eleve a una distancia de 1 cm por encima del eje radial el tubo Pitot, efectuando las lecturas de presión dinámica en cada punto, realice entonces el perfil de velocidad y estime su promedio.
- Una vez alcanzadas las condiciones de equilibrio dinámico, registre los valores correspondientes en el higrómetro de temperatura de bulbo seco y húmedo del aire y las temperaturas de entrada y salida del agua en el intercambiador de calor.
- Empleando las gráficas de la curva característica para una torre de enfriamiento reportadas en la literatura, determine el coeficiente global

por unidad de volumen de transferencia de masa K_{xa} , para cada relación L/G efectuada en diferentes tipos de empaque y para el usado en este experimento por medio de la siguiente correlación: $K_{xa} [Kg / m^2 s] =$

$$1,98 * (L')^{0,45} * (G')^{0,6}$$

- Determine la altura empacada (Z) para la torre de enfriamiento para cada corrida realizada (mínimo 3).
- Realice el escalamiento de este proceso para un flujo de agua de 10000 gal/h desde los 29,4 °C hasta los 40,5 °C para determinar la altura y el diámetro de una torre industrial de enfriamiento.

INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO

1. Rotámetro de área variable para medir el flujo de agua circulante en el circuito de enfriamiento.
2. Tubo de impacto o tubo Pitot para medir la velocidad del aire húmedo conectado a un manómetro inclinado.
3. Higrómetro diferencial para medir las temperaturas del aire en el tope y el fondo y la humedad relativa.
4. Termómetro y termo pozos para medir las condiciones de entrada y salida del agua en el intercambiador de calor. (entrada y salida de la torre)
5. Motor reductor Sinfin-Corona MOTOX
6. Torre de enfriamiento en FRP de tiro inducido de 0,35 x 0,35 m²

DATOS EXPERIMENTALES

Valor Inicial en el manómetro inclinado: _____ cm

Temperatura de bulbo húmedo del aire en la entrada: _____ °C

Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada: _____ °C

Presión atmosférica: _____ kPa.

VARIABLE / OPERACIÓN	1	2	3
Tiempo			

Flujo másico de H ₂ O en la entrada			
Caída de presión tubo Pitot			
Temperatura del agua en el tope			
Temperatura del agua en el fondo			
Temperatura bulbo seco del aire saliente			
Temperatura de bulbo húmedo del aire.			

RECOMENDACIONES OPERACIONALES

- Cuando en pleno funcionamiento se observa canalización o cascadas de agua, las cuales conllevan al incremento del consumo energético y de agua, debidas a la obstrucción de las boquillas, se recomienda remover las boquillas para su limpieza, de este modo se evita el daño en el empaque y las mallas de soporte.
- Revisar el estado del relleno, su limpieza favorece significativamente la capacidad de enfriamiento. Cuando éste presenta desajustes, ensuciamiento o desgaste es recomendable retirarlo de la torre para su limpieza o en su defecto su reemplazo conforme a las especificaciones del fabricante.
- Una vez finalizado el mantenimiento del motor, reductor de velocidad y ventilador se debe asegurar limpiar el aceite que pueda derramarse, así como los materiales utilizados para su limpieza (estopas, franelas, etc.)
- Los eliminadores de rocío pueden operar inadecuadamente debido a secciones rotas, dobladas o faltantes y posiblemente inapropiada instalación, por lo cual, se recomienda instalar su reemplazo conforme al diseño, adecuando los sellos de aire entre las secciones de uniones en la pared de la torre y en el mismo eliminador.
- Una revisión periódica de la estructura FRP (Fiber Glass Reinforced Plastic) permite garantizar una disposición adecuada de los aditamentos dentro de la torre en operación, en muchos casos se presenta desbalance del equipo mecánico debido a un exceso de vibración en la operación.

7. ESTIMATIVO DE COSTOS

Se realizó el estimativo de costos de la implementación de la torre de enfriamiento, en base a los proveedores nacionales. En la tabla 7 se describe el costo de las unidades internas de la torre de enfriamiento dados por EDOSPINA S.A.

Item	Cód.	Cant.	Descripción	COSTO
1	20747	1	Modulo de relleno fílmico PVC DE 12 mm. (74" x 30" x 30")	\$155.000
2	20746	1	Modulo eliminador de roció PVC (DE 74" x 30" x 15")	\$130.000
3	20753	1	Boquilla de aspersion de 1/2" o 3/4" polipropileno	\$6.000
4	20751	1	Boquilla spray polipropileno. de 1" ø distribución de agua con inserto	\$25.000

Tabla 7. Costos de equipamiento y suministros

En la tabla 8 se muestra el costo de montaje el cual involucra: los costos de suministro, montaje de accesorios y equipos requeridos, los cuales son proporcionados por la empresa local INAL. S.A. (ver Anexo D).

COSTOS DE ACCESORIOS Y EQUIPOS	
ACTIVIDAD Y EQUIPOS	COSTO
Torre de enfriamiento en fibra de vidrio 35X35 cm ² más equipamiento interno.	\$ 2'950.000
Intercambiador de calor, tipo tubo y carcasa acuatubular Acero Inoxidable AISI 304	\$1'850.000
Ventilador Axial de Tiro Inducido de 0.18 kW con soporte	\$ 950.000
Accesorios para la medición y control	\$ 4'600.000
TOTAL	\$ 10'350.000

Tabla 8. Costos de construcción, montaje y accesorios.

CONCLUSIONES

- Se diseñó una torre de enfriamiento a escala de laboratorio de tiro inducido de estructura FRP de 1,7 m de altura, ancho 0,35 m y largo 0,35 m. Esta torre fue diseñada para un flujo de agua de 0,548 kg/s entrando a la torre a una temperatura de 43 °C y sale a 28 °C el cual es recirculado a través de un circuito formado por el intercambiador y la torre.
- Se diseñó una unidad de intercambio de calor de tubos (14 tubos) y carcasa con un área de intercambio de 0,45 m², para un rango de temperatura de 15 °C. El fluido caliente es vapor vivo proveniente de una caldera de laboratorio con un flujo másico de diseño de 0,29 kg/s. El material seleccionado fue acero inoxidable AISI 304, a fin de prevenir el desgaste o deterioro del equipo por corrosión.
- Se expone una estimación de costos para su implementación en el laboratorio. Las cotizaciones fueron obtenidas de las empresas INAL S.A junto con la instrumentación suministrada por EDOSPINA S.A y Lanzetta & Rengifo CIA LTDA.
- Se desarrolló un modelo para la guía de laboratorio donde se presentan recomendaciones operacionales y el procedimiento experimental para obtener el coeficiente global de transferencia de masa por unidad de volumen K_{xa} .

BIBLIOGRAFÍA

[1] FOUST, Alan S. *PRINCIPLES OF UNIT OPERATIONS*, Second Edition, Chapters 15 and 17, JOHN WILEY & SONS 1980.

[2] TREYBAL, Robert E. *OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA* 2 edición, Pág. 212-227 y 254-271, Mc Graw Hill 1967.

[3] COOLING TOWER FUNDAMENTALS, Agosto 16 de 2011 Disponible en: <www.em-ea.org/.../book-3/Chapter%203.7%20Cooling%20Tower.pdf>

[4] CAMPOS A, Juan Carlos, "Evaluación energética de torres de enfriamiento", UPME, COLCIENCIAS Agosto 16 de 2011. Disponible en: <www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/torres.pdf>

[5] INCROPERA, F.P. y DEWITT, D.P. *Fundamentos de la Transferencia de Calor*. 4ª ed. Prentice Hall, México, 1999.

[6] Daeil Aqua Co. LTD, COOLING TOWER THERMAL DESIGN MANUAL, Agosto 26 de 2011. Disponible en:

<che.sharif.ir/.../Cooling%20Tower%20Thermal%20Design%20Manual.pdf>

[7] CORONEL, Juan Francisco, "Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transferencia de Calor", Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética y mecánica de fluidos. Agosto 16 de 2011. Disponible en:

<http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf>

[8] LEMOUARI M. "*Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower*", University of Bejaia, Algeria, Energy Conversion and management journal. 2008

[9] ELSARRAG, Esam, "*Experimental study and predictions of an induced draft ceramic tile packing cooling tower*", Energy conversion and management , 2006.

[10] GHARAGHEZI, Farhad, "*Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing*".Energy conversion and management, 2006.

[11] Goshayshi, H.R, "*The Investigation of cooling tower packing in various arrangements*". Applied thermal engineering, 1999.

[12] MILOSAVLJEVIC, Nenad, "*A comprehensive approach to Cooling Tower Design*", Applied thermal engineering.2001

[13] Cortinovis, Giorgia F, "*Integrated analysis of cooling water systems: Modeling and experimental validation*". Applied thermal engineering, 2008.

[14] CRANE, *Flujo de Flúidos en válvulas, accesorios y tuberías*, Mc Graw Hill 1976.

ANEXO A. TEORÍA DE MERKEL, ENFRIAMIENTO DE AGUA CON AIRE

Los procesos en los cuales se plantea la operación unitaria de la humidificación consisten básicamente en aquellos procesos en los cuales se enfría agua por el contacto del aire casi seco, a fin de reutilizar el agua dentro de la planta, la cual se usa en los subprocesos de intercambio de calor dentro del proceso global.

Merkel plantea un modelo operacional basado en el potencial entálpico como el gradiente o fuerza impulsora del proceso de enfriamiento evaporativo, en el cual las contribuciones correspondientes al calor sensible entre al aire y el agua son despreciables en comparación con las contribuciones correspondientes al calor latente de vaporización [6], de este modo el balance de energía general se reduce a:

$$L' * CPL * dTL = G' s * C' H * dTG + G' s * \lambda o * dY' = G' s * dH' \quad (1)$$

$$\text{Integrando (1)} \quad \int_{TL1}^{TL2} (L' * CPL * dTL) = \int_{H'1}^{H'2} (G' s * dH')$$

Línea de Operación de una Torre de Enfriamiento

$$H'2 - H'1 = \frac{L * CPL}{G' s} * (TL1 - TL2) \quad (2)$$

ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES MÍNIMAS DE OPERACIÓN Y CONDICIONES DE HUMEDAD DEL AIRE

La relación de entalpía específica define la curva de equilibrio para el sistema aire-vapor de agua, mediante la siguiente expresión:

$$H' = (CPB + CPAY') * T + \lambda o Y' \quad (1)$$

Por lo tanto la razón de cambio de la entalpía específica H' con respecto a la temperatura del gas en las condiciones de temperatura de la interfase. T , se iguala a la recta de operación de la torre en contracorriente.

$$\begin{aligned} \frac{dH'}{dT} &= (CPB + CPAY') * \frac{dT}{dT} + T * \frac{d(CPB + CPAY')}{dT} + \lambda o * \frac{dY'}{dT} \\ \frac{dH'}{dT} &= CPB + CPAY' + T * CPA * \frac{dY'}{dT} + \lambda o * \frac{dY'}{dT} \\ \frac{dH'}{dT} &= CPB + CPA * \left(Y' + T \frac{dY'}{dT} \right) + \lambda o * \frac{dY'}{dT} \quad (2) \end{aligned}$$

La temperatura en la interfase T , así como la saturación molar se evalúan a las condiciones de saturación Y' , por lo cual se describen por la siguiente relación:

$$Y' = \frac{MA}{MB} * \left(\frac{Ps}{P - Ps} \right) \quad (3)$$

$$Ps = EXP * \left(A - \frac{B}{T + C} \right) \quad (4) \text{ Ecuación de Antoine}$$

Derivando ambas expresiones y reemplazándolas en (2) se obtiene, una expresión general que permite, mediante pruebas iterativas hallar las condiciones mínimas de flujo de gas $G_{s\text{mín}}$.

$$\begin{aligned} \frac{dY'}{dT} &= \left(\frac{MA}{MB} \right) * \frac{dPs * (P - Ps) - d(P - Ps) * Ps}{(P - Ps)^2} \\ \frac{dY'}{dT} &= \frac{B * Ps * P}{(P - Ps)^2 * (C + T)^2} \quad (5) \end{aligned}$$

De la ecuación del balance general, descrita por Merkel se obtiene la ecuación que define la recta de operación. El punto de tangencia entre la recta de operación y la curva de equilibrio se calcula en el punto de corte (pendientes iguales):

$$H' - H'2 = \frac{LCPl}{G's} * (TL - TL2) \quad (6)$$

Se determinan entonces las coordenadas del punto de tangencia (H', T), suponiendo una temperatura T y despejándola al igualar $\frac{dH'}{dT} = \frac{(H' - H'2)}{(TL - TL2)}$.

Se muestran los resultados tabulados de las iteraciones a continuación:

Ts	Ps	Y's	dh/dt	H'	Tc	T-Tc
30,000	4,241	0,032	5,968	111,451	36,259	6,259
36,259	6,023	0,046	8,069	154,998	39,506	3,247
39,506	7,181	0,056	9,491	183,430	40,778	1,272
40,778	7,684	0,060	10,126	195,902	41,208	0,430
41,208	7,861	0,062	10,352	200,309	41,346	0,137
41,346	7,918	0,062	10,425	201,735	41,389	0,043
41,389	7,936	0,062	10,448	202,184	41,402	0,013
41,402	7,942	0,062	10,455	202,324	41,406	0,004
41,406	7,944	0,062	10,457	202,367	41,408	0,001
41,408	7,944	0,062	10,458	202,380	41,408	0,000
41,408	7,944	0,062	10,458	202,384	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000
41,408	7,945	0,062	10,458	202,386	41,408	0,000

De manera análoga se muestran los pasos iterativos para determinar la temperatura de bulbo húmedo a partir de la psicrometría.

TBH s	Y'h	Y'c	Ps	Tc	Tc-TBHs
22,2222	0,0157	0,0197	2142,8385	18,6061	3,6161
18,6061	0,0172	0,0157	2357,3730	20,1400	-1,5339
20,1400	0,0166	0,0173	2269,3890	19,5263	0,6137
19,5263	0,0168	0,0166	2304,6111	19,7745	-0,2481
19,7745	0,0167	0,0169	2290,3734	19,6746	0,0999
19,6746	0,0168	0,0168	2296,1061	19,7148	-0,0403
19,7148	0,0167	0,0168	2293,7942	19,6986	0,0162
19,6986	0,0168	0,0168	2294,7260	19,7052	-0,0065
19,7052	0,0168	0,0168	2294,3504	19,7025	0,0026
19,7025	0,0168	0,0168	2294,5018	19,7036	-0,0011
19,7036	0,0168	0,0168	2294,4407	19,7031	0,0004
19,7031	0,0168	0,0168	2294,4653	19,7033	-0,0002
19,7033	0,0168	0,0168	2294,4554	19,7033	0,0001
19,7033	0,0168	0,0168	2294,4594	19,7033	0,0000
19,7033	0,0168	0,0168	2294,4578	19,7033	0,0000
19,7033	0,0168	0,0168	2294,4584	19,7033	0,0000

ANEXO C. CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DEL AGUA

T [°C]	Ps(KPa)¹	Ps(Kpa)²	Λs
20	2,3390	2,33704332	2454,1
21	2,4870	2,48569250	2454,8
22	2,6450	2,64254139	2449,4
23	2,8100	2,80796910	2447,0
24	2,9850	2,98236861	2444,7
25	3,1690	3,16614706	2442,3
26	3,3630	3,35972617	2439,9
27	3,5670	3,56354255	2437,6
28	3,7820	3,77804809	2435,2
29	4,0080	4,00371032	2432,8
30	4,2460	4,24101276	2430,5
31	4,4960	4,49045530	2428,8
32	4,7590	4,75255459	2425,0
33	5,0340	5,02784439	2423,4
34	5,3240	5,31697596	2421,0
35	5,6280	5,62021847	2418,6
36	5,9470	5,93845932	2416,2
37	6,2810	6,27220459	2413,9
38	6,6320	6,62207940	2411,5
39	6,9990	6,98872828	2409,1
40	7,3840	7,37281563	2406,7
41	7,7860	7,77502603	2404,3
42	8,2080	8,19606470	2401,9
43	8,6490	8,63665789	2339,5
44	9,1110	9,09755317	2397,2
45	9,5930	9,57952008	2394,8

² KEENAN, Joseph.; KEYED, Frederick G; HILL, Pjilip G. and MOORE, Joan G. Steam Tables. A Wiley-inntersciencie Publication. John Wiley & Sons, New York. 1978

¹ LYDERSEN, Askel L. Mass Transfer in Engineering Practice. A Wiley-Interscience publication. 1993

ANEXO D. COTIZACIÓN PROPUESTA PARA CONSTRUCCIÓN DE INAL S.A

Bucaramanga, Octubre 11 DE 2011

Señores
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S.
Atte: Dra. María Paola Maradei

Ref. Cotización No. **M 1195**



PRESENTAMOS NUESTRA OFERTA PARA EL SUMINISTRO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN FIBRA DE VIDRIO CON INTERCAMBIADOR DE CALOR TUBERIA Y ACCESORIOS SEGUN ESPECIFICACIONES SUMINISTRADAS

CONSTA DE:

Carcasa de Torre de enfriamiento en fibra de vidrio de 35cm x 35 cms
Valor unitario \$ 2'950.000

Intercambiador de calor de carcasa y tubo acuatubular en acero inoxidable tipo 304 de 15 tubos
Valor unitario \$ 1'850.000

Intercambiador de calor de carcasa y tubo acuatubular en con cuerpo en acero al carbon y tubería en acero inoxidable tipo 304 de 15 tubos
Valor unitario \$ 1'350.000

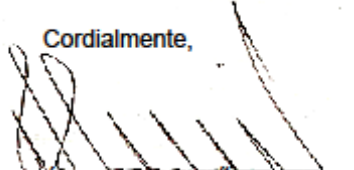
Ventilador axial de tiro inducido con motor de 0,25 hp con soporte y variador electrónico de velocidad
Valor unitario \$ 950.000

Accesorios de instrumentación para control y medición de parámetros

- Bomba centrifuga
 - Manómetro
 - Termómetro
 - Higrómetro
 - Controlador de temperatura
 - Válvula solenoide
 - Medidor de flujo tipo tubo pitot
 - Rotámetro de flujo de área variable
 - Tubería, accesorios y válvulas tipo globo y bola para conexión
- Valor \$ 4'600.000**

Condiciones Comerciales:
Tiempo de Ejecución: 25 días
Valor más el 16% de IVA.

Cordialmente,



ÁNGEL C. ACUÑA LLANES
Gerente

Calle 22 N° 11-61 Teléfonos (7) 6718898* fax: (7) 6715237 Bucaramanga-Colombia
NIT: 804.016.740-9 E-mail: miguel@inal.com.co * WEB www.inal.com.co



Diseño, desarrollo, fabricación y mantenimiento de máquinas industriales tales como: prensas, tanques de almacenamiento, autoclaves, transportadores, intercambiadores de calor y sus componentes para la industria en general. Diseño, desarrollo y fabricación de plantas piloto semi-industriales para el sector de hidrocarburos. Mecanizado de probetas estandarizadas, copones para ensayos de laboratorio y piezas en general.



ANEXO E. CATÁLOGO SUMINITROS DE EDOSPINA S.A

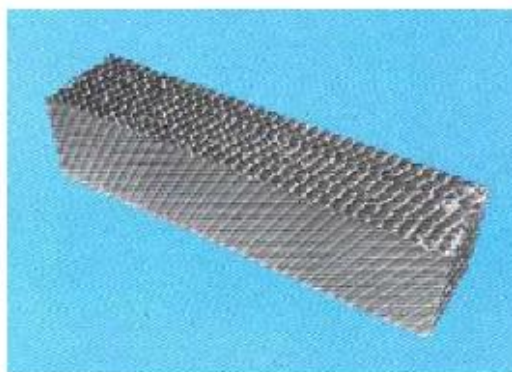
A. RELLENO



RELLENO FILMICO PVC DE EDOSPINA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

GENERAL

El relleno filmico de Edospina S.A. es un producto desarrollado para las torres de enfriamiento de tiro inducido en contra-flujo, con base en la experiencia internacional en diferentes tipos de proceso de enfriamiento trabajados por nuestra compañía y de acuerdo a los estándares del Cooling Tower Institute para estos elementos.



Relleno Fílmico Edospina

MATERIAL Y CARACTERISTICAS ESPECIALES

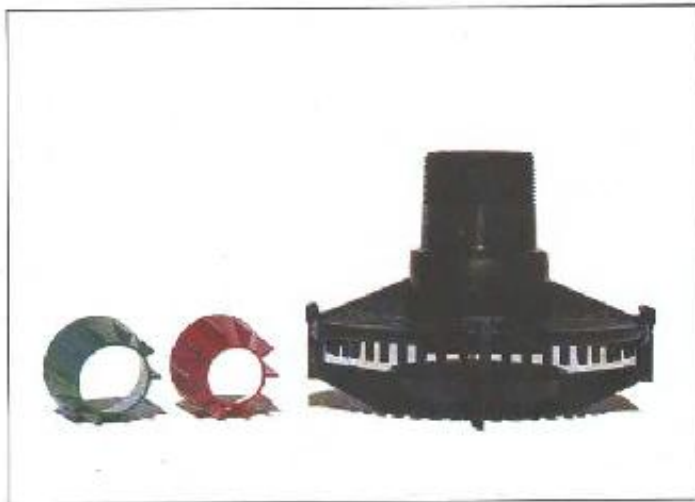
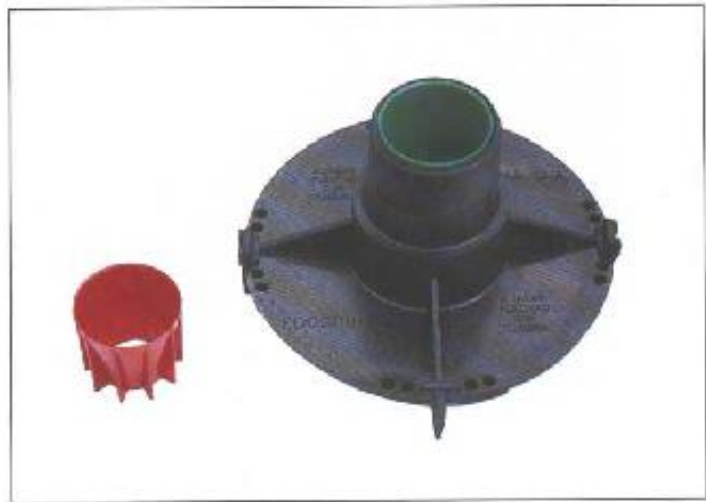
El material del relleno filmico de Edospina S.A. es lámina de PVC rígido auto-extinguible, inalterable a hongos y otros ataques biológicos; estampadas y formadas al vacío en ondulaciones triangulares sobrepuestas en flautas con inclinación alternada de forma que producen un gran área de contacto a los fluidos (agua - aire) puestos en contracorriente. El diseño de los módulos ha sido cuidadosamente determinado para uso industrial, permitiendo un contacto agua - aire excelente, con una caída de presión muy baja. La configuración estándar tipo colmena da como resultado una alta capacidad térmica a muy bajo costo y es suficiente para evitar su taponamiento en la mayoría de los ambientes industriales. Con un tratamiento normal del agua en recirculación y un buen mantenimiento, la capacidad térmica del relleno se mantendrá inalterable durante toda la vida de la torre de enfriamiento.



Avda. Eldorado No 100 - 57 Bogotá - Colombia
Tels : (0571) 413 84 00 - 4139713 Fax : 413 98 25 /65
www.edospina.com - info@edospina.com.co
Nit : 890303642-9

B. BOQUILAS ASPERSORAS

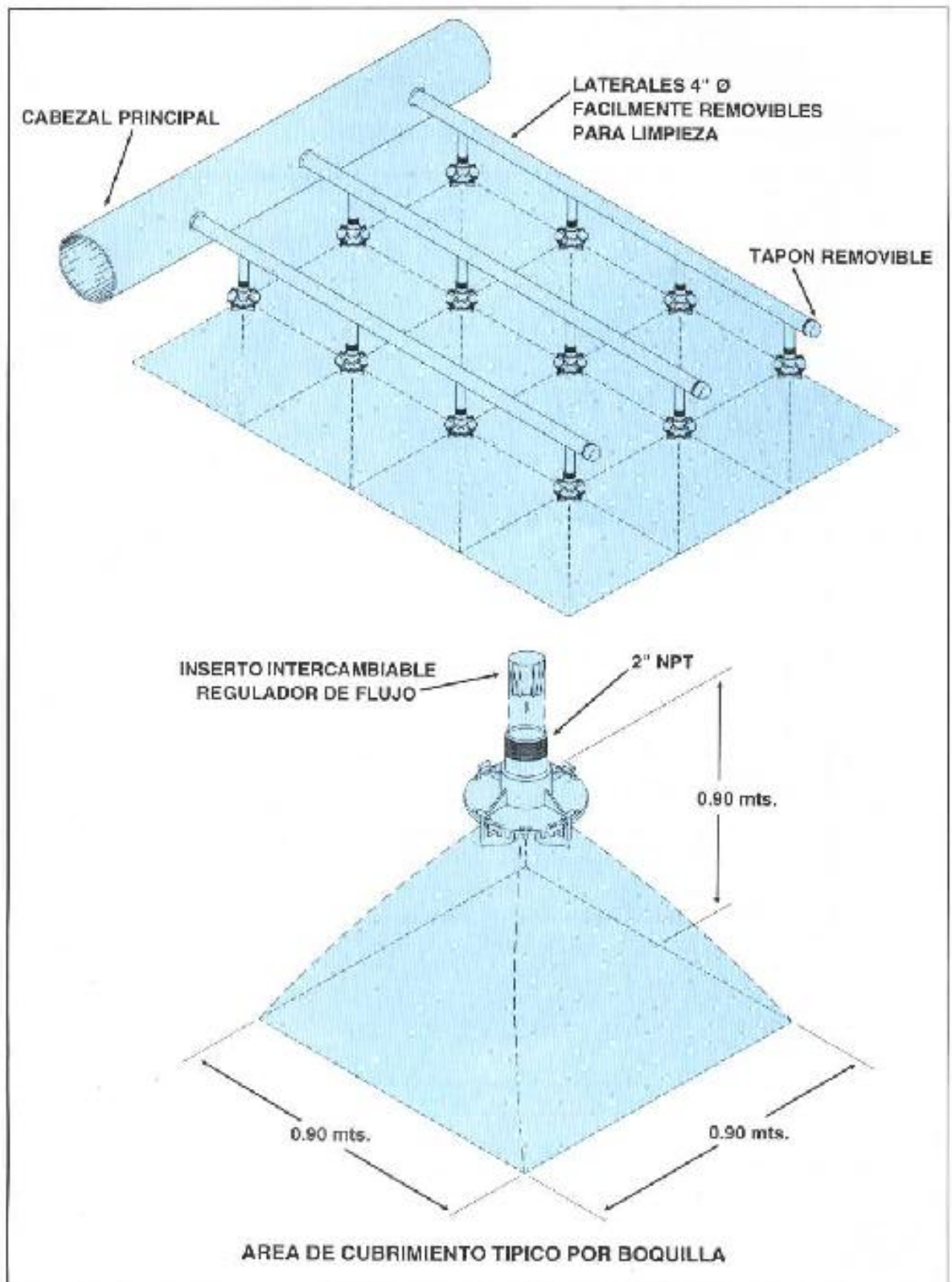
		MANUAL DE INGENIERIA	BOLETIN ING. 20751
		BOQUILLAS DE DISTRIBUCION DE AGUA PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO EDOSPINA S.A. Avda. Eldorado No. 100-57 Apartado Aéreo No. 151258 Teléfonos: 413-9713 & 413-8400 FAX: 413-9825 & 413-9865 Santafé de Bogotá - Colombia	

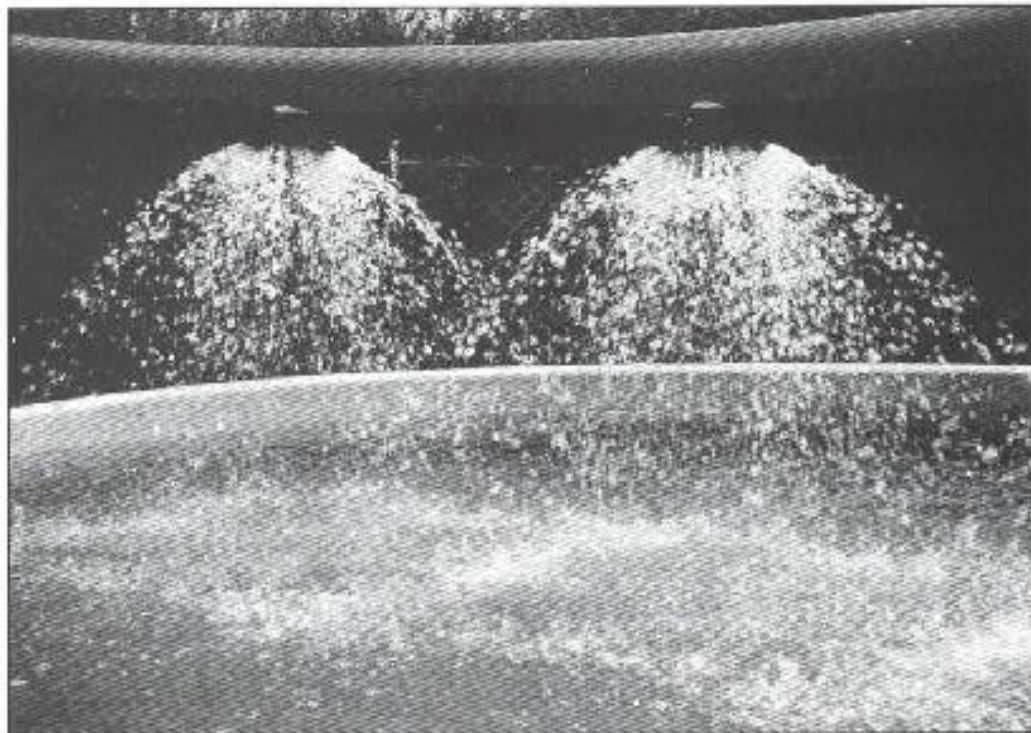


ORIFICIO DE INSERCIÓN

COLOR	DIAMETRO ORIFICIO
AMARILLO	1.01"
ROJO	1.09"
NARANJA	1.22"
VERDE	1.28"
BEIGE	1.44"
SIN ORIFICIO	1.35"

FABRICADAS EN POLIPROPILENO
INATASCABLES
BAJA PRESION DE OPERACION
TEMPERATURA DE OPERACION HASTA 93° C





EDOSPINA S.A. ofrece boquillas de distribución de agua para torres de enfriamiento, diseñadas especialmente para aplicaciones de enfriamiento de agua u otros líquidos contaminados con aceites, sólidos en suspensión o material orgánico, que pueden generar acumulaciones, depósitos o taponamientos por sedimentos que obstruyen los sistemas de distribución de agua y las superficies de transferencia de calor de una torre de enfriamiento.

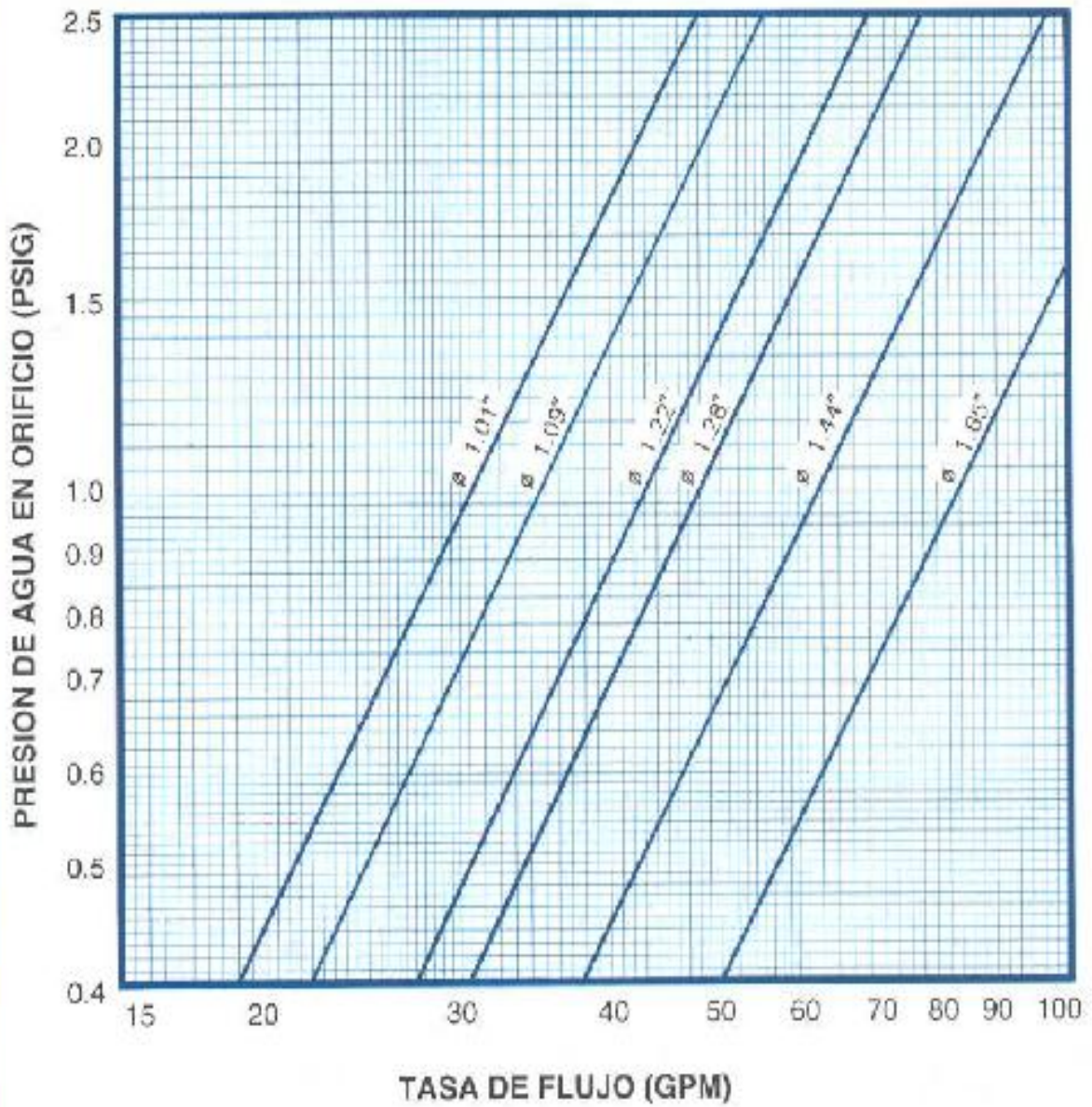
CARACTERÍSTICAS

- Las boquillas EDOSPINA se fabrican en polipropileno, son inatascables (orificios de descarga mayores a 1") y de baja presión de operación (menos de 2 PSI para su correcto funcionamiento).
- De conexión roscada de 2" NPT. Se instalan roscadas a los laterales de distribución de agua, de tal forma que esta distribución sobre el relleno sea completamente uniforme, sin dejar espacios muertos.

- Se ensamblan con un orificio de regulación de flujo intercambiable (disponibles en varios tamaños), para lograr una distribución balanceada y uniforme del flujo de agua en toda el área de la torre.
- Tanto las boquillas como sus insertos son inyectados en polipropileno resistente al ataque químico y biológico para una temperatura máxima continua de operación de 200 °F (93 °C).
- Adicionalmente este tipo de boquilla puede ser desmontada con facilidad para su inspección y limpieza.

Su instalación normalmente se diseña para centros de tres pies por tres pies (90 cms.) con una altura igual sobre el relleno de intercambio térmico. Lo cual produce una distribución del agua en forma piramidal cuadrada muy uniforme sobre el relleno de intercambio térmico. El flujo de agua deseado por unidad de área de relleno se puede variar fácilmente cambiando los orificios intercambiables de regulación de flujo. Esto simplifica enormemente el diseño e instalación del sistema de distribución de agua según los cambios de velocidad y pérdidas de presión en sistema de distribución.

BOQUILLAS DE DISTRIBUCION EDOSPINA CURVAS DE FLUJO



EDOSPINA S.A.

Avda. Eldorado No. 100-57 Apartado Aéreo No. 151258
Teléfonos: 413-9713 & 413-8400 Fax: 413-9825 & 413-9865
Santafé de Bogotá, Colombia

D. TORRE DE ENFRIAMIENTO MODELO FV-15



Bogotá D.C., Octubre 12 de 2011

110656-35036

Señores
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER UIS
Carrera 27 con Calle 9 Ciudad Universitaria
Bucaramanga/Santander

Atn.: Jonatan Ricardo Restrepo Garca
Chemical Engineer UIS Junior

Ref.: Torre de enfriamiento FV-15

En atención a su solicitud de cotización, con gusto presentamos nuestra oferta por la torre de enfriamiento en que ustedes están interesados.

Estamos ofreciendo una torre de enfriamiento modelo FV, de tiro inducido, en contra flujo, cuyas características y especificaciones técnicas generales están resumidas en el escrito y catálogos que se adjuntan.

La torre cotizada fue seleccionada bajo las siguientes características:

Flujo	13	GPM	
Temperatura de entrada (agua caliente)	112	°F	44.44 °C
Temperatura de salida (agua fría)	77	°F	25 °C
Temperatura de bulbo húmedo ambiente	75.20	°F	24 °C

Quedamos a su disposición para suministrar la información adicional que se requiera.

Atentamente,

Maria del Pilar Acosta
Asesor Comercial
EDOSPINA S.A.

Kra 7 No. 24-89 piso 45 Bogotá – Colombia
Tels: (571) 286 1919 – 282 9393 Fax 282 4014 – 282 8112
www.edospina.com – info@edospina.com.co
Nit: 890303642-9

TORRE DE ENFRIAMIENTO FV-15

Una (1) #19730 Torre de enfriamiento Edospina, tipo FV, modelo FV-15, de tiro inducido, fabricada en poliéster reforzado con fibra de vidrio, muy resistente a la corrosión.

La entrada de aire por la parte inferior, en todo el perímetro, facilita la instalación de esta torre, sin que se afecte su capacidad debido a posibles vientos que prevalezcan en un sentido o en otro.

El ventilador está acoplado directamente al motor, lo cual resulta en bajo mantenimiento, eliminando la necesidad de correas o engranajes. El diseño es tal, que cualquier posible mantenimiento futuro al relleno o al sistema de distribución de agua se hará muy fácilmente, a través del panel removible que hay en todas las torres, en la sección del relleno de contacto.

Las características principales de la torre ofrecida son:

- ◆ Cuerpo y bandeja (piscina) de recolección de agua fría, fabricados en resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, especial para esta aplicación, resistente a la corrosión.
- ◆ Alta resistencia estructural.
- ◆ El acabado exterior de la torre será completamente liso y bien terminado en gel-coat que contiene inhibidores de rayos ultravioleta y otros aditivos para protección del sol y el ambiente, libre de mantenimiento.
- ◆ El ventilador es de tipo "axial", con aspas múltiples en plástico reforzado, manzana de acople en aluminio, perfectamente balanceado y de diseño aerodinámico, para operación eficiente.
- ◆ El motor para el ventilador, con protección IP-65, es de 0.9 HP, 3 fases, 220/440 Voltios, totalmente cerrado, con lubricación permanente, acoplado directamente al eje del ventilador.
- ◆ Relleno de contacto (evaporador) del tipo película, en módulos ensamblados con láminas estampadas y termoformadas de PVC auto-extinguible, resistentes a las algas, a la corrosión, al ataque biológico y de alta eficiencia de intercambio.
- ◆ Las boquillas distribuidoras de agua son fabricadas en ABS, tipo centrífugo, inatascables, de servicio pesado, para distribuir el agua caliente en forma uniforme sobre el relleno, sin dejar zonas muertas.
- ◆ La torre tiene eliminadores de rocío en su parte superior, fabricados con PVC auto-extinguible, para minimizar las pérdidas por arrastre de gotas a menos del 0.005% del flujo de agua en recirculación.
- ◆ Las conexiones para entrada y salida de agua son en PVC, roscadas o unión Z.

Dimensiones y Pesos Aproximados:

Largo	: 1.02 m
Ancho	: 1.02 m
Alto	: 2.40 m
Peso de despacho	: 100 kilos
Peso en operación	: 340 Kilos

Favor referirse al boletín adjunto ING-19700, para mayor información sobre las dimensiones y características de la torre.

CONDICIONES COMERCIALES

1. VALOR DE LA PROPUESTA

Una (1) Torre de enfriamiento FV-15 \$8.788.221

NOTAS:

- ✓ El IVA se cobrará adicionalmente a la tasa vigente en el momento de la facturación.
- ✓ Somos **GRANDES CONTRIBUYENTES** según Resolución DIAN No. 2509 – 03 Diciembre 1993.
- ✓ Somos **AUTORRETENEDORES** según Resolución DIAN No. 00512 – 25 Enero 2005.
- ✓ Favor **NO** Efectuar Ningún Tipo de Retención a título de RENTA, IVA e ICA.

2. SITIO DE ENTREGA

Los equipos serán entregados en las instalaciones de la fábrica Edospina en Madrid Cundinamarca.

3. ALCANCE DE LA OFERTA

Nuestra oferta no incluye los siguientes aspectos, los cuales serán por cuenta del cliente:

- ✓ El flete y seguros de los equipos desde fábrica Edospina en Madrid Cundinamarca hasta sus instalaciones.
- ✓ La obra civil y el montaje de la torre, incluyendo todos los materiales de interconexión hidráulica, mecánica y eléctrica.

4. FORMA DE PAGO

50% Anticipo

50% Antes de la entrega de los equipos en fábrica Edospina para despacho.

5. TIEMPO DE ENTREGA

30 – 45 días contados a partir del pedido, recibo efectivo del anticipo y de la aclaración de todos los aspectos técnicos y comerciales.

6. VALIDEZ DE LA OFERTA

30 días