

Referencia


Gallardo, N. J., Céspedes Jiménez, C. E. y López Bonifaz, J. J. (2024). Simulación y evaluación de torres de enfriamiento de agua de tiro mecánico. *Revista Científica del Sistema de Estudios de Postgrado*. 7(2). 49-64.

DOI: <https://doi.org/10.36958/sep.v7i2.298>


Simulación y evaluación de torres de enfriamiento de agua de tiro mecánico

Simulation and evaluation of mechanical draft water cooling towers


Norberto Justiniano Gallardo

Docente investigador
Universidad Privada Domingo Savio, UPDS
Santa Cruz Bolivia
norberjust@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-0231-4210> 

Carlos Elio Céspedes Jiménez

Docente investigador
Universidad Privada Domingo Savio, UPDS
Santa Cruz Bolivia
ccarlos.eliocespedes@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-1959-3056> 

Juan Javier López Bonifaz

Docente investigador
Universidad Privada Domingo Savio, UPDS
Santa Cruz Bolivia
bonifaz1973@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-1308-5821> 

Recibido: 16/07/2024

Aceptado: 09/10/2024

Publicado: 26/11/2024

Resumen

OBJETIVO: abordar la importancia de la simulación computacional en el diseño y operación de torres de enfriamiento mecánicas, destacando la influencia de variables climatológicas y la eficiencia de enfriamiento. **MÉTODO:** Se emplearon los procedimientos de cálculo de Tchebychev, Ordenadas y Mickley, con un enfoque particular en la precisión del coeficiente de transferencia de masa, el cual fue validado utilizando datos experimentales. **RESULTADOS:** los cálculos revelaron diferencias significativas en los coeficientes de transferencia de masa y energía, lo que permitió desarrollar una fórmula específica para optimizar los sistemas de cálculo según las condiciones operativas. Estos resultados fueron validados mediante una correlación experimental, mostrando que la tasa de transferencia de masa está directamente influenciada por el flujo másico de agua y aire por unidad de área. **CONCLUSIÓN:** la simulación computacional y la evaluación de torres de

Las opiniones expresadas en el artículo son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente representan la posición oficial de la USAC y sus miembros. La obra está protegida por la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos emitida en el decreto No. 33-98 por el Congreso de la República de Guatemala.

enfriamiento de agua de tiro mecánico son herramientas clave para mejorar la eficiencia y el rendimiento de estos equipos. La correcta consideración de las variables climatológicas, la validación con datos experimentales y la determinación precisa del coeficiente de transferencia de masa son elementos esenciales. La comparación con otros métodos de cálculo evidenció que el método de Ordenadas es el más eficiente, lo que subraya la importancia de seleccionar el sistema de cálculo adecuado según las condiciones específicas de cada aplicación.

Palabras clave

simulación computacional, torres de enfriamiento mecánicas, variables climatológicas, eficiencia de enfriamiento

Abstract

OBJECTIVE: to address the importance of computational simulation in the design and operation of mechanical cooling towers, highlighting the influence of climatological variables and cooling efficiency. **METHOD:** the Tchebychev, Ordinate, and Mickley calculation procedures were applied, with particular emphasis on the accuracy of the mass transfer coefficient, which was validated using experimental data. **RESULTS:** the calculations revealed significant differences in the mass and energy transfer coefficients, allowing for the development of a specific formula to optimize the calculation systems based on operational conditions. These results were validated through experimental correlation, showing that the mass transfer rate is directly influenced by the mass flow rate of water and air per unit area. **CONCLUSION:** computational simulation and the evaluation of mechanical draft cooling towers are key tools for improving the efficiency and performance of these systems. Correct consideration of climatological variables, validation with experimental data, and precise determination of the mass transfer coefficient are essential elements. Comparison with other calculation methods showed that the Ordinate method is the most efficient, highlighting the importance of selecting the appropriate calculation system based on the specific conditions of each application.

Keywords

computational simulation, mechanical cooling towers, climatological variables, cooling efficiency

Introducción

La simulación y evaluación de las torres de enfriamiento de agua de tiro mecánico son fundamentales para el diseño eficiente y la operación óptima de estos equipos en la industria. La simulación computacional proporciona resultados precisos y confiables que pueden mejorar tanto el diseño como la operación de estas torres. La consideración de variables climatológicas y el uso de gráficos psicométricos son aspectos clave en este proceso.

Es importante verificar la precisión de los resultados obtenidos por simulación a través de la comparación con datos experimentales. Esto permite validar y ajustar los modelos computacionales utilizados en la simulación, asegurando así la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Además, uno de los parámetros fundamentales a considerar es el coeficiente de transferencia de masa. Este parámetro tiene un impacto directo en el proceso de enfriamiento y su determinación precisa es crucial para garantizar la eficiencia de la torre de enfriamiento.

El presente, es un estudio de ingeniería, desarrollado a partir de una carta psicométrica y cálculos efectuados en base a las ecuaciones utilizadas en el diseño de esta carta.

Metodología

El problema más común que enfrentan las Torres de Enfriamiento de agua de Tiro Mecánico es la pérdida de eficiencia y rendimiento debido a la acumulación de incrustaciones y sedimentos en el sistema de enfriamiento. Estas incrustaciones pueden obstruir los conductos de agua y reducir la transferencia de calor, lo que resulta en un menor enfriamiento del agua y un mayor consumo de energía. Además, la acumulación de sedimentos puede causar corrosión en las partes metálicas de la torre, lo que puede llevar a la falla prematura del equipo. Por lo tanto, es importante realizar un mantenimiento regular y adecuado de las Torres de Enfriamiento de agua de Tiro Mecánico para evitar estos problemas y garantizar un funcionamiento eficiente.

Se plantea la hipótesis, la precisión de la simulación de una torre de enfriamiento mecánica depende en gran medida del coeficiente global de transferencia de masa, y que la comparación de los resultados de la simulación con datos experimentales permita verificar la exactitud y veracidad de los resultados computacionales.

Y como variables: la variable dependiente, son los resultados de la simulación con datos experimentales y verificación de la exactitud y veracidad de los resultados computacionales. La variable independiente, es la precisión de la simulación de una torre de enfriamiento mecánica y la variable interviniente es el coeficiente global de transferencia de masa.

Los objetivos del estudio son los siguientes: Modelar y simular una torre de enfriamiento mecánica forzada del trabajo experimental a escala piloto desarrollado en el trabajo de investigación “Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales”. Analizar la transferencia de calor y materia en el proceso de enfriamiento del agua caliente que ingresa a la torre de enfriamiento, considerando los fenómenos de transferencia de materia y energía. Determinar el coeficiente global de transferencia de masa utilizando tres métodos diferentes y comparar los resultados obtenidos para evaluar su precisión y validez. Validar el modelo de simulación y los resultados obtenidos por medio de la comparación con datos experimentales desarrollados en una escala piloto. Analizar los resultados de la simulación a través de gráficas que muestren la variación de la humedad relativa y la temperatura del agua y del aire en el proceso de enfriamiento. Concluir sobre la cercanía y consistencia entre las curvas simuladas y las curvas experimentales, y evaluar el impacto del coeficiente de transferencia de masa en el rendimiento y eficiencia de la torre de enfriamiento.

Resultados y discusión

Modelo matemático y su estructura

El método de Merkel es una técnica utilizada para calcular la eficiencia de una torre de enfriamiento. Este método se basa en la relación entre el calor sensible y el calor latente en los balances de masa y energía. La eficiencia de la torre se calcula a partir de la relación entre el calor latente transferido y el calor total transferido. El método de Merkel fue propuesto por Merkel en 1925 con su trabajo, “Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure” y es considerado como la teoría básica de las torres de enfriamiento (Khan, et al., 2003).

Ecuación de diseño de Merkel

Las cinco ecuaciones básicas para un incremento de columna dz son:

Balance de agua

$$\begin{aligned} dm^{\circ}w &= m^{\circ}a \, dw \\ m^{\circ}w &= \text{Kg de agua/h} \\ m^{\circ}a &= \text{Kg de aire seco/h} \end{aligned}$$

Balance de entalpía

$$\begin{aligned} m^{\circ}wdhf &= m^{\circ}a \, di \\ hf &= \text{Kcal/Kg de agua} \\ i &= \text{Kcal/Kg de a.s} \end{aligned}$$

Ecuación de transferencia de calor en la fase líquida

La figura 1 ilustra una película de agua caliente de flujo vertical descendente con aire en contraflujo.

$$m^{\circ}wcpwdT_w = a_wacSdz(T_w - T_i)$$

$$S = \text{Área transversal, m}^2$$

$$a_w = \text{Coef. de transferencia de calor para la película de agua Kcal/m}^2 \text{ h } ^{\circ} \text{C.}$$

Ecuación de transferencia de calor la fase gaseosa

$$m^{\circ}accpm dT = a_a c S dz (T_i - T) \text{ donde } C_{pm} \approx \text{cte}$$

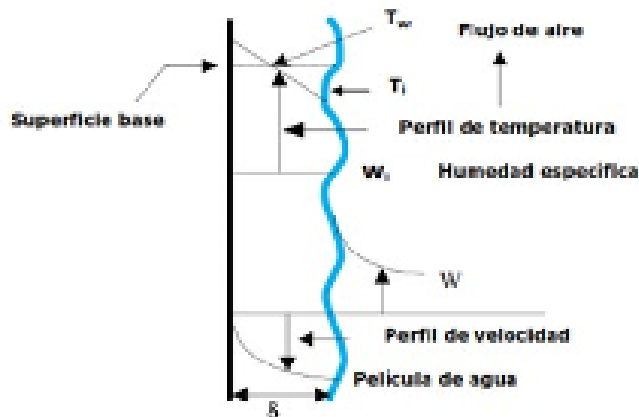
T = Temperatura del aire, ° C

C_{pm} = Calor específico húmedo (kcal/kg a.s. ° C).

a_a = Coeficiente de transferencia de calor (kcal/m² °C h).

Figura 1

Perfiles de velocidad, temperatura para una película de agua



NOTA: Nomenclatura para una torre de enfriamiento (Milosavjevic, 2001).

Ecuación de transferencia de masa

$$m^{\circ}adw = k_w a_m S (w_i - w) dz$$

Variación de la humedad (*Treybal*, et al, 1988).

Dónde:

k_w = Coeficiente de transferencia de masa (kg de a.s./m²h. m)

a_m = Área específica de transferencia de masa (m²/m³).

De acuerdo con el volumen de control considerando dz , la diferencia de calor dq puede expresarse en términos de la disminución de la entalpía de la cantidad total del agua o el aumento de la mezcla total del aire, ambas son iguales (Milosavljevic, et al, 2001).

$$dq = d(m^{\circ}wC_w T_w) = m^{\circ}adi = d(m^{\circ}wdhf)$$

El calor por difusión resulta de la evaporación del agua en el seno del aire:

$$dq_d = hfgkwamS(w_i - w)dz$$

hfg = Calor latente de vaporización, kcal/kg de agua ° C

El calor por convección para dz es: $dq_c = \alpha_{aac}Sdz(T_i - T)$

La ecuación resultante es: $dq = dq_d + dq_c$

$$m^{\circ}adi = hfg kwamS(w_i - w)dz + \alpha_{aac}Sdz(T_i - T)$$

Determinación de coeficientes de transferencia de calor

En el diseño de una torre de enfriamiento de agua si no se pueden conseguir los coeficientes obtenidas por medidas hechas sobre un equipo que se encuentra trabajando en una planta, se recurre a utilizar coeficientes obtenidos en un equipo planta piloto, o bien otros obtenidos mediante analogías entre la transferencia de calor y materia. La falta de datos es más bien el resultado de dificultades experimentales muy considerables. Por lo que este trabajo se enmarca en el análisis de tres métodos para la obtención de dichos coeficientes.

A continuación, se aplican distintos métodos para la determinación de los coeficientes de transferencia de materia apreciándose los errores asociados utilizando distintos métodos aplicados.

Método de Tchebycheff

Este método se basa en la integración numérica de las ecuaciones que rigen el sistema aire-agua, y se utiliza para determinar los valores de $Kwma/mw$ para las condiciones y variables experimentales utilizadas en los métodos anteriores.

La característica $Kwma/mw$ determinada por integración a través de este método se determina de la siguiente manera:

$$\frac{K_w m_a}{m_w} = C_{p_w} \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} \frac{dt}{H_w - H_A} \approx \frac{t_{w2} - t_{w1}}{4} \left[\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_3} + \frac{1}{H_4} \right]$$

T_w = Temperatura del agua, T_{w1} (entrada), T_{w2} (salida) (° C)

H_A = Entalpía del aire húmedo a la temperatura de bulbo húmedo (Kcal/Kg)

H_w = Entalpía del aire húmedo a la temperatura del agua (Kcal/Kg)

H_1 = Valor de $(H_w - H_A)$ a $T_{w2} + 0,1 (T_{w1} - T_{w2})$ en (Kcal/Kg)

H_2 = Valor de $(H_w - H_A)$ a $T_{w2} + 0,4 (T_{w1} - T_{w2})$ en (Kcal/Kg)

H_3 = Valor de $(H_w - H_A)$ a $T_{w2} - 0,4 (T_{w1} - T_{w2})$ en (Kcal/Kg)

H_4 = Valor de $(H_w - H_A)$ a $T_{w2} - 0,1 (T_{w1} - T_{w2})$ en (Kcal/Kg)

m° = relación del flujo de agua, m°_a (del aire), m°_w (del agua), (Kg/h)

De los datos experimentales y usando este método con el programa se determina el coeficiente de transferencia de materia de la torre en evaluación.

Método de ordenadas

Denominada también regla de los trapecios aplicada cuando la integración es difícil o no se puede efectuar en términos de funciones elementales.

$$\frac{K_w a Z S}{m_a} = \int_{i_1}^{i_2} \frac{di}{i^* - i} = NTU_w$$

NTU_w = Número de unidades de transferencia, método de ordenadas.

El valor de la integral, método de integración, se determina en el programa representando la inversa de $(i^* - i)$ frente i y determinando el área bajo la curva por medio del método de ordenadas entre los límites i_1 e i_2 .

$NTU_w = h [1/2 (y_0 + y_n) + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1}]$; $h = \text{Número de datos de la tabla}$, $y_0 = \frac{1}{i^* - i}$ 1er dato de la tabla de entalpía $y_n = \frac{1}{i^* - i}$, último dato de la tabla de entalpía Kg/Kcal,

El coeficiente de transferencia de materia en este estudio fue obtenido mediante el método de integración directa. Además, se asumió una relación de Lewis igual a uno, ya que el aire a la entrada de la torre no es húmedo ni caliente. La Tabla 1 del documento muestra los resultados de la determinación del coeficiente de transferencia de masa por el método de integración.

Tabla 1
 Resultados de la simulación y datos experimentales

		DATOS DE SALIDA		
Flujo de aire entrante (Kg/s)	0,0742	RESULTADOS SIMULACIÓN		
Temp. aire entrante (°C)	32	Temp. agua saliente (°C)		34,66
Temp. Bulbo Húmedo entrante (°C)	26,4			
Humedad relativa entrante (%)	65,00%	Humedad saliente (%)	Relativa	96,71%
Flujo del agua entrante (Kg/s)	0,1262	DATOS REALES		
Temperatura agua entrante (°C)	40,8	Temp. agua saliente (°C)		34,44
Área de la torre (m ²)	0,0625	Temp. aire saliente (°C)		34,9
Altura de la torre (m)	1,42	Humedad saliente (%)	Relativa	94,00%
Coeficiente de transferencia de masa (Kg/m ³ s)				1,4
Altura sobre el nivel del mar del sistema (m)				169

De carta entre psicométrica de elaboración propia se determina la línea de operación de la torre experimental considerando la presión barométrica para la altura sobre el nivel del mar de 169 m de 992,424 mmb (744,318 mm de Hg), permite determinar las condiciones del aire a la entrada y salida de la torre y que guarda relación con las propiedades del aire y cálculos que se efectúan en el programa desarrollado en el presente estudio.

Figura 2
 Carta psicométrica

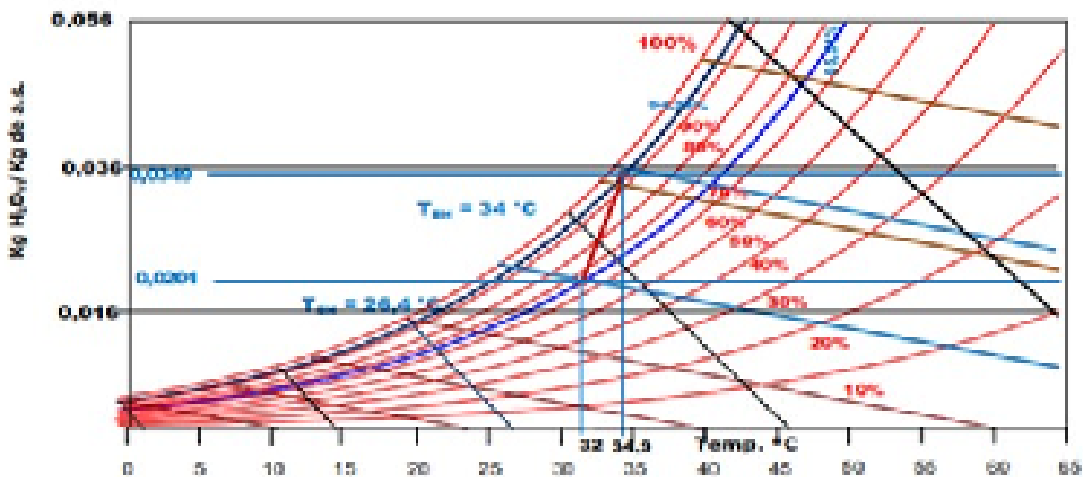
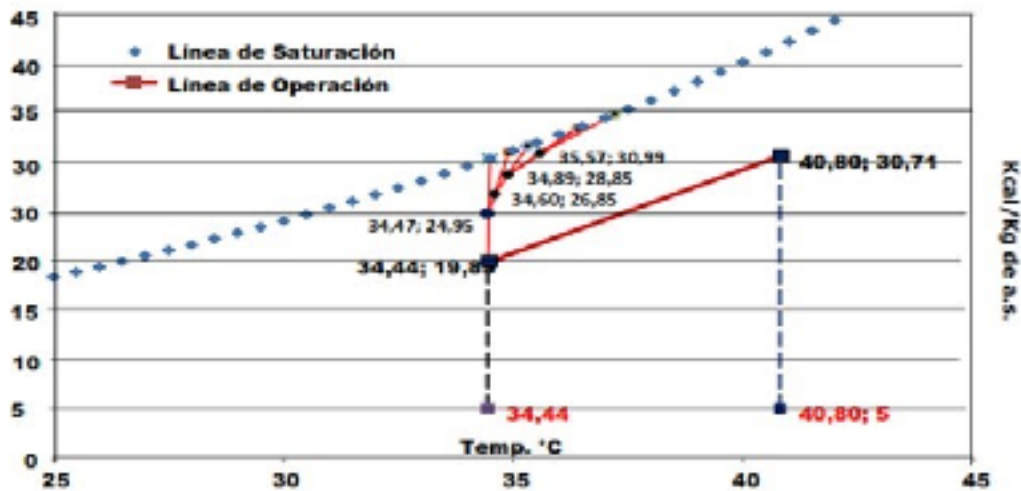


Figura 3

Comportamiento del aire en el interior de la torre



Nota: Método de Mickley, de Tabla 2.

Evaluación de las condiciones del aire en el interior de la torre

En la evaluación de la torre se determinan las temperaturas del agua y las temperaturas y humedades del aire, tanto a la entrada como a la salida, determinándose posteriormente la relación de caudales de ambas corrientes. La línea de operación para el sistema es trazada en el gráfico entalpía-temperatura. Las líneas de reparto son graficadas mediante el programa cuya construcción gráfica está en base a ecuaciones planteadas en el método de Mickley.

Lo que permite extraer las condiciones del aire en el interior de la torre, siendo importante para verificar si el mismo no se satura. Cuando el aire se calienta se satura a la salida de la torre y se descarga a la atmósfera, ocurre condensación. Esto puede causar una niebla densa que desciende sobre los alrededores afectando negativamente. Se efectuaron los cálculos obtenidos, empleando las ecuaciones empleadas en el diseño de la carta psicrométrica con las ecuaciones empleadas para el cálculo de diseño de torre de enfriamiento de tiro mecánico, éstos se compararon con los obtenidos en el trabajo de investigación "Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales" de Jader D. Alean, Gail A. Gutiérrez, Farid Chejne y Marlon J. Bastidas, determinándose un error de cálculo en el coeficiente de transferencia, determinado en la tabla 2 es: $KGa = 1,4 \text{ Kg/m}^3 \text{ s}$ por el método de integración, el valor corregido es $KGa = 3,664 \text{ Kg/m}^3 \text{ s}$.

Tabla 2

Determinación del coeficiente de transferencia de masa (KGa) por el método de integración

	T_w	I^* Kcal/Kg	HR %	I Kcal/Kg	$I^* - I$ Kcal/Kg	$(I^* - I)_{Prom}$ Kcal/Kg	dT_w	dT_w $(I^* - I)_{Prom}$
t_2	34,4	30,47	65,00 %	22,35	8,13	-	-	-
$t_2 + 0,1$	34,5	30,52	73,33 %	24,95	5,57	6,848	0,1	0,0146
$t_2 + 0,5$	34,9	31,15	81,75 %	26,85	4,30	4,933	0,4	0,0811
$t_2 + 0,9$	35,3	31,79	86,21 %	28,85	2,95	3,622	0,4	0,1104
$t_2 + 2$	36,4	33,63	90,73 %	30,99	2,63	2,790	1,1	0,3942
$t_2 + 2,9$	37,2	35,02	92,17 %	32,80	2,22	2,425	0,8	0,3299
$t_2 + 4,9$	39,3	38,94	93,67 %	36,73	2,21	2,213	2,1	0,9489
t_1	40,8	42,00	94,32 %	39,91	2,09	2,149	1,5	0,6981
$K_G a A Z / C_w L = dT_w / (I^* - I)_{promedio} =$								2,5772

$$\frac{K_G a A Z}{C_L L} = 2,5772 \frac{^\circ C}{Kcal/Kg} \quad \Rightarrow \quad K_G a = 3,665 \frac{Kg}{m^3 s}$$

Tabla 3

Determinación del coeficiente de transferencia de masa (KGa) por el método de Ordenadas

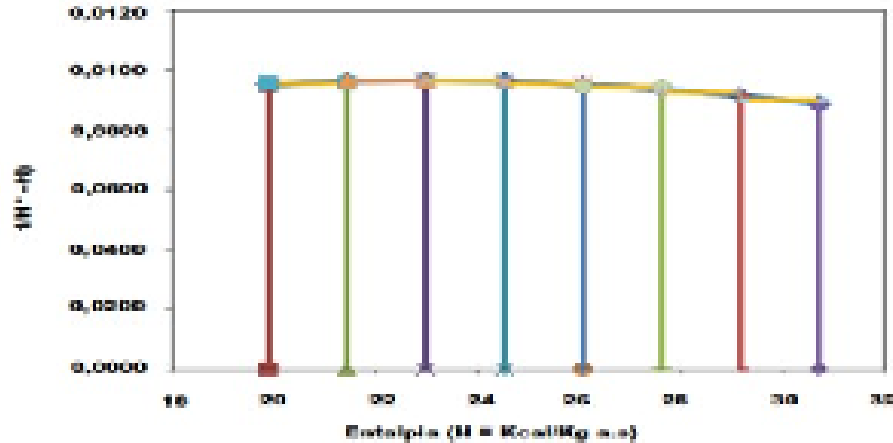
Temp., del H ₂ O	H*	H	H* - H	1/ (H* - H)	dH	1(H* - H)	Integral	% Humedad	
t_2	34,44	30,376	19,89	10,48	$Y_0 = 0,095395$			65,10%	
$t_2 + \Delta t$	35,35	31,825	21,44	10,39	$Y_1 = 0,096281$	1,5453	0,0958	0,1481	71,20%
$t_2 + 2\Delta t$	36,26	33,338	22,98	10,35	$Y_2 = 0,096585$	1,5453	0,0964	0,1490	77,20%
$t_2 + 3\Delta t$	37,17	34,917	24,53	10,39	$Y_3 = 0,096266$	1,5453	0,0964	0,1490	82,00%
$t_2 + 4\Delta t$	38,07	36,567	26,07	10,49	$Y_4 = 0,095305$	1,5453	0,0958	0,1480	86,00%
$t_2 + 5\Delta t$	38,98	38,292	27,62	10,67	$Y_5 = 0,093707$	1,5453	0,0945	0,1460	90,00%
$t_2 + 6\Delta t$	39,89	40,094	29,17	10,93	$Y_6 = 0,091505$	1,5453	0,0926	0,1431	94,50%
$t_2 + 7\Delta t$	40,80	41,978	30,71	11,27	$Y_7 = 0,088752$	1,5453	0,0901	0,1393	96,00%
$\Sigma =$							1,0226		

$$NTU_w = h \left[\frac{1}{2} (Y_0 + Y_n) + Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{n-1} \right] = 0,8803$$

Utilizando los datos anteriores en la aplicación de este método utilizando el mismo número de divisiones, tal como se muestra en el cuadro anterior y se aprecia en el siguiente diagrama.

Figura 4

Determinación del N° de unidades de transferencia por el método de las ordenadas



Nota: Determinación del N° de unidades de transferencia por el método de las Ordenadas, de Tabla 3.

$$NTUW = 1,0226Z = NTUW \times HOW \quad 1,4 = 1,0226 \times \frac{267,12}{0,0625 \times K_y a}$$

$$K_y a = 3077,71 \text{ Kg aire/h m}^3 = 0,8549 \text{ Kg aire/m}^3 \text{ s}$$

Tabla 4

Determinación del coeficiente de transferencia de masa (KGa) por el método de integración Tchebycheff.

Temperatura del H ₂ O	H _w =Entalpia del aire húmedo a T _w	H _A	(H _w - H _A)	1/ (H _w - H _A)	dt	1/(H _w -H _A)	Integral
t _{w2}	34,44	30,376	27,73	H _A = 2,65	0,3777		
t _{w2} + 0,1(t _{w2} - t _{w1})	35,08	31,384	27,93	H ₁ = 3,46	0,2893	0,6360	0,3335
t _{w2} + 0,4(t _{w2} - t _{w1})	36,98	34,596	28,52	H ₂ = 6,07	0,1646	1,9080	0,2269
t _{w2} - 0,4(t _{w2} - t _{w1})	38,26	36,906	28,92	H ₃ = 7,99	0,1252	1,2720	0,1449
t _{w1} - 0,1(t _{w2} - t _{w1})	40,16	40,650	29,51	H ₄ = 11,14	0,0898	1,9080	0,1075
t _{w1}	40,80	41,978	29,71	H _w = 12,27	0,0815	0,6360	0,0857
				Σ (1/H₁ +....1/H₄)	0,6689	Σ =	1,0890

$$\frac{KaV}{L} = C_w \int_{t_{W1}}^{t_{W2}} \frac{dt}{H_W - H_A} \approx \frac{t_{W2} - t_{W1}}{4} \left[\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_3} + \frac{1}{H_4} \right]$$

$$\frac{KaV}{L} = 1,089 \times \frac{L}{V} = 1,089 \frac{Kg \text{ aire}}{Kg \text{ de } H_2O} \times 7.269,12 \frac{Kg H_2O}{hm^2} \times \frac{1m^2}{1,42m^3}$$

$$\frac{KaV}{L} = 5.574,66 \frac{Kg \text{ aire}}{hm^3} = 1,5485 \frac{Kg \text{ aire}}{m^3 s}$$

En la tabla 5 se detallan los coeficientes obtenidos en el programa para los datos de diseño y para las condiciones de operación obtenidos.

Tabla 5

Datos de coeficientes estimados mediante programa de simulación

Método	Coeficiente		
Tchebycheff	5.705,23	Kg aire/ h m ³	1,585 Kg/s m ³
Ordenadas	3.077,71	Kg aire/h m ³	0,855 Kg/s m ³
Mickley	7.269,12	Kg aire/h m ³	2,0192 Kg/s m ³
Dato	5.040,00	Kg aire/h m ³	1,400 Kg/s m ³

Del trabajo experimental “Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental” (Villa, at el, 2020).

En dicho estudio empleado se obtiene la siguiente correlación:

$$Kx_a = 0,31 (m^{\circ} \text{agua}/\text{área}) 1,35 (m^{\circ} \text{aire}/m \times \text{Área}) 0,168$$

Dónde:

K_x_a: Tasa de transferencia de masa (Kg aire/m³ s)

Esta correlación es válida para los siguientes rangos:

Flujo másico de agua por unidad de área: desde 0 hasta 10,5 Kg de agua/m² s.

Flujo másico de aire por unidad de área: desde 0 hasta 5 Kg de aire/m² s.

Tabla 6

Datos de la torre empleada para la simulación

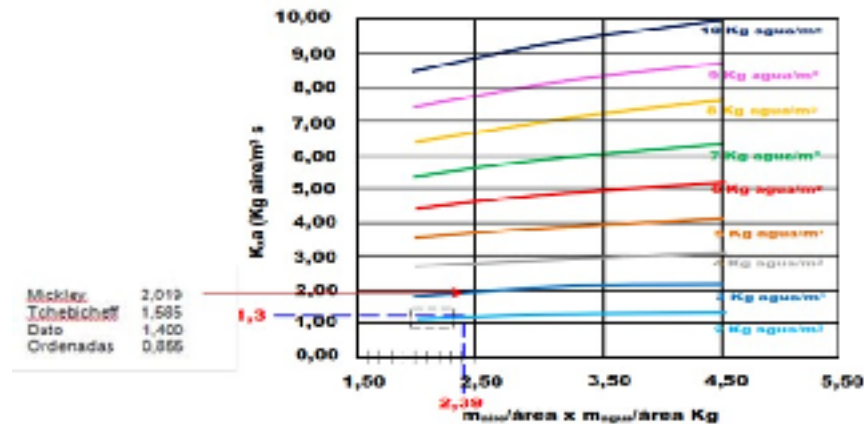
S	m ^o aire	m ^o agua	m ^o aire/S	m ^o agua/S	m ^o aire/S x m ^o agua/s
m ²	Kg aire/s	Kg H ₂ O/s	Kg aire/s-m ²	Kg H ₂ O/s-m ²	
0,0625	0,0742	0,1262	1,1872	2,0192	2,3972

$$K_{xa} = 0,31 (2,0192)^{1,35} (1,1872)^{0,168} = 0,82389$$

Con la anterior correlación se obtiene la Figura 5, gráfico para varias combinaciones de flujo másico de agua y aire por unidad de área.

Figura 5

Tasa de transferencia de masa en función del flujo másico de agua y aire



Conclusiones

La simulación computacional de una torre de enfriamiento y su comparación con datos experimentales es de gran importancia para verificar la exactitud y veracidad de los resultados, lo que puede tener aplicaciones académicas y prácticas en el diseño y la operación de equipos de enfriamiento. En este estudio de investigación el método de Tchebicheff se determinó un coeficiente de transferencia de masa de 1,585 Kg aire/m³ s y de 0,855 Kg aire/m³ s por el método de las ordenadas que se consideran apreciables respecto al valor de 1,4 del dato experimental de la torre experimental empleada en el trabajo de investigación “Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales. (Alean, et. al., 2009).

El coeficiente de transferencia de materia por el método de las ordenada de 0,855 Kg/m³ s tiene una aproximación al valor estimado en el trabajo experimental “Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental” (Villa Jadán Santiago Francisco, 2020), empleando la correlación: $K_{xa} = 0,31 (m^{\circ}\text{agua}/\text{área})^{1,35} (m^{\circ}\text{aire}/\text{área})^{0,168} = 0,82389 \text{ Kg/m}^3 \text{ s}$ que es muy próximo a dicho valor.

Resaltar la importancia de la simulación computacional en el análisis y diseño de torres de enfriamiento mecánicas, así como la relevancia del coeficiente de transferencia de masa en el proceso de enfriamiento.

En figura 5 para la relación $(m^{\circ}\text{aire}/\text{área}) \times (m^{\circ}\text{agua}/\text{área})$ de 2,3972 de la torre experimental, y los valores de los coeficientes determinados de los métodos empleados (Tchebicheff, de las Ordenadas y del dato experimental base del presente estudio), dan valores próximos al estimado a la correlación 1,3 y el método de Mickley un coeficiente alto para un flujo de 3 Kg agua/m².

Referencias

Alean, J. D., Gutiérrez, G. A., Chejne, F., & Bastidas, M. J. (2009). Simulación de una torre de enfriamiento mecánica comparada con curvas experimentales. *Información tecnológica*, 20(3), 13-18. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000300003>

Milosavljevic, N., & Heikkilä, P. (2001). Un enfoque integral para el diseño de torres de enfriamiento. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 21(9), 899-915. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00078-8)

Treybal, R. E. (1988). DE MASA. "Operaciones de transferencia de masa", 2e, operaciones-de-transferencia-de-masa-robert-e-treybal-libre.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net)

Villa Jadán, S. F. (2010). Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental (Bachelor's thesis) <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/862/1/1632.pdf>

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Privada Domingo Savio (UPDS - SC), por el apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

Sobre los autores

Norberto Justiniano Gallardo

Docente investigador de la Universidad Privada Domingo Savio. Es Ingeniero químico de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, con experiencia en procesos industriales y tiene 25 años como docente universitario.

Carlos Elio Céspedes Jiménez

Ingeniero Industrial, consultor independiente, con 16 años como docente universitario, para UTEPSA, (Universidad Técnica Privada de Santa Cruz), UPDS, (Universidad Privada Domingo Savio), docente investigador, miembro del comité científico en la Universidad Privada Domingo Savio, UPDS, Par Evaluador de artículos científicos para la revista “3i”, del área de Tecnología de la UPDS, ex Gerente general, de YPFB Aviación-Nacionalizada, Ex gerente de Producción en Avícola Integral srl, Consultor para QUANTUM Ingeniería, desarrollando la ingeniería de ampliación de todas las plantas de almacenamiento de Combustible para aviones, en Bolivia, director general de ACADEPEC Internacional.

Juan Javier López Bonifaz

Docente investigador de la Universidad Privada Domingo Savio. Es Ingeniero Industrial de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno con experiencia en procesos industriales con 10 años como docente universitario UPDS y es asesor de proyectos en educación superior.

Financiamiento de la investigación

Proyecto de investigación, sin financiamiento.

Declaración de intereses

Declaramos no tener ningún conflicto de intereses, que puedan haber influido en los resultados obtenidos o las interpretaciones propuestas.

Declaración de consentimiento informado

El estudio se realizó respetando el Código de ética y buenas prácticas editoriales de publicación.

Derecho de uso

Copyright (c) (2024) Norberto Justiniano Gallardo, Carlos Elio Céspedes Jiménez y Juan Javier López Bonifaz

Este texto está protegido por la [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](#)



Este texto está protegido por una licencia
[Creative Commons 4.0](#).

Es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente, siempre que cumpla la condición de atribución: debe reconocer el crédito de una obra de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace.