

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-06

Artículos

**Metodologías y estudios en torres de enfriamiento
húmedas a contraflujo con enfoque en la reducción de
las pérdidas de agua por evaporación y arrastre**
**Methodologies and studies on counterflow wet cooling
towers: strategies for reducing water losses through
evaporation and drift**

Carlos René Ramírez-Ferreira¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1429-0977>

Carlos Rubio-Maya², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7676-9145>

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 1180831e@umich.mx

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, carlos.maya@umich.mx

Autor para correspondencia: Carlos René Ramírez-Ferreira, 1180831e@umich.mx

Resumen

El presente trabajo muestra una comparativa de estudios realizados a torres de enfriamiento húmedas a contraflujo para sintetizar aportes, estudios y metodologías que permitan dar un contexto reciente al estado actual de la investigación en este campo. Este trabajo parte desde los fundamentos básicos en torres de enfriamiento, sus secciones de estudio y problemáticas a resolver, con un enfoque hacia el consumo de agua en los procesos evaporativos por transferencia de calor en gotas de agua para calcular las pérdidas de agua por evaporación y arrastre. Se revisan y discuten los fundamentos de torres de enfriamiento y aplicaciones generales, los métodos comunes de investigación en torres de enfriamiento utilizados, con énfasis en las características particulares según el tipo de estudio, ya sea desde el punto de vista de diseño de la torre de enfriamiento, las características que afectan su funcionamiento o desempeño, los fundamentos de análisis energético, las sugerencias en la realización de estudios numéricos y simulaciones por CFD, además de su validación correspondiente mediante estudios experimentales. La información recopilada en este trabajo proporciona una visión general y simplifica los avances esenciales en la reducción de las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo, las características y tendencias en el desarrollo de modelos matemáticos computacionales y recomendaciones para llevar a cabo estudios teóricos y experimentales para comprender más ampliamente los mecanismos de transferencia de calor y masa.

Palabras clave: torre de enfriamiento a contraflujo, gotas de agua, evaporación, arrastre.

Abstract

This paper presents a comparison of studies carried out on counterflow cooling towers to synthesize contributions, studies and methodologies that provide a recent context for the current state of research in this field. This work starts from the basic fundamentals of cooling towers, their study sections and problems to be solved, with a focus on water consumption in evaporative processes by heat transfer in water droplets to calculate water losses by evaporation and drag. The fundamentals of cooling towers and general applications are reviewed and discussed, as well as the common research methods used in cooling towers, emphasizing the particular characteristics according to the type of study; whether from the point of view of cooling tower design, the characteristics that affect its operation or performance, the fundamentals of energy analysis, suggestions for carrying out numerical studies and CFD simulations, in addition to their corresponding validation through experimental studies. The information gathered in this paper provides an overview and simplifies the essential advances in reducing evaporation and drag losses in counterflow cooling towers, the characteristics and trends in the development of computational mathematical models, and recommendations for carrying out theoretical and experimental studies for better understanding of heat and mass transfer mechanisms.

Keywords: Counter flow cooling tower, water droplets, evaporation, drag.

Recibido: 25/09/2024

Aceptado: 21/01/2025

Publicado *ahead of print*: 30/01/2025

Versión final: 01/11/2025



Introducción

Las torres de enfriamiento son componentes auxiliares cruciales en muchos sistemas de generación eléctrica y en diversas industrias, como la química, petroquímica, metalúrgica, de refinación y de fertilizantes (Khamis & Hassab, 2014). Su función principal es disipar el calor residual de los procesos térmicos hacia el entorno. Esto se logra mediante el rechazo de calor y la convección entre las gotas de agua y el aire ambiental, lo que permite que una pequeña porción de agua se evapore en el flujo de aire que entra a la torre. En general, el proceso de evaporación de las gotas de agua ha sido objeto de numerosas investigaciones centradas en comprender y caracterizar los fenómenos físicos de transferencia de calor y masa (Klimanek & Bialecki, 2009). Para estudiar tales fenómenos es esencial entender la interacción e influencia entre la fase continua (aire) y la fase dispersa (agua).

El enfriamiento del agua se logra mediante una combinación de transferencia de calor sensible y latente, lo que provoca la evaporación del agua y el arrastre del fluido, para disipar finalmente el calor hacia la atmósfera. En la Figura 1 se muestra un esquema representativo de una torre de enfriamiento húmeda a contraflujo y sus componentes esenciales, como la zona de relleno, la zona de aspersion, el sistema de distribución de agua caliente, el tanque colector, el sistema de circulación de aire, y las entradas y salidas de aire.

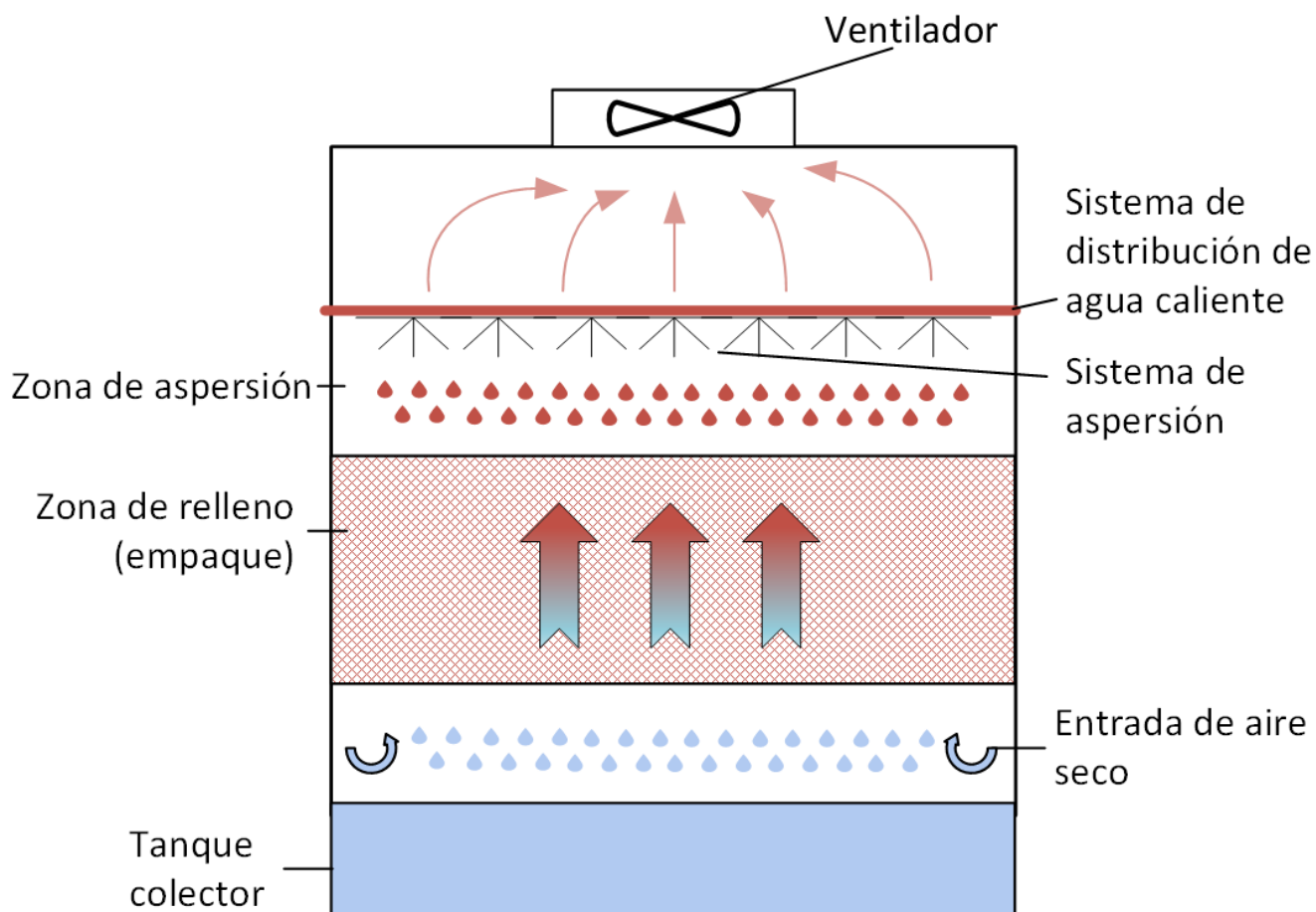


Figura 1. Esquema básico de torre de enfriamiento húmeda a contraflujo.

Las torres de enfriamiento húmedas a contraflujo cuentan con tres zonas de interés para comprender su operación y desempeño: zona de aspersión, zona de relleno y zona de lluvia. La zona de aspersión se caracteriza por el sistema de distribución de agua y por lo general consiste en un conjunto de aspersores en línea o una matriz dependiendo de la geometría de la torre (Vitkovic, 2015). Los aspersores de agua son ampliamente utilizados en varias aplicaciones de ingeniería, como control de ductos, extinción de incendios y enfriamiento del núcleo del reactor

nuclear (Zunaid, Murtaza, & Gautam, 2017); el agua se esparce de manera uniforme sobre la superficie del relleno de la torre, para evitar zonas de flujo muertas; los aspersores se encuentran a una separación promedio de 20 cm entre la boquilla del aspersor y el relleno (Collin, Boulet, Parent, & Lacroix, 2007), como se observa en la Figura 2. Existen tres parámetros en el sistema de aspersión que juegan un papel crucial para el enfriamiento: el tamaño de gota, la velocidad de la gota y su flujo volumétrico; además, la correcta distribución espacial del agua influye en la eficiencia operativa de la torre de enfriamiento (Li *et al.*, 2018; Liang & Mudawar, 2017).

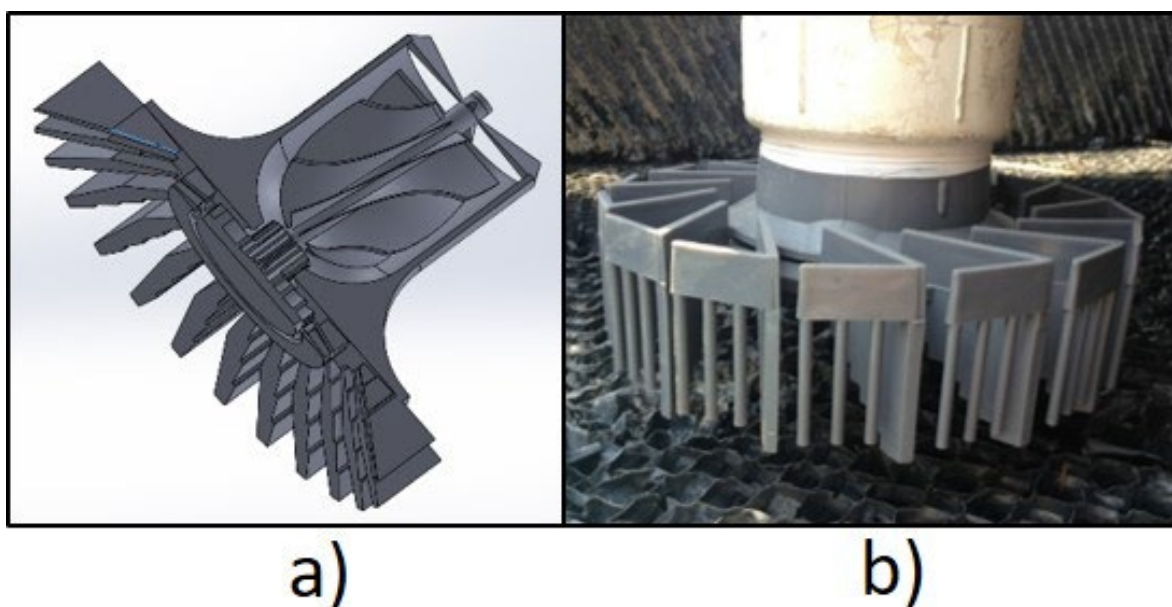


Figura 2. Aspersor de una torre de enfriamiento: a) propuesta CAD, b) Prototipo instalado.

Parte de las gotas que salen de la zona de aspersión tienden a escapar a gran velocidad por la parte superior de la torre de enfriamiento. Estas pequeñas gotas, conocidas como emisiones por arrastre (bruma),

contienen minerales, bacterias y químicos dañinos que pueden corroer componentes metálicos en las instalaciones. Además, en algunos casos, son responsables de la deposición de sales, formación de hielo (en invierno) y enfermedades como legionelosis (enfermedad del legionario) (Chin, Rosli, Wee, & Ngeow, 2005; Ruiz, Kaiser, & Lucas, 2017). El eliminador de bruma es un dispositivo que remueve las gotas de agua arrastradas por la corriente de aire que sale de la torre de enfriamiento, con lo cual evita que se dispersen en el entorno y se reduce la emisión de contaminantes al medio ambiente. Este dispositivo consiste en un arreglo de rejillas acanaladas por las cuales pasa el flujo de aire circulante, como se muestra en la Figura 3 (Yang, Stratman, & Rasmussen, 2015; Zamora & Kaiser, 2011). El eliminador de bruma requiere limpieza con agua a presión para su mantenimiento, que mejora la efectividad del agua tratada con químicos, previene incrustaciones y reduce riesgos para el entorno (Ruiz *et al.*, 2016).



Figura 3. Eliminador de bruma.

La zona de relleno (empaquete o empaquetamiento) en una torre de enfriamiento constituye un componente crítico diseñado para maximizar el contacto entre el flujo de agua caliente entrante y la corriente de aire frío ascendente, a fin de promover eficientemente los procesos de transferencia de calor y masa. Esta zona consta de una estructura de elevada área superficial específica, comúnmente fabricada con materiales resistentes a la corrosión y de baja conductividad térmica, tales como plásticos, fibra de vidrio o materiales cerámicos. La configuración del relleno puede presentar diversas geometrías, que incluye láminas onduladas, empaquetamientos de anillos o estructuras de panal de abeja. La altura característica desde el sistema de aspersion hasta la parte superior del relleno es de unos 20 cm, independientemente de la capacidad de la torre de enfriamiento (Qureshi & Zubair, 2006). La diferencia de temperatura entre el agua a la entrada y salida de la torre de enfriamiento se conoce como rango de la torre de enfriamiento (Llano-Restrepo & Monsalve-Reyes, 2017). La eficiencia de transferencia de calor y masa en la torre de enfriamiento depende sobre todo de la capacidad del relleno, ya que en esta zona se lleva a cabo la mayor parte de la transferencia de calor, con lo que se promueve el máximo contacto entre las fases y aumenta el tiempo de residencia del agua dentro de la torre de enfriamiento (El-Wakil, 1985; Hensely, 2011).

Por debajo de la zona de relleno se encuentra la denominada zona de lluvia, que permite un flujo de aire uniforme hacia el relleno. La altura de la zona de lluvia se diseña lo suficientemente grande como para garantizar un flujo de aire uniforme, aunque la mayoría de las torres de enfriamiento no supera los 80 cm. En la zona de lluvia se forman gotas y chorros debido al goteo de agua desde las rejillas del relleno, y el radio

de estas gotas es considerablemente mayor en comparación con las de la zona de aspersión. Sin embargo, una parte significativa de la transferencia total de calor y masa, un aproximado entre el 10 y 20 %, ocurre en la zona de lluvia (Qureshi & Zubair, 2006). Por otro lado, las relaciones existentes para describir estos fenómenos de transporte tienden a ser incorrectos o limitados para un rango muy pequeño en ciertas variables (De-Villiers & Kroger, 1999); algunas investigaciones sobre las características de la zona de lluvia tampoco logran incorporar los efectos de la deformación de las gotas y el desprendimiento de masa (Miura, Miura, & Ohtani, 1977), lo que implica diámetros pequeños en las gotas y números de Reynolds menores a 2 000, o un error alrededor del 12 % en caso de omitir las pérdidas por evaporación (Nahavandi & Serico, 1975).

En la actualidad, se dispone de un amplio abanico de herramientas numéricas que permiten simular los fenómenos de transporte involucrados en la representación del funcionamiento de una torre de enfriamiento. Estas herramientas posibilitan el desarrollo e implementación de nuevas metodologías en los procesos de enfriamiento. Para simular matemáticamente una torre de enfriamiento se requiere la solución simultánea de tres relaciones fundamentales: la ecuación de balance de energía, una relación correspondiente a las características del relleno y una teoría de diseño térmico (Thulukkanam, 2013). Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre torres de enfriamiento que trascienden el simple mejoramiento energético de la estructura. Estas investigaciones abordan preocupaciones globales, que incluyen el cambio climático, la dependencia de combustibles fósiles y, de manera más reciente, la escasez de agua (Bauer *et al.*, 2014).

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión exhaustiva de las metodologías y estudios existentes orientados a la reducción de las pérdidas de agua por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo. La revisión buscará identificar y analizar de forma crítica las estrategias más efectivas y sostenibles para mitigar este fenómeno y mejorar la eficiencia de estos sistemas de refrigeración industrial. Además, se analizará en profundidad el funcionamiento de las torres de enfriamiento, incluyendo los principios termodinámicos, los fenómenos de transferencia de calor y masa, los modelos matemáticos y numéricos empleados, el uso de herramientas CFD, las técnicas experimentales para la validación de resultados y las aplicaciones relacionadas con el estudio de la evaporación en gotas de agua. Ello permitirá establecer un estado del arte reciente en cuanto las líneas de investigación que pueden derivarse a partir del estudio en torres de enfriamiento enfocado a las pérdidas por evaporación y arrastre. El trabajo está organizado de la siguiente forma: se definen la operación y características de torres de enfriamiento; se abordan las metodologías y estudios más utilizados, desde el enfoque en global de la torre de enfriamiento o su análisis de cada equipo o zona en particular, destacando el modelado numérico, su análisis computacional y su validación experimental, a escala real o escala laboratorio, y los puntos clave destacados por los investigadores en cuanto a suposiciones para llegar a sus resultados; por último se revisan de manera detallada las características particulares para la validación experimental de los modelos numéricos, donde se especifican las dimensiones y geometrías utilizadas a escala laboratorio.

Efectos de la humedad relativa y temperatura de bulbo seco

Para garantizar un funcionamiento óptimo de las torres de enfriamiento húmedas es importante considerar dos propiedades principales relacionadas con la temperatura del aire: la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo, esta última influenciada por la humedad presente en el aire ambiente, ya que estas propiedades lo determinan.

La disminución de la temperatura del agua variará con la temperatura del punto de rocío ambiente. Cuanto más bajo sea el punto de rocío, mayor será la diferencia de temperatura entre el agua que entra y sale de la torre. Otra regla general para calcular la tasa de evaporación de una torre de enfriamiento es la siguiente: la evaporación equivale a tres galones por minuto por cada 100 "toneladas" de carga de enfriamiento colocada en la torre (DEQ, 2009). El término "tonelada", cuando se utiliza para describir la capacidad de la torre de enfriamiento, equivale a 12 000 Btu por hora de calor eliminado por la torre.

La temperatura de bulbo húmedo desempeña un papel crítico, al establecer el límite para la transferencia de calor entre las fases del proceso y al incrementar las pérdidas de agua debido a la evaporación. Afectada por la humedad en el aire ambiente, dicha temperatura desempeña un papel crítico en el diseño y funcionamiento eficiente de las torres de enfriamiento. Su determinación exacta es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en la transferencia de calor y la conservación del agua durante el proceso de enfriamiento, y para la reducción del costo operativo de la torre de enfriamiento debido a la reducción de la masa total de agua evaporada para ciertas condiciones ambientales invernales (Papaefthimiou, Rogdakis, Koronaki, & Zannis,

2012). Lucas, Martínez, Ruiz, Kaiser y Viedma (2010) demostraron que existe una fuerte influencia en la temperatura ambiente en la deposición y dispersión de la deriva en la torre de enfriamiento. La investigación de Stull (2011) proporciona una ecuación para determinar la temperatura del bulbo húmedo en relación con la temperatura del aire y la humedad relativa (%HR). Esta ecuación se obtiene de un ajuste empírico que abarca valores de humedad relativa comprendidos entre el 5 y 99 %, así como temperaturas que oscilan entre -20 y 50 °C, además de los valores resultantes de %HR, los muestra o representan conforme a gráficos similares a la Figura 4 a partir de las ecuaciones implementadas, y pueden ser utilizadas para diferentes presiones de operación.

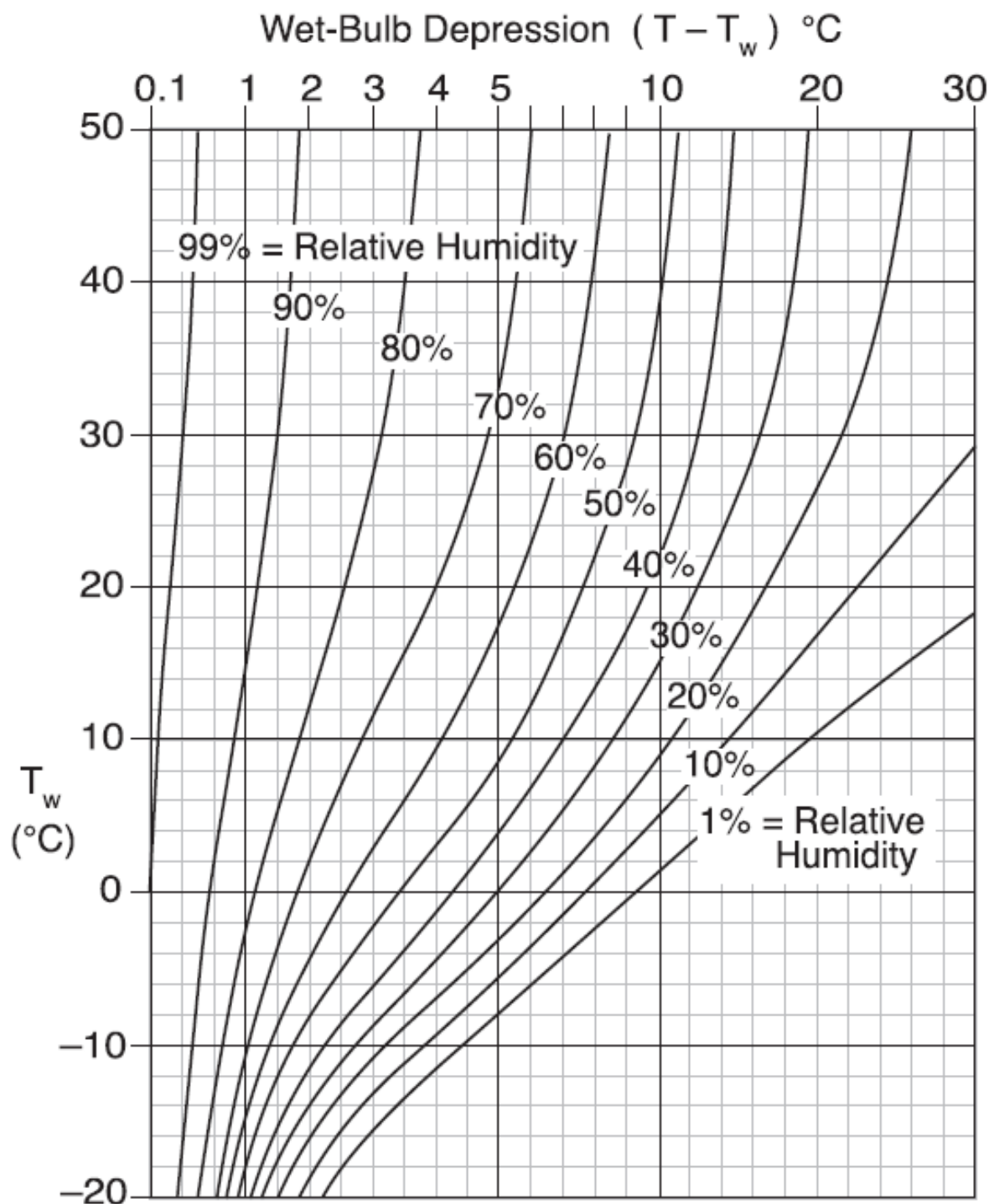


Figura 4. Carta psicrométrica de Stull (2011), válida para presión de 101.325kPa.

Pérdidas de agua por evaporación y arrastre

La mayoría de las centrales eléctricas utiliza torres de enfriamiento como tecnología preferida debido a su eficiencia, pero su funcionamiento depende de la disponibilidad de agua, por lo que el consumo de agua es un factor importante, pocas veces analizado y cuantificado en estudios relacionados con torres de enfriamiento. El agua utilizada para el enfriamiento en los sistemas de generación de energía eléctrica proviene principalmente de fuentes de agua dulce, tanto superficiales como subterráneas, y su uso tiene un impacto significativo en la disponibilidad de este recurso hídrico. Los modelos analíticos se basan en la implementación de las leyes de conservación de energía y masa, y hacen varias suposiciones sobre la distribución de la temperatura del agua rociada y la pérdida de agua rociada debido a la evaporación (Papaefthimiou *et al.*, 2012).

La cantidad de agua que se reutiliza en los procesos no contribuye al consumo total, pues se recircula y no se extrae del medio ambiente (Bijl, Bogaart, Kram, Vries, & De Vuuren, 2016; Gjorgiev & Sansavini, 2018). En promedio, las centrales eléctricas que funcionan con el ciclo Rankine consumen alrededor de dos litros de agua por kilowatt-hora (l/kWh) de electricidad generada. Las centrales de ciclo combinado, que combinan el ciclo Rankine con una turbina de gas, son más eficientes y consumen unos 1.0 l/kWh (Guerras & Martín, 2020).

Las pérdidas de agua por evaporación en las torres de enfriamiento representan una cantidad significativa del consumo de agua, la tasa de evaporación es de aproximadamente el 1.0 % del caudal de agua por cada ΔT de 10 °F (5.6 °C) de rango de enfriamiento (DEQ, 2009). Las torres

de enfriamiento experimentan pérdidas de agua a través de varios mecanismos, que incluyen la evaporación, la purga y el arrastre, es decir, se debe tener agua de reposición para compensar dichas pérdidas (Shublaq & Sleiti, 2020).

Los eliminadores de deriva (separador de gotas) desempeñan un papel importante en el funcionamiento de las torres de enfriamiento. Cuando el aire caliente y húmedo es expulsado por la parte superior de la torre, mientras que el agua enfriada se recoge en la zona de lluvia, es posible que pequeñas gotas de agua sean transportadas por la corriente de aire, y si el separador de gotas no es eficaz en su captura, se produce lo que se conoce como pérdidas de arrastre. Estos dispositivos operan modificando la dirección del flujo de aire a medida que atraviesa la sección del eliminador (Figura 5), lo que facilita la separación de la mayoría de las gotas arrastradas de la corriente de aire y permiten que vuelvan a caer dentro de la unidad. La eficacia de los eliminadores de gotas se puede medir mediante dos parámetros principales: la eficiencia de recolección de gotas y la caída de presión a través del eliminador (Ruiz *et al.*, 2019).



Figura 5. Eliminadores de deriva (separador de gotas).

La eficiencia de recolección se define por lo general como la relación entre la masa de agua recolectada por el separador y la masa de agua total que ingresa al separador de gotas. Un diseño adecuado del separador de gotas debe garantizar una alta eficiencia de recolección de gotas y mantener al mismo tiempo la caída de presión a un valor mínimo (González-Pedraza, Pacheco-Ibarra, & Rubio-Maya, 2015).

Investigaciones sobre los separadores de gota proponen mejoras en la estructura interna para lograr una mayor eficiencia de separación y al mismo tiempo reducir la pérdida de presión; caracterizar varios tipos de eliminadores de gotas comerciales (Zamora & Kaiser, 2011); proporcionar pautas generales para desarrollar criterios de selección basados en los números adimensionales que gobiernan el problema físico, ya sea por medio de modelación matemática computacional (Meroney, 2006; Song,

Wu, & Song, 2021) y su evaluación de manera experimental (Lucas, Martínez, & Viedma, 2012; Yu *et al.*, 2021). Naik y Muthukumar (2017) desarrollaron una expresión para estimar la pérdida de evaporación del agua en una torre de enfriamiento húmeda en términos de los parámetros de entrada conocidos, que mostró concordancia con datos experimentales. Este enfoque proporciona una herramienta útil para la predicción y comprensión del comportamiento de la torre de enfriamiento bajo diversas condiciones operativas.

En la actualidad, el nexo energía-agua desempeña un papel crucial, si se considera que el sector energético consume agua directamente en la generación de electricidad (Li, Feng, Siu, & Hubacek, 2012; Lu & Chen, 2016). El sector energético representa un 15 % del consumo total de agua en el mundo (Li *et al.*, 2017). Las torres de enfriamiento consumen grandes cantidades de agua, por lo que la disponibilidad del recurso se ve afectada por los efectos del cambio climático global, el aumento de la población y la implementación de regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Murrant, Quinn, Chapman, & Heaton, 2017; Srinivasan *et al.*, 2018). Ante la creciente demanda de generación de electricidad en un contexto de disminución de la disponibilidad de agua para el enfriamiento en las centrales eléctricas, ha surgido un interés en reducir las pérdidas de agua debidas a la evaporación y el arrastre (González-Pedraza, Pacheco-Ibarra, Rubio-Maya, Galván-González, & Rangel-Arista, 2018; Taghian & Ahmadi, 2017).

Materiales y métodos

En el ámbito del estudio de torres de enfriamiento se han empleado diversos enfoques, que parten desde su análisis energético global o centradas en las áreas clave de las torres de enfriamiento (Chen, Sun, & Lyu, 2019; Goshayshi & Missenden, 2000; Kachhwaha, Dhar, & Kales, 1998; Lemouari, Boumaza, & Kaabi, 2011; Ramkrishnan & Arumugam, 2013; Sun, Guan, Gurgenci, Li, & Hooman, 2017; Tomás *et al.*, 2018). El estudio de Merkel (1925) ha sido primordial en el análisis de los procesos de transferencia de calor y masa. Su trabajo estableció los fundamentos matemáticos para mejorar el rendimiento de las torres de enfriamiento. Además, sus hallazgos han sido aplicados en otras investigaciones para perfeccionar ecuaciones o desarrollar correlaciones más precisas con el objetivo de mejorar el desempeño energético y reducir las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento (Baker & Shryock, 1961; Jaber & Webb, 1989; Kloppers, 2003; Kloppers & Kröger, 2005; Gharagheizi, Hayati, & Fatemi, 2007; Qi, Liu, & Li, 2007; Heidarinejad, Karami, & Delfani, 2009; Picardo & Variyar, 2012; González-Pedraza *et al.*, 2015).

La Tabla 1 muestra las investigaciones que comparten el objetivo de optimizar alguno de los componentes internos de la torre de enfriamiento húmeda; se puede apreciar que cada una de las zonas de interés aporta en lo individual a la mejora del rendimiento: en función de la velocidad de pulverización; la distribución del agua en su recorrido por la torre de enfriamiento; el diseño y la optimización de las boquillas de los aspersores; la distribución de los materiales utilizados en el relleno;

la distribución del diámetro de las gotas, y el impacto de la velocidad del aire a contraflujo, a través de un enfoque teórico y experimental.

Tabla 1. Estudios enfocados a zonas en torres de enfriamiento.

Autor	Zona	Resultados clave
Li <i>et al.</i> (2018)	Aspersión/multizona	Analizaron el impacto de la velocidad de pulverización y la distribución del agua en las tres zonas dentro de la torre de enfriamiento y su influencia en la reducción de la temperatura del agua de salida. Además, exploraron la relevancia de la velocidad del aire en la zona de lluvia y el relleno para comprender su interacción en el proceso de enfriamiento
Kachhwaha <i>et al.</i> (1998)	Aspersión	Realizaron pruebas experimentales para verificar el rendimiento de las boquillas empleadas en los aspersores para la distribución del agua; utilizaron un túnel de viento como medio de experimentación
Sun <i>et al.</i> (2017)	Aspersión	Determinaron la distancia óptima entre dos boquillas y evaluaron el efecto del enfriamiento en función del número de boquillas, su ubicación óptima y la dirección de inyección en el sistema de aspersión. Además, desarrollaron una correlación entre la eficiencia de enfriamiento y variables adimensionales
Tomás <i>et al.</i> (2018)	Relleno	Compararon el rendimiento de la torre de enfriamiento utilizando materiales alternativos en el empaque, como fibra de coco y botellas de plástico PET. Los resultados demostraron una eficiencia satisfactoria sin un incremento en el consumo de energía de la torre de enfriamiento

Autor	Zona	Resultados clave
Lemouari <i>et al.</i> (2011)	Relleno	Realizaron un estudio experimental para analizar las características hidráulicas de una torre de enfriamiento, usando un relleno tipo VGA (Vertical Grid Apparatus). La investigación resalta las correlaciones obtenidas entre los parámetros operativos, tales como los flujos máscicos de aire y agua, junto con la temperatura de entrada del agua, con lo que sería interesante ampliar su estudio en torres de enfriamiento de mayor tamaño y condiciones operativas más elevadas
Chen, Sun y Lyu (2019)	Lluvia	Realizaron un estudio cuantitativo sobre la distribución del diámetro de las gotas en torres de enfriamiento húmedas, e investigaron el efecto que produce la variación en la velocidad del flujo cruzado de aire sobre la relación numérica de las gotas
Ramkrishnan y Arumugam (2013)	Relleno	Elaboraron un estudio experimental con un relleno curvado para determinar los parámetros que afectan la efectividad de una torre de enfriamiento
Goshayshi y Missenden (2000)	Relleno	Examinaron de forma un experimental cómo afecta la transferencia de masa y la caída de presión el uso de empaques corrugados de PVC, los cuales presentaban superficies lisas o rugosas

Otra perspectiva en la mejora del desempeño en torres de enfriamiento a contraflujo es la evaluación del funcionamiento mediante modelación matemática computacional y la simulación de sistemas existentes bajo ciertas condiciones operativas, o al realizar cambios en el diseño para predecir su funcionamiento y evaluar su rendimiento. La validación de un modelo matemático computacional se lleva a cabo

mediante experimentos de campo, a escala real o de laboratorio. Además, los datos obtenidos permiten hacer un análisis de sensibilidad para determinar cómo cambian los resultados del modelo cuando se modifican ciertos parámetros, lo que ayuda a identificar los factores que más influyen en el rendimiento de la torre de enfriamiento.

Modelado analítico y análisis energético

En el estudio del rendimiento de las torres de enfriamiento se desarrolla un modelo matemático confiable con las ecuaciones de conservación para la transferencia de masa, momento y energía; además de un modelo físico que exprese los fenómenos asociados de resistencia al flujo de aire, la transferencia de calor y masa entre las fases de aire y agua.

Los marcos de referencia para el estudio de flujos bifásicos pueden ser abordados desde dos enfoques principales: el marco de referencia Euleriano-Lagrangiano y el marco de referencia Euleriano-Euleriano (González-Pedraza *et al.*, 2018). De acuerdo con la investigación de González-Pedraza *et al.* (2018), en el estudio de fenómenos evaporativos en gotas de agua, el marco de referencia Lagrangiano permite la modelación de la caída de gotas de agua; la formación de una película de líquido subenfriado alrededor de estas durante su fusión (lo que aumenta su diámetro); la trayectoria seguida por las partículas hasta su fusión, y el tiempo de fusión de la partícula. Este enfoque implica una aproximación matemática al modelo de dos corrientes: agua y aire, que fluyen en direcciones opuestas. En la Figura 6 se muestran las variables que más influyen en un esquema Euleriano-Lagrangiano en el análisis de los fenómenos evaporativos en gotas de agua para ambas corrientes de

fluido, de las que destacan: la temperatura, la velocidad y la humedad relativa.

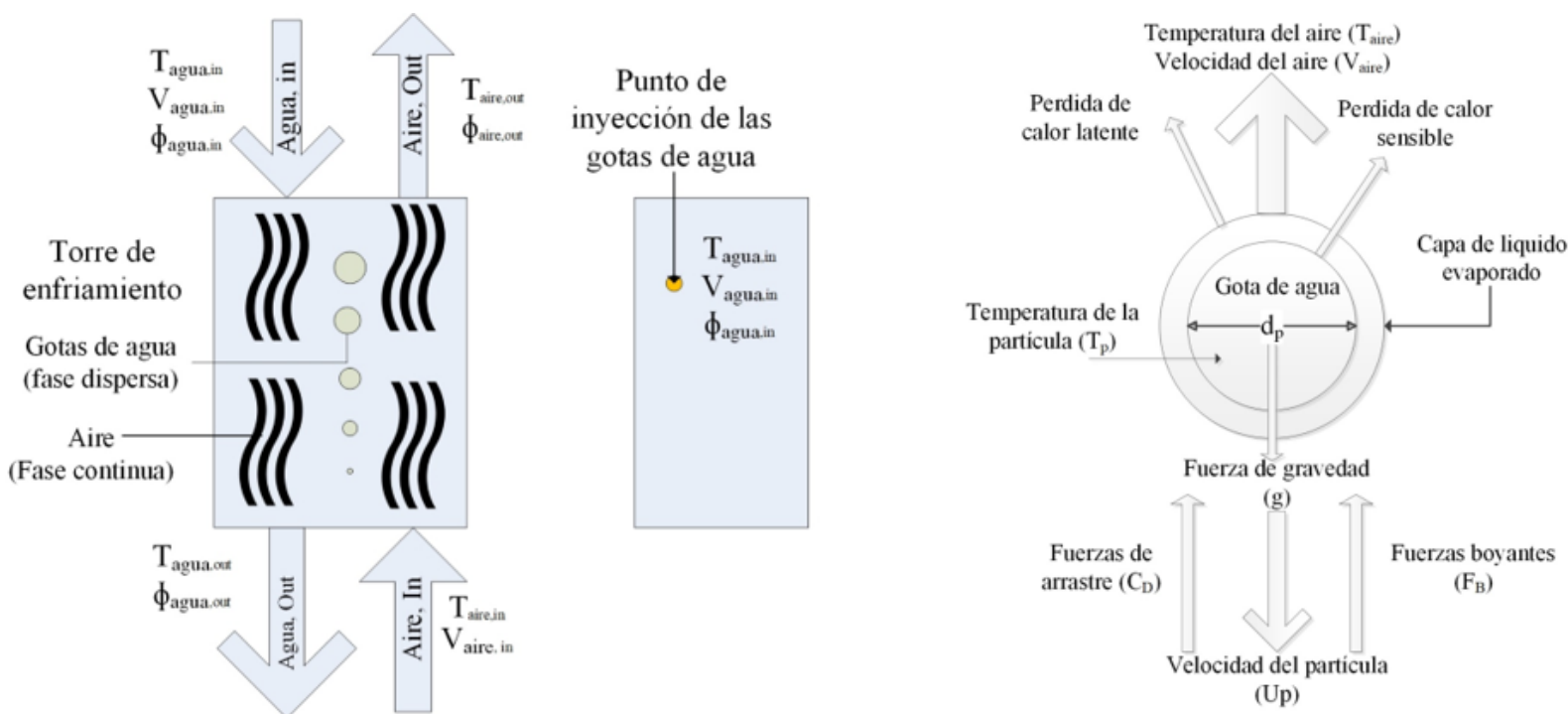


Figura 6. Esquema Euleriano-Lagrangiano en el estudio de los fenómenos evaporativos en una gota de agua (González-Pedraza *et al.*, 2018).

De acuerdo con el estudio de González-Pedraza (2017), una forma de abordar el estudio de fenómenos evaporativos en una gota de agua consiste en resolver una ecuación de trayectoria en un marco de referencia Lagrangiano, originando una ecuación diferencial que se fundamenta en la segunda ley de Newton del movimiento. Esta ecuación describe todas las fuerzas que influyen en el movimiento de las partículas, como la fricción o arrastre, las fuerzas de flotación, las fuerzas inerciales y la naturaleza estocástica de la turbulencia. Además, es necesario

considerar el intercambio de energía asociada con el cambio de fase que se experimenta durante su trayectoria como fase continua. Esto se modela al resolver una ecuación para determinar el cambio de temperatura de la partícula debida a la evaporación de masa en la gota de agua por efecto del aire circundante.

González-Pedraza (2017) también indica que es necesario resolver las ecuaciones de continuidad y conservación de energía tanto para la fase dispersa (las gotas de agua) y la fase continua, (que es el aire) como para las ecuaciones de turbulencia de Navier-Stokes en un marco de referencia Euleriano-Euleriano. Este enfoque implica un tiempo de cómputo considerable para su resolución, pero permite analizar desde la formación de la gota hasta las deformaciones que experimenta al pasar por el volumen de control, así como los desprendimientos de masa debidos a la tensión superficial. En otras palabras, este método estudia el flujo a partir de un volumen de control fijo, y considera la cantidad de flujo que entra y sale del mismo.

Solución del modelo Euleriano-Lagrangiano

Para presentar el modelo matemático y las ecuaciones gobernantes de los fenómenos involucrados en la transferencia de masa y calor de gotas agua a contraflujo, se debe partir de la ecuación general de conservación de cualquier propiedad, expresada por la Ecuación (1), que representa de manera general los fenómenos de conservación (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2006):

$$\nabla \cdot \Gamma_{\varphi} \nabla \varphi - \nabla \cdot (\rho \vec{u} \nabla \varphi) + S_{\varphi} = \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

El primer término del lado izquierdo de la Ecuación (1) representa el término difusivo; el segundo corresponde al término convectivo, y el último término de lado izquierdo de la ecuación es el término fuente. Del lado derecho de la ecuación se encuentra el término transitorio (acumulación) y φ es la propiedad a analizar. Por ejemplo, la ecuación de conservación de masa —o continuidad de acuerdo con lo anterior— se presenta en la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (2)$$

La Ecuación (2) representa la forma general de la ecuación de conservación de masa y es válida tanto para flujos compresibles como incompresibles. Donde S_m es el término fuente a evaluar; el primer término del lado izquierdo de la ecuación es la acumulación de masa en el sistema, y el segundo término es el término convectivo.

Por otro lado, la ecuación de conservación de momentum para ambas fases está compuesta de los siguientes elementos: término transitorio o de acumulación de momentum (RANS); el término de transporte de momento convectivo; término de esfuerzos de Reynolds; término de presión; término de transporte de momento difusivo o viscoso; las fuerzas de cuerpo, y el término fuente, en el cual se pueden introducir fuerzas externas, como se muestra en la Ecuación (3):

$$\frac{D}{Dt} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Otro elemento a tomar en cuenta en el modelo matemático es la ecuación de energía, como se muestra en la Ecuación (4):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\vec{k}_{eff} \nabla T) - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) + S_h \quad (4)$$

Los términos asociados con la ecuación de energía constan de la transferencia de energía debido a la conducción y disipación viscosa. Los términos de conductividad efectiva ($\vec{k}_{eff}$) consideran los términos de conductividad térmica turbulenta, en función del modelo de turbulencia usado. El último término del lado derecho en la Ecuación (4) representa el calor generado por reacciones químicas, fuentes de generación o disipación de calor, y cualquier otra fuente definida por el usuario.

En cuanto a los modelos de turbulencia, González-Pedraza (2017) considera el modelo κ - ϵ estándar. Este modelo se basa en un enfoque semiempírico que utiliza ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (κ) y su tasa de disipación (ϵ), que se obtienen a través de razonamientos físicos. En la formulación del modelo de turbulencia κ - ϵ estándar, se asume que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Por lo tanto, el modelo κ - ϵ estándar es válido solamente para flujos turbulentos. Las ecuaciones (5) y (6) muestran el modelo de turbulencia κ - ϵ estándar, que representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad y flotabilidad:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_\kappa \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Cabe señalar que las constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, mostradas en la Ecuación (6), dependen del modelo de la viscosidad turbulenta μ_t , como se muestra en la Ecuación (7):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Donde C_μ también es un valor constante, y para este modelo de viscosidad turbulenta las constantes pueden tomar los valores listados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valor para las constantes del modelo κ - ε (González-Pedraza, 2017).

Constante	C_1	C_2	σ_κ	σ_ε	C_μ
Valor	1.44	1.92	1.0	1.3	0.09

En la modelación de gotas de agua en caída libre con aire a contraflujo, las ecuaciones Lagrangianas se resuelven de tal forma que describen el comportamiento en función de la posición velocidad, masa y temperatura de la partícula. Esta consideración puede llevar un error al momento en que la gota intercambia calor y momentum con la fase líquida, por lo que las ecuaciones Lagrangianas deben incluir los mecanismos de transporte mencionados entre las dos fases y el cambio

de diámetro que sufren las partículas. La Ecuación (8) representa la formulación del modelo Euleriano, que incluye los mecanismos de transporte a los términos fuente para ambas fases, como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c \varphi_c) + \nabla \cdot (\vec{u}_c \rho_c \varphi_c) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi_c) = S_\varphi + S_{\varphi G} \quad (8)$$

En resumen, y de acuerdo con González-Pedraza (2017), para llegar a la solución del modelo matemático aplicado a gotas de agua debe considerarse la siguiente secuencia:

1. Calcular el paso de tiempo Lagrangiano
2. Calcular el movimiento de la partícula
3. Calcular las propiedades de la partícula en la nueva posición
4. Calcular las fuentes de interface

La Ecuación (9) es la representación vectorial de la posición y el cálculo de la velocidad instantánea de la partícula:

$$\frac{dx_p}{dt} = \vec{u}_p \quad (9)$$

En esta forma, la ecuación de momento de la partícula se define así:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = D_p(\vec{u} - \vec{u}_p) + m_p b g - V_p \nabla p_r \quad (10)$$

Partiendo de la segunda ley de movimiento de Newton, la Ecuación (10) expresa la velocidad de cambio de momentum en conjunto con la gota; por otro lado, los términos a la derecha de la Ecuación (10) corresponden a las fuerzas que actúan sobre la gota, como el arrastre, la flotabilidad y las asociadas a la fase continua. En el modelo de turbulencia, se asume que la gota es afectada por los remolinos presentes en un fluido, remolinos denominados también como Eddys. El movimiento de la gota es afectado por la velocidad $\vec{u}$ de la fase continua en la ecuación de movimiento de la partícula descrita por la Ecuación (11):

$$\vec{u}_c = \vec{u} - \vec{u}'_c \quad (11)$$

González-Pedraza (2017) indica que el campo de velocidades fluctuantes $\vec{u}_c$ es obtenido simplificando cada componente, una distribución normal con una media de 0.0 y una desviación estándar de $(2/3 \kappa)^{1/2}$, donde κ es el valor de la energía cinética turbulenta. La función de arrastre D_p sobre la gota de agua es representada por la Ecuación (12):

$$D_p = \frac{1}{2} \rho A_p C_D (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (12)$$

Para determinar el valor del coeficiente de arrastre del aire sobre la partícula se utiliza la correlación aportada por Clift, Grace y Weber (1978):

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0.15Re^{0.687}) + \frac{0.42}{1.425 \times 10^4 Re^{-1.16}} \quad (13)$$

Por otro lado, la evolución de la masa de la partícula, m_p (Sánchez, Kaiser, Zamora, Ruiz, & Lucas, 2015) está descrita por la Ecuación (14), que es la ecuación de conservación de masa, en función del cambio de diámetro y propiedades de conductividad térmica y capacidad calorífica:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p \frac{k_v}{C_{pv}} Nu \cdot \ln(1 + B_M) \quad (14)$$

El número de Nusselt (Nu) mide el aumento de la transferencia de calor por convección, comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción, y se define mediante la Ecuación (15):

$$Nu = 2(1 + 0.3Re^{0.5}Pr^{0.33})F \quad (15)$$

La descripción más adecuada del espesor relativo de las capas límite de velocidad laminar en la fase continua se realiza mediante el número de Prandtl adimensional. Este parámetro se define como el cociente entre la difusividad del momento y la difusividad térmica. El factor de corrección F para la transferencia de masa propuesto por Frossling (Bolot, Li, & Coddet, 2004) de la Ecuación (15) se calcula por medio de la Ecuación (16):

$$F = \frac{1}{B_M} \ln(1 + B_M) \quad (16)$$

La Ecuación (16) depende del número de transferencia de masa B_M , que representa las fuerzas que actúan en el proceso de transferencia entre la gota de agua y el aire circundante, y se calcula mediante la Ecuación (17):

$$B_M = \left[\frac{Y_{VS} - Y_{V\infty}}{1 - Y_{VS}} \right] \quad (17)$$

El lado derecho de la Ecuación (17) muestra la interacción entre la fracción de vapor de masa entre la superficie de la gota y la fracción de masa vapor en gas que rodea la gota. La fracción de masa de vapor en la superficie de la gota de agua se calcula con la Ecuación (18):

$$Y_{VS} = \left[1 + \left(\frac{P}{P_{VS}} - 1 \right) \frac{W_C}{W_V} \right]^{-1} \quad (18)$$

Por otro lado, el intercambio de energía entre la gota de agua y el aire circundante se describe en la Ecuación (19):

$$Cp_p \cdot m_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = H_{fg} \frac{dm_p}{dt} + \alpha(T_v - T_p) \quad (19)$$

El lado izquierdo de la Ecuación (19) muestra cómo se intercambia y acumula la energía en la gota. En el lado derecho, el primer término se

refiere al calor latente causado por la evaporación o la pérdida de masa de la gota de agua, mientras que el segundo término representa el intercambio de calor sensible entre la fase continua y la fase dispersa, lo cual se debe a la diferencia de temperatura por enfriamiento y la velocidad del aire. Según el término fuente S_m de la ecuación de conservación de masa, la variación de la masa de la gota se calcula por la Ecuación (20):

$$S_m = \frac{\Delta m_p \dot{m}_{ip}}{m_{ip} dV} \quad (20)$$

La Ecuación (20) relaciona el cambio inicial de masa de la gota en cada volumen diferencial en un flujo másico inicial de gotas inyectadas. Por lo tanto, para calcular el cambio de masa en cada elemento diferencial para la fase continua se emplea la Ecuación (21):

$$\Delta m_p dV = N_v M_v A_p dt \quad (21)$$

La Ecuación (21) relaciona el flujo molar, el peso molecular del vapor y el área de la gota. El flujo molar de vapor es función de la concentración de vapor en la superficie de la gota, la concentración de vapor en la fase continua y el coeficiente de transferencia de masa K_c ; dichas relaciones se muestran en las ecuaciones (22) a (24):

$$N_v = K_c (C_{v,s} - C_v) \quad (22)$$

$$K_c = \frac{Nu(D_{v,m})}{d_p} = \frac{(2+0.6 \cdot Re^{1/2} Sc^{1/3}) D_{v,m}}{d_p} \quad (23)$$

$$C_{v,s} = \frac{p_{v,s}(T_p)}{R(T_p)} \quad C_{v,s} = \frac{p x_v}{RT} \quad (24)$$

Se observa en la Ecuación (23) que el coeficiente de transferencia de masa depende del número de Nusselt, que a su vez puede obtenerse mediante la correlación dada por Ranz y Marshall (1952). Por último, los términos fuente utilizados en las ecuaciones (3) y (4) para la cantidad de movimiento y energía se pueden calcular por las ecuaciones (25) y (26):

$$\vec{F} = \left[\frac{3\mu C_D Re}{4\rho_p d_p^2} (\vec{u} - \vec{u}_p) + g \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) + \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u}_p \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_p} \right] \frac{\dot{m}_{p0} dt}{dV} \quad (25)$$

$$S_h = \left[\left(\frac{\dot{m}_p}{m_{p0}} C_p \Delta T_p \right) + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left(-h_f + \int_{T_{ref}}^{T_p} C_{p,i} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{p0}}{dV} \quad (26)$$

Las ecuaciones (25) y (26) describen el cambio promedio de la masa de la partícula y cuánto fue el cambio de la temperatura en un diferencial de volumen dado (Lucas *et al.*, 2010). Por último, se debe cuidar el uso de la suposición de la esfericidad de la gota de agua. Araneo (2012) indica que las gotas de agua pueden considerarse como cuerpos esféricos para un número de Weber menor o igual a 1, que puede calcularse con la Ecuación (27):

$$We = \frac{\rho_a \vec{u}^2 d_p}{\sigma_w} \quad (27)$$

En el estudio de González-Pedraza *et al.* (2018) se encontró que números de Weber son consistentes con la suposición de esfericidad en gotas de agua: con un diámetro de 3 mm y una velocidad de 4 m/s, el número de Weber es de 0.79; por otro lado, para gotas de 0.1 mm y velocidad de 10 m/s, el número de Weber es 0.1658. También analizó un caso crítico, donde el diámetro de gota de 10 mm y velocidad de 2.4 m/s daba un número de Weber de 0.95. Por lo tanto, González-Pedraza *et al.* (2018) concluye que la forma esférica de las gotas es una suposición aceptable.

Kloppers y Kröger (2005) abordaron en un estudio la importancia del factor de Lewis y la razón de que tenga un valor de 1 para la simplificación de las ecuaciones gobernantes en los procesos de transferencia de calor y masa; aclaran también el error común entre los investigadores que se refieren al número de Lewis, Le , como el factor de Lewis, Le_f . Mencionan que el número de Lewis deriva de los números de Prandtl (Pr) y Schmidt (Sc). En sistemas donde ocurren transferencias simultáneas de calor y momento por convección, la relación entre ν y α es significativa, y se denomina número de Prandtl, como se muestra en la Ecuación (28):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (28)$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática

α = coeficiente de difusividad térmica

c_p = calor específico a presión constante

μ = viscosidad dinámica

k = conductividad térmica

Kloppers y Kröger (2005) mencionan que en los procesos que implican transferencia simultánea de momento y masa, el número de Schmidt se define como la relación entre ν y D (coeficiente de difusión), como se muestra en la Ecuación (29):

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (29)$$

En procesos que involucran transferencia simultánea de calor y masa por convección, la relación entre α y D se define como el número de Lewis, como se muestra en la Ecuación (30):

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{k}{\rho c_p D} = \frac{Sc}{Pr} \quad (30)$$

Esta relación es relevante para la transferencia convectiva simultánea de calor y masa. La tasa relativa de crecimiento de las capas límite térmicas y de concentración está determinada por el número de Lewis. Los perfiles de temperatura y concentración coincidirán cuando $Le = 1$.

Por otro lado, el factor de Lewis, Le_f , proporciona una indicación de las tasas relativas de transferencia de calor y masa en un proceso de evaporación (Kloppers & Kröger, 2005). El factor de Lewis, Le_f , es igual a la relación entre el número de Stanton de transferencia de calor, St , y el

número de Stanton de transferencia de masa, St_m . Estos números adimensionales están dados por las ecuaciones (31) y (32):

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho u c_p} \quad (31)$$

$$St_m = \frac{Sh}{ReSc} = \frac{h_m}{\rho u} \quad (32)$$

Donde:

Nu = número de Nusselt o flujo de calor adimensional

Sh = número de Sherwood o flujo de masa adimensional

El factor de Lewis Le_f se puede obtener dividiendo la Ecuación (31) entre la Ecuación (32), como sigue:

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \frac{h}{\rho c_p D} \frac{\rho u}{h_m} = \frac{h}{c_p h_m} \quad (33)$$

Además, esta misma relación puede conducir a que el factor de Lewis se pueda calcular en función del número de Lewis, como se muestra en la Ecuación (34):

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{-2/3} = Le^{2/3} \quad (34)$$

Kloppers y Kröger (2005) mencionan que el valor del factor de Lewis está en un rango de 0.5 a 1.3. Además, la tasa de evaporación del agua

depende en gran medida del factor Lewis tanto para las torres de enfriamiento de tiro natural como para las de tiro mecánico. Por último, los autores mencionan que el factor Lewis se puede ajustar para representar las tasas de evaporación medidas físicamente y las temperaturas del aire de salida con mayor precisión en los análisis del rendimiento del relleno de la torre de enfriamiento.

El modelado de turbulencia basado en el promedio de Reynolds requiere que las tensiones de Reynolds de la Ecuación (36) se modelen adecuadamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (35)$$

Por lo general se emplea la hipótesis de Boussinesq (Fluent ANSYS, 2013) para relacionar las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad media, como se expresa en la Ecuación (36):

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (36)$$

La hipótesis de Boussinesq es utilizada en los modelos de Spalart-Allmaras, en los modelos de turbulencia κ - ϵ y κ - ω . Una de las ventajas en este enfoque es el costo computacional relativamente bajo asociado con el cálculo de la viscosidad turbulenta, μ_t (Fluent ANSYS, 2013).

El modelo de Spalart-Allmaras solo resuelve una ecuación de transporte adicional (que representa la viscosidad turbulenta). Sin embargo, los modelos κ - ϵ y κ - ω resuelven dos ecuaciones de transporte

adicionales (para la energía cinética de la turbulencia, κ , y la tasa de disipación de la turbulencia, ε , o la tasa de disipación específica, ω), y μ_t se calcula como una función de κ y ε o κ y ω .

Por otro lado, la hipótesis de Boussinesq tiene la desventaja en suponer que μ_t es una cantidad escalar isotrópica (mismas propiedades en todas las direcciones), lo que no es estrictamente cierto. Sin embargo, la suposición de una viscosidad turbulenta isotrópica suele funcionar bien para flujos cortantes dominados por solo una de los esfuerzos de corte turbulentos. En consecuencia, un enfoque alternativo integrado en el modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM) consiste en resolver ecuaciones de transporte para cada uno de los términos del tensor de esfuerzo de Reynolds. Además, se requiere una ecuación adicional que determine la escala (normalmente para ε o ω). Esto significa que se requieren cinco ecuaciones de transporte adicionales en flujos 2D y siete ecuaciones de transporte adicionales que deben resolverse en 3D. En muchos casos, los modelos basados en la hipótesis de Boussinesq funcionan muy bien y el consumo computacional adicional del modelo de tensión de Reynolds no está justificado. En cambio, el modelo RSM es claramente superior en situaciones en las que la anisotropía de la turbulencia tiene un efecto dominante en el flujo. Tales casos incluyen flujos muy arremolinados y flujos secundarios impulsados por la tensión (Fluent ANSYS, 2013).

Resultados

En cada una de las investigaciones realizadas sobre estudios numéricos y matemáticos es común encontrar que cada investigador desarrolla un modelo matemático para un tipo específico de torre de enfriamiento. Estos modelos suelen basarse en el estudio pionero de Merkel (1925) y

hacen suposiciones que simplifican la solución de los modelos numéricos, con lo que procura reducir el porcentaje de error al compararlos con los datos experimentales. A partir de las investigaciones y consideraciones de Merkel, Jaber y Webb (1989) utilizaron el método del número de unidades de transferencia efectiva (ϵ -NTU) para evaluar el desempeño en torres de enfriamiento de contraflujo o flujo cruzado.

Merkel (1925) desarrolló su teoría relacionando los fenómenos de evaporación y transferencia de calor sensible entre el contacto de agua y una corriente de aire a contraflujo presentes en torres de enfriamiento. El punto central de esta teoría es la expresión del número de transferencia de unidades (NTU) como una función integral de la diferencia de temperatura dividida por el gradiente de entalpía; para poder resolver las ecuaciones diferenciales que involucran la transferencia de masa y calor, Merkel utilizó las siguientes consideraciones para simplificar el problema:

- La capa de aire saturado tiene la misma temperatura que el agua.
- La capa de aire saturado presenta poca resistencia a la transferencia de calor.
- El contenido de vapor del aire es proporcional a la presión parcial del vapor de agua.
- La presión del vapor dentro de la torre de enfriamiento es bastante baja, por lo que su impacto en la presión operativa de la torre es prácticamente insignificante.
- El flujo de calor del aire a la capa por convección es proporcional al flujo de calor de la capa al aire ambiente por evaporación.
- El calor específico constante de la mezcla de vapor de aire-agua y el calor constante de vaporización.

- La pérdida de agua por evaporación es insignificante.
- La fuerza que impulsa la transferencia de calor es la diferencia de entalpía entre el aire saturado y el “bulk air”.
- Tanto las propiedades de la gota de agua, el aire y los coeficientes de transferencia de masa y calor permanecen constantes.
- En cuanto al movimiento de la gota, se considera como un cuerpo esférico.
- Se asume que la temperatura de la superficie exterior de la gota es la misma que la de su interior.
- El factor de Lewis es igual a 1 y relaciona la transferencia de calor y masa.
- El movimiento de la gota dentro de la torre de enfriamiento es totalmente vertical.

Algunas de estas consideraciones se han adaptado con respecto al método de Merkel, Poppe y ε -NTU para resolver modelos numéricos considerando las pérdidas de agua debido a la evaporación en la ecuación de la energía (Kloppers & Kröger, 2005). Por otro lado, las consideraciones empleadas en la solución de modelos de CFD reducen los requisitos de cómputo en las simulaciones, además de incrementar la precisión de los resultados (Nasrabadi & Finn, 2014). La Tabla 3 muestra algunos factores que sirvieron a las investigaciones dar solución a estudios numéricos o simulaciones CFD.

Tabla 3. Resumen de las suposiciones encontradas en algunas investigaciones.

Autor	Características y consideraciones del modelo matemático
Kloppers (2003)	- El factor de Lewis se asume como 1. Aunque este supuesto tiene una influencia mínima, puede afectar los resultados en temperaturas ambientales bajas - Asume que el aire que sale de la torre está saturado con vapor de agua y se describe solo por su entalpía. Esta suposición de saturación tiene un impacto menor a temperaturas superiores a 20 °C, pero se vuelve significativa a temperaturas más bajas - La reducción del caudal de agua debido a la evaporación se omite en el balance energético. Esta simplificación del equilibrio de energía tiene un impacto mayor en temperaturas ambientales elevadas
Naphon, 2005	- Asume que la distribución de temperatura del flujo de agua en cualquier sección transversal es uniforme - No considera transferencia de calor y masa entre el sistema y el entorno - Supone que el número de Lewis es constante dentro de la torre - Los calores específicos del agua y del aire seco se mantienen constantes dentro de la torre - Los coeficientes de transferencia de calor y masa se consideran constantes dentro de la torre
Qi, Liu y Li (2008)	- Los coeficientes de transferencia de calor y masa se mantienen constantes dentro de la torre; el aire frío y el agua caliente se consideran con propiedades físicas constantes - La presión de vapor en la torre es tan baja que tiene una influencia mínima en la presión en toda la torre. Por lo tanto, se utiliza el valor promedio de la presión atmosférica en los cálculos - Las gotas de agua que se desplazan dentro de la torre se consideran como esferas - Supone que la temperatura tanto en el exterior como en el interior de la gota es uniforme, lo que significa que la resistencia térmica a la caída de agua es insignificante - Considera que el factor de Lewis es igual a 1 - Asume que la gota de agua se mueve verticalmente en una dimensión - Los coeficientes de transferencia de calor y masa en toda la torre se consideran constantes

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadora y ha demostrado ser una herramienta efectiva para comprender los mecanismos de transferencia de calor y masa en las torres de enfriamiento, así como para determinar las pérdidas por evaporación y arrastre (Versteeg, 2007). Las técnicas para la solución de los modelos matemáticos computacionales son de gran importancia, ya que la modificación en la geometría, malla o condiciones de frontera son fundamentales para la obtención de resultados precisos con un porcentaje de error mínimo (Fluent ANSYS, 2013). Es conveniente tener en cuenta clarificar el propósito de la simulación, ya sea para analizar el flujo de agua, la transferencia de calor o la evaporación de gotas. La creación de la geometría CAD en un *software* CFD debe incluir las secciones de interés de la torre de enfriamiento y definir el dominio de la simulación. Una ventaja notable de la geometría de las torres de enfriamiento es su estructura axialmente simétrica, lo cual ha permitido a los investigadores utilizar solo la mitad o incluso una cuarta parte de la torre para reducir tanto el tiempo de solución como los requerimientos de *hardware* (Fluent ANSYS, 2017).

Posteriormente seleccionar el tipo de malla adecuado (estructurada y no estructurada), aplicar un refinamiento en las zonas críticas donde se espera un mayor gradiente de variables evitando elementos distorsionados que puedan afectar la precisión de la simulación. La selección del solucionador involucra conocer la física del problema, seleccionar el método numérico y configuraciones del solucionador, como el esquema de discretización y la tolerancia de convergencia. Además, se deben definir las condiciones de frontera del modelo los parámetros de operación, que incluyan las propiedades de los materiales, flujos de aire

y agua. En el estudio de gotas es recomendable el uso de modelos de fase discreta (DPM), volumen de fluido (VOF), mezcla o Euleriano-Euleriano (Lopes & Quinta-Ferreira, 2010); hay que activar modelos físicos de turbulencia según la naturaleza del flujo en la torre de enfriamiento. Finalmente, el posprocesamiento, visualizar campos de velocidad, temperatura y presión en todo el dominio computacional; es posible realizar un mapeo de gotas de agua, o los flujos de agua y aire a la entrada o salida.

En la modelación de la caída de una gota de agua con aire en contraflujo, el desplazamiento de cada gota dentro del aire está condicionado por la forma en que interactúa; esta interacción se ve afectada por la transferencia simultánea de calor, masa y momento entre la gota y el aire a su alrededor. La presencia de gotas en el flujo de aire puede ser considerada al incluir términos de fuente de masa, energía y momento en las ecuaciones que rigen la fase del aire. Estos términos de fuente se calculan a partir del enfoque Lagrangiano con un método alternativo basado en el método de volumen finito.

Rotar, Širok, Drobnič, Novak y Donevski (2005) realizaron un estudio tanto numérico como experimental para investigar las características aerotermodinámicas del flujo de aire en una torre de enfriamiento de tiro natural, con una capacidad de 350 MW. Al combinar análisis experimentales y numéricos pudieron determinar los campos de temperatura y velocidad dentro de la torre, lo que les permitió detectar y abordar algunas irregularidades en el flujo de aire mediante la reconstrucción de ciertos componentes.

En cuanto a torres de enfriamiento húmedas, Jiang, Liu y Jiang (2013) llevaron a cabo un estudio numérico y lo validaron de forma experimental. Obtuvieron correlaciones empíricas para los coeficientes de

transferencia de calor y masa. Realizaron pruebas experimentales variando parámetros característicos en la entrada de la torre, como la temperatura del agua y aire, y los flujos de masa, entre otros. Por otro lado, Wan, Ren y Xing (2017) utilizaron un modelo CFD para simular los procesos de enfriamiento evaporativo y calcularon las fracciones en masa de vapor de agua en la interfaz gas-líquido. Blain, Belaud y Miolane (2016) desarrollaron un modelo en CFD basándose en las ecuaciones de Poppe y Merkel; validaron sus resultados mediante valores a escala real por alrededor de seis meses por medio de sensores.

Para evaluar la transferencia de calor y masa, Al-Waked y Behnia (2006) presentaron un modelo CFD de una torre de enfriamiento de tiro natural, y estudiaron el efecto de los parámetros operativos y del flujo cruzado de aire en el desempeño térmico. El modelo se validó bajo las condiciones de diseño y mostró que cumplió satisfactoriamente su solución, y que la diferencia entre los resultados entre el modelo CFD y de la curva de diseño fue inferior al 3 %. Por otro lado, Klimanek, Cedzich y Bialecki (2015) estudiaron el efecto del flujo cruzado de aire y que la inyección de aire tiene un efecto positivo, pero insignificante sobre la temperatura del agua enfriada debido a un ligero aumento del caudal de aire a través de la torre. Velandia, Chery y Lopez (2016) estudiaron la dinámica del flujo de aire con dos configuraciones distintas: una con sección transversal cuadrada y otra circular; para ambas configuraciones se desarrollaron modelos en CFD y se evaluaron experimentalmente mediante un túnel de viento; caracterizaron el comportamiento de la simulación para relacionar la caída de presión del aire que pasa a través de la torre de enfriamiento.

En cuanto a estudios CFD donde utilizaron modelos 3D, Zhao *et al.* (2016) evaluaron, a través de su modelo en CFD, los parámetros

operativos en condiciones sin aire y con aire a flujo cruzado; establecieron criterios de convergencia y la independencia en la malla en los resultados numéricos. Montazeri, Blocken y Hensen (2015) realizaron una simulación CFD y validaron de manera experimental el enfriamiento evaporativo mediante sistemas de aspersión; también realizaron un análisis de sensibilidad enfocado en la malla en el modelo de turbulencia y en el ángulo del cono del difusor.

Los estudios CFD ayudan asimismo a evaluar las pérdidas por evaporación y arrastre. Meroney (2006) evaluó el aumento de la deposición de gotas de agua alrededor de una torre de enfriamiento y simuló trayectorias de partículas para diámetros que van de 2 a 0.001 mm. En cuanto a las investigaciones que implican análisis de CFD, es recomendable seguir una metodología para llevar a cabo un modelado analítico de evaporación de gotas de agua, con independencia del tipo de solución que el *software* utilice, ya sea por el método de volumen finito (MVF), el método de elemento finito (MEF) o el método de diferencias finitas (MDF), entre otros (Fluent ANSYS, 2013). El modelado analítico en torres de enfriamiento para el estudio de fenómenos evaporativos en gotas de agua con *software* CFD debe contar con lo siguiente (Tu, Yeoh, Liu, & Tao, 2023):

- Planteamiento del fenómeno a analizar: que consiste en un modelo de flujo bifásico donde la gota de agua representa la fase dispersa y el aire a contraflujo la fase continua.
- Seleccionar el marco de referencia de estudio que puede seguir la trayectoria de la gota o la formación, deformación y desprendimiento de masa de la gota.

- Para el planteamiento inicial se debe identificar el modelo matemático con el cual trabaja el *software* (MVF, o MEF) y la manera de discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes.

A partir de este punto, la metodología a seguir consta de tres componentes esenciales (Zawawi *et al.* 2018):

- Preprocesamiento: se identifica el dominio de interés a estudiar; el modelo sólido puede establecerse en 2D o 3D, y se genera la malla computacional.

- Solucionador: se establece la física de la gota, se definen las propiedades de los materiales y del fluido, también se establece el modelo de fase discreta (DPM) o el volumen de fluido (VOF) para la solución del modelo de flujo bifásico. Se definen los parámetros de operación, como temperatura inicial de la gota, velocidad del aire, humedad. Luego se establecen las condiciones de frontera en el dominio computacional (entradas, salidas, paredes, etc.). Se identifica y selecciona el método de solución en función del marco de referencia (Euleriano-Euleriano o Euleriano-Lagrangiano). Por último, se seleccionan los criterios de convergencia y se seleccionan los monitores de salida de resultados.

- Posprocesamiento: en esta etapa se utilizan las herramientas de visualización de flujo: contornos de velocidad, presión, temperatura; se generan reportes numéricos con los resultados cuantitativos en términos de valores finitos de las variables de interés evaluadas. Por último, el análisis de los resultados lleva a dos opciones: actualizar el modelo computacional con otros parámetros operativos o, de lo contrario, realizar la validación del modelo CFD por medios experimentales.

En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo y los requisitos generalizados para realizar un estudio CFD. No obstante, es

recomendable importante considerar que la fiabilidad de los modelos CFD dependen de su validación experimental y que las capacidades de un modelado CFD está limitada por la capacidad computacional.

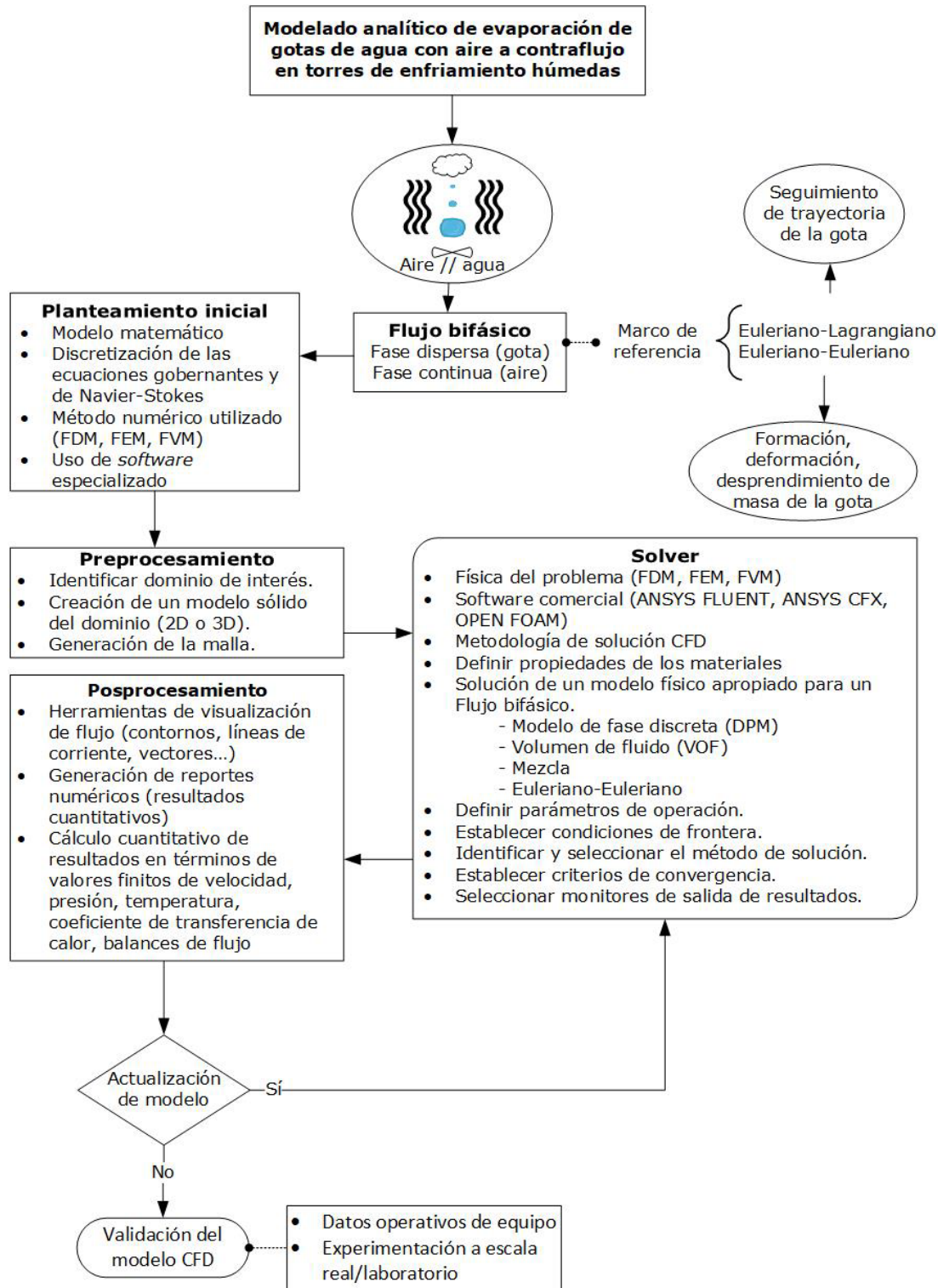


Figura 7. Diagrama de flujo del modelado analítico y requisitos genéricos para realizar un estudio CFD en evaporación de gotas.

Los modelos CFD pueden resultar de gran utilidad, ya que es posible establecer dominios computacionales que abarquen todos los parámetros dimensionales y operativos de la torre de enfriamiento húmeda. La Tabla 4 muestra las características particulares del modelo matemático computacional en torres de enfriamiento.

Tabla 4. Características particulares del modelo matemático computacional.

Autor	Características particulares del modelo matemático computacional
Lucas <i>et al.</i> (2010)	• Dominio (<i>enclosure</i>): 3 000 x 1 000 x 750 m • Modelo físico de torre de enfriamiento • $D_{base} = 114 \text{ m}$; $D_{salida} = 54.8 \text{ m}$; $H = 124 \text{ m}$
Jiang <i>et al.</i> (2013)	• Los procesos de transferencia de calor y masa están en estado estacionario • El intercambio de calor y masa entre la torre de enfriamiento y los alrededores es insignificante • Se supone que el calor específico de los fluidos es constante • La película de agua pulverizada cubre de manera uniforme toda la pared de los tubos y las aletas, de modo que el intercambio de calor entre el aire y agua de proceso es insignificante • El flujo del agua del proceso y el aire es aproximadamente contracorriente
Al-Waked y Behnia (2006)	• Uso de la aproximación Euleriana-Lagrangiana • Dominio (<i>enclosure</i>) → radio y altura → 500 m • Modelo físico de torre de enfriamiento: • $D_{base} = 95.2 \text{ m}$ // $H = 129.8 \text{ m}$ // $H_{interior} = 8.6 \text{ m}$
Klimanek <i>et al.</i> (2015)	• Utilizaron elementos tetraédricos y hexaédricos en la malla • Dominio (<i>enclosure</i>) → diámetro = 200 m y altura = 300 m • Modelo físico de torre de enfriamiento: • $D_{base} = 95 \text{ m}$ // $D_{salida} = 54.74 \text{ m}$ // $H = 129.8 \text{ m}$ // • Gases de combustión → $D_{tubo} = 7 \text{ m}$ // $H_{base} = 25.86 \text{ m}$

Autor	Características particulares del modelo matemático computacional
Tissot, Boulet, Trinquet, Fournaison y MacChi-Tejeda (2011)	- Estudio numérico para determinar las condiciones de enfriamiento de aire mediante la evaporación de gotas en condensadores (torres de enfriamiento evaporativas). Acoplamiento entre la fase continua y dispersa - Modelo físico de túnel de viento: - Dimensiones $\rightarrow ST = 0.38 \times 0.26 \text{ m}^2$; $l = 1.70 \text{ m}$ $\dot{V} = 0.025 \text{ l/min}$ // $d_{\text{gota}} = 25 \sim 50 \text{ }\mu\text{m}$ // aspersor cónico a 72° // $T_{\text{gota}} = 298 \text{ K}$ // $v_{\text{gota}} = 10 \text{ m/s}$ - Aire $\rightarrow T_{\text{aire}} = 298 \text{ K}$; $HR = 30 \%$; $v_{\text{gota}} = 1 \text{ m/s}$

Otro aspecto importante en el estudio de las torres de enfriamiento es determinar la cantidad de agua que se pierde bajo diferentes condiciones operativas. Además, los estudios sobre las gotas de agua se concentran en las zonas de aspersión y lluvia, y se utilizan herramientas para medir los cambios en el diámetro de las gotas.

El proceso de evaporación de gotas en una corriente de aire a contraflujo ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas debido a su presencia en una vasta gama de aplicaciones. Durante este fenómeno, el tamaño de las gotas disminuye de forma continua, lo que requiere abordar el problema en condiciones no estacionarias. El diámetro de la gota es un parámetro significativo que determina la influencia de ciertos factores, como la tensión superficial, la fuerza gravitacional y el camino libre medio de las moléculas de vapor en el proceso de evaporación. Por lo tanto, es necesario seleccionar un modelo físico adecuado para la evaporación de gotas que tome en consideración los factores más relevantes (Borodulin, Letushko, Nizovtsev, & Sterlyagov, 2016).

Cabe resaltar que la energía requerida para evaporar el agua es mucho mayor que la necesaria para enfriar la misma cantidad de agua en 1 °C. Una sola gota de agua en un entorno no saturado experimenta procesos de transferencia de calor, masa y momento, como sigue:

- El gradiente de temperatura en la interfaz gota-aire provoca una transferencia neta de calor del aire a la superficie de la gota si el aire es más caliente que la gota.
- La concentración de vapor de agua cerca de la superficie del agua da lugar a la difusión del agua desde la superficie de la gota al aire no saturado. Debido a la energía latente de este cambio de fase, dicha transferencia de masa está fuertemente acoplada con la transferencia de calor.
- Si hay un movimiento relativo entre la gota de agua y el aire circundante, se producirá una transferencia de impulso entre ellos. Esta transferencia de impulso tiende a aumentar la velocidad tanto del calor como de la transferencia de masa.
- No se produce aglomeración, colisión o coalescencia de gotas de agua.
- El flujo de masa de agua que pasa a través de la zona de relleno se distribuye de modo uniforme y todos los diámetros de las gotitas son iguales (en la práctica se debe usar un diámetro efectivo de las gotas) (González-Pedraza *et al.*, 2018).
- Las gotas ingresan a la zona de lluvia con velocidad absoluta cero (las pruebas numéricas muestran que las velocidades de entrada de gotitas variables tienen una influencia relativamente pequeña en el rendimiento general si las gotas ingresan a la zona de lluvia por debajo del 10 % de la velocidad terminal).

- Las gotas que caen no tienen efecto en la distribución de la velocidad del aire ni en la solución de flujo potencial al flujo de aire.
- No hay interacción mutua entre las gotas con respecto a la transferencia de masa y la resistencia viscosa.
- Las propiedades físicas tanto de las gotitas como del aire cambian de manera insignificante al atravesar la zona de lluvia.

Las investigaciones experimentales y numéricas expuestas en este documento destacan varias relaciones entre las propiedades de la gota, como su trayectoria, velocidad inicial, temperaturas iniciales del agua y del aire, y el diámetro de la gota, entre otros aspectos. Cerqueira, Paladino y Maliska (2015) llevaron a cabo un análisis numérico de partículas fluidas tanto esféricas como deformadas en un flujo laminar ($Re = 80.0$). Encontraron que, a medida que las partículas se deformaban, el coeficiente de transferencia disminuía, aunque el aumento del área compensaba este efecto sobre la transferencia de calor.

Terblanche, Reuter y Kröger (2009) realizaron un estudio experimental enfocado en analizar la distribución de los tamaños de gota presentes en la zona de lluvia de torres de enfriamiento. Para llevar a cabo su investigación, emplearon técnicas fotográficas y evaluaron tres tipos diferentes de relleno dentro de las torres. Durante los experimentos variaron las condiciones de entrada tanto del agua como del aire con el objetivo de cuantificar los cambios en el diámetro de las gotas. Los autores recurrieron a la correlación empírica conocida como Rosin-Rammler, la cual es ampliamente utilizada para caracterizar distribuciones de tamaño de partículas.

Duguid (1969) llevó a cabo una investigación sobre los rangos de evaporación de pequeñas gotas de agua, con diámetros entre 3 y 9 μm

en caída libre dentro de una corriente de aire a contraflujo en un tubo vertical. Realizó experimentos para comparar los resultados obtenidos de manera experimental con los modelos teóricos, y logró determinar la posición de las gotas a partir del análisis de imágenes, lo que le permitió observar y cuantificar los cambios que estas experimentaban a lo largo del tiempo.

Sartor y Abbott (1975) estudiaron el movimiento acelerado de gotas de agua con un número de Reynolds entre 0.01 y 5, y realizaron experimentos para comparar los resultados obtenidos. Obtuvieron expresiones analíticas para la velocidad y distancia de caída en función del tiempo mientras las gotas aceleraban. Concluyeron que, dentro de ese rango de Reynolds, las fuerzas de arrastre pueden utilizarse en soluciones numéricas y analíticas para las ecuaciones de movimiento de gotas aceleradas.

En el estudio numérico realizado por Lorenzini y Saro (2013) se evaluó la dinámica de gotas de agua durante su proceso de evaporación en aire. Su modelo numérico contempló todos los fenómenos transitorios involucrados en la dinámica del fluido térmico, como calentamiento, enfriamiento, evaporación y condensación, así como los efectos dinámicos de fricción y flotabilidad.

Givoni (1997) llevó a cabo un estudio experimental centrado en analizar el proceso de evaporación que ocurre en gotas de agua al entrar en contacto con una corriente de aire. En su investigación comparó el comportamiento y rendimiento de dicho fenómeno bajo diferentes condiciones climáticas. Los hallazgos revelaron que el desempeño de la evaporación se ve influenciado por diversos elementos de diseño, tales como la altura de la zona de aspersión, el caudal de agua utilizado, el sistema de aspersión empleado o el tamaño de las gotas involucradas.

Pearlmutter, Erell, Etzion, Meir y Di (1996) desarrollaron un prototipo de torre de enfriamiento por evaporación a pequeña escala. En su estudio variaron los parámetros operativos tanto para el aire como para el agua y lograron una reducción de temperatura de 10 °C en condiciones de verano. A pesar de la expectativa de que el proceso de evaporación sería más eficiente debido al uso de pequeñas gotas de agua dispersas en un área de superficie relativamente mayor, no encontraron evidencia que respaldara esta relación en la torre real. Los autores concluyeron que determinar una relación precisa entre el diámetro de la gota y la eficiencia de enfriamiento sigue siendo un tema abierto a investigación.

Fisenko, Petruchik y Solodukhin (2002) observaron cierta dependencia en el tamaño de la gota con respecto al flujo de agua. Pudieron determinar el valor de un radio de gota efectivo en función de la carga hidráulica con valor a 1 mm. El modelo matemático permite predecir parámetros operativos en las distintas zonas de la torre de enfriamiento.

Gilani y Parpanji (2018) realizaron un estudio numérico con el objetivo de mejorar la precisión de los modelos matemáticos utilizados para predecir el rendimiento de las torres de enfriamiento. Además, los investigadores consideraron el proceso de evaporación de las gotas de agua al incorporar una ecuación que describe la variación del diámetro de las mismas a medida que atraviesan la torre. Finalmente, un estudio paramétrico mostró que el aumento en la altura (de 6 a 8 m) de las torres conduce a la disminución de la temperatura del agua de salida.

En las investigaciones de Ivchenko (1979), Ivchenko (1984), e Ivchenko y Muradyan (1982) se estudiaron los fenómenos de evaporación de gotas esféricas bajo condiciones controladas de laboratorio. Logró

derivar una fórmula analítica que permite determinar la reducción del diámetro de las gotas en función del tiempo transcurrido, aplicable a diferentes regímenes o etapas temporales del proceso evaporativo.

Chini y Amirfazli (2013) realizaron un estudio enfocado en comprender el proceso de evaporación de gotas esféricas en un ambiente estático o inactivo. En su trabajo desarrollaron un modelo transitorio y convectivo basado en los principios de transferencia de calor, para explicar el fenómeno evaporativo en gotas. Este modelo involucra la evaluación de las consideraciones planteadas por Maxwell con el fin de determinar la tasa de evaporación de las gotas de manera precisa.

Respecto a la caída libre de gotas, Guella, Alexandrova y Saboni (2008) investigaron la influencia que tiene el fenómeno de evaporación sobre la velocidad instantánea de gotas con diámetros inferiores a un milímetro durante su descenso. Los autores realizaron experimentos utilizando un modelo de columna vertical, los cuales les permitieron validar su modelo matemático propuesto. Este modelo predictivo se basó en la solución de la ecuación que gobierna el movimiento de la gota y considera los efectos del cambio de fase por evaporación.

Collin *et al.* (2007) llevaron a cabo una simulación numérica para estudiar el comportamiento de gotas de agua pulverizadas y el impacto de la atenuación de la radiación en relación con la dinámica de estas gotas. Los pasos clave de la simulación fueron los siguientes: rastrear las gotas inyectadas en aire húmedo, considerando las condiciones de inyección, gravedad, arrastre, vaporización y dispersión turbulenta; describir el flujo de aire inducido principalmente por los efectos de arrastre; observar el fenómeno de la propagación de la radiación a través de este medio debido a las correspondientes propiedades de absorción y

dispersión. Para la solución de la dinámica de gotas proponen los siguientes pasos (Collin *et al.*, 2007):

1. Primer seguimiento de las gotas en el aire en reposo; descartar la evaporación, transferencia de calor y dispersión turbulenta en el cálculo de la trayectoria para minimizar el tiempo computacional de esta etapa temprana del cálculo; registrar cada paso y calcular su contribución a los diversos términos fuente dirigidos a modelar la influencia de la fase dispersa en la continua.

2. Solución de la simulación Euleriana para el flujo de aire en condiciones isotérmicas, teniendo en cuenta los resultados del paso anterior para la fase dispersa que inducirá el flujo de aire debido a los efectos de arrastre.

3. Seguimiento de las gotas en el campo de flujo correspondiente sin considerar la transferencia de calor y vaporización, evaluando los términos fuente ajustados que se incorporarán en el siguiente paso de la solución Euleriana.

4. Solución para la simulación Euleriana de la fase fluida en condiciones isotérmicas teniendo en cuenta las estadísticas corregidas producidas por el paso anterior, realizando 200 iteraciones.

5. Repetición de los pasos (3) y (4) hasta que la convergencia se considere suficiente; el número de iteraciones garantiza que los llamados efectos de acoplamiento bidireccional se han tenido en cuenta de forma correcta.

6. Repetición de los pasos (3) y (4); activación de los efectos de vaporización y transferencia de calor hasta alcanzar la convergencia completa.

Nuyttens, Baetens, De Schampheleire y Sonck (2007) desarrollaron un equipo de prueba y un protocolo para caracterizar boquillas de pulverización mediante la medición de tamaños y velocidades de gotas, utilizando principios de dispersión de luz. Es importante destacar que el rango de tamaño de las gotas medidas oscilaba entre 80 y 700 micras.

Continuando con el trabajo de Kachhwaha *et al.* (1998), Sureshkumar, Dhar y Kale (2007) llevaron a cabo un análisis sobre el efecto del modelado de aspersores. Para ello, desarrollaron un modelo de transferencia de masa y calor que describe la interacción entre el aire y el agua en diferentes condiciones, como el diámetro de la gota, la velocidad del aire, la temperatura del bulbo seco y la humedad específica. Los tamaños de las gotas utilizados variaron entre 3 y 5.5 milímetros.

Muangnoi, Asvapoositkul y Hungspreugs (2014) realizaron un análisis de sensibilidad para evaluar la variación de cada parámetro de diseño que afecta la evaporación de gotas de agua. Estos parámetros incluyen la altura del sistema de pulverización, la relación de flujo másico de agua-aire, el diámetro inicial de la gota, la temperatura del agua de entrada, la temperatura de bulbo seco, la velocidad inicial de pulverización y la velocidad del aire, y cómo influyen en el rendimiento del sistema.

Cui, Li, Peng, Cheng y Li (2016) desarrollaron un modelo matemático de gotas utilizadas en una torre de enfriamiento para el estudio de la dinámica de gota y desempeño térmico; validaron su modelo con datos operativos en condiciones reales, y analizaron también las influencias de diferentes velocidades iniciales del aire y agua en la distribución de temperatura a diferentes alturas de la torre.

Kumar y Chandra (2015) desarrollaron un modelo y simulación numérica de la evaporación de una gota, que destaca la dinámica de burbujas y gotas, así como el efecto del cambio de fase en la dinámica de la caída de una gota para distintos valores utilizando el modelo de turbulencia κ - ϵ .

Sirena (2013) propuso un indicador de calidad para evaluar la eficiencia en el consumo de energía del ventilador en una torre de enfriamiento de tiro mecánico; resalta su relevancia al momento de seleccionar o ajustar los componentes internos. Además, en concordancia con otros estudios previos, los autores coincidieron en que la eficiencia de la torre de enfriamiento aumenta a medida que se incrementa la relación entre los flujos máscicos de agua y aire (l/g). La Tabla 5 muestra de forma resumida las características particulares para modelar los fenómenos evaporativos en gotas de agua.

Tabla 5. Características particulares para modelar los fenómenos evaporativos en gotas de agua.

Autor	Suposiciones clave
Lorenzini y Saro (2013)	- El sistema físico considerado es una sola gota que sale de la boquilla de un rociador y se genera exactamente en correspondencia con la salida de la boquilla - Las fuerzas aplicadas al sistema son peso, flotabilidad y fricción - La gota tiene un cuerpo completamente esférico en su recorrido - El volumen de la gota es variable en la caída debido a su evaporación continua - El viento se considera como una entidad vectorial, lo que puede afectar el vuelo de las gotas en todas las direcciones o sentidos posibles - Se deben realizar estudios paramétricos en la humedad del aire y la radiación (solar/ambiental) para ver cambios potenciales en los resultados - La difusión de la fase continua en el agua es despreciable
Pearlmutter <i>et al.</i> (1996)	- El gradiente de temperatura entre las fases continua y dispersa provoca una transferencia neta de calor del aire a la superficie de la gota si el aire es más caliente que la gota - La concentración de vapor de agua cerca de la superficie de la gota da paso a la difusión del agua desde la superficie de la gota al aire no saturado. Esta difusión de agua necesita una evaporación previa de la gota. Debido a la energía latente de este cambio de fase, esta transferencia de masa está fuertemente acoplada a la transferencia de calor - Si hay un movimiento relativo entre la gota y el aire circundante, se producirá una transferencia de impulso entre ellos. Esta transferencia de impulso tiende a aumentar la tasa de transferencia de calor y de masa
Gilani y Parpanji (2018)	- Las gotas de agua viajan en dirección vertical desde la salida del aspersor hasta el depósito - Las gotas son esferas y su forma (no su tamaño) no cambia durante el movimiento - El movimiento de la gota alcanza una velocidad constante desde la salida del aspersor - El movimiento de la gota después de que alcanza una velocidad es constante y continúa viajando con esta velocidad

Autor	Suposiciones clave
Collin <i>et al.</i> (2007)	• Seguimiento de las gotas inyectadas en aire húmedo tomando en cuenta las condiciones de inyección, gravedad, arrastre, vaporización y dispersión turbulenta • Descripción del aire inducido por efectos de arrastre • Propagación de radiación a través de este medio debido a las propiedades de absorción y dispersión • La ruptura hidrodinámica de las gotas, posibles colisiones y efectos de coalescencia no se incluyen en el seguimiento Lagrangiano
Cui <i>et al.</i> (2016)	• Las interacciones entre las gotas son insignificantes, y las gotas ascendentes no chocan con las gotas que caen • Las condiciones de la gota y aire son uniformes, solo cambian con la dirección vertical • El aire y la solución tienen propiedades físicas constantes • No se produce transferencia de calor y masa en la pared del dispositivo • La concentración de la solución es constante (en este estudio se optó por una solución de cloruro de calcio con una fracción de masa del 16 %), ya que el vapor de agua contenido en el aire es insignificante en comparación con el flujo de masa de la solución; el diámetro de la gota no cambia debido a la misma razón • La resistencia térmica dentro de las gotas es insignificante en comparación con el lado del aire

Para evaluar los modelos numéricos y contrastar los resultados obtenidos en las investigaciones sobre torres de enfriamiento se pueden emplear dos métodos principales (Montazeri *et al.*, 2015):

- Mediciones a gran escala: se llevan a cabo en la torre real, lo que permite estudiar la situación *in situ* y considerar toda la complejidad del problema. Sin embargo, generalmente se limitan a zonas localizadas o a condiciones operativas específicas.

- Mediciones de túnel de viento a nivel de laboratorio: este método ofrece un alto grado de control sobre las condiciones operativas y permite realizar cambios de diseño tanto estructurales como de componentes internos. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para profundizar en el estudio del comportamiento de las torres de enfriamiento. No obstante, los requisitos de similitud a veces son incompatibles y sus limitaciones dependen del tamaño del experimento y de los puntos de interés que se deseen analizar.

En comparación con las mediciones a escala real, las pruebas a escala de laboratorio suelen contar con un sistema de instrumentación más avanzado y un mayor control sobre las condiciones experimentales, lo que permite evitar la interferencia de la turbulencia ambiental. Los datos experimentales resultantes suelen ser más consistentes y estables. De acuerdo con Li, Gurgenci, Guan, Wang y Xia (2019), los resultados obtenidos en laboratorio no pueden aplicarse de forma directa para predecir el comportamiento de torres reales a menos que se cumplan las condiciones de similitud geométrica y dinámica entre ambas (como los números de Froude y Reynolds).

La metodología experimental se basa en el principio de funcionamiento de las torres de enfriamiento. El agua se distribuye de manera uniforme en la zona de aspersión, desde donde cae en dirección vertical a través del relleno. Las gotas de agua atraviesan el relleno y se acumulan en un depósito contenedor ubicado en la parte inferior de la torre. De forma simultánea se introduce aire a contracorriente mediante un ventilador centrífugo, cuya velocidad puede ser ajustada. El agua del depósito se recircula hacia los aspersores por medio de una bomba, pasando previamente por un calentador eléctrico para controlar su temperatura. Antes de iniciar el experimento, se instala el equipo de

monitoreo, que incluye sensores de temperatura y humedad, flujómetros, anemómetros y cámaras de alta velocidad. Se verifica el correcto funcionamiento de cada componente y, una vez que todo está listo, se procede a iniciar las pruebas.

Asvapoositkul y Treeutok (2012) desarrollaron un método de cálculo para determinar las características de operativas de una torre de enfriamiento y la masa de agua evaporada en términos de la relación de flujos agua-aire. Los resultados experimentales se pueden utilizar para optimizar el diseño de la torre de enfriamiento para un conjunto dado de condiciones de operación.

Širok, Iagojevič, Novak, Hočevár y Jere (2003) llevaron a cabo diagnósticos en torres de enfriamiento de tiro natural mediante mediciones experimentales y análisis de transferencia de calor y masa. Relacionaron la eficiencia de la torre de enfriamiento con las características geométricas de las gotas, así como con los flujos máscos de aire y agua. Utilizaron un robot para mapear el flujo de aire saliente y determinar la ubicación exacta de los problemas de distribución de agua, que causan falta de homogeneidad en los perfiles de velocidad y temperatura. La Tabla 6 muestra las características particulares en investigaciones para validar de forma experimental estudios en torres de enfriamiento.

Tabla 6. Características particulares en investigaciones para validar de forma experimental estudios en torres de enfriamiento.

Autor	Dimensión y características de la experimentación
Naphon (2005)	- Dimensiones $\rightarrow ST = 0.15 \times 0.15 \text{ m}^2$; $H = 0.48 \text{ m}$ - Incluye relleno: cobertura de área de 1.19 m^2
Pearlmutter <i>et al.</i> (1996)	Dimensiones $\rightarrow ST = 1 \times 1 \text{ m}^2$; $H = 3 \text{ m}$
Lucas, Martínez y Viedma (2009), y Lucas <i>et al.</i> (2012)	- Dimensiones $\rightarrow ST = 0.70 \times 0.48 \text{ m}^2$; $H = 2.597 \text{ m}$ - Incluye relleno de fibra de vidrio: $H = 1.13 \text{ m}$ - Evaluaron distintos tipos de empaquetadura para el eliminador de bruma
Tissot <i>et al.</i> (2001)	Dimensiones $\rightarrow ST = 0.38 \times 0.26 \text{ m}^2$; $L = 1.70 \text{ m}$
Asvapoositkul y Treeutok (2012)	- Dimensiones $\rightarrow ST = 1 \times 1 \text{ m}^2$; $H = 3.35 \text{ m}$ - Incluye relleno: $H = 1.50 \text{ m}$ - Zona de lluvia: $H = 0.40 \text{ m}$
Montazeri <i>et al.</i> (2015)	- Estudio numérico experimental en túnel de viento - Dimensiones $\rightarrow ST = 0.585 \times 0.585 \text{ m}^2$; $L = 1.90 \text{ m}$
Muangnoi <i>et al.</i> (2014)	- Dimensiones $\rightarrow ST = 1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$; $H = 3.35 \text{ m}$ - Altura del aspersor: $1.7 \sim 2.5 \text{ m}$
Cui <i>et al.</i> (2016)	- Dimensiones $\rightarrow ST = 0.60 \times 0.60 \text{ m}^2$; $H = 1.71 \text{ m}$ - Altura del aspersor: $1.7 \sim 2.5 \text{ m}$

De los montajes experimentales revisados, se pueden observar similitudes entre los casos estudiados aplicados al análisis de gotas de agua. Dichas características son las siguientes:

- La geometría de la torre de enfriamiento presenta dos configuraciones: una forma tubular vertical o una con una base de sección

cuadrada (que en configuración horizontal se asemeja a un túnel de viento).

- Dentro de los equipos que integran la experimentación se encuentran: un sistema de bombeo (que incluye la bomba de circulación, calentador eléctrico, sistema de tubería y accesorios); un equipo de monitoreo de propiedades (sensores de temperatura y humedad, flujómetro, anemómetros, cámara de alta velocidad, etc.), y un ventilador con variador de velocidad.
- El diseño del experimento puede o no contener relleno para su análisis.
- La altura de la torre se mide desde el nacimiento y concepción de la gota hasta donde cae la misma, que en general oscila desde 0.6~1.20 m. Por otro lado, la altura total de los experimentos a escala laboratorio ronda entre 2~2.5 m.
- El diseño del experimento, el método utilizado o el análisis de incertidumbre no forman parte de las investigaciones consultadas (Tabla 6). La validación de los modelos numéricos se compara con los resultados obtenidos mediante experimentación.

Discusión

En este trabajo se realizó una revisión exhaustiva de las metodologías y estudios existentes orientados al consumo de agua debido a las pérdidas por evaporación y arrastre en torres de enfriamiento a contraflujo. Se puntualizaron las partes esenciales de las torres de enfriamiento, los principios termodinámicos, el efecto de la humedad relativa, además de los modelos matemáticos empleados en el cálculo de los fenómenos de

transferencia de calor y masa, el uso de herramientas CFD, las técnicas experimentales para la validación de resultados, y las aplicaciones relacionadas con el estudio de fenómenos asociadas con la evaporación de gotas de agua.

Al analizar los diferentes enfoques presentados es posible identificar diversas estrategias que se ajusten a las necesidades específicas de cada componente interno de la torre de enfriamiento húmeda, contemplados en la Tabla 1 (Li *et al.*, 2018; Kachhwaha *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2017; Tomás *et al.*, 2018; Lemouari *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2019; Ramkrishnan & Arumugam, 2013; Goshayshi & Missenden, 2000); por lo tanto, la revisión y el análisis de varias metodologías pueden servir de guía al investigador hacia los campos generales de interés en el estudio de torres de enfriamiento.

Respecto a los enfoques que se pueden desarrollar en estudios de torres de enfriamiento, se puede establecer lo siguiente:

- Enfoque por zona: desarrollan mejoras por componente de la torre de enfriamiento húmeda, como los mostrados en la Tabla 1.
- Enfoque por método de investigación: desarrollan modelos matemáticos para predecir el funcionamiento operacional de la torre de enfriamiento; dan solución analítica y numérica por medio de CFD (Rotar *et al.*, 2005; Jiang *et al.*, 2013; Wan *et al.*, 2017; Blain *et al.*, 2016; Al-Waked & Behnia, 2006; Klimanek *et al.*, 2015; Velandia *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016; Montazeri *et al.*, 2015). A través de este enfoque pueden evaluarse modelos en 2D y 3D, dependiendo del tamaño del dominio computacional, a distintas condiciones operacionales como las mostradas en la Tabla 4.

- Enfoque por método de investigación experimental: los aportes dados por medio de modelos matemáticos son validados, como al ajustar parámetros operacionales de la torre de enfriamiento húmeda. Los experimentos pueden ser a escala real o a escala laboratorio (Montazeri *et al.*, 2015). En la Tabla 6 se determinaron características particulares en los experimentos; sin embargo, las investigaciones consultadas no muestran a detalle el diseño del experimento o cálculo sobre la incertidumbre de la medición obtenida.

Con base en estas metodologías, los objetivos generales derivados de las investigaciones son los siguientes:

- Los estudios numéricos buscan mejorar las relaciones de Merkel, en función del método de Merkel, Poppe y ε -NTU para resolver modelos numéricos (Kloppers & Kröger, 2005; Rezaei, Shafiei, & Abdollahnezhad, 2010).
- Determinar los parámetros operativos a partir de un modelo matemático, que permitan un mejor desempeño de la torre de enfriamiento húmeda, comparando los resultados con datos experimentales (Naik & Muthukumar, 2017).
- Mejora de la transferencia de calor y masa entre los flujos de agua y aire dentro de la torre o en la zona de relleno, que a su vez mejoran el desempeño de la torre de enfriamiento húmeda (Širok *et al.*, 2003; Naphon, 2005; Al-Waked & Behnia, 2006; Qi *et al.*, 2008; Lemouari *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2013; Ramkrishnan & Arumugam, 2013).

Dentro de las propuestas de investigación por zonas o componentes se analizó en la Tabla 1 que se pueden incluir los siguientes: la caracterización de la distribución del agua y la formación de gotas en la zona de aspersión; el análisis de la transferencia de calor y masa entre el

aire y el agua en distintas configuraciones y/o materiales en la zona de relleno, y el estudio de la evaporación y transferencia de calor y masa entre las gotas de agua y el aire en la zona de lluvia.

Se destacó la importancia e impacto ambiental que tienen las torres de enfriamiento en el sector de generación de energía, al ser el principal consumidor de agua por medio del agua de reposición para compensar las pérdidas por evaporación y arrastre, pues el consumo promedio de agua puede variar entre 1~2 l/kWh en plantas de ciclo combinado o termoeléctricas convencionales (Guerras & Martín, 2020).

Finalmente, los enfoques mencionados con anterioridad permiten contrastar la meta general de las investigaciones con el objetivo de reducir el consumo de agua de reposición, priorizar el análisis de fenómenos evaporativos en las gotas de agua y optimizar el funcionamiento de la torre de enfriamiento húmeda, principalmente en sistemas de generación de electricidad, ya que forman parte importante del nexo agua-energía en el manejo de recursos hídricos de países en desarrollo (Bauer *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2012; Gjorgiev & Sansavini, 2018). La Figura 8 resume en forma de diagrama de flujo lo mencionado en esta sección.

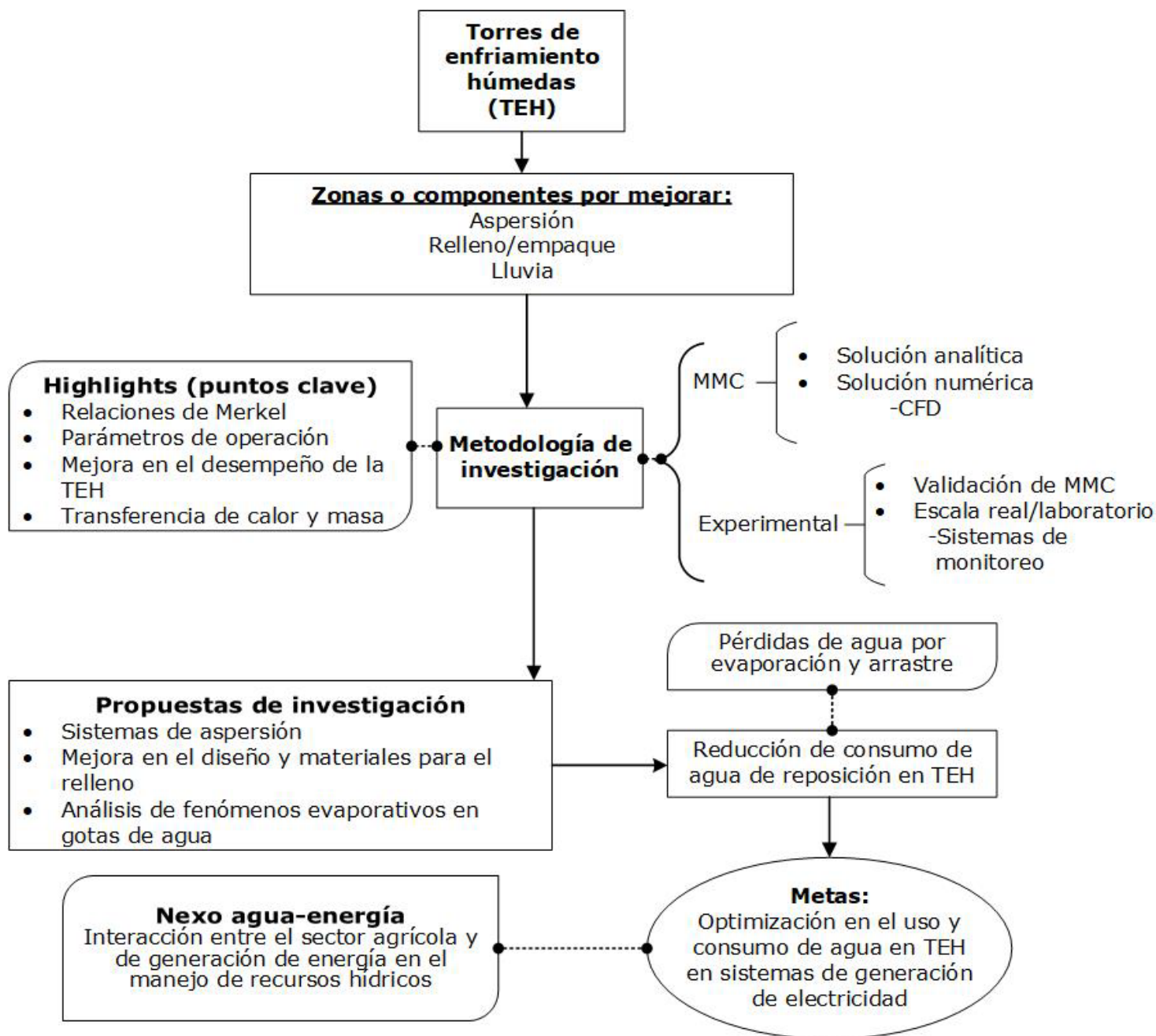


Figura 8. Relación de enfoques y encuadre en la investigación de torres de enfriamiento húmedas.

En cuanto a la validación de los modelos CFD mediante experimentos, las investigaciones consultadas no ofrecen información a

detalle del diseño del experimento. Es decir, la técnica utilizada, cómo se realizó el muestreo para la obtención de los datos reportados o la estimación de la incertidumbre de medición en los resultados obtenidos; esto se debe a que los aportes al estado del arte de las investigaciones cumplen con otros objetivos y que los autores no comparten más información al respecto. Ello puede ser un área de interés para desarrollar a futuro, en donde la investigación resalte a mayor detalle el diseño experimental para evaluar la caída de una gota de agua en torres de enfriamiento a contraflujo.

Conclusiones

El presente trabajo mostró una comparativa de estudios realizados a torres de enfriamiento húmedas a contraflujo para sintetizar aportes, estudios y metodologías, con un enfoque hacia el consumo de agua en los procesos evaporativos por transferencia de calor en gotas de agua para calcular las pérdidas de agua por evaporación y arrastre. También se abordaron las características particulares de los estudios numéricos y experimentales.

En cuanto a los modelos matemáticos consultados, se identificaron algunas consideraciones utilizadas en investigaciones de fenómenos evaporativos en gotas de agua, y la solución de los modelos matemáticos por medio de *software* especializado para simular el flujo de fluidos, además se realizó un modelado analítico que aborda los elementos clave para el estudio de los fenómenos evaporativos en gotas de agua. Las investigaciones revisadas abordan las principales suposiciones clave en la solución de los modelos matemáticos.

Finalmente, se determinaron las características particulares para validar estudios experimentales a escala laboratorio, como la geometría utilizada, la altura de la torre de enfriamiento y los equipos de monitoreo que pueden incluir en la validación experimental, además de ser la mejor opción a tener en cuenta a la hora de implementar mejoras sobre los equipos auxiliares que componen a la torre de enfriamiento.

Referencias

- Al-Waked, R., & Behnia, M. (2006). CFD simulation of wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 26(4), 382-395. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.06.018
- Araneo, L. T. (2012). Droplet separators for evaporative towers: Efficiency estimation by PDA. In: *ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (pp. 1-8). Heidelberg, Germany.
- Asvapoositkul, W., & Treeutok, S. (2012). A simplified method on thermal performance capacity evaluation of counter flow cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 38, 160-167. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.025
- Baker, D. R., & Shryock, H. A. (1961). A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance. *ASME Journal of Heat Transfer*, 83(3), 339-349. DOI: 10.1115/1.3682276
- Bauer, D., Philbrick, M., Vallario, B., Battey, H., Clement, Z., & Fields, F. (2014). *The water-energy nexus: Challenges and opportunities*. Washington, DC, USA: US Department of Energy. Recuperado de https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/pgasite/documents/webpage/pga_153127.pdf

- Bijl, D. L., Bogaart, P. W., Kram, T., Vries, B. J. M., & De Vuuren, D. P. van. (2016). Long-term water demand for electricity, industry and households. *Environmental Science and Policy*, 55, 75-86. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.09.005
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Fenómenos de transporte* (2ª ed.). Ciudad de México, México: Limusa Wiley.
- Blain, N., Belaud, A., & Miolane, M. (2016). Development and validation of a CFD model for numerical simulation of a large natural draft wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 105, 953-960. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.020
- Bolot, R., Li, J., & Coddet, C. (2004). Modeling of thermal plasma jets: A comparison between Phoenix and Fluent. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference* (pp. 764-769). Osaka, Japan. DOI: 10.31399/asm.cp.itsc2004p0764
- Borodulin, V., Letushko, V., Nizovtsev, M., & Sterlyagov, A. (2016). The surface temperature of free evaporating drops The surface temperature of free evaporating drops. *Journal of Physics: Conference Series*, 754(3). DOI: 10.1088/1742-6596/754/3/032018
- Cerqueira, R. F. L., Paladino, E. E., & Maliska, C. R. (2015). A computational study of the interfacial heat or mass transfer in spherical and deformed fluid particles flowing at moderate Re numbers. *Chemical Engineering Science*, 138, 741-759. DOI: 10.1016/j.ces.2015.08.054

- Chen, X., Sun, F., & Lyu, D. (2019). Field test study on water droplet diameter distribution in the rain zone of a natural draft wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114252. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114252
- Chin, K. S., Rosli, A. A., Wee, C. S. L., & Ngeow, Y. F. (2005). Isolation of Legionella from cooling towers non-medical buildings in a university campus. *Journal of Health and Translational Medicine (JUMMEC)*, 8(1), 23-27. DOI: 10.22452/jummec.vol8no1.5
- Chini, S. F., & Amirfazli, A. (2013). Understanding the evaporation of spherical drops in quiescent environment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 432, 82-88. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.05.013
- Clift, R., Grace, J. R., & Weber, M. E. (1978). *Bubbles, drops and particles*. Cambridge, USA: Academic Press.
- Collin, A., Boulet, P., Parent, G., & Lacroix, D. (2007). Numerical simulation of a water spray-radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(9), 856-868. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.005
- Cui, H., Li, N., Peng, J., Cheng, J., & Li, S. (2016). Study on the dynamic and thermal performances of a reversibly used cooling tower with upward spraying. *Energy*, 96, 268-277. DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.065
- De-Villiers, E., & Kröger, D. G. (1999). Analysis of heat, mass, and momentum transfer in the rain zone of counterflow cooling towers. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, 121(4), 751-755. DOI: 10.1115/1.2818537

- DEQ. (2009). *Water efficiency manual. Water resources*. Recuperado de <https://www.deq.nc.gov/watereducation/water-efficiency-business-2/download>
- Duguid, H. A. (1969). *A study of the evaporation rates of small freely falling water droplets*. Recuperado de https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5295/
- El-Wakil, M. M. (1985). *Power plant technology*. New York, St. Louis, San Francisco, USA: McGraw-Hill Book Company. Recuperado de <https://lunyx.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/03/power-plant-technology-by-m-m-el-wakil.pdf>
- Fisenko, S. P., Petruchik, A. I., & Solodukhin, A. D. (2002). Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(23), 4683-4694. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00158-8
- Fluent ANSYS. (2013). *ANSYS fluent theory guide*. Canonsburg, USA: ANSYS Inc.
- Fluent ANSYS. (2017). *ANSYS fluent tutorial guide*. Canonsburg, USA: ANSYS Inc.
- Gharagheizi, F., Hayati, R., & Fatemi, S. (2007). Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 277-280. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.002

- Gilani, N., & Parpanji, F. (2018). Parametric study on the outlet water temperature in a shower cooling tower and its application in different Iranian provincial capitals. *International Journal of Thermal Sciences*, 124, 174-186. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.017
- Givoni, B. (February-March, 1997). Performance of the shower cooling tower in different climates. *Renewable Energy*, 10(2-3), 173-178. DOI: 10.1016/0960-1481(96)00059-6
- Gjorgiev, B., & Sansavini, G. (2018). Electrical power generation under policy constrained water-energy nexus. *Applied Energy*, 210, 568-579. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.011
- González-Pedraza, O. J. (2017). *Desarrollo de una metodología para el mejoramiento del diseño del aspersor de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo* (tesis doctoral). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- González-Pedraza, O. J., Pacheco-Ibarra, J. J., & Rubio-Maya, C. (2015). Conceptual design and numerical modeling of prototype counterflow cooling tower with forced draft for geothermal. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 57496, 1-8. DOI: 10.1115/IMECE2015-50634
- González-Pedraza, O. J., Pacheco-Ibarra, J. J., Rubio-Maya, C., Galván-González, S. R., & Rangel-Arista, J. A. (2018). Numerical study of the drift and evaporation of water droplets cooled down by a forced stream of air. *Applied Thermal Engineering*, 142, 292-302. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.011

- Goshayshi, H. R., & Missenden, J. F. (2000). Investigation of cooling tower packing in various arrangements. *Applied Thermal Engineering*, 20(1), 69-80. DOI: 10.1016/S1359-4311(99)00011-3
- Guella, S., Alexandrova, S., & Saboni, A. (2008). Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(7), 886-898. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.07.020
- Guerras, L. S., & Martín, M. (2020). On the water footprint in power production: Sustainable design of wet cooling towers. *Applied Energy*, 263, 114620. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114620
- Heidarinejad, G., Karami, M., & Delfani, S. (2009). Numerical simulation of counter-flow wet-cooling towers. *International Journal of Refrigeration*, 32(5), 996-1002. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.10.008
- Hensely, J. C. (2011). *Cooling tower fundamentals*. Recuperado de <https://www.academia.edu/download/48373575/Cooling-Tower-Fundamentals.pdf>
- Ivchenko, I. N. (1979). Evaporation of spherical drops under conditions of thermostatic control of their surface. *Fluid Dyn*, 14, 790-792. DOI: 10.1007/BF01409829
- Ivchenko, I. N. (1984). The evaporation and growth of spherical droplets at intermediate Knudsen numbers. *Fluid Dynamics*, 19(2), 335-337. DOI: 10.1007/BF01091264
- Ivchenko, N., & Muradyan, S. M. (1982). Evaporation of spherical drops in a binary gas mixture at arbitrary Knudsen numbers. *Fluid Dynamics*, 19, 92-97. DOI: 10.1007/BF01090705

- Jaber, H., & Webb, R. L. (1989). Design of cooling towers by the effectiveness-NTU method. *Journal of Heat Transfer*, 111(4), 837. DOI: 10.1115/1.3250794
- Jiang, J. J., Liu, X. H., & Jiang, Y. (2013). Experimental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 678-689. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.08.043
- Kachhwaha, S. S., Dhar, P. L., & Kales, S. R. (1998). Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray-I. Horizontal parallel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(2), 447-464. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00133-6
- Khamis M. M., & Hassab, M. A. (2014). Innovative correlation for calculating thermal performance of counterflow wet-cooling tower. *Energy*, 74(C), 855-862. DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.059
- Klimanek, A., & Bialecki, R. A. (2009). Solution of heat and mass transfer in counterflow wet-cooling tower fills. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(6), 547-553. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.03.007
- Klimanek, A., Cedzich, M., & Bialecki, R. (2015). 3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection. *Applied Thermal Engineering*, 91, 824-833. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.095

- Kloppers, J. C. (2003). *A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers* (doctoral dissertation). University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa. Recuperado de <https://scholar.sun.ac.za/items/49b7c7b4-763c-487a-8ce3-494521816dca>
- Kloppers, J. C., & Kröger, D. G. (2005). The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(9), 879-884. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.03.006
- Kumar, M., & Chandra, K. (2015). Evaporating falling drop. *Procedia IUTAM*, 15, 201-206. DOI: 10.1016/j.piutam.2015.04.028
- Lemouari, M., Boumaza, M., & Kaabi, A. (2011). Experimental investigation of the hydraulic characteristics of a counter flow wet cooling tower. *Energy*, 36(10), 5815-5823. DOI: 10.1016/j.energy.2011.08.045
- Li, H. W., Duan, W. B., Wang, S. B., Zhang, X. L., Sun, B., & Hong, W. P. (2018). Numerical simulation study on different spray rates of three-area water distribution in wet cooling tower of fossil-fuel power station. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1558-1567. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.107
- Li, M., Dai, H., Xie, Y., Tao, Y., Bregnbæk, L., & Sandholt, K. (2017). Water conservation from power generation in China: A provincial level scenario towards 2030. *Applied Energy*, 208, 580-591. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.096

- Li, X., Gurgenci, H., Guan, Z., Wang, X., & Xia, L. (2019). A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 150, 250-270. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.147
- Li, X., Feng, K., Siu, Y. L., & Hubacek, K. (2012). Energy-water nexus of wind power in China: The balancing act between CO2 emissions and water consumption. *Energy Policy*, 45, 440-448. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.02.054
- Liang, G., & Mudawar, I. (2017). Review of spray cooling. Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 1174-1205. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029
- Llano-Restrepo, M., & Monsalve-Reyes, R. (2017). Modélisation et simulation de tours de refroidissement humide à contre-courant et calcul et corrélation précis des coefficients de transfert de masse pour la prévision de la performance thermique. *International Journal of Refrigeration*, 74, 45-70. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.10.018
- Lopes, R. J., & Quinta-Ferreira, R. M. (2010). Evaluation of multiphase CFD models in gas-liquid packed-bed reactors for water pollution abatement. *Chemical Engineering Science*, 65(1), 291-297. DOI: 10.1016/j.ces.2009.06.039
- Lorenzini, G., & Saro, O. (2013). Thermal fluid dynamic modelling of a water droplet evaporating in air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62(1), 323-335. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.062

- Lu, Y., & Chen, B. (2016). Energy-water nexus in urban industrial system. *Energy Procedia*, 88, 212-217. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.150
- Lucas, M., Martínez, P. J., Ruiz, J., Kaiser, A. S., & Viedma, A. (2010). On the influence of psychrometric ambient conditions on cooling tower drift deposition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(4), 594-604. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.037
- Lucas, M., Martínez, P. J., & Viedma, A. (2009). Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 490-497. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.11.008
- Lucas, M., Martínez, P. J., & Viedma, A. (2012). Experimental determination of drift loss from a cooling tower with different drift eliminators using the chemical balance method. *International Journal of Refrigeration*, 35(6), 1779-1788. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.04.005
- Merkel, F. (1925). Verdunstungskku. *VDI-Zeitchrift*, 70, 123-128.
- Meroney, R. N. (2006). CFD prediction of cooling tower drift. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(6), 463-490. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.01.015
- Miura, K., Miura, T., & Ohtani, S. (1977). Heat and mass transfer to and from droplets (Spray drying). *AIChE Symposium Series*, 73(163), 95-102.
- Recuperado de <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/6473595f08fd68d54601c2d7>

- Montazeri, H., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2015). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 83, 129-141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.022
- Muangnoi, T., Asvapoositkul, W., & Hungspreugs, P. (2014). Performance characteristics of a downward spray water-jet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 69(1-2), 165-176. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.019
- Murrant, D., Quinn, A., Chapman, L., & Heaton, C. (2017). Water use of the UK thermal electricity generation fleet by 2050: Part 1 identifying the problem. *Energy Policy*, 108, 844-858. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.011
- Nahavandi, A. N., & Serico, B. J. (1975). The effect of evaporation losses in the analysis of crossflow cooling towers. *Nuclear Engineering and Design*, 35(2), 269-282. DOI: 10.1016/0029-5493(75)90201-0
- Naik, B. K., & Muthukumar, P. (2017). A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 121, 14-26. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.042
- Naphon, P. (2005). Study on the heat transfer characteristics of an evaporative cooling tower. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(8), 1066-1074. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.016

- Nasrabadi, M., & Finn, D. P. (2014). Mathematical modeling of a low temperature low approach direct cooling tower for the provision of high temperature chilled water for conditioning of building spaces. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 273-282. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.025
- Nuyttens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., & Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 333-345. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001
- Papaefthimiou, V. D., Rogdakis, E. D., Koronaki, I. P., & Zannis, T. C. (2012). Thermodynamic study of the effects of ambient air conditions on the thermal performance characteristics of a closed wet cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 33, 199-207. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.035
- Pearlmutter, D., Erell, E., Etzion, Y., Meir, I. A., & Di, H. (1996). Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower. *Energy and Buildings*, 23(3), 191-197. DOI: 10.1016/0378-7788(95)00944-2
- Picardo, J. R., & Variyar, J. E. (2012). The Merkel equation revisited: A novel method to compute the packed height of a cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 57, 167-172. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.12.016
- Qi, X., Liu, Z., & Li, D. (2007). Performance characteristics of a shower cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 193-203. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.021

- Qi, X., Liu, Z., & Li, D. (2008). Prediction of the performance of a shower cooling tower based on projection pursuit regression. *Applied Thermal Engineering*, 28(8-9), 1031-1038. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2007.06.029
- Qureshi, B. A., & Zubair, S. M. (2006). A complete model of wet cooling towers with fouling in fills. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 1982-1989. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.01.010
- Ramkrishnan, R., & Arumugam, R. (2013). Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing. *Processing and Application of Ceramics*, 7(1), 21-27. DOI: 10.2298/pac1301021r
- Ranz, W. E., & Marshall, W. R. (1952). Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, 48, 141-146. Recuperado de <https://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/2000%20CE/PDF/Che%20Eng%20Pro48,%20141.pdf>
- Rezaei, E., Shafiei, S., & Abdollahnezhad, A. (2010). Reducing water consumption of an industrial plant cooling unit using hybrid cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 311-319. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.09.027
- Rotar, M., Širok, B., Drobnič, B., Novak, M., & Donevski, B. (2005). A numerical analysis of the local anomalies in a natural-draft cooling tower. *Heat Transfer Engineering*, 26(9), 61-72. DOI: 10.1080/01457630500207592
- Ruiz, J., Cutillas, C. G., Kaiser, A. S., Ballesta, M., Zamora, B., & Lucas, M. (2016). Experimental study of drift deposition from mechanical draft cooling towers in urban environments. *Energy and Buildings*, 125, 181-195. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.076

- Ruiz, J., Cutillas, C. G., Kaiser, A. S., Zamora, B., Sadafi, H., & Lucas, M. (2019). Experimental study on pressure loss and collection efficiency of drift eliminators. *Applied Thermal Engineering*, 149, 94-104. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.023
- Ruiz, J., Kaiser, A. S., & Lucas, M. (2017). Experimental determination of drift and PM10 cooling tower emissions: Influence of components and operating conditions. *Environmental Pollution*, 230, 422-431. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.073
- Sánchez, F., Kaiser, A. S., Zamora, B., Ruiz, J., & Lucas, M. (2015). Prediction of the lifetime of droplets emitted from mechanical cooling towers by numerical investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 1190-1206. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.014
- Sartor, J. D., & Abbott, C. E. (1975). Prediction and measurement of the accelerated motion of water drops in air. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 14(2), 232-239. DOI: 10.1175/1520-0450(1975)014<0232:PAMOTA>2.0.CO;2
- Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., Meng, K., & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110301
- Shublaq, M., & Sleiti, A. K. (2020). Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115418. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115418

- Sirena, J. A. (2013). Electrical-fluid dynamic performance of mechanical draft water cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 54(1), 185-189. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.009
- Širok, B., Blagojevič, B., Novak, M., Hočevár, M., & Jere, F. (2003). Energy and mass transfer phenomena in natural draft cooling towers. *Heat Transfer Engineering*, 24(3), 66-75. DOI: 10.1080/01457630304061
- Song, Y., Wu, G., & Song, B. (2021). Water balance test, analysis and application of the wet cooling tower. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 898, 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/898/1/012008
- Srinivasan, S., Kholod, N., Chaturvedi, V., Ghosh, P. P., Mathur, R., Clarke, L., Evans, M., Hejazi, M., Kanudia, A., Nagar Koti, P., Liu, B., Parikh, K. S., Ali, M. S., & Sharma, K. (2018). Water for electricity in India: A multi-model study of future challenges and linkages to climate change mitigation. *Applied Energy*, 210, 673-684. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.079
- Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267-2269. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1
- Sun, Y., Guan, Z., Gurgenci, H., Li, X., & Hooman, K. (2017). A study on multi-nozzle arrangement for spray cooling system in natural draft dry cooling tower. *Applied Thermal Engineering*, 124, 795-814. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.157

- Sureshkumar, R., Dhar, P. L., & Kale, S. R. (2007). Effects of spray modeling on heat and mass transfer in air-water spray systems in parallel flow. *Chemical Engineering Science*, 34, 878-886. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.03.001
- Taghian, S., & Ahmadikia, H. (2017). Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1002-1014. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.069
- Terblanche, R., Reuter, H. C. R., & Kröger, D. G. (2009). Drop size distribution below different wet-cooling tower fills. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1552-1560. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.013
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat exchanger design handbook* (2nd ed.). Boca Raton, USA: CRC Press. DOI: 10.1201/b14877
- Tissot, J., Boulet, P., Trinquet, F., Fournaison, L., & MacChi-Tejeda, H. (2011). Air cooling by evaporating droplets in the upward flow of a condenser. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(11), 2122-2131. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.004
- Tomás, A. C. C., Araujo, S. D. O., Paes, M. D., Primo, A. R. M., Da Costa, J. A. P., & Ochoa, A. A. V. (2018). Experimental analysis of the performance of new alternative materials for cooling tower fill. *Applied Thermal Engineering*, 144(August), 444-456. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.08.076
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., & Tao, Y. (2023). *Computational fluid dynamics: A practical approach*. Maryland Heights, USA: Elsevier.

- Velandia, J. S., Chery, M., & Lopez, O. D. (2016). Computational study of the air flow dynamics in an induced draft cooling tower. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38(8), 2393-2401. DOI: 10.1007/s40430-015-0348-y
- Versteeg, H. K. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 2/E*. Chennai, India: Pearson Education India.
- Vitkovic, P. (2015). Water distribution characteristics of spray nozzles in a cooling tower. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(1), 1-7. DOI: 10.1051/epjconf/20159202109
- Wan, Y., Ren, C., & Xing, L. (2017). An approach to the analysis of heat and mass transfer characteristics in indirect evaporative cooling with counter flow configurations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1750-1763. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.019
- Yang, J., Stratman, J., & Rasmussen, E. (2015). *Cooling tower drift eliminator*. Patent No. 002015. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/US20160356549A1/en>
- Yu, Z., Sun, C., Fang, J., Zhang, L., Hu, Y., & Bao, B. (2021). Water recovery efficiency improvement using the enhanced structure of the mist eliminator. *Process Safety and Environmental Protection*, 154, 433-446. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.018
- Zamora, B., & Kaiser, A. S. (2011). Comparative efficiency evaluations of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation. *Chemical Engineering Science*, 66(6), 1232-1245. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.018

- Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018, November). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD). In: *AIP Conference Proceedings*, 2030(1), 1-8. DOI: 10.1063/1.5066893
- Zhao, Y., Sun, F., Long, G., Huang, X., Huang, W., & Lyv, D. (2016). Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 116(May), 150-164. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.02.071
- Zunaid, M., Murtaza, Q., & Gautam, S. (2017). Energy and performance analysis of multi droplets shower cooling tower at different inlet water temperatures for air cooling application. *Applied Thermal Engineering*, 121, 1070-1079. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.157