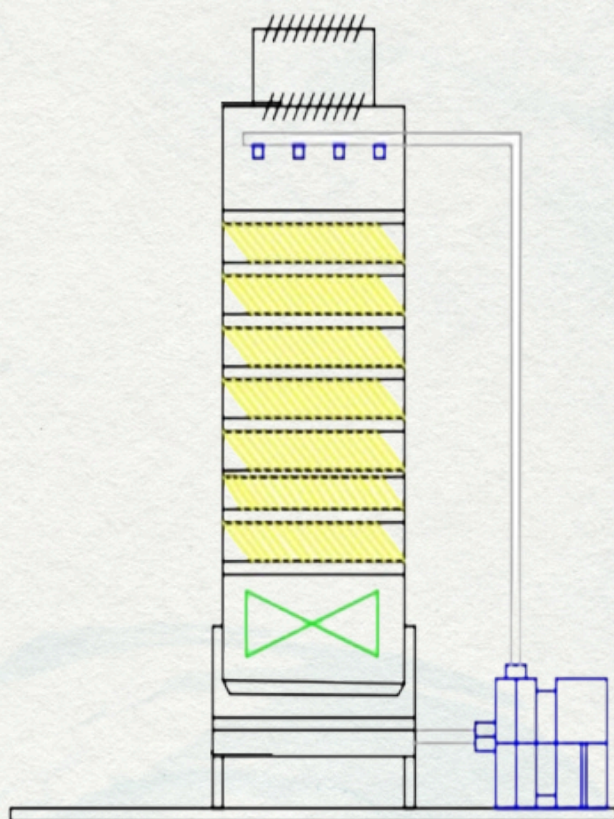


WILSON LEÓN PATRICIO CUEVA
GABRIELA VIVIANA ARMIJOS CABRERA
WASHINGTON OMAR ESPINOZA RAMÓN

TORRE DE HUMIDIFICACIÓN PARA ENFRIAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y APORTES A LA
INGENIERÍA QUÍMICA



Torre de Humidificación para Enfriamiento de Aguas Industriales

Diseño, Construcción y Aportes a la Ingeniería Química

Wilson Patricio León Cueva ¹

Gabriela Viviana Armijos Cabrera ²

Washington Omar Espinoza Ramón ³

¹ Ingeniera Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: wleon@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>

² Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: gvarmijos@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8391-3048>

³ Ingeniera Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: wespinoza@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4151-2347>



Editorial Hambatu Sapiens
Octubre 2025

Copyright © Editorial Hambatu Sapiens

Copyright del texto © 2025 de Autores

International Publication Technical Data

Title: Torre de Humidificación para Enfriamiento de Aguas Industriales. Diseño, Construcción y Aportes a la Ingeniería Química.

Publisher: Editorial Hambatu Sapiens

Cover Design: Editorial Hambatu Sapiens

Authors: Wilson Patricio León Cueva, Gabriela Viviana Armijos Cabrera, Washington Omar Espinoza Ramón.

Format: PDF

Pages: 109 pág.

Size: A4 21x29.7cm

System Requirements: Adobe Acrobat Reader

Access Mode: World Wide Web

ISBN: 978-9942-7442-3-4

DOI: <https://doi.org/10.63862/ehs-978-9942-7442-3-4>

Primera edición, año 2025. Publicado por Editorial Hambatu Sapiens.

El contenido de esta obra, así como la veracidad y precisión de los datos presentados, son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se permite la descarga y distribución libre del libro, siempre que se reconozca debidamente la autoría y no se modifique ni se utilice con fines comerciales. Queda prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización previa. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación.

**® Torre de Humidificación para Enfriamiento de Aguas Industriales.
Diseño, Construcción y Aportes a la Ingeniería Química.**

©2025. Wilson León Patricio Cueva, Gabriela Viviana Armijos Cabrera, Washington Omar Espinoza Ramón.

Licencia y derechos de uso

Torre de Humidificación para Enfriamiento de Aguas Industriales. Diseño, Construcción y Aportes a la Ingeniería Química, está licenciada bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (**CC BY-NC-ND 4.0**).

Para ver una copia de esta licencia, visite:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Queda prohibida su reproducción total o parcial sin autorización previa. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación académica.

Editorial Hambatu Sapiens
Primera edición

ISBN 978-9942-7442-3-4

Tabla de contenidos

Tabla de contenidos.....	iv
Tabla de figuras.....	viii
Resumen	ix
Abstract	x
CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN	2
Objetivos	3
Revisión de Literatura.....	4
1.1. Humidificación	4
1.1.1. Psicrometría.....	5
1.1.2. Carta Psicrométrica.....	5
1.1.3. Humedad Relativa.	7
1.1.4. Humedad Absoluta.....	7
1.1.5. Humedad Específica.	8
1.1.6. Temperatura del Bulbo Húmedo.....	8
1.1.7. Temperatura de Bulbo Seco.	9
1.1.8. Punto de Rocío.	9
1.1.9. Transferencia de Calor.	9
1.1.9.1. Convección.....	9
1.1.9.2. Radiación.....	10
1.1.10. Transferencia de Masa.....	11
1.1.11. Enfriamiento por Evaporación.	11
1.2. Torres de Humidificación.....	13
1.2.1. Torres de Entrada Natural de Aire.	13
1.2.1.1 Torres Atmosféricas.	14
1.2.1.2. Torres de Tiro Natural.....	14
1.2.2. Torres de entrada Mecánica de aire.	15
1.2.2.1. Torres de Tiro Inducido.....	16

1.2.2.2.	Torre de Tiro Inducido en Contracorriente.....	17
1.2.2.3.	Torre de Tiro Inducido de Flujo Cruzado.....	18
1.2.2.4.	Torre de Tiro Forzado.	19
1.2.3.	Torre de Platos.....	21
1.3.	Termodinámica de la Torre de Humidificación	21
1.3.1.	Balance de Materia.	21
1.3.2.	Balance de Energía.	22
1.3.3.	Rendimiento.	22
1.4.	Softwares de Diseño	23
1.4.1.	AutoCAD.	23
1.4.2.	QCAD.	23
1.4.3.	SolidWorks.	24
1.4.4.	Autodesk Inventor.....	25
1.4.5.	SketchUp.	25
1.5.	Softwares de Simulación.....	27
1.5.1.	Simulink.	28
1.5.2.	Aspen Plus.....	28
1.5.3.	DWSIM.	29
1.6.	Estructura de las Torres de Humidificación	30
1.6.1.	Estructura del Cuerpo de la Torre.	30
1.6.2.	Los conductos de la Torre de Humidificación.	32
1.6.3.	Bomba de Agua.	33
1.6.3.1.	Bomba Centrífuga.....	33
1.6.3.2.	Bombas de Atomización.	33
1.6.4.	Paneles de control.	34
1.6.5.	Sensores de Temperatura.....	34
1.6.6.	Medidores de Caudal.	35
1.6.7.	Psicrómetro.....	37
1.6.8.	Hidrómetro.	38
1.6.9.	Medidor de Presión.	39
1.6.10.	Válvulas y Reguladores de Flujo.	40
1.6.11.	Ventilador y Extractor.	41

1.6.11.1.	Función del sistema de ventilador:	42
1.6.11.2.	Función de los extractores:.....	42
1.6.12.	Sistema de Agua de Aporte.....	43
1.6.13.	Chimenea o Virola.....	44
1.6.14.	Sistema de Distribución de Agua.	45
1.6.15.	Pulverizadores o Rociadores.....	46
1.6.16.	Separadores de Gotas.	47
1.6.17.	Rellenos.	48
1.6.18.	Sistema de Salida de Agua.....	49
1.7.	Materiales Utilizados en la Torre de Humidificación	50
1.8.	Recubrimiento de la Torre de Enfriamiento	52
1.9.	Empaquetaduras de lámina Ondulada.....	52
CAPÍTULO II.....		55
METODOLOGÍA		55
2.1.	Simulación en el Software DWSIM	55
2.1.1.	Elección de la Técnica de Investigación.	55
2.1.2.	Aspectos de los Fluidos de Trabajo.	56
2.1.3.	Recolección de Información.....	56
2.1.4.	Modelo Simulador.	57
2.1.5.	Esquema de Distribución del proceso de humidificación.	58
2.1.6.	Elección del Modelo Termodinámico que se quiere utilizar.	59
2.1.7.	Elección de la Torre de humidificación.	60
2.1.8.	Definición de los componentes que influyen en la simulación.	61
2.2.	Diseño de la Torre de Humidificación en el Software QCAD	62
2.2.1.	Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado.....	62
2.2.2.	Condiciones de entrada a la Torre.....	63
2.2.3.	Torre de Presión Estática.....	64
2.2.4.	Selección del Ventilador de la Torre.	65
2.2.5.	Selección de la Fuente de Agua Caliente.	66
2.2.6.	Capacidad de la Bomba.....	67
2.2.7.	Longitud de la Torre de Humidificación para el Tiro Mecánico.	69

2.2.8.	Dimensiones del Relleno.....	70
2.2.9.	Componentes de la Torre en el Software QCAD.....	71
CAPÍTULO III		74
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		74
3.1.	Simulación de la Torre de Humidificación en el Programa DWSIM	74
3.2.	Plano de la torre de humidificación en QCAD.....	78
3.2.1.	Condiciones de Aire entrante a la Torre.....	78
3.2.2.	Presión Estática de la Torre.	79
3.2.3.	Potencia del Ventilador.....	79
3.2.4.	Potencia de la Bomba.....	79
3.2.5.	Altura de la Torre.....	80
3.2.6.	Altura de Relleno.....	80
CAPÍTULO IV		84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		84
4.1.	Conclusiones.....	84
4.2.	Recomendaciones	85
4.2.1.	Simulación.....	85
4.2.2.	Diseño	85
BIBLIOGRAFÍA		86
ANEXOS.....		94

Tabla de figuras

Figura 1 Carta Psicométrica De Aire – Agua A 1 Atm	6
Figura 2 Torre De Enfriamiento Por Evaporación.....	12
Figura 3 Sistema Atmosférico De Torre De Humidificación.	14
Figura 4 Torre De Humidificación De Tipo Natural.....	15
Figura 5 Torre Inducida De Humidificación Y Sus Elementos.	16
Figura 6 Torre De Tiro Mecánico Inducido En Contracorriente.	17
Figura 7 Torre De Tiro Mecánico Inducido De Flujo Cruzado.	18
Figura 8 Torre De Humidificación De Tiro Forzado.	19
Figura 9 Torre De Humidificación De Tiro Forzado Cruzado.	20
Figura 11 Software Aspen Plus.....	29
Figura 12 Modelo De Peng-Robinson En El Simulador Dwsim.	60
Figura 13 Esquema De La Humidificación En Dwsim.....	61
Figura 14 Características Del Agua En El Ingreso De La Torre De Humidificación. ...	62
Figura 15 Armazón Y Ventilador De La Torre.	66
Figura 16 Bomba En El Software Qcad.	68
Figura 17 Representación Del Empaque En Qcad.....	71
Figura 18 Representación Final De La Torre Vista Desde Qcad.	72
Figura 19 Condición De Temperatura De Salida Del Agua.	74
Figura 20 Calor Perdido Por El Agua En El Proceso De Refrigeración.	75
Figura 21 Condiciones De Entrada Del Aire.	76
Figura 22 Calor Suministrado Al Aire Durante El Proceso.....	77
Figura 23 Condiciones Del Aire A La Salida.	78
Figura 24 Plano Acotado De La Torre De Humidificación En Qcad.....	81

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y construcción de una torre de humidificación para el enfriamiento de aguas industriales calientes, desarrollada a escala piloto y destinada al laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala. El proyecto integra tanto el enfoque experimental como la simulación computacional, con el objetivo de aportar una herramienta didáctica y de investigación en el campo de la Ingeniería Química.

En una primera etapa, se realiza una revisión teórica sobre el funcionamiento de las torres de enfriamiento, sus componentes esenciales y su clasificación, complementada con el análisis de balances de materia y energía aplicables al diseño. A partir de este estudio comparativo, se selecciona una torre atmosférica de tiro natural con relleno, considerando su adecuación a los requerimientos experimentales. El proceso de diseño se apoya en mediciones experimentales de las propiedades de los fluidos de trabajo: agua a 37 °C procedente de la torre de destilación del laboratorio, con un caudal de 0.0476 L/s, y aire atmosférico a 22 °C. Estos datos constituyen la base para la simulación del fenómeno de humidificación empleando el software DWSIM, evaluando modelos termodinámicos como NRTL, Wilson, UNIQUAC y Peng-Robinson. La elección final recae en el modelo de Peng-Robinson, por su simplicidad y capacidad de representar el sistema binario aire–agua en condiciones de transferencia de calor con mínima evaporación. Los resultados de la simulación permiten calcular los parámetros de diseño: calor intercambiado de 0.475 kW, temperatura final del aire de 27.32 °C, potencia de ventilador de 0.25 hp, potencia de bomba de 0.5 hp, altura total de la torre de 1.60 m, altura de empaquetamiento de 1,28 m y área transversal de 0,25 m². Con estos datos, se elaboran planos de construcción detallados mediante QCAD, que contemplan el uso de láminas de acrílico y acero inoxidable, PVC para tuberías y relleno, y sistemas de distribución de agua y aire. El proyecto no solo proporciona un prototipo funcional para uso académico, sino que también sienta las bases para la construcción de la torre de humidificación. De este modo, la obra constituye un aporte significativo al desarrollo de equipamiento didáctico y a la investigación aplicada en Ingeniería Química.

Palabras Clave: Humidificación, simulación, diseño, columna de enfriamiento, transferencia de calor

ABSTRACT

This work presents the design and construction of a humidification tower for cooling hot industrial water, developed at a pilot scale and intended for the Unit Operations Laboratory of the Faculty of Chemical Sciences and Health at the Technical University of Machala. The project integrates both experimental and computational simulation approaches, aiming to provide a didactic and research tool in the field of Chemical Engineering. In the first stage, a theoretical review is carried out on the operation of cooling towers, their essential components, and their classification, complemented by the analysis of material and energy balances applicable to the design. Based on this comparative study, a natural draft atmospheric tower with packing is selected, considering its suitability for the experimental requirements. The design process relies on experimental measurements of the working fluids' properties: water at 37 °C from the distillation tower in the laboratory, with a flow rate of 0.0476 L/s, and atmospheric air at 22 °C. These data serve as the basis for simulating the humidification phenomenon using DWSIM software, evaluating thermodynamic models such as NRTL, Wilson, UNIQUAC, and Peng–Robinson. The final choice is the Peng–Robinson model, due to its simplicity and ability to represent the binary air–water system under heat transfer conditions with minimal water evaporation. The simulation results allow the calculation of the design parameters: exchanged heat of 0.475 kW, final air temperature of 27.32 °C, fan power of 0.25 hp, pump power of 0.5 hp, total tower height of 1.60 m, packing height of 1.28 m, and cross-sectional area of 0.25 m². Based on these data, detailed construction plans are prepared using QCAD, incorporating acrylic and stainless-steel sheets, PVC for pipes and packing, and water and air distribution systems. The project not only provides a functional prototype for academic use, but also lays the groundwork for the construction of the humidification tower. As such, the work represents a significant contribution to the development of educational equipment and applied research in Chemical Engineering.

Key Words: Humidification, simulation, design, forced draft humidification tower, heat transfer.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Antes de la llegada de los softwares de diseño asistido por computadora (CAD), la elaboración de planos para equipos industriales o prototipos era un proceso completamente manual. Esta metodología, además de demandar un alto nivel de habilidad técnica, ralentizaba el avance de los proyectos y la producción, ya que dificultaba la obtención precisa de los parámetros funcionales del equipo. Asimismo, el dibujo manual presentaba limitaciones en detalle, precisión y capacidad de modificación. Con el desarrollo de herramientas CAD, el diseño se ha transformado, permitiendo generar y editar planos en dos y tres dimensiones con mayor exactitud, optimizando tiempos y mejorando la comodidad del trabajo técnico (Lawal et al., 2020).

Las herramientas tecnológicas no solo han agilizado los procesos de diseño, sino que también han potenciado la colaboración entre equipos, generando ahorros significativos en sectores como la infraestructura y la construcción (Rahimi-Ahar et al., 2020). En el ámbito de la Ingeniería Química, es de especial interés identificar los principales softwares de simulación orientados a procesos de humidificación, a fin de seleccionar la metodología más adecuada para el diseño de equipos. Programas como Aspen Plus, Aspen HYSYS o DWSIM ofrecen la posibilidad de modelar, simular y optimizar procesos industriales, aportando a investigadores e ingenieros una poderosa herramienta para la toma de decisiones (Qasem et al., 2020).

En este contexto, las torres de enfriamiento constituyen un equipo fundamental para estudiar de manera directa el enfriamiento evaporativo en sistemas térmicos, facilitando la realización de balances de materia y energía, así como el análisis de transferencia de calor y masa (Rahimi-Ahar et al., 2020).

El presente trabajo se centra en el diseño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio, empleando el software DWSIM para la simulación del proceso y QCAD para la elaboración de los planos de construcción (Xu et al., 2020). La metodología integra una revisión teórica sobre el funcionamiento y clasificación de torres de enfriamiento, el análisis de variables clave para el diseño y la aplicación de principios de transferencia de

calor y masa en contacto directo entre aire y agua. El objetivo general de esta obra es diseñar, calcular y proyectar la construcción de una torre de enfriamiento de agua prototipo a escala piloto para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, considerando criterios técnicos, principios termodinámicos y condiciones experimentales previamente establecidas, con el fin de optimizar su desempeño y aplicabilidad en entornos académicos e industriales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar una torre de humidificación de tiro mecánico forzado a partir de los datos obtenidos mediante la simulación del proceso en software libre, con el fin de determinar los parámetros de diseño y operación involucrados en el equipo.

Objetivos Específicos

- Identificar las variables y parámetros de diseño que influyen en el funcionamiento de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado.
- Simular en el software DWSIM el proceso de humidificación desarrollado en una torre de tiro mecánico forzado, evaluando las condiciones óptimas de operación.
- Calcular los parámetros de ingeniería necesarios para el dimensionamiento de la torre, aplicando principios de transferencia de calor y masa.
- Elaborar el plano técnico de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado utilizando el software libre QCAD.
- Proponer el diseño de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado a escala de laboratorio.

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Humidificación

Las torres de enfriamiento son instalaciones diseñadas para reducir la temperatura del agua u otros fluidos que han alcanzado niveles elevados durante su uso en procesos industriales. Su aplicación más común se encuentra en plantas de generación eléctrica, refinerías de petróleo, complejos petroquímicos, instalaciones de procesamiento de gas natural y, en general, en cualquier industria que requiera enfriar grandes volúmenes de agua antes de reutilizarla o descargarla (Eder et al., 2022).

En esencia, una torre de enfriamiento funciona como un intercambiador de calor que emplea el principio de enfriamiento evaporativo. Mediante el contacto directo entre agua y aire, logra disminuir la temperatura del agua desde el momento en que ingresa al sistema hasta su salida. El proceso inicia con la entrada del agua por la parte superior, donde se distribuye de manera uniforme sobre el material de relleno mediante pulverizadores o boquillas. Este relleno incrementa la superficie y el tiempo de contacto entre ambas corrientes, optimizando así la transferencia de calor (J. Chen et al., 2020).

La cesión de calor desde el agua hacia el aire se produce por tres mecanismos: radiación, conducción (aproximadamente entre un 10 % y un 30 %) y, principalmente, evaporación, que representa entre un 70 % y un 90 % de la transferencia total. La diferencia de temperatura entre el agua que entra y la que sale de la torre se conoce como rango de la torre. Para mantener un equilibrio térmico con el sistema del condensador, este rango debe ser equivalente al incremento de temperatura que experimenta el agua en dicho condensador (Campoverde León et al., 2024).

Las torres de enfriamiento pueden clasificarse según distintos criterios. De acuerdo con el método de circulación del aire, existen torres de tiro mecánico, que utilizan ventiladores para mover el aire, y torres de tiro natural, que dependen de las condiciones ambientales para generar el flujo. Si la clasificación se hace en función de la dirección del flujo de aire respecto al agua, se distinguen sistemas de flujo cruzado y de flujo contracorriente (Xu et al., 2020).

Desde el punto de vista teórico, la temperatura mínima a la que puede enfriarse el agua en una torre es la temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa. En ese punto, el aire a la salida estaría completamente saturado de vapor de agua, aunque en la práctica siempre se encuentra ligeramente por debajo de la saturación. La diferencia entre la temperatura del agua de salida y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada se denomina acercamiento. En condiciones iguales, un mayor caudal de agua circulando tiende a reducir esa diferencia, acercando la temperatura del agua de salida al bulbo húmedo del aire. Sin embargo, este aumento de caudal suele estar limitado por las capacidades y el consumo de potencia de las bombas que alimentan el sistema.

1.1.1. Psicrometría.

Comprender las propiedades psicrométricas del aire es fundamental para optimizar el funcionamiento de una torre de enfriamiento. Este conocimiento permite reducir el consumo energético y disminuir las pérdidas de agua asociadas al proceso de evaporación. Dicho proceso está directamente relacionado con la carga térmica y con las características psicrométricas del aire que ingresa en la torre, factores que determinan su eficiencia y rendimiento (Habla & Sleiti, 2020).

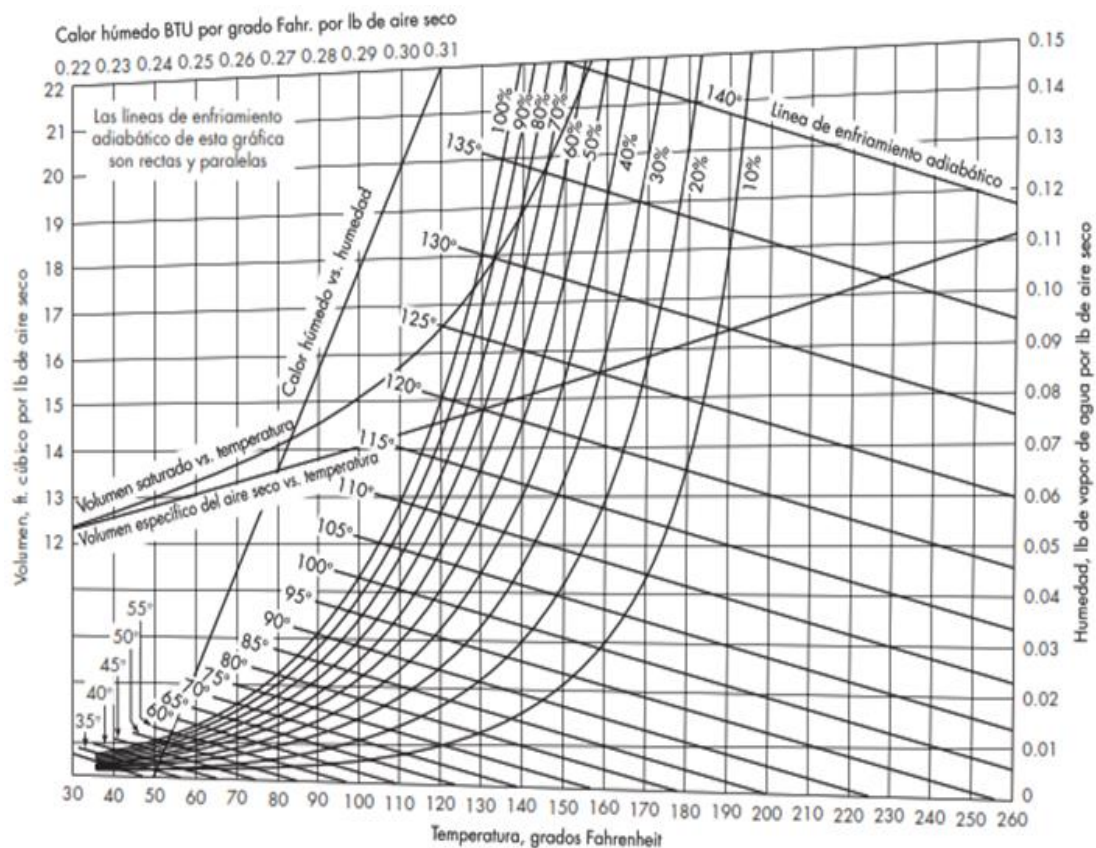
Disminuir la carga térmica del sistema permite lograr un ahorro significativo de energía y reducir la velocidad de evaporación. Esto, a su vez, disminuye la necesidad de realizar purgas de agua, ya que la cantidad evaporada está directamente vinculada con la carga, y el volumen de purga guarda una relación proporcional con dicha evaporación. La correcta aplicación de los principios psicrométricos del aire en un sistema de enfriamiento por agua ofrece el potencial de optimizar el uso de recursos, reduciendo tanto el consumo hídrico como el gasto energético (J. Chen et al., 2020).

1.1.2. Carta Psicrométrica.

Entender las características psicrométricas del aire puede ser un elemento crucial para disminuir el uso de energía y las pérdidas relacionadas con la evaporación del agua. La condensación en las torres de enfriamiento se basa en la carga y en las características psicrométricas del aire que ingresa a la torre de enfriamiento (Yang et al., 2019).

Disminuir la carga resulta en un ahorro de energía superior y en la disminución de la velocidad de evaporación, lo que a su vez disminuye la necesidad de extraer agua del sistema. Esto sucede debido a que la cantidad de agua que se evapora tiene una relación directa con la carga, mientras que la purga tiene una relación con la evaporación. Al aplicar propiedades psicrométricas del aire en un sistema basado en agua, se puede disminuir el uso de agua y energía (Foust et al., 1984).

Figura 1 Carta psicrométrica de Aire – agua a 1 atm



Fuente: (McCabe et al., 2007)

La regla de la fase de Gibbs es el fundamento de la CP, la cual establece que, para un sistema de aire húmedo con dos componentes y una fase, se deben definir tres variables intensivas (grados de libertad) para establecer todas las características del sistema. Una presión atmosférica, conocida como CP, puede simbolizar todas las características inherentes del sistema (X. Liu et al., 2020).

1.1.3. Humedad Relativa.

La humedad relativa (HR) se refiere a la proporción de vapor de agua auténtica que exhibe una masa de aire en comparación con la cantidad de vapor de agua que el aire poseería en su estado saturado a una temperatura específica. En resumen, la FC es un indicador de la cercanía del aire al llegar a su estado de saturación, manifestándose en porcentaje desde 0 hasta 100%. En este punto, 0 señala una masa de aire seca, mientras que el 100% se refiere a una masa de aire saturada (XIONG et al., 2017).

La humedad relativa no constituye una medida absoluta de la cantidad de vapor de agua presente en el aire, pues su valor está condicionado simultáneamente por la temperatura y el punto de rocío. (Adkins & Sescu, 2022).

La humedad es fundamental para la vida. Frecuentemente se denomina HR, que simboliza la relación entre la humedad absoluta y la máxima a una temperatura determinada, lo cual representa la cantidad de vapor de agua contenida en el aire a la temperatura considerada. Como un componente ecológico esencial, juega un papel esencial en la calidad del aire (XIONG et al., 2017).

En la ecuación 1 se presenta la expresión matemática que permite calcular la humedad relativa en términos porcentuales:

$$H_R = \frac{P_A}{P_A^*} * 100 \quad (1)$$

Donde:

H_R : Humedad relativa (%)

P_A : Presión parcial del vapor (Pa)

P_A^* : Presión de vapor en el líquido respecto a la temperatura del gas (Pa)

1.1.4. Humedad Absoluta.

La humedad absoluta (HA) se refiere a la masa de vapor de agua que se encuentra por cada volumen de gas. Si el gas se encuentra completamente saturado de vapor de agua, se denomina humedad de saturación absoluta. Los gases se expanden al ser calentados,

lo que provocará una ligera reducción de la HA al incrementar la temperatura (Wilkes & Williams, 2018).

Se puede derivar la humedad absoluta (HA) de la HR al determinar primero la presión de vapor en situaciones de saturación, en función de la temperatura, y luego calcular la presión de vapor de acuerdo con la HR. Después, se puede calcular la HA al tomar en cuenta tanto la presión del vapor como la temperatura (Adkins & Sescu, 2022).

La ecuación 2 muestra la relación matemática para calcular la humedad absoluta.:

$$H_A = H_R \frac{P - P_A^*}{P - P_A} \quad (2)$$

Donde:

H_A = Humedad absoluta ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

P = Presión total (Pa)

H_R = Humedad relativa (%)

P_A = Presión parcial del vapor (Pa)

P_A^* = Presión de vapor en el líquido respecto a la temperatura del gas (Pa)

1.1.5. Humedad Específica.

La humedad específica (HE) Indica el volumen de vapor de agua por cada unidad de masa de gas. La masa atmosférica y, en consecuencia, la HE, se conservan inalterables a medida que varían la temperatura y la presión (Ocon & Tojo, 1980).

1.1.6. Temperatura del Bulbo Húmedo.

En el ámbito de la Psicometría, se conoce como temperatura de bulbo húmedo, también conocida como temperatura de bulbo mojado, a la que se registra a través del uso de un termómetro, cuando este bulbo está atravesado por una gasa saturada con agua. Se realiza la medición de esta temperatura mediante la corriente de aire correspondiente bajo el bulbo húmedo.

Para determinar la temperatura de bulbo húmedo (TBH), es imprescindible contar con temperaturas de bulbo seco y humedad relativa confiables (Freychet et al., 2020).

1.1.7. Temperatura de Bulbo Seco.

También denominada temperatura seca, simboliza la temperatura calculada sin tener en cuenta las influencias del aire que influyen en la percepción de calor. En resumen, el bulbo seco representa la temperatura verdadera del aire que los termómetros registran en situaciones de operación habitual (Freychet et al., 2020).

1.1.8. Punto de Rocío.

La temperatura de rocío se refiere a la temperatura a la que una masa de aire necesita enfriarse isobáricamente para llegar a su punto de saturación; es decir, un indicador del nivel de humedad en el entorno (Ocon & Tojo, 1980).

Por lo tanto, el punto de rocío se refiere a la temperatura en la que un volumen de aire se satura tras enfriarse a una temperatura estable.

1.1.9. Transferencia de Calor.

Es la manera en que la energía se transfiere de las partículas más energéticas a las menos energéticas de un sistema, en virtud de las interacciones entre las partículas, y que se manifiesta en la forma de un gradiente de temperatura entre ellas.

Si existe un gradiente de temperatura en un material continuo, se genera un flujo de materia sin transferencia de calor. Durante el proceso de conducción, el procedimiento se realiza a nivel molecular y consiste en la transmisión de la cantidad de movimiento de moléculas únicas a través de un sólido. Un caso común de conducción es la transferencia de calor por medio de sólidos opacos, Como ocurre con los bloques de ladrillo en las paredes de un horno o con la pared de un tubo metálico (Aguilar & Ortega, 2017).

1.1.9.1. Convección.

Es una de las formas o mecanismos de transferencia de calor en sistemas bifásicos. En este proceso se transfiere calor entre un fluido líquido y una fase gaseosa adyacente en

movimiento. La convección es la transferencia de calor por la combinación de conducción y movimiento del fluido.

La convección es un proceso macroscópico que se puede ver con los ojos, que se da cuando fuerzas que pueden mover partículas o corrientes de fluido superan las fuerzas de fricción. La convección está muy ligada a la mecánica de fluidos. Termodinámicamente hablando, la convección no es una forma de transferencia de calor, sino de flujo de densidad de entalpía (Yu et al., 2021).

En un fluido que fluye bajo la gravedad, donde hay regiones de diferente densidad (las más densas, que en general son las más frías, se localizan en la parte superior). Estas zonas se mueven hacia las zonas de menor densidad (las inferiores), normalmente más calientes, desplazando el fluido que se encuentre en ellas.

En un radiador, por ejemplo, el aire frío, dado que su densidad es superior a la del aire caliente, baja a las zonas inferiores y empuja el aire caliente hacia arriba. Las partículas más energéticas se mueven hacia las zonas más frías, y viceversa. Este proceso de transferencia se llama convección.

1.1.9.2. Radiación.

La radiación se refiere a la energía que la materia libera mediante ondas electromagnéticas (o fotones), derivadas de las modificaciones en las estructuras electrónicas de átomos o moléculas. El término radiación se emplea para referirse a la transmisión de energía a través del espacio a través de ondas electromagnéticas.

Cuando la radiación se desplaza por el vacío, no se transforma en calor ni se desvía de su trayectoria. No obstante, si atraviesa algo en su trayecto, puede ser transmitido, reflejado o absorbido. Solo la energía absorbida se transforma en calor de manera cuantitativa. Por ejemplo, una superficie mate o negra absorbe casi la totalidad de la radiación que absorbe, convirtiendo la energía absorbida en calor de forma numérica (Aguilar & Ortega, 2017).

1.1.10. Transferencia de Masa.

En el ámbito de la Ingeniería Química, en la sección de Transferencia de Masa, sobresale una operación esencial de unificación. Esta tarea se centra en modificar la composición de soluciones y mezclas, utilizando procedimientos o técnicas que no requieren necesariamente de reacciones químicas.

Las separaciones de las mezclas pueden realizarse de forma completamente mecánica, tal como cuando un sólido se filtra a partir de la suspensión de un líquido "x", o cuando un sólido es examinado y clasificado según su tamaño de partícula, o también separando partículas en función de su densidad.

En conclusión, cualquier operación que modifique la composición de soluciones se categoriza como una operación de Transferencia de Masa (Aguilar & Ortega, 2017). Las operaciones de Transferencia de Masa se caracterizan por su habilidad para mover un compuesto desde una etapa a otra a escala molecular. Por ejemplo, en un proceso de evaporación, como la corriente de agua que se evapora de una piscina o un depósito de origen artificial y se incorpora a una corriente de aire que se desplaza por la superficie del agua. En este procedimiento, las moléculas de vapor de agua se propagan por las moléculas de aire en la superficie del agua, y posteriormente son llevadas a cabo por la corriente de aire.

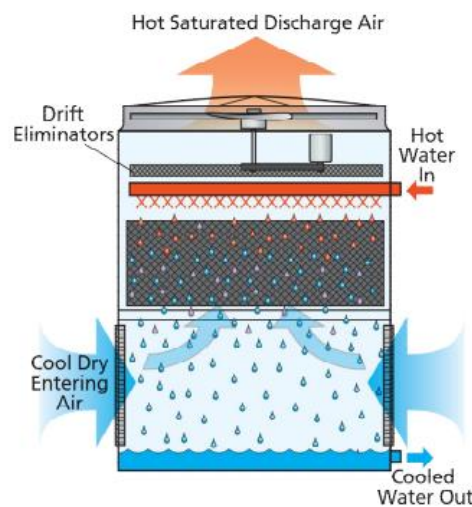
En el contexto de la transferencia de masa, el fenómeno de interés no se asocia principalmente al movimiento generado por diferencias de presión, como ocurre en el bombeo de un líquido a través de una tubería. Por otro lado, en la Transferencia de Masa, los problemas tratados se enfocan en las diferencias de concentración, o sea, gradientes. En estas situaciones, la sustancia que se difunde se desplaza desde un área de elevada concentración hacia una de baja concentración, generando así el fenómeno que nos ocupa (Aguilar & Ortega, 2017).

1.1.11. Enfriamiento por Evaporación.

Los procedimientos de refrigeración son técnicas sencillas y algunas de las más antiguas de las que se conocen. Para refrigerar el agua, es esencial que su superficie esté expuesta al aire. Algunos de estos procedimientos pueden tener una velocidad bastante reducida,

como el enfriamiento progresivo del agua en la superficie de un estanque. En contraposición, existen técnicas más veloces, como cuando se vierte agua en el aire, lo que resulta en un enfriamiento eficaz en un periodo de tiempo reducido (Lai et al., 2021). Estos procesos mencionados requieren que la superficie del agua se exponga al aire, y su efectividad se basa en las condiciones específicas de cada proceso (Campoverde León et al., 2024).

Figura 2 Torre de enfriamiento por evaporación



Fuente: (Dode et al., 2023)

En el sector industrial, el objetivo primordial del agua es disipar el calor, condensando y refrigerando varios productos. Tras su utilización en este propósito, el agua tiende a estar caliente, y se puede elegir descargarla o enfriarla para posteriormente recircularla. El paso de calor latente ocurre a causa de una alteración de estado, concretamente de líquido a vapor, en una pequeña porción de agua. Además, ocurre una transferencia de calor delicada a causa de la variación de temperaturas entre el agua y el aire.

Se necesitan 600 calorías o 2.5 julios para evaporar 1 kg de agua. Estos niveles son adecuados para refrigerar 100 kg de agua a 6 °C. Esto significa que, por cada 6 °C de efecto refrigerante, se pierde cerca del 1% del agua a causa de la evaporación. Además, hay una pérdida adicional asociada al rociado de agua, que normalmente no excede el 0.2% en las torres de refrigeración de tiro natural o mecánico, siempre que estén adecuadamente diseñadas.

1.2. Torres de Humidificación

En el ámbito industrial, las torres de humidificación o de enfriamiento juegan un papel crucial como operaciones unitarias para la Transmisión de Calor. Un elemento crucial para la adecuada operación de una torre de enfriamiento es la introducción de aire en su interior, dado que es en este punto donde sucede la transferencia de calor del agua al exterior. La Transferencia de Calor latente se produce cuando una parte mínima del agua se vaporiza, en cambio, la Transferencia de Calor sensible se produce a causa de la variación entre la temperatura del agua y la del aire (Nourani et al., 2019).

El principal método de refrigeración en una torre de enfriamiento se fundamenta en la evaporación. En este procedimiento, se realiza una Transferencia de Masa desde el agua líquida hasta el aire en estado gaseoso, lo que resulta en una disminución de la temperatura del agua que circula por la torre de refrigeración. Este cambio ocurre cuando el agua caliente se desprende desde la parte alta de la torre y se desciende paulatinamente en contracorriente con una corriente de aire a temperatura ambiente. El agua se evapora alrededor del 80% del enfriamiento total, mientras que el 20% residual se origina por la variación de temperatura entre el aire y el agua (Nourani et al., 2019).

Las torres de humidificación son aparatos que se emplean para eliminar el calor de un fluido específico, generalmente agua, empleando otro fluido de temperatura inferior, generalmente aire. El agua necesaria para enfriar se inserta en la torre y se reparte a través de la superficie de Transferencia de Calor. En cambio, el aire se infiltra en la torre de manera natural o mediante algún aparato. El proceso de refrigeración del agua ocurre mediante la evaporación que se origina de la interacción entre el aire y el agua. Una de las mayores ventajas de las torres de humidificación en comparación con los intercambiadores de calor convencionales es el manejo de grandes volúmenes de agua de una planta completa, en cambio, los intercambiadores de calor habituales se suelen emplear para el tratamiento del agua de aparatos sencillos (Obregon Quiñones et al., 2017).

1.2.1. Torres de Entrada Natural de Aire.

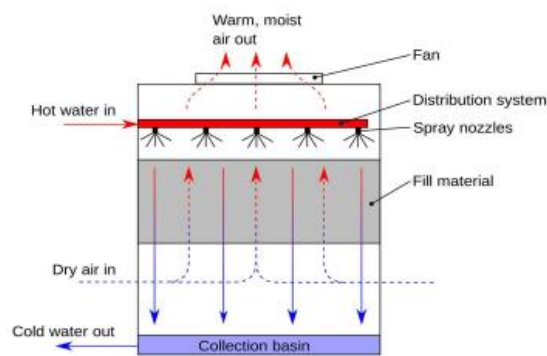
Las Torres de Entrada Natural de Aire, también conocidas como ENA en inglés ("Torres de Entrada Natural de Aire"), son edificaciones creadas con el objetivo de fomentar la

ventilación y el ingreso de aire fresco en construcciones de forma natural. Estas torres se benefician de las corrientes aéreas y las variaciones de presión para fomentar el flujo de aire dentro de los edificios. Además, suelen estar diseñados en función de principios de sostenibilidad y eficacia energética.

1.2.1.1 Torres Atmosféricas.

La corriente de aire requerida en las Torres de Entrada Natural de Aire se produce debido a la variación en las densidades entre el aire más frío del exterior y el aire más húmedo dentro de la torre. Para lograr este objetivo, se emplean chimeneas de alta altura que producen el caudal de aire requerido. Considerando el tamaño significativo de estas torres, se necesitan flujos de agua considerables, que superan los 200.000 galones por minuto (gpm).

Figura 3 Sistema atmosférico de torre de humidificación.



Fuente: (Dode et al., 2023)

1.2.1.2. Torres de Tiro Natural.

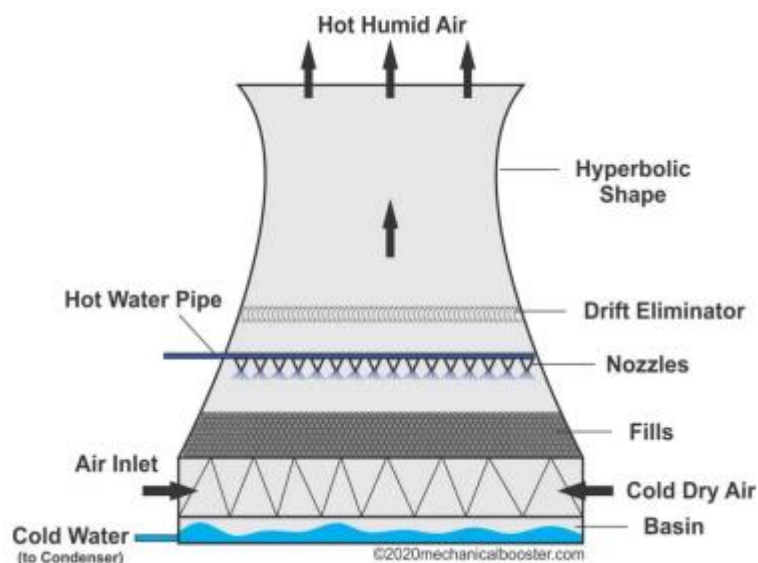
Las torres de refrigeración de tiro natural (TETN) se utilizan ampliamente en plantas térmicas y nucleares para refrigerar el agua que entra al condensador. De acuerdo con el método de refrigeración empleado, pueden clasificarse en dos categorías: las torres de refrigeración húmedas de tipo natural (TEHTN) y las torres de refrigeración secas de tipo natural (TESTN) (X. Chen et al., 2019).

Aunque existen diversos diseños y sistemas de transferencia de calor, el principio fundamental se conserva inalterable. La variación en la densidad del aire en el interior y exterior de la torre de enfriamiento produce un flujo que está regulado por el "efecto de

flotación". El aire caliente en la torre se incrementa, mientras que el aire frío del ambiente es absorbido dentro de la torre (Guney, 2023).

Se emplea el efecto de tiro natural para expulsar el calor del líquido de trabajo caliente hacia la atmósfera. A pesar de que estas torres son habituales en las plantas de energía eléctrica, pocas veces se utilizan en instalaciones industriales debido a la elevada inversión inicial que demandan (Sun et al., 2017).

Figura 4 Torre de humidificación de tipo natural



Fuente: (Dode et al., 2023)

Dado que las torres de enfriamiento poseen atributos como un elevado desempeño en el intercambio de calor, una menor dimensión y un consumo energético reducido, su utilización es ampliamente conocida (N. Liu et al., 2017).

1.2.2. Torres de entrada Mecánica de aire.

Se refiere a torres compactas que tienen una sección transversal y una altura de bombeo considerablemente inferiores en relación con las torres de tiro natural. En estas torres, se puede regular con exactitud la temperatura del agua de salida, lo que permite lograr valores de acercamiento muy bajos, A veces pueden llegar a ser tan bajos como 1 o 2 grados Celsius, aunque en la mayoría de las situaciones se ubican cerca de 3 o 4 grados Celsius en la práctica (Aguilar & Ortega, 2017).

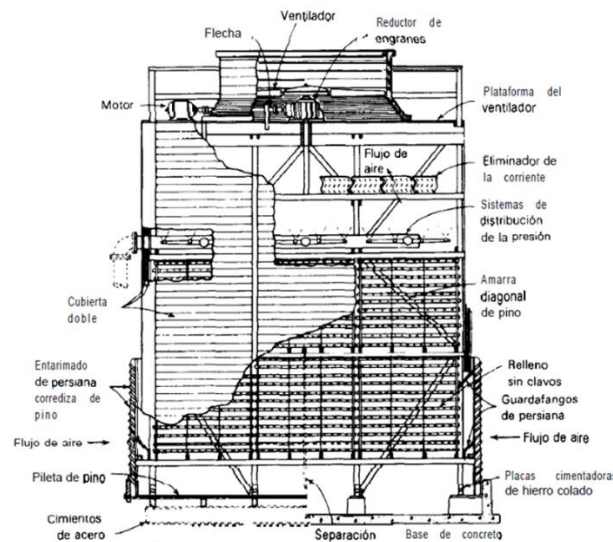
Cuando el ventilador se sitúa en el flujo de aire, se produce un disparo obligado. En cambio, si el ventilador se sitúa en el área de expulsión del aire, se conoce como tiro inducido.

1.2.2.1. Torres de Tiro Inducido.

Las torres inducidas de disparo pueden clasificarse en dos categorías: flujo a contracorriente o flujo cruzado. En el flujo contracorriente, el aire se desplaza verticalmente a través del material de relleno, de manera que las corrientes de agua y aire mantienen la misma orientación espacial, aunque circulan en sentidos opuestos.

El beneficio primordial de estas torres se basa en que el agua más fría interactúa con el aire más seco, lo que resulta en un desempeño óptimo. Además, facilitan la entrada de aire a través de una o varias paredes de la torre, lo que disminuye considerablemente la altura de la entrada de aire.

Figura 5 Torre inducida de humidificación y sus elementos.



Fuente: (Aguilar & Ortega, 2017)

Otro factor a tener en cuenta es que la rapidez con la que el aire ingresa incrementa la posibilidad de que partículas de suciedad y objetos inusuales se introduzcan dentro de la torre. El ascenso del aire en sentido contrario al flujo descendente del agua provoca una disminución significativa de la presión estática y un incremento en el requerimiento de potencia del ventilador, en comparación con las torres de flujo cruzado.

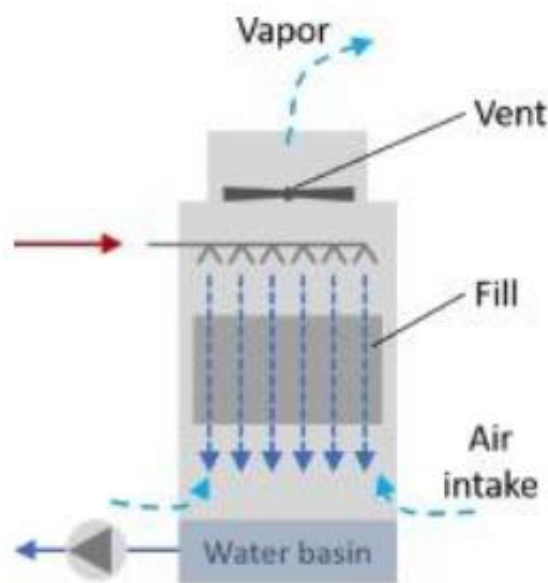
1.2.2.2. Torre de Tiro Inducido en Contracorriente.

En esta clase de torre, el aire se infiltra por la base de la estructura, generando un flujo a contracorriente, dado que se eleva hasta que se encuentra con el agua, que se gestiona desde la parte superior de la torre. Se consigue la distribución del agua a través de celdas que crean una forma de red en la parte superior de la torre (LAFTA et al., 2024).

Estas celdas se componen de varios orificios distribuidores que garantizan una densidad homogénea de lluvia a través del relleno de contacto.

El principal valor de esta torre se encuentra en la conexión entre el agua y el aire. Para alcanzar un rendimiento óptimo, es fundamental que se produzca una combinación específica de condiciones ambientales: el intercambio térmico entre el agua a baja temperatura y un ambiente de baja humedad, y simultáneamente, la convección de calor entre el agua a alta temperatura y un ambiente de alta humedad.

Figura 6 Torre de tiro mecánico inducido en contracorriente.



Fuente: (Alaiwi & Al-Omari, 2024)

Como desventajas se conocen las siguientes:

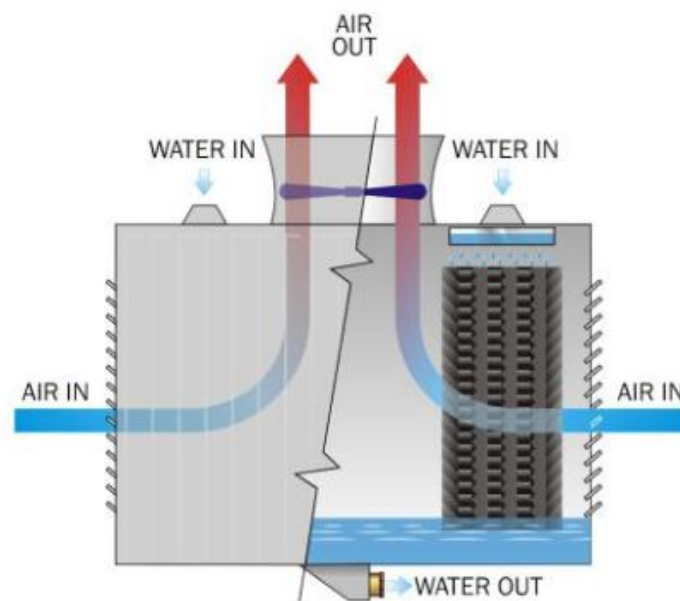
- El área limitada en la base y las altas velocidades de entrada del aire conducen a un incremento en la potencia necesaria para el ventilador.

- La resistencia producida por el flujo de aire contra el flujo de agua resulta en una pérdida de carga más significativa, lo que, consecuentemente, incrementa la potencia requerida por el ventilador.
- El flujo de aire a través del relleno no es homogéneo, presentando una circulación de aire reducida en las paredes.
- Durante el funcionamiento, el sistema de suministro de agua no está disponible para el mantenimiento.

1.2.2.3. Torre de Tiro Inducido de Flujo Cruzado.

En esta configuración de torre, la inyección de aire se realiza de manera uniforme y horizontal, distribuyéndose a lo largo de toda la sección vertical de la torre, mientras que el agua se mueve de manera vertical por el relleno de contacto. El flujo cruzado inducido de humidificación de la torre se expulsa a través de ventiladores situados en la parte superior de la torre.

Figura 7 Torre de tiro mecánico inducido de flujo cruzado.



Fuente: (Alaiwi & Al-Omari, 2024)

Sus ventajas principales son:

- Una disminución de la carga de aire, lo que resulta en una disminución de la necesidad de potencia de los ventiladores.

- Posee dispositivos sencillos para la repartición del agua.
- Promueve la entrada al sistema de distribución durante el funcionamiento de la torre.
- El relleno de contacto tiene una altura que casi coincide con la altura total de la torre.

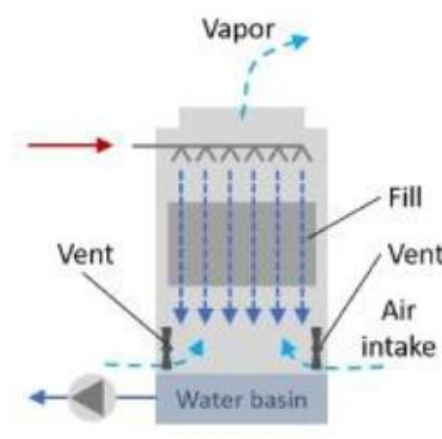
Como desventajas se presentan las siguientes:

- En los sistemas de distribución, la formación de algas es más frecuente debido a su exposición a la atmósfera.
- Este diseño exige modificaciones significativas a causa de la repartición de las temperaturas a lo largo de la torre, particularmente en situaciones con extensos "rangos" y aproximaciones limitadas. Así pues, se requieren espacios más amplios y una menor potencia de ventilador en comparación con las torres de flujo a contracorriente (Aguilar & Ortega, 2017).

1.2.2.4. *Torre de Tiro Forzado.*

En las torres de disparo obligado, el aire se expulsa a una velocidad reducida desde el nivel más alto de la torre. En la mayor parte de las situaciones, estas torres se presentan en forma de contracorriente.

Figura 8 Torre de humidificación de tiro forzado.



Fuente: (Alaiwi & Al-Omari, 2024)

Estas torres de disparo forzado proporcionan una eficiencia superior frente a las torres de disparo inducido. Esto ocurre porque la presión dinámica se transforma en presión estática, lo que lleva a cabo una mano de obra provechosa. El aire que se desplaza es más frío y compacto que en las torres de disparo inducido. Además, esto implica que el equipo mecánico generalmente tiene una duración más larga, dado que el ventilador funciona con aire frío y no saturado, el cual es menos corrosivo que el aire caliente y saturado presente en la salida. Como inconveniente, cabe destacar la posibilidad de que el aire de salida regrese a la zona de baja presión, producida por el ventilador en el ingreso de aire (Guevara Chinchayan et al., 2020).

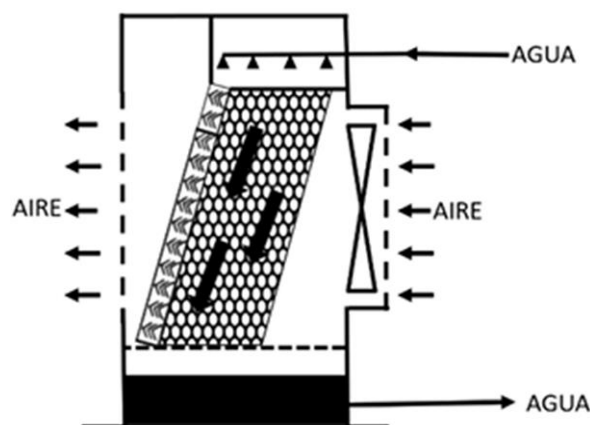
El ventilador, estratégicamente posicionado en la sección inferior de la torre, genera un flujo de aire forzado que se introduce por la base y es descargado por el extremo superior. El aire circundante a la torre es más frío, lo que resulta en una densidad superior frente al aire caliente que se encuentra dentro de la torre.

Este procedimiento conduce a una mayor durabilidad del ventilador y sus elementos en comparación con las torres de disparo inducidas. Esto ocurre porque el ventilador insufla aire frío que no tiene saturación ni corrosión, en contraposición al aire caliente y saturado que proviene de la torre.

Se clasifican en:

- Tiro forzado en contracorriente
- Tiro forzado en cruzado

Figura 9 Torre de humidificación de tiro forzado cruzado.



Fuente:(Gutierrez, 2021)

1.2.3. Torre de Platos.

Son sumamente eficaces, sin embargo, poseen inconvenientes asociados a su precio y una disminución de presión considerable, a no ser que se presenten situaciones particulares. Así pues, a pesar de su efectividad, no se emplean frecuentemente en procedimientos de humidificación, deshumidificación o refrigeración de gases.

1.3. Termodinámica de la Torre de Humidificación

1.3.1. Balance de Materia.

Es posible categorizar las balanzas de masa como estáticas o no estáticas. El equilibrio de masa transitorio o no estacionario se emplea en procesos continuos y semicontinuos; estos últimos pueden ocurrir en esta circunstancia, mientras que los semicontinuos son exclusivamente no estacionarios; este equilibrio de materiales se utiliza para solucionar problemas en el sector industrial, incluyendo la incorporación de un equipo en un proceso, la renovación de un parámetro y la reducción del tiempo de cálculo. Este balance de materiales se utiliza para solucionar dificultades en el ámbito industrial (Contreras et al., 2018).

La expresión matemática del balance de masa para la torre queda representada en la ecuación 3:

$$M_{w1} + (M_a * X_1) = M_{w2} + (M_a * X_2) \quad (3)$$

Donde:

M_{w1} : Flujo másico de agua caliente entrante (kg.min⁻¹).

M_{w2} : Flujo másico de agua enfriada a la salida (kg.min⁻¹).

M_a : Flujo másico de aire húmedo (kg.min⁻¹).

X_1 : Humedad absoluta de entrada (g.m⁻³).

X_2 : Humedad absoluta de salida (g.m⁻³).

El flujo de agua de reposición viene expresado por la ecuación 4:

$$M_{WR} = M_{w1} - M_{w2} \quad (4)$$

M_{WR} : Flujo másico de agua de reposición (kg.min⁻¹).

M_{w1} : Flujo másico de agua caliente entrante (kg.min⁻¹).

M_{w2} : Flujo másico de agua fría saliente (kg.min⁻¹).

1.3.2. Balance de Energía.

Un equilibrio energético se refiere a la entrada, salida y el consumo o producción de energía en un proceso o fase. Al definir un equilibrio energético, todas las fuentes de energía térmica se ubican en el lado de la entrada, y todos los componentes que emplean el calor en el lado de la salida (Castelli et al., 2018).

En la ecuación 5 tenemos el balance de energía:

$$(M_{w1} * h_{w1}) + (M_a * h_1) = (M_{w2} * h_{w2}) + (M_a * h_2) \quad (5)$$

Donde:

M_{w1} : Flujo másico de agua caliente entrante (kg.min⁻¹).

M_{w2} : Flujo másico de agua fría saliente (kg.min⁻¹).

M_a : Flujo másico de aire húmedo (kg.min⁻¹).

h_{w1} : Entalpia específica del aire húmedo a condiciones de entrada (kJ.kg⁻¹).

h_{w2} : Entalpia específica del aire húmedo a condiciones de salida (kJ.kg⁻¹).

1.3.3. Rendimiento.

La efectividad de la torre de enfriamiento se determina por la variación entre el acercamiento de la torre, que se refiere a la diferencia de temperatura entre el agua de salida y la temperatura húmeda del aire, y el rango, que no excede la variación entre la temperatura del agua de entrada y la temperatura del agua refrigerada de salida, y el margen, que no excede la variación entre la temperatura del agua de entrada y la temperatura del agua refrigerada de salida (Guevara Chinchayan et al., 2020).

El rendimiento de la torre viene dado por la ecuación 6:

$$RE = \frac{R}{R+A} \quad (6)$$

1.4. Softwares de Diseño

1.4.1. AutoCAD.

Numerosos ingenieros emplean AutoCAD de manera predeterminada para elaborar anteproyectos, ilustraciones, planos, estructuras y otros componentes que necesitan adaptarse a ciertas especificaciones requeridas por el cliente.

Además, AutoCAD es un instrumento polifacético que facilita la creación de proyectos de ingeniería, industria, mecánica, arquitectura y mecatrónico. AutoCAD es uno de los programas líderes en diseño digital en el mercado ya que ofrece a los usuarios la posibilidad de visualizar los diseños en dos y tres dimensiones. (ARCUX, sf) Tiene las siguientes propiedades:

- Facilitar la elaboración de diseños en dos y tres dimensiones que permitan una visualización a nivel mundial.
- Admitir la elaboración de piezas a través de la estrategia global de dibujo técnico.
- Es posible elaborar cualquier tipo de diseño parametrizado, que incluya planos, cianotipos, ilustraciones, estructuras y componentes.
- Con AutoCAD se puede trabajar en proyectos urbanísticos, civiles, mecánicos, industriales y muchos otros.
- Posee una interfaz sencilla de manejar con funciones concretas para que un experto pueda conocerlo rápidamente y comprender cómo emplearlo.

1.4.2. QCAD.

Se trata de una aplicación gratuita y de código abierto destinada al dibujo asistido por computadora (CAD) en dos dimensiones. Con QCAD, se pueden elaborar dibujos técnicos, tales como planos de construcción, diseños interiores, componentes mecánicos, además de esquemas y gráficos. QCAD funciona con sistemas operativos tales como Windows, macOS y Linux. La distribución del código fuente de QCAD se realiza bajo

la Licencia Pública General de GNU versión 3 (GPLv3), una licencia de código abierto muy reconocida.

Este es un software libre que se enfoca en el dibujo gráfico computacional. Es uno de los programas de mayor alcance, dado que es simple y se asemeja a otros programas que son vendidos y poseen una mayor potencia. QCAD forma parte del conjunto de programas de dibujo vectorial. Este software facilita la creación de objetos basados en ecuaciones matemáticas, de tal manera que se pueden alterar las imágenes (distorsionar, disminuir, expandir) todo esto sin sacrificar la calidad.(Romero Carrillo, 2009) Posee las siguientes ventajas:

- Posee herramientas intuitivas.
- Las funciones son de manejo y comprensión sencillas, en particular las de impresión y diseño.
- Instalación fácil.
- Se pueden crear diseños en 2D, tanto sencillos como complejos.
- Capacidad para importar y cambiar archivos CAD.
- Disponible en varios idiomas.
- Utiliza pocos recursos y requisitos.

Posee las siguientes desventajas:

- Es incompatible con los dibujos en 3D.

1.4.3. SolidWorks.

Es un programa específico para la producción en 3D de artículos industriales y la creación de documentos. El software se fundamenta en Parasolid, frecuentemente visto como el más cómodo para el diseño en 3D, motivo por el cual también se utiliza en algunos sistemas CAD de gran envergadura.

Puede adquirirse un módulo de cálculo que facilite la optimización de los productos que se están estudiando. El programador también proporciona un módulo para la creación de programas de control para máquinas NC y otras herramientas adicionales.

Los beneficios claves de este programa incluyen:

- El mayor beneficio en comparación con otros programas CAD radica en una interfaz intuitiva, lo que convierte a este CAD en el más sencillo de utilizar.
- Disponibilidad de complementos para solucionar trabajos muy especializados.
- Hay una extensa variedad de herramientas para la creación de productos de formas variadas y complejas, además de un módulo sofisticado para manipular superficies.

Los inconvenientes claves de este programa incluyen:

- La falta de bibliotecas incluidas en GOST.
- Posee altos requisitos de desempeño en la informática
- Posee altas exigencias de rendimiento informático.

1.4.4. Autodesk Inventor.

Es un programa que facilita al usuario la creación de productos magníficos utilizando soluciones de ingeniería de calidad profesional. Incorpora instrumentos como la simulación, la elaboración de sistemas enrutados y la generación de herramientas para cualquier producto de alta tecnología (Lee & Ibrahim, 2018).

Los beneficios claves de este programa incluyen:

- Dispone de instrumentos de colaboración unificada.
- Es posible desarrollar productos a medida y procesos automatizados.

1.4.5. SketchUp.

Es un instrumento frecuentemente empleado por arquitectos, ingenieros y diseñadores para la representación visual de proyectos previo a su ejecución. Con Sketchup, se pueden modelar diversos elementos, como zonas, ecosistemas, paisajes, mobiliario, ambientes urbanos, proyectos arquitectónicos, videojuegos y sistemas de información geográfica (GIS), entre otros. Además, Sketchup proporciona la posibilidad de realizar impresiones en tercera dimensión, lo que mejora sus habilidades de diseño y representación.

Sketchup es una herramienta o software de diseño que se enfoca directamente en los procesos de diseño. Contribuye y asiste a los diseñadores en la concepción visual a través de la computación. Todo esto con una concepción más precisa y detallada, el modelo final puede ser transferido a otro programa de renderizado para que así se lleve a cabo el renderizado final.

Por lo tanto, los diseñadores pueden prevenir el contacto, disminuir la manipulación mecánica y supervisar la exactitud de los resultados del diseño elaborado. Sketchup es un programa de aprendizaje sencillo y fácil que resulta agradable para profesores y alumnos de nivel universitario, lo que no requiere excesivo tiempo de estudio.

Este software no solo permite el diseño de esquemas, sino que también permite la creación de gráficos exactos y cuenta con una agradable función de push-pull. Con sketchup, los diseñadores pueden generar geometría 3D a través de un gráfico, en vez de ejecutar complejos modelados en tres dimensiones. Sketchup fusiona la elegancia del lápiz con la naturalidad de los gráficos, permitiendo la creación, visualización y modificación rápida de modelos tridimensionales.

Sketchup es un software que orienta el proceso de diseño con el fin de solucionar el problema de la expresión del diseño. Este software es de tres dimensiones intuitivo. Es capaz de generar dibujos de edificación en secciones y exhibir diversos efectos pintados a mano, siendo útil para diseño industrial, arquitectura, planificación, entre otros.(Song & Jing, 2021)

Sketchup cuenta con una versión gratuita o libre para uso educativo, de manera que no necesitamos pagar y podemos emplearlo de manera legal en nuestra formación académica (Jaelani et al., 2019).

Mediante la aplicación de Sketchup, los estudiantes pueden comprender de manera más efectiva la intención de diseño e interpretar con rapidez la construcción gráfica mediante el estudio de modelado básico y modelos complejos (Dong & Yong, 2014).

Algunas de las ventajas del programa son:

- Es un software sencillo y adaptable.

- Proporciona la habilidad de modificar estilos para ajustarse a las demandas del proyecto.
- Es sencillo de aprender y emplear, particularmente para los alumnos.
- Proporciona exactitud en las mediciones, garantizando la precisión de los diseños.
- Facilitar la importación de archivos DWG provenientes de CAD y su exportación a DWG, lo cual resulta sumamente beneficioso.
- Permite localizar proyectos mediante Google Earth.
- Es un software liviano que no satura la computadora.
- Proporciona licencias especiales para alumnos a costos increíbles.
- Ofrece 10 GB de espacio de almacenamiento en la nube.
- Facilitar la representación de proyectos en aparatos móviles.
- Proporciona la habilidad para analizar las sombras en tiempo real.
- Se puede utilizar con varias plataformas de renderizado, como Lumion , Keyshot, Twinmotion, Thea Render, Enscape y V-ray.
- Su gran aceptación a escala global es un beneficio en el entorno laboral.
- Proporciona un extenso abanico de opciones y aplicaciones sin la necesidad de emplear otros programas.
- Facilita la elaboración de diseños con mayor rapidez en comparación con software de mayor complejidad.
- Permite la inclusión de iluminación tanto artificial como natural.
- Se puede utilizar con sistemas operativos Mac y Windows.

1.5. Softwares de Simulación

Los simuladores de procesos solucionan ecuaciones matemáticas no solo con el fin de representar reactores, columnas de destilación, intercambiadores de calor, bombas, compresores y otras tareas unitarias, sino también para la creación y optimización de procedimientos.(Ircas & Carranza, 2013) Además, proporcione a los ingenieros un instrumento para calcular los costos de la planta, incluyendo tanto los costos de operación como los costos de capital. Los usuarios introducen la presión de operación, la temperatura, los flujos, la composición y los paquetes termodinámicos, mientras que el

software determina los equilibrios de masa y energía de cada flujo y módulo (De Tommaso et al., 2020).

Los simuladores también funcionan como instrumentos para determinar propiedades termodinámicas (entalpía, entropía, energía libre de Gibbs, densidad, viscosidad), utilizando como datos de entrada la cinética de reacción, los servicios de calor y las transiciones de fase.

Los simuladores de procesos llevan a cabo evaluaciones de puntos pinch (APP) con el objetivo de crear una red de transferencia de calor ideal y reducir las demandas energéticas del proceso (De Tommaso et al., 2020).

Los simuladores fusionan el análisis de APP con un modelo de transferencia de calor y, de esta manera, se encargan del diseño de la red más allá del ambiente de simulación. Optan por importar los resultados del equilibrio calorífico y masa desde el exterior, y cuentan con al menos un diseño manual y otro automático.

1.5.1. *Simulink.*

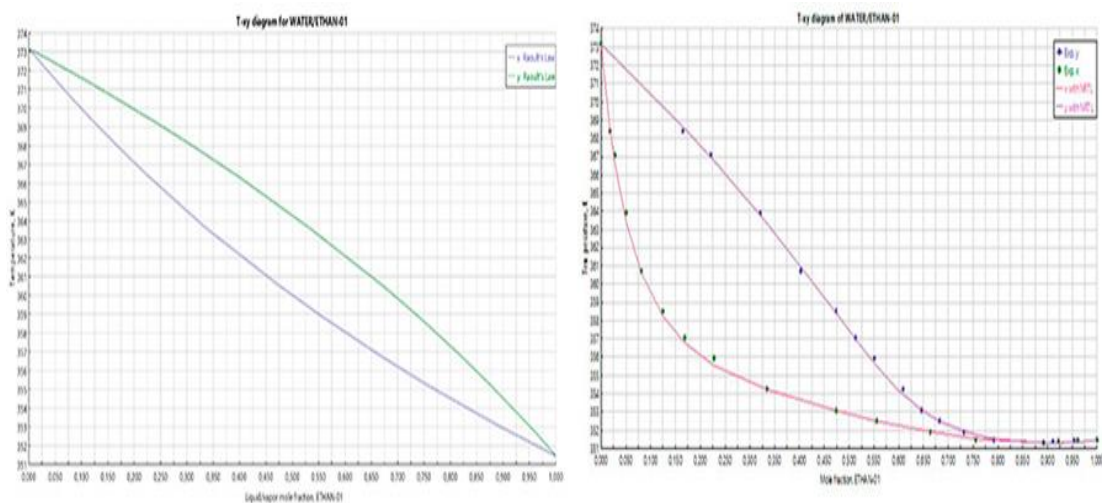
Un programa de información se centra en diseñar sistemas con modelos multidimensionales y simularlos sin necesidad de redacción de código. El programa, que se ejecuta en la plataforma MATLAB, facilita la creación de modelos, la simulación y el análisis de sistemas, ya sean lineales o no lineales.

1.5.2. *Aspen Plus.*

Es un programa informático que se emplea para simular procesos químicos, facilitando la integración de diferentes operaciones unitarias utilizadas en el sector industrial. Este programa se emplea extensamente en la ingeniería química y en el sector industrial para modelar, examinar y perfeccionar procesos petroquímicos y químicos.

Además, tiene la habilidad de manejar una extensa gama de estados, que incluyen líquidos, sólidos y gases, además del estudio de los equilibrios de fases en sistemas de tuberías. Aspen Plus proporciona un conjunto integral de instrumentos para la simulación y estudio de procesos químicos, facilitando el manejo de diversas condiciones y estados en el sector industrial.

Figura 10 Software ASPEN PLUS.



Fuente:(AIMPLAS, 2022)

Las aplicaciones del software son:

- Evaluación de características físicas, tales como establecer los puntos de ebullición a temperaturas y presiones concretas para sustancias puras o combinadas.
- Análisis de separaciones y purificación de combinaciones mediante procedimientos de destilación (tales como la destilación atmosférica, al vacío, extractiva, etc.), decantación de líquidos a líquidos o absorción de líquidos. Esto facilita la disminución del tiempo necesario para la experimentación.
- Evaluación del balance de reacciones químicas con el objetivo de establecer parámetros de reacción y cotejar con reacciones químicas que han sido categorizadas de diversas formas.
- Especificaciones del procedimiento para establecer los volúmenes requeridos de reactivos.
- Evaluación tecnológica y económica de un proceso.

1.5.3. DWSIM.

Simulador de procesos químicos que se distingue por su conformidad con la norma CAPE-OPEN y ofrece una interfaz gráfica sencilla de manejar con múltiples funciones que normalmente se encuentran únicamente en simuladores de procesos químicos de

carácter comercial. Este programa se ha transformado en un recurso útil para ingenieros y científicos que se dedican a la simulación y desarrollo de procesos químicos en distintas industrias.

DWSIM ofrece a los usuarios la posibilidad de modelar y simular una extensa gama de procesos químicos, entre ellos la termodinámica y el equilibrio de fases, lo que simplifica el entendimiento y la mejora de estos procedimientos. Gracias a su conformidad con la norma CAPE-OPEN, DWSIM se puede integrar con facilidad con otros programas y herramientas de simulación, lo que lo hace una alternativa flexible y potente para aquellos interesados en llevar a cabo análisis exhaustivos de procesos químicos.

El poderoso motor termodinámico de DWSIM también se encuentra disponible como una librería de enlace dinámico autónomo que puede vincularse con aplicaciones de propiedad.

Las principales ventajas de este programa se son:

- Dispone de una amplia gama de operaciones unitarias.
- Interfaz sumamente sencilla de entender.
- Modelos de termodinámica avanzada.
- Es de fuente abierta.

1.6. Estructura de las Torres de Humidificación

1.6.1. Estructura del Cuerpo de la Torre.

Las torres de humidificación pueden ser edificadas utilizando una variedad de materiales, y la elección del material a emplear se basará en varios factores como las condiciones particulares de uso, el presupuesto destinado y las necesidades específicas del proyecto (Rafael et al., 2020).

Algunos de los materiales que se utilizan con mayor frecuencia en la construcción de estas estructuras son:

- Acero inoxidable: Las torres de humidificación pueden ser construidas con una diversidad de materiales, y la selección del material a utilizar dependerá de

diversos factores como las condiciones específicas de uso, el presupuesto asignado y las demandas particulares del proyecto (Medina, 2010).

- Aluminio: El aluminio es un material robusto y liviano que se emplea frecuentemente en las torres de humidificación, especialmente en usos donde la corrosión no constituye un inconveniente de gran importancia. Es una alternativa muy común en sistemas de humedecimiento para construcciones tanto comerciales como residenciales.
- Plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP): representa una opción que combina la durabilidad química del plástico con la durabilidad de la fibra vitrificada. Este material resiste la corrosión y se utiliza en circunstancias que exigen una elevada resistencia química.
- PVC (policloruro de vinilo): El PVC es un plástico asequible que se emplea en torres de humedecimiento en usos más básicos o en contextos donde la corrosión no es un elemento esencial. Es posible que sea apropiado para sistemas de humedecimiento más reducidos.
- Madera: En ciertas circunstancias particulares, como invernaderos o proyectos de jardinería, es posible utilizar estructuras de madera para la edificación de torres de humidificación. No obstante, la madera suele ser menos resistente y más propensa a la corrosión en contraste con otros materiales.
- Hormigón o concreto: En proyectos de gran magnitud o usos industriales específicos, se pueden emplear estructuras de concreto o hormigón reforzado. Estos materiales son fuertes y resistentes, aunque generalmente resultan más costosos de edificar.

La selección del material debe basarse en las necesidades particulares de la aplicación, teniendo en cuenta factores como la resistencia a la corrosión, las condiciones ambientales de funcionamiento y el presupuesto existente. Es vital garantizar que el material escogido sea adecuado para soportar las circunstancias en las que se empleará la torre de humidificación, respetando las regulaciones y estándares de seguridad pertinentes (Ali & Zaman, 2019).

1.6.2. Los conductos de la Torre de Humidificación.

Las tuberías empleadas en las torres de humidificación deben ser adecuadas para el agua y el entorno en el que funcionan, y deben poseer la habilidad de resistir la corrosión a causa de la exposición al agua y, a veces, a sustancias químicas empleadas en el procedimiento de humidificación. A continuación, se señalan algunos de los materiales utilizados en los conductos de las torres de humidificación:

- Acero inoxidable: La opción favorita para las tuberías en las torres de humidificación es el acero inoxidable, gracias a su magnífica resistencia a la corrosión y su longevidad. Se distingue especialmente en usos que exigen una elevada resistencia química y una extensa durabilidad.
- PVC (policloruro de vinilo): El PVC es un plástico compuesto empleado en los conductos de las torres de humidificación. Es asequible y se adapta a usos donde la resistencia química no es un factor esencial. Está frecuentemente presente en sistemas de humedecimiento tanto comerciales como residenciales.
- CPVC (policloruro de vinilo clorado): El CPVC es un tipo de PVC que proporciona una resistencia superior frente a la temperatura y la corrosión. Podría ser una alternativa apropiada en circunstancias donde se necesiten temperaturas más altas.
- PPR (polipropileno random): El PPR es otro tipo de plástico empleado en las tuberías de ciertas torres de humidificación. Es resistente a la corrosión y es apropiado para usos de presión baja y temperaturas moderadas (Reinoso, 2010).
- Polietileno: El polietileno es un plástico versátil empleado en ciertos usos de torres de humidificación. Se adapta bien a circunstancias de presión reducida y temperaturas moderadas.

El material del material para las tuberías se basará en elementos como el uso particular selección, las circunstancias del entorno, la presión y la temperatura del agua, además del presupuesto a disposición. Es crucial considerar la compatibilidad química y su resistencia a la corrosión al elegir el material de las tuberías para garantizar un funcionamiento seguro y confiable de la torre de humidificación. El material del material para las tuberías se basará en elementos como la selección concreta del uso, las

circunstancias del entorno, la presión y la temperatura del agua, además del presupuesto existente.

1.6.3. Bomba de Agua.

Se utilizan bombas centrífugas o de atomización para dispersar el agua como aerosoles en el aire, con el objetivo de incrementar la humedad (Bin et al., 2017). La selección de la bomba se basa en la capacidad de la torre de humedecimiento y en las características del sistema. A continuación, se describen concisamente ambos tipos de bombas:

1.6.3.1. Bomba Centrífuga.

Las torres de humidificación suelen utilizar bombas centrífugas. Estas bombas operan al extraer agua de una fuente o depósito e impulsarla a través de un motor rotativo, creando una corriente de agua de gran rapidez. Después, el agua se traslada desde la bomba mediante una tubería al sistema de distribución de agua, donde se atomiza en el aire (Shishatskii et al., 2022).

- **Ventajas:** Las bombas centrífugas resultan eficaces, confiables e idóneas para sistemas de humedecimiento de diversas capacidades. Son aptos para gestionar flujos variables y su control es sencillo a través de válvulas y reguladores de velocidad.
- **Limitaciones:** Las bombas centrífugas resultan insuficientes para sistemas de alta presión y no son óptimas para fragmentar el agua en partículas extremadamente pequeñas.

1.6.3.2. Bombas de Atomización.

En ciertas torres de humidificación, particularmente en las que necesitan una atomización extremadamente precisa del agua, se emplean bombas de atomización. Estas bombas se han diseñado específicamente para generar aerosoles de tamaño reducido y homogéneo al fragmentar el agua en minúsculas gotas.

- **Ventajas:** Las bombas de atomización resultan perfectas para producir una fina nube de agua, lo cual promueve una repartición homogénea de la humedad en el aire. Son adecuados para usos que exigen un control exacto de la humedad.

- **Limitaciones:** Las bombas de atomización son más especializadas y caras que las bombas centrífugas, y suelen utilizarse en sistemas de humedecimiento de menor tamaño o en usos que necesitan una humedad extremadamente baja.

La decisión de seleccionar una bomba centrífuga o una bomba de atomización se basa en las demandas particulares del sistema de humedecimiento. Las bombas centrífugas son más adaptables y habituales en sistemas de gran magnitud, en cambio, las bombas de atomización son perfectas para sistemas que necesitan una dispersión muy pequeña del agua en el aire.

1.6.4. Paneles de control.

Los paneles de control contienen aparatos como termostatos, humidistatos y controladores que facilitan el ajuste y seguimiento de la temperatura y la humedad en el entorno (Portero & Valarezo, 2012).

1.6.5. Sensores de Temperatura.

En las torres de humidificación se utilizan sensores de temperatura para monitorear y controlar tanto las condiciones del entorno como el procedimiento de humidificación (Rodríguez, 2018). A continuación, se explica el objetivo de estos sensores y su apoyo al funcionamiento de las torres de humedecimiento:

- **Nivel de temperatura del agua:** Los sensores de temperatura se utilizan para registrar la temperatura del agua empleada en el procedimiento de humedecimiento. Es esencial para garantizar que el agua esté a la temperatura correcta para el proceso de humidificación, previniendo inconvenientes como la congelación o el calentamiento excesivo.
- **Regulación de la temperatura atmosférica:** Además, se pueden colocar sensores de temperatura en el aire alrededor para supervisar la temperatura del ambiente. Esto posibilita modificar el funcionamiento de la torre de humidificación con el fin de preservar las condiciones óptimas de temperatura y humedad en el lugar que se está humidificando.
- **Protección en circunstancias extremas:** Los sensores de temperatura son vitales para resguardar tanto la torre de humedecimiento como el sistema en situaciones

de extrema severidad. Si la temperatura del agua o del aire excede los límites seguros, estos sensores tienen la capacidad de transmitir señales de alerta o detener la operación para evitar perjuicios.

- Administración de la eficiencia en energía: Es fundamental supervisar la temperatura para mantener la eficacia energética de la torre de humidificación. Si la temperatura del agua es demasiado alta, podría necesitarse más energía para refrigerarla antes de ser utilizada, lo que incrementaría los gastos de operación.
- Mejora del procedimiento de humedecimiento: El control y la cuantificación eficaz de la temperatura facilitan una distribución homogénea de la humedad en el aire, un elemento esencial para preservar un ambiente interior confortable y saludable.

Los sensores de temperatura son fundamentales en las torres de enfriamiento al asegurar que las condiciones de temperatura y humedad sean las adecuadas para garantizar su funcionamiento eficaz y seguro. Estos sensores son esenciales para conseguir un control exacto de los procesos y fomentar el confort y la eficiencia en diversos contextos, que abarcan edificaciones comerciales, industriales y residenciales (GeethaRani, 2019).

1.6.6. Medidores de Caudal.

Los medidores de caudal, también denominados medidores de flujo son herramientas utilizadas en una torre de humidificación para medir la cantidad de agua que circula dentro del sistema. Su tarea primordial es supervisar y controlar la velocidad o el volumen de agua que se proporciona a las boquillas responsables de atomizar o repartir el agua en la torre.

A continuación, se explica detalladamente el significado y la importancia de los medidores de flujo en una torre de humidificación:

- Medición del caudal: Los medidores de flujo llevan un registro del volumen de agua que fluye por sus componentes durante un lapso determinado, usualmente expresado en litros por minuto (L/min) o galones por minuto (GPM). Esta medida ofrece información sobre la velocidad o la circulación del agua en el sistema de humedecimiento.

- Regulación del volumen de agua: Los medidores, al registrar el flujo de agua de forma precisa, permiten una regulación precisa del volumen de agua que se proporciona al sistema de humidificación. Este control es esencial para modificar la humedad relativa en el entorno de manera detallada y eficaz.
- Salvaguarda de agua y energía: El cálculo preciso del caudal de agua previene los residuos superfluos de este recurso, lo que, a su vez, conduce a una reducción de los costos operativos y del consumo energético asociado a la generación de humedad.
- Conservación y evaluación: Los dispositivos para medir flujos pueden emplearse con propósitos de mantenimiento y diagnóstico del sistema. Si se observan fluctuaciones en el flujo, esto podría señalar problemas en las boquillas de atomización, bloqueos en las tuberías o en el abastecimiento de agua, entre otros posibles problemas.
- Acatamiento de normativas: En ciertas circunstancias, particularmente en usos industriales y comerciales, resulta esencial acatar normativas ambientales y de seguridad que exigen la supervisión y el registro del flujo de agua utilizado en el procedimiento de humidificación.
- Mejora del desempeño: La regulación exacta del flujo de agua permite ajustar la humedad relativa de acuerdo con las demandas particulares del espacio, lo que favorece un rendimiento óptimo y el bienestar de los individuos en el ambiente.

1.6.7. Psicrómetro.

Un psicrómetro es un aparato de medición utilizado en torres para medir la humedad relativa del aire. Su tarea principal es registrar y medir la humedad en el entorno donde se encuentra instalado. Un psicrómetro consta de dos termómetros: uno de tipo seco y otro de tipo húmedo. A continuación, se proporciona una explicación exhaustiva sobre el significado de un psicrómetro y su uso en una torre de humidificación

- Termómetro en estado seco: Este termómetro mide la temperatura del aire alrededor sin agregar ninguna protección o humedad adicional.
- Termómetro de agua: El termómetro húmedo se envuelve con un tejido de algodón que se conserva encapsulado a través de agua destilada. La evaporación del agua desde la tela causa una reducción en la temperatura del bulbo húmedo.

La operación del psicrómetro se fundamenta en el uso del enfriamiento que sucede durante el proceso de evaporación del agua. El termómetro húmedo se enfría con mayor rapidez que el termómetro seco porque el agua se evapora de la tela que lo rodea. La diferencia de temperatura entre ambos termómetros está relacionada con la humedad relativa del aire (Dalili, 2003).

- Enfoque en la humedad relativa: Mediante el contraste de las mediciones de ambos termómetros, se puede determinar la humedad relativa del aire mediante una tabla de psicrometría o una fórmula específica. La diferencia entre la temperatura del termómetro seco y la temperatura del termómetro húmedo ofrece los datos requeridos para determinar la humedad relativa.
- Beneficio en la torre de aireación: El psicrómetro juega un papel crucial en una torre de humidificación, ya que permite la monitorización y regulación de la humedad relativa en el ambiente. La relación de humedad es un indicador crucial que asegura la correcta adaptación de las condiciones de humedad, particularmente en usos industriales, comerciales y en ambientes de confort en edificaciones.
- Monitoreo y modificación de la torre de humedecimiento: Se emplea los datos recolectados por el psicrómetro para determinar si es necesario incrementar o

reducir la cantidad de humedad que se inyecta en el aire a través de la torre de humidificación.

- En circunstancias de humedad relativa baja, puede ser imprescindible incrementar la humidificación, mientras que, en situaciones de humedad elevada, se puede reducir o interrumpir la humidificación para prevenir un exceso de humedad.

1.6.8. Hidrómetro.

Un hidrómetro en una torre de humedecimiento es un aparato empleado para determinar la humedad relativa del aire en el entorno. Su tarea principal es proporcionar datos exactos acerca del grado de humedad en el aire alrededor.

Esto es vital para el control y monitoreo de las condiciones ambientales en el sitio que se está humidificando. A continuación, se explica la operación y aplicación de un hidrómetro en una torre de humedecimiento:

- Medición de la humedad relativa: El hidrómetro es un aparato que determina la humedad relativa del aire, o sea, el volumen de vapor de agua presente en el aire en comparación con el volumen máximo que puede retener a una temperatura y presión específicas. Generalmente, este valor se ilustra como un porcentaje.
- Gestión y modificación de la humidificación: Los datos suministrados por el hidrómetro se emplean para establecer si se requiere incrementar o reducir la cantidad de humedad que se añade al aire mediante la torre de humidificación. Si la relación de humedad es reducida y se encuentra por debajo del rango esperado, es posible incrementar la humidificación. Por otro lado, si la relación de humedad es elevada, es posible disminuir o interrumpir la humidificación para prevenir un exceso de humedad en el entorno.
- Conservación de condiciones ideales: El hidrómetro resulta fundamental para conservar las condiciones del entorno dentro de los umbrales ideales de humedad absoluta. Esto es crucial en usos que exigen un control exacto, como en procesos industriales o en la administración de la calidad del aire en edificaciones comerciales y residenciales.
- Lucha contra problemas vinculados a la humedad: La vigilancia continua de la humedad relativa a través de un hidrómetro contribuye a evitar problemas como

el hongo, la corrosión, la multiplicación de ácaros y otras dificultades vinculadas a la temperatura. Al conservar los niveles de humedad apropiados, se genera un entorno más sano y seguro.

1.6.9. Medidor de Presión.

Un sensor de presión en una torre de humedecimiento es un aparato empleado para registrar y supervisar la presión en el interior del sistema de humedecimiento. Su papel principal es brindar datos exactos acerca de la presión del aire o el agua en el sistema., lo que resulta vital para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro de la torre de humidificación.

A continuación, se ofrece una descripción exhaustiva acerca de qué representa y cuál es el uso de un medidor de presión en una torre de humidificación:

- Evaluación de la presión atmosférica: En algunas torres de humedecimiento, se emplea un sensor de presión para determinar la presión del aire. Es importante para supervisar y controlar la velocidad del paso del aire por la torre conforme a requisitos particulares.
- Evaluación de la presión del agua: En otros contextos, se utiliza un dispositivo de medición de presión para determinar la presión del agua que se proporciona al proceso de humidificación. Es esencial para garantizar que el agua se distribuya a una presión correcta, lo que asegura un desempeño óptimo de los elementos de humidificación, tales como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.
- Gestión y modificación del sistema: La información suministrada por el medidor de presión posibilita que los operadores de la torre de humidificación monitoreen y modifiquen el sistema conforme se requiera. Si la presión excede los niveles esperados, es posible implementar acciones correctivas para asegurar que el sistema opere de forma eficaz y segura.
- Evitación de dificultades: El monitoreo continuo de la presión a través del medidor contribuye a evitar posibles inconvenientes, tales como bloqueos en las tuberías, fugas o circunstancias de presión excesiva que podrían provocar perjuicios al sistema.

- Sistemas de regulación y protección: Para asegurar la protección del funcionamiento, es posible incorporar sistemas de seguridad que desactiven automáticamente la torre de humidificación en situaciones críticas o problemas graves.
- Reguladores de la velocidad de la bomba: Estos reguladores controlan la rapidez de la bomba de agua con el fin de modificar la cantidad de agua atomizada presente en el aire. Esto facilita una regulación exacta de la humedad relativa.
- Interacción y monitoreo a distancia: En ciertas situaciones, es posible establecer sistemas de comunicación que posibilitan el monitoreo y la gestión a distancia de la torre de humidificación mediante una red de ordenadores. Esto resulta beneficioso para el seguimiento constante y la identificación de problemas a distancia.
- Alertas y alertas: Los sistemas de control pueden contar con alertas que se ponen en marcha en situaciones anormales, tales como niveles de agua bajos, averías en los sensores o problemas de operación. Estas alertas pueden producir advertencias visuales, sonoras o incluso advertencias mediante sistemas de administración de edificios (BMS, en inglés).

1.6.10. Válvulas y Reguladores de Flujo.

Estos elementos facilitan el control y la regulación del volumen de agua introducida en el sistema de humidificación, lo cual es crucial para modificar la humedad relativa según se requiera (Arango, 2019).

En la torre de humidificación, las válvulas y reguladores de flujo son elementos esenciales que juegan un papel esencial en la administración y regulación del flujo de agua y aire en el sistema de humidificación.

Su objetivo principal es regular y conservar los niveles correctos de flujo de agua y aire, lo que es crucial para asegurar el funcionamiento eficiente y exacto de la torre de humidificación. A continuación, se explica minuciosamente su objetivo y funciones:

- Válvulas de agua: Estos aparatos se encargan de controlar la cantidad de agua que se dirige a los componentes de humidificación, tales como boquillas de atomización, paneles de evaporación o pulverizadores. Su función principal

consiste en regular el flujo de agua, permitiendo su incremento o disminución de acuerdo con las demandas particulares para preservar las condiciones de humedad deseadas en el entorno. Estas válvulas resultan cruciales para prevenir circunstancias de sobreabundancia o falta de humedad durante el proceso de humidificación.

- Controladores del caudal de aire: Los reguladores del flujo de aire son elementos que regulan el volumen de aire que fluye por la torre de humidificación. Poseen la habilidad de modificar la velocidad del ventilador o la cantidad de aire introducido para alcanzar un equilibrio ideal entre el aporte de aire y el procedimiento de humidificación.

Este equilibrio es vital para asegurar que el aire pase correctamente por los elementos de humidificación y se impregne de humedad antes de ser expulsado al ambiente (Pérez, 2017).

- Aparatos de control de presión: Este tipo de aparatos se utiliza para regular la presión del agua en el sistema de humedecimiento. Es fundamental mantener una presión correcta para asegurar un desempeño óptimo de los componentes de humidificación, como los atomizadores. Las regulaciones de presión modifican la presión del agua conforme a las especificaciones del sistema, previniendo presiones en los elementos involucrados.

- Reguladores proporcionales de control: Estas válvulas son aparatos preferidos que posibilitan un control sumamente exacto del flujo de agua o aire, fundamentado en indicadores o parámetros del sistema, tales como la humedad relativa o la necesidad de humedecer.

Estas válvulas proporcionan un control gradual en vez de solo abrir o cerrar el flujo, lo que ayuda a preservar condiciones de humedad estables y constantes.

1.6.11. Ventilador y Extractor.

El elemento esencial en una torre de humidificación es el sistema de motopropulsor, cuyo objetivo primordial es propulsar el aire por la torre para simplificar el proceso de humidificación (Hamdan Al Assaf et al., 2022). Su tarea primordial consiste en producir un flujo de aire que atraviese los elementos de humidificación, tales como boquillas de atomización o paneles de evaporación, facilitando la combinación y evaporación del agua

en el ambiente alrededor. A continuación, se especifica el objetivo y la función del sistema de motopulsor o ventilador en una torre de humidificación:

1.6.11.1. Función del sistema de ventilador:

- **Circulación del aire:** El sistema de motopropulsión o ventilador genera un caudal de aire en la torre de humidificación. Esto es crucial para asegurar que el aire fluya a través de los medios de humedecimiento (tales como paneles, almohadillas o boquillas) y se mezcle con el agua, lo que favorece el proceso de evaporación.
- **Fomentar la evaporación:** El aire producido por el ventilador favorece el contacto entre el aire y el agua, acelerando de esta manera el proceso de evaporación (Raza et al., 2021). El flujo de aire más rápido incrementa la velocidad de evaporación, lo que aumenta la habilidad de la torre para incrementar la humedad relativa del aire.
- **Repartición equitativa de la humedad:** El sistema de ventilación garantiza que la humedad producida se reparta de manera justa en el espacio asignado para la humidificación. Es fundamental para mantener un nivel de humedad homogéneo en toda el área circundante.
- **Regulación de la humedad absoluta:** Mediante el control de la velocidad del ventilador, se puede regular el nivel de humedad que se introduce en el aire. Esto posibilita conservar la humedad relativa en el rango requerido y satisfacer las especificaciones específicas de comodidad o procedimiento.
- **Refrigeración adicional:** En determinadas situaciones, las torres de humidificación también cumplen la función de sistemas de refrigeración evaporativa. El flujo de aire provocado por el ventilador ayuda a refrigerar el aire durante la humidificación, lo que puede resultar beneficioso en circunstancias donde se requiere regular tanto la temperatura como la humedad (Lafta et al., 2023).

1.6.11.2. Función de los extractores:

- **Supresión de aire contaminado:** En las torres de humidificación, los extractores se emplean para expulsar el aire contaminado o demasiado húmedo del entorno. Esto es particularmente crucial en usos industriales o comerciales en los que se requiere

expulsar el aire contaminado o con alta humedad para preservar las condiciones ideales.

- Regulación de la humedad desmedida: En circunstancias donde la humedad relativa es excesivamente elevada, los extractores contribuyen a disminuir la humedad desmedida al expulsar una porción del aire húmedo. Esto podría ser imprescindible para evitar inconvenientes como el hongo o la degradación de materiales.
- Incremento de la calidad atmosférica: La limpieza del aire contaminado ayuda a mejorar la calidad del aire en el lugar, lo cual es crucial para la salud y el confort de los individuos.

1.6.12. Sistema de Agua de Aporte.

El Sistema de Agua de Aporte, un elemento crucial en una torre de humidificación, tiene la tarea de proporcionar agua al proceso de humidificación. Su tarea principal consiste en suministrar un caudal de agua constante y regulado a los componentes de humidificación, tales como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación, con el objetivo de producir la humedad necesaria en el aire alrededor (Alamos & Fernandez, 2014).

Para comprender con mayor profundidad la relevancia y eficacia del Sistema de Agua de Transporte, se requiere examinar minuciosamente sus funciones:

- Provisión continua de agua: El Sistema de agua de aporte tiene la responsabilidad de guardar y proveer agua de forma constante al proceso de humidificación. Esto garantiza que siempre existirá suficiente agua a disposición, particularmente en circunstancias de alta demanda o cuando el abastecimiento de agua es esporádico.
- Control del caudal de agua: Este sistema cuenta con aparatos de control como válvulas, sensores de flujo y bombas, que controlan la cantidad de agua que se expulsa hacia los componentes de humidificación. Esto posibilita una regulación exacta de la cantidad de humedad que se añade al aire.
- Conservación del caudal de agua: El Sistema de Suministro de Agua asegura que el nivel de agua en el depósito o tanque se mantenga estable, lo que resulta crucial para mantener un funcionamiento homogéneo y eficiente de los elementos de humidificación.

- Eficiencia y protección: Mediante un control meticuloso del abastecimiento de agua, se previene el derroche de este recurso y se asegura un funcionamiento seguro y eficaz de la torre de humidificación.

1.6.13. Chimenea o Virola.

En una torre de humidificación, la chimenea o virola es una estructura creada para expulsar el aire húmedo y caliente producido durante el proceso de humidificación hacia el entorno exterior. Su tarea principal consiste en ofrecer un canal de escape para el aire humidificado, facilitando su escape de la torre de humidificación y su mezcla con el aire alrededor en el exterior.

A continuación, se detalla qué representa y cuál es su función en una torre de humidificación: la chimenea o virola:

- Extracción del aire saturado de humedad: Una vez que el aire atraviesa los componentes de humidificación, tales como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación, se impregna de humedad y frecuentemente se calienta. La chimenea o virola facilita la expulsión de este aire caliente y humidificado de la torre de humidificación.
- Combinación con el aire del exterior: La chimenea expulsa aire caliente y húmedo que se fusiona con el aire alrededor en el exterior de la torre. Esta combinación ayuda a reducir tanto la temperatura como la humedad del aire previo a su emisión en el ambiente exterior.
- Evitar la recirculación: La chimenea impide que el aire humidificado regrese a la torre de humidificación, lo que podría provocar inconvenientes de exceso de humedad o recirculación del aire previamente humidificado.
- Regulación de las condiciones del entorno: La chimenea, al expulsar el aire humedecido, ayuda a regular las condiciones de humedad y temperatura en el lugar que se está humidificando, preservando de esta manera el equilibrio requerido para el confort y la eficacia.

1.6.14. Sistema de Distribución de Agua.

El Sistema de Distribución de Agua en una torre de humidificación constituye un elemento crucial del sistema, cuyo deber es dirigir y dispersar el agua de forma regulada hacia los elementos de humidificación, tales como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.

Su tarea principal consiste en garantizar una distribución homogénea y exacta del agua para promover la creación de humedad en el aire alrededor de forma eficiente (Rafael et al., 2020). A continuación, se explica más a fondo qué representa y cuál es su función en una torre de humidificación:

- **Provisión de agua para los componentes de humidificación:** El sistema tiene la tarea de llevar el agua desde el origen o el depósito principal hasta los elementos encargados de generar humedad en el aire, tales como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.
- **Control del flujo de agua:** El sistema de suministro de agua cuenta con válvulas, bombas y otros aparatos de control que facilitan la regulación del volumen de agua que se desprende hacia los componentes de humidificación. Esto asegura un control exacto sobre la humedad añadida al aire.
- **Distribución homogénea:** Su diseño se ha ideado para garantizar una distribución homogénea del agua en toda la superficie de los componentes de humidificación. Esto evita la creación de áreas saturadas de humedad o áreas secas, lo cual es crucial para mantener niveles uniformes de humedad relativa en el lugar que se está humidificando.
- **Evitar obstáculos y dificultades:** El Sistema de Distribución de Agua ha sido creado con el objetivo de prevenir bloqueos en las tuberías o boquillas, lo que podría impactar el desempeño del sistema de humidificación. Además, un mantenimiento apropiado ayuda a evitar inconvenientes como la corrosión o los bloqueos que puedan presentarse con el paso del tiempo.
- **Eficiencia y supervisión:** El sistema, al distribuir el agua de manera regulada y homogénea, favorece el funcionamiento eficaz de la torre de humidificación y posibilita un control exacto de las condiciones de humedad relativa en el entorno.

1.6.15. Pulverizadores o Rociadores.

Empleados en las torres de humidificación son aparatos creados para convertir el agua en pequeñas gotas que se dispersan en el entorno. Su objetivo principal es producir una diminuta nube de agua que se combina con el aire, provocando un aumento en el ambiente. Estos aparatos son esenciales en el procedimiento de humidificación, y a continuación, se ofrece una explicación más exhaustiva sobre sus características y su objetivo:

- El agua se atomiza: Los pulverizadores extraen el agua del sistema de abastecimiento y la convierten en pequeñas gotas o aerosoles. Este procedimiento es esencial, dado que las gotas de menor tamaño proporcionan una mayor superficie para la evaporación, lo cual agiliza el proceso de humedecimiento.
- Elevación del nivel de humedad relativa: Los pulverizadores, al liberar gotas de agua en el aire, ayudan a incrementar la humedad relativa en el entorno. Esto es particularmente útil en contextos donde se requiere conservar niveles particulares de humedad, ya sea para fines de comodidad, salud o usos industriales.
- Distribución homogénea: Los pulverizadores están diseñados para que el agua se reparta de forma uniforme en toda el área que se pretende humedecer. Así, se previene la creación de áreas con humedad excesiva o áreas secas, lo cual es vital para mantener condiciones homogéneas de humedad relativa.
- Regulación de la humedad: Los pulverizadores permiten regular el volumen de agua que se expulsa al aire, lo que permite un control exacto de las condiciones de humedad relativa según las demandas particulares del entorno. Este control es fundamental en usos que van desde ambientes comerciales hasta industriales y domésticos.
- Refrigeración adicional (en ciertas aplicaciones): Además de su tarea de humedecer, en algunas situaciones, los pulverizadores pueden aportar al enfriamiento del entorno al dispersar agua atomizada finamente. Esto es útil en usos donde se necesita controlar tanto la temperatura como la humedad.

1.6.16. Separadores de Gotas.

Son aparatos concebidos para recolectar y eliminar las gotas de agua que puedan ser arrastradas por el flujo de aire húmedo producido durante el procedimiento de humedecimiento.

Su tarea principal consiste en prevenir que estas gotas de agua alcancen zonas no deseadas o a elementos delicados en el sistema, tales como ventiladores, tuberías de aire o aparatos eléctricos. Estos separadores de gotas juegan un papel crucial en el procedimiento de humedecimiento, asegurando el funcionamiento seguro y eficaz de la torre. A continuación, se ofrece una descripción más exhaustiva de lo que son y el propósito de su uso:

- **Recolección de gotas de agua:** El propósito de los dispositivos separadores de gotas es recoger y retener las gotas de agua que podrían ser arrastradas por el movimiento de aire húmedo. Este procedimiento impide que estas gotas se difundan en áreas no deseadas o se encuentren en contacto con componentes del sistema que son susceptibles a la humedad.
- **Salvaguarda de dispositivos y elementos:** La tarea primordial de estos separadores es proteger los elementos del sistema, tales como ventiladores, motores eléctricos y tuberías de aire, de la exposición a una humedad elevada o al contacto directo con el agua, lo que podría afectar la eficacia (Vargas & García, 2020).
- **Conservación de la calidad atmosférica:** Los separadores de gotas, al evitar que las gotas de agua lleguen a zonas de salida de aire, ayudan a preservar la calidad del aire y a evitar inconvenientes como la aparición de marcas de agua o la corrosión en superficies.
- **Eficacia en el procedimiento:** Estos aparatos, al suprimir las gotas de agua del flujo de aire, contribuyen a un funcionamiento más eficaz de la torre de humidificación, disminuyendo la carga de humedad indeseable en el ambiente.
- **Evitar dificultades de recirculación:** Los separadores de gotas también contribuyen a prevenir la recirculación del aire previamente humidificado, lo que podría ocasionar inconvenientes asociados a un exceso de humedad en la torre de humidificación (Vargas & García, 2020).

1.6.17. Rellenos.

Los rellenos empleados en las torres de humidificación son componentes cruciales que se utilizan para aumentar la superficie de interacción entre el agua y el aire durante el procedimiento de húmedo.

Su tarea primordial consiste en ofrecer una estructura o material con una amplia superficie que promueva la evaporación del agua y su eficaz combinación con el aire alrededor (Wang et al., 2018). Estos rellenos juegan un papel crucial en el proceso de humidificación y en la conservación de condiciones ideales de humedad relativa en el ambiente. A continuación, se especifica con más exactitud su objetivo y sus funciones:

Área de evaporación: Los rellenos se construyen con varias superficies rugosas o estructuras en forma de panel, lo que promueve la dispersión del agua y su transformación en minúsculas gotas que se evaporan rápidamente. Este incremento en la potencia de la superficie de manera significativa la eficiencia del proceso de evaporación del agua.

- Elevación del nivel de humedad relativa: Los rellenos, al ofrecer una amplia superficie para la evaporación del agua, favorecen el aumento de la humedad relativa en el aire. Esta función es particularmente útil en contextos donde se requiere conservar niveles determinados de humedad para el confort, la salud o para procesos industriales (Aguilar, 2017).
- Distribución homogénea: Los rellenos se construyen para garantizar una repartición uniforme del agua en toda su superficie. Esto previene la creación de áreas saturadas de humedad o áreas secas, lo que resulta crucial para mantener niveles homogéneos de humedad relativa en el espacio que se está humidificando.
- Regulación de la humedad: Los rellenos, al incrementar la superficie de evaporación y distribuir el agua de forma homogénea, facilitan un control exacto de las condiciones de humedad relativa, ajustándose a las demandas particulares del ambiente. Esto es esencial en usos comerciales, industriales y domésticos (Aguilar, 2017).

En las torres de humidificación, se pueden encontrar diversas clases de rellenos creados para ayudar a la evaporación del agua y elevar la humedad relativa en el aire (Hashemi et al., 2023). Los tipos de relleno son:

- Relleno de panel: Este tipo de encapsulado incluye placas de forma circular de material absorbente, tales como celulosa, fibra de vidrio, papel kraft o materiales artificiales. Los paneles se ubican en estratos y ofrecen una amplia superficie para la evaporación del agua. Los rellenos de panel se caracterizan por su eficacia y habilidad para repartir el agua de manera uniforme.
- Relleno de tipo panel: Los rellenos de panel se componen de láminas de plástico, aluminio o acero inoxidable que se unen para crear una estructura con forma de panel. Estas láminas cuentan con crestas y canales que facilitan el flujo y distribución uniforme del agua, optimizando de esta manera la evaporación.
- Relleno de tipo malla: Los rellenos de malla se producen con hilo o material plástico en forma de tejido o malla. Este diseño promueve una eficiente distribución del agua y proporciona un área extensa de superficie para la evaporación. Los rellenos de malla son duraderos y resisten la corrosión.
- Relleno de tipo bloques apilados: Estos rellenos se componen de bloques ensamblados o torres rígidas con materiales de plástico o cerámica. Los bloques cuentan con estructuras internas que simplifican la repartición del agua y una eficaz evaporación.

La selección del tipo de relleno se basa en diversos elementos, tales como la aplicación concreta, el tipo de agua empleada y las necesidades de eficiencia. Cada tipo de relleno posee sus propios pros y contras en cuanto a eficiencia, durabilidad y mantenimiento, por lo que resulta crucial elegir el correcto de acuerdo con las necesidades específicas de la torre de humidificación y su ambiente de funcionamiento (Hashemi et al., 2023).

1.6.18. Sistema de Salida de Agua.

El elemento crucial en una torre de humidificación es el sistema de almacenamiento y distribución de agua, que guarda y provee el agua para el proceso de humidificación (Li & Flynn, 2021). Su papel principal es garantizar un flujo de agua constante y regulado hacia los componentes de humidificación, tales como boquillas de atomización o paneles de evaporación, con el fin de producir la humedad requerida en el entorno. A continuación, se explica la finalidad y el beneficio del sistema de almacenaje y reparto de agua en una torre de humidificación:

- Almacenamiento de agua: El reservorio de agua es un depósito concebido para almacenar una cantidad significativa de agua. Esto asegura que siempre existirá suficiente agua para el proceso de humidificación, particularmente en circunstancias de alta demanda o cuando el abastecimiento de agua pueda ser inconstante.
- Suministro controlado: El sistema de suministro de agua controla la cantidad de agua que se desprende hacia los componentes de humidificación. Esto permite un control exacto sobre la humedad que se inyecta en el aire y garantiza que la humedad relativa se conserva dentro del margen requerido.
- Prevención de sobrecargas: Generalmente, el sistema de distribución de agua incluye elementos de control, tales como válvulas o mecanismos de flotación, para evitar el desbordamiento o la sobrecarga de agua en la torre de humidificación.
- Conservación del caudal de agua: El objetivo de la cuba y el sistema de suministro de agua es preservar un nivel de agua estable. Es vital para garantizar un desempeño eficiente y homogéneo de los elementos de humidificación en la torre.
- Protección y eficacia: Al controlar cuidadosamente el abastecimiento de agua, se previene el derroche de este recurso y se asegura un funcionamiento seguro y eficaz de la torre de humidificación.

1.7. Materiales Utilizados en la Torre de Humidificación

El desarrollo de una torre de humedecimiento conlleva la elección de materiales que se ajustan a las condiciones de funcionamiento, la humedad y los componentes químicos utilizados en el procedimiento. Los materiales necesitan resistir la corrosión y preservar su integridad estructural a través del tiempo.

Los materiales recomendados para el diseño de la torre de humidificación se describen de la forma siguiente:

- Acero de primera calidad: El uso frecuente de acero inoxidable en las torres de humidificación se debe a su extraordinaria resistencia a la corrosión y su longevidad. Posee varios grados, como el 304 y el 316, que proporcionan distintos grados de resistencia ante sustancias químicas y corrosión. El acero inoxidable es

particularmente apropiado para usos donde se manejan sustancias químicas corrosivas o se necesita una elevada resistencia a la humedad.

- Plásticos de arquitectura: Los materiales ingenieriles como el PVC y el PP son de peso reducido y resisten la corrosión. Se emplean en torres de humedecimiento para usos donde no se necesita una resistencia intensa a sustancias químicas perjudiciales. El PVC es particularmente reconocido por su capacidad de resistir a sustancias químicas ácidas y alcalinas.
- Plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP): El Fiber Reinforced Plastics es un material compuesto que fusiona fibras de vidrio con una matriz plástica. Proporciona una magnífica resistencia a la corrosión y su peso es reducido.
- Se aplica en torres de humedecimiento donde se necesita resistencia química y una construcción liviana. El FRP también es reconocido por su resistencia en ambientes de alta agresividad.
- Aluminio: El aluminio es un metal de peso reducido que se emplea en ciertas torres de aireación. Posee una excelente resistencia a la corrosión bajo determinadas circunstancias, aunque no es tan dura como el acero inoxidable o el FRP en ambientes con alta corrosión. Se emplea en usos que requieren resistencia estructural y no requieren una resistencia química intensa.
- Aleaciones de cobre y cobre: El cobre y sus aleaciones, tales como el bronce, resisten la corrosión y se emplean en usos particulares donde la resistencia química es crucial. Estos materiales pueden resultar costosos y se emplean en contextos que necesitan características particulares de transferencia de calor.
- Materiales revestidos: En ciertas situaciones, los materiales de base más costosos pueden ser revestidos con un revestimiento que resista la corrosión. Esto incrementa se realiza para la longevidad de los materiales más económicos en ambientes corrosivos. La elección del tipo de revestimiento se basa en la composición química del líquido de humectación y las condiciones operativas.

1.8. Recubrimiento de la Torre de Enfriamiento

El revestimiento de la torre de humidificación es un componente crucial de su diseño, dado que juega un papel vital en la salvaguarda de los elementos internos y en la prevención de la corrosión. El acero inoxidable es uno de los materiales más frecuentemente empleados para este fin.

El acero inoxidable es una opción favorita para revestir las torres de humidificación, gracias a su sobresaliente resistencia a la corrosión y su larga vida útil. Este material se distingue por su habilidad para resistir la humedad, sustancias químicas corrosivas y otros elementos del entorno que pueden degradar rápidamente otros materiales.

Cuando se emplea acero inoxidable para el revestimiento, se garantiza que la torre de humidificación conserve su integridad estructural y siga operando de forma eficaz durante un extenso período. Además de su capacidad para resistir la corrosión, el acero inoxidable se mantiene y se limpia con facilidad, lo que favorece la durabilidad de la torre.

El revestimiento de acero inoxidable no solo resguarda los elementos internos de la torre de humedecimiento de la corrosión, sino que además ofrece un aspecto pulcro y de alta calidad profesional. Esto es especialmente relevante en usos industriales y comerciales donde la estética y la higiene son factores de gran relevancia.

1.9. Empaquetaduras de lámina Ondulada

El relleno de lámina ondulada, también conocido como relleno de lámina corrugada o de panel, es uno de los métodos de relleno más comunes empleados en las torres de humidificación y de refrigeración. Su diseño se ha ideado para incrementar el contacto entre el aire y el agua, lo que simplifica la transmisión de masa y calor durante el proceso de humidificación o refrigeración evaporativa.

El material de relleno de lámina ondulada se compone de láminas planas de PVC, dispuestas en forma de ondas o crestas. Estas láminas en movimiento generan canales y áreas de aire entre sí. El diseño ondulado proporciona una extensa área de superficie para la interacción entre el aire y el agua.

El aire se mueve a través de los conductos formados entre las láminas onduladas, y el agua se distribuye sobre ellas o se derrama desde la parte superior. El aire cálido y seco retiene la humedad del agua mientras se desplaza por el relleno. En consecuencia, el aire se humedece y se refrigera mientras que el agua se evapora (Prado de Nicolás et al., 2023).

La aplicación de lámina ondulada en torres de humidificación y refrigeración evaporativa brinda múltiples beneficios importantes gracias a su diseño eficaz y al material frecuentemente empleado, como el PVC. Algunos de los beneficios más destacados comprenden:

- **Elevado Índice de Transferencia:** El diseño en forma de lámina ondulada genera una amplia superficie de interacción entre el aire y el agua, facilitando así una transferencia de calor y masa sumamente eficaz. Esto conduce a una humidificación eficaz o a una rápida refrigeración del aire.
- **Disminución de Pérdida de Carga:** Aunque su eficacia es elevada, el relleno de lámina ondulada suele tener una pérdida de carga reducida en comparación con otros métodos de relleno. Esto implica que el sistema no necesita un volumen considerable de energía para que el aire circule a través del relleno.
- **Resistencia y Durabilidad:** El PVC es un material resistente y de larga duración. El relleno de PVC en forma ondulada puede resistir condiciones ambientales desfavorables, como la exposición al agua y a las condiciones climáticas adversas.
- **Mantenimiento deficiente:** Es relativamente fácil mantener el relleno de lámina ondulada. Es posible realizar una limpieza periódica para eliminar la acumulación de sedimentos o depósitos minerales, lo que contribuye a preservar su eficacia a través de los años.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Simulación en el Software DWSIM

2.1.1. Elección de la Técnica de Investigación.

La elección del método de investigación para tratar el análisis y diseño de una torre de humidificación requiere la mezcla de varias metodologías complementarias. Primero, se utilizará el enfoque analítico, el cual facilitará un estudio minucioso de los principios esenciales de transferencia de calor y masa que participan en el proceso de humidificación.

Mediante este método, se elaborarán ecuaciones matemáticas y modelos teóricos que detallarán la conducta del sistema y funcionarán como fundamento para la simulación. Además, se utilizará el método de modelación, utilizando herramientas de software de simulación especializadas para elaborar un modelo informático que replicará el rendimiento de la torre de humidificación bajo diversas circunstancias operativas.

La metodología de investigación también incluye el método sistemático, asegurando la organización lógica de los pasos a implementar en el diseño y la simulación de la torre. Esto conlleva un estudio minucioso de las variables fundamentales y la organización estructurada de experimentos virtuales y exámenes en el mundo real.

Finalmente, el método de medición será importante para confirmar los resultados de la simulación al contrastar los datos adquiridos de manera experimental con los datos simulados, lo que facilitará la valoración de la exactitud del modelo creado.

Esta mezcla de técnicas garantizará un abordaje meticuloso e integral para el estudio de la torre de humidificación, asegurando resultados fiables y pertinentes para su diseño y mejora.

2.1.2. Aspectos de los Fluidos de Trabajo.

Las propiedades de los fluidos laborales, agua y aire, son fundamentales para comprender y representar correctamente el proceso de humidificación en la torre. La tabla 1 especifica estas propiedades:

Tabla 1. Características de los fluidos

Características	Agua	Aire	Referencias Bibliográficas
Temperatura (°C)	37	22	Elaboración propia
Presión (atm)	1	1	Elaboración propia
Densidad (kg/m ⁻³)	985	1.205	(Cengel & Boles, 2009)
Viscosidad (Pa.s)	0.25 – 0.30	1.85*10 ⁻⁵	(Cengel & Boles, 2009)

Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

Las características físicas y termodinámicas citadas son fundamentales para determinar los intercambios de calor y masa en la torre de humedecimiento, puesto que influyen directamente en la eficacia de la transmisión de energía y humedad durante el procedimiento. La temperatura y la presión del agua y del aire son particularmente esenciales para establecer las características termodinámicas y la conducta de los fluidos en el sistema de la torre.

2.1.3. Recolección de Información.

La recopilación de datos necesarios para este estudio de simulación y diseño de una torre de humidificación se realizó de manera meticulosa, utilizando diferentes fuentes y métodos de medición.

Respecto a las condiciones de ingreso para los fluidos laborales, se desarrolló el flujo de agua midiendo el tiempo requerido para llenar un contenedor de 20 litros con agua residual caliente procedente de la torre de destilación situada en el laboratorio de Operaciones Unitarias. Se registró la temperatura del agua utilizando un termómetro de mercurio de alta precisión, asegurando mediciones fiables y consistentes.

En cuanto al aire, se realizaron mediciones de temperatura para el bulbo seco y el bulbo húmedo. Se registró la temperatura del bulbo seco usando un termómetro de mercurio tradicional, en cambio, se desarrolló la temperatura del bulbo húmedo a través de un proceso de refrigeración adiabático. Esto conllevó la aplicación de un paño húmedo al bulbo del termómetro de mercurio y luego registre la temperatura que se registró.

Los demás datos fundamentales para describir el aire, como la humedad relativa, la presión y la densidad atmosféricas, se determinarán utilizando la carta psicrométrica. Esto garantiza una ilustración detallada de las condiciones termodinámicas del aire que ingresa a la torre de humedecimiento.

Este método estricto en la recolección de datos establece los cimientos para una simulación y un diseño exacto de la torre de humidificación.

2.1.4. Modelo Simulador.

El programa DWSIM se empleará para crear el modelo de simulación de la torre de humidificación con tiro mecánico obligatorio. DWSIM es una herramienta firme en el ámbito de la química y los procesos, destacada por su capacidad para crear modelos detallados y exactos de sistemas termodinámicos, además de examinar transferencias de calor y masa. Esto lo hace la opción correcta para este análisis de simulación.

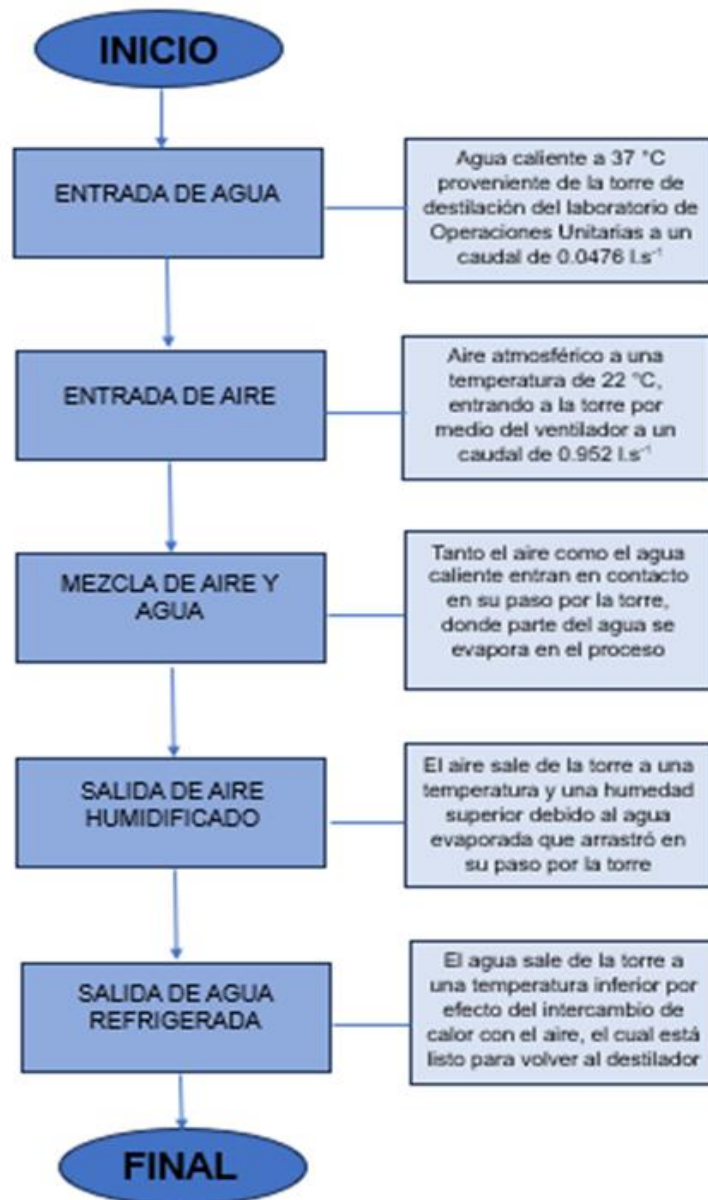
Desarrollo del Modelo:

- El procedimiento de modelado iniciará con la determinación de las características termodinámicas de los fluidos laborales (agua y aire) en DWSIM, empleando los atributos físicos y termodinámicos señalados en la sección 2.2, tales como temperatura, presión, densidad y viscosidad.
- En el simulador se establecerán los componentes y las corrientes de entrada y salida de la torre de calentamiento, considerando el diseño y la geometría específica de la torre.
- Se establecerán los parámetros operativos, tales como flujos de agua y aire, temperaturas y humedad relativa de entrada, velocidades de disparo mecánico obligado, y cualquier otro elemento significativo para la simulación.

2.1.5. Esquema de Distribución del proceso de humidificación.

El procedimiento llevado a cabo en la torre de humidificación con tiro mecánico forzado se condensa en el diagrama 1:

Diagrama 1 Flujo del proceso de humidificación.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

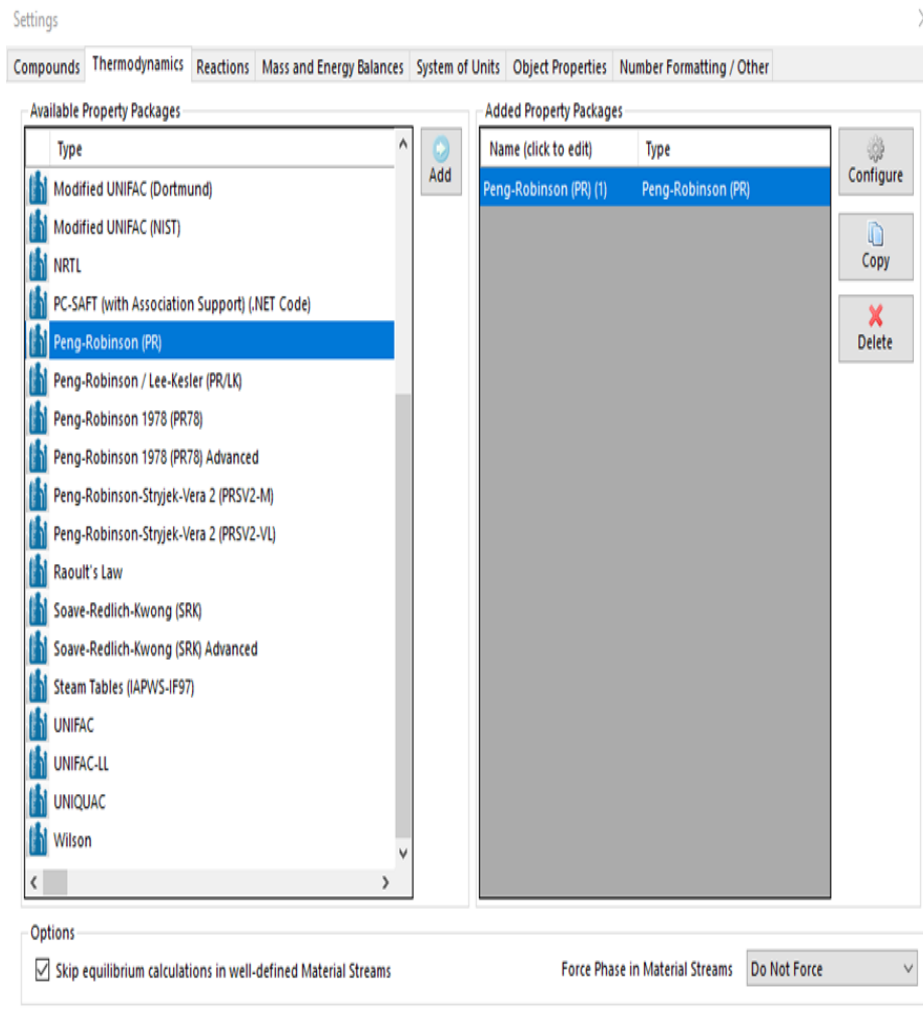
2.1.6. Elección del Modelo Termodinámico que se quiere utilizar.

El hecho de seleccionar el modelo termodinámico Peng-Robinson para simular una torre de humidificación de tiro mecánico forzado se basa en diversas consideraciones esenciales.

El modelo de estado termodinámico de Peng-Robinson es un modelo muy usado y prestigioso en el sector de la ingeniería química y de procesos. Su habilidad para detallar con exactitud el funcionamiento de sistemas multicomponentes bajo una variedad de circunstancias lo convierte en particularmente apropiado para tratar sistemas complejos como el proceso de humidificación.

Además, el modelo de Peng-Robinson toma en cuenta las desviaciones de la conducta ideal y las interacciones eficaces entre moléculas, aspectos cruciales para registrar los fenómenos termodinámicos que se presentan en la torre de humidificación. Su utilidad se ha evidenciado en diversas aplicaciones industriales y de procesos, lo que respalda su selección como un instrumento sólido y confiable para representar las características termodinámicas, los balances de fases y la transferencia de calor en esta simulación. En la figura 12 se representa la selección del modelo termodinámico en el simulador DWSIM.

Figura 11 Modelo de Peng-Robinson en el simulador DWSIM.

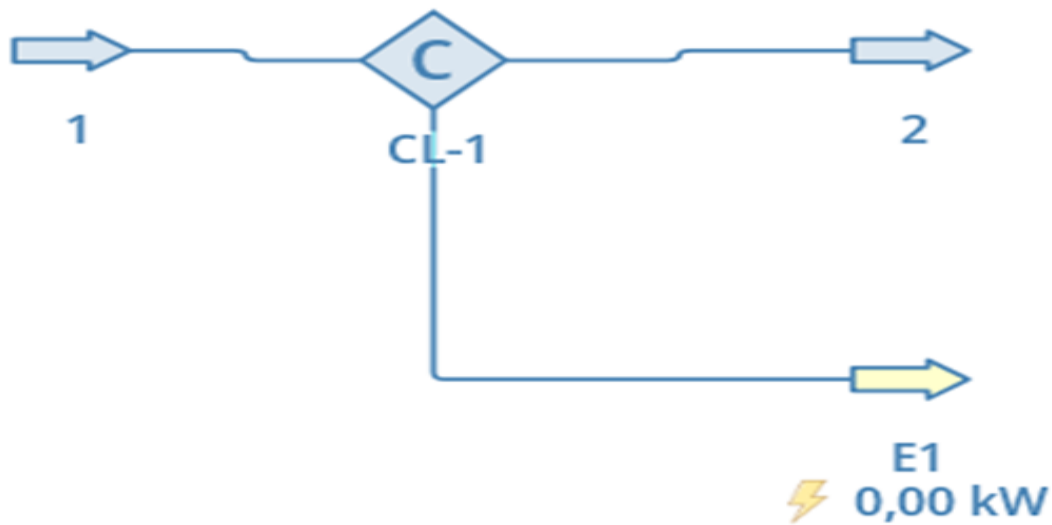


Fuente: (León et al., 2024)

2.1.7. Elección de la Torre de humidificación.

Para realizar la simulación, es crucial elegir correctamente el tipo de equipo a utilizar; en el caso de la torre de humidificación, la elección se realiza en la sección de "coolers", refrigeradores, ubicados en la banda inferior del simulador DWSIM.

Figura 12 Esquema de la humidificación en DWSIM



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

2.1.8. Definición de los componentes que influyen en la simulación.

Se establecen dos elementos clave: el agua (H_2O) y el aire. El agua, identificada por su composición química H_2O , resulta crucial para el proceso de humidificación, dado que se evapora y se combina con el aire para incrementar la humedad relativa del flujo de salida. Las características críticas de la termodinámica, como la temperatura y la presión críticas, son esenciales para determinar la etapa de vapor en la torre.

En cambio, se modela el componente atmosférico como una combinación binaria de nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), los dos elementos clave del aire atmosférico. Cada uno de estos gases se distingue por sus propias características críticas en términos termodinámicos. Esta representación gráfica permite la simulación precisa del comportamiento del aire durante el proceso de humedecimiento, considerando las interacciones entre estos gases y su influencia en la transferencia de calor y masa en la torre. La figura 14 muestra las características que conserva el agua en el flujo de entrada de la torre:

Figura 13 Características del agua en el ingreso de la torre de humidificación.

1 (Material Stream)		
Information Connections		
General Info		
Object	1	
Status	Calculated (29/9/2023 23:54:29)	
Linked to		
Property Package Settings		
Property Package	Peng-Robinson (PR) (1)	
Input Data Results Annotations Dynamics Floating Tables		
Stream Conditions Compound Amounts		
Flash Spec	Temperature and Pressure (TP)	
Temperature	37	C
Pressure	1	atm
Mass Flow	0,00870117	kg/s
Molar Flow	0,48211	mol/s
Volumetric Flow	0,0476	L/s
Specific Enthalpy	-2470,54	kJ/kg
Specific Entropy	-6,62238	kJ/[kg.K]

Fuente: (León et al., 2024)

2.2. Diseño de la Torre de Humidificación en el Software QCAD

2.2.1. Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado.

En relación con la tarea de refrigerar el agua caliente que proviene de la torre de destilación del laboratorio, hemos elaborado un diseño para una torre de humidificación altamente eficiente que emplea la aplicación de código abierto QCAD.

El objetivo principal de esta torre es reducir la temperatura del agua caliente mediante un procedimiento de refrigeración regulado por evaporación. El diseño se ha desarrollado

de forma integral con la finalidad de garantizar un rendimiento superior y un funcionamiento confiable en el ambiente del laboratorio.

La creación de la torre de humidificación se ha fundamentado en una estructura eficaz y práctica, poniendo especial atención en la mejora del enfriamiento por evaporación.

La torre estará formada por una estructura vertical que acogerá un sistema de suministro de agua caliente en su parte superior. Se ha determinado el área transversal de la torre en 0.25 m² para garantizar un flujo de aire apropiado y una interacción eficaz entre el agua caliente y el aire. Conforme el agua caliente baja por el sistema de distribución se topará con una corriente ascendente de aire humidificado. Este aire saturado de humedad provocará una evaporación regulada del agua caliente, lo que provocará una reducción en la temperatura del líquido.

El diseño también establece que la corriente de agua de la torre sea regulada a un nivel estable de agua caliente, así como el flujo de aire que ingresa a la torre. Esto facilitará la modificación del ritmo de evaporación y, consecuentemente, la cantidad de refrigeración suministrada.

Además, es necesario tener en cuenta materiales que resistan la corrosión y sean duraderos para la edificación de la torre, asegurando de esta manera su utilidad a largo plazo en el ambiente del laboratorio. En resumen, el diseño de la torre de humidificación tiene como objetivo proporcionar una solución confiable y eficaz para refrigerar el agua caliente de la torre de destilación, aportando de forma notable al funcionamiento global del sistema de laboratorio.

2.2.2. Condiciones de entrada a la Torre.

La proporción habitual de aire/agua en un sistema de humidificador empleado por varios productores se sitúa entre 20 y 30 de aire por litro de agua. Para esta torre de humidificación particular, se opera con un flujo de agua de 0.0476 litros/segundos y una relación de agua/aire de 20 litros/litros, lo que implica que se produce un caudal de agua de 0.0476 litros/segundos, el flujo de aire a utilizar se calcula con la ecuación 7:

$$\text{Caudal de aire} = R * \dot{Q} \quad (7)$$

Donde:

R: Relación aire – agua

$\dot{Q}$: Caudal de agua (l.s⁻¹)

Para determinar la rapidez con que el aire fluye por la torre de humidificación, se aplica la ecuación 8:

$$\dot{Q} = A \cdot v \quad (8)$$

Donde:

$\dot{Q}$: Caudal de aire m³/s

A: Área transversal de la torre m²

v: Velocidad del aire m.s⁻¹

2.2.3. Torre de Presión Estática.

La presión estática en una torre de humidificación se refiere a la medición de la presión del aire dentro de la torre cuando el flujo de aire se encuentra en una condición estable o se desplaza a una velocidad invariable. Este tipo de presión estática es crucial para medir la resistencia al paso del aire en la torre y se utiliza para garantizar que el sistema de ventilación pueda sobrepasar cualquier obstrucción, conducto o elemento del sistema, asegurando así una repartición homogénea de la humedad en el aire.

Durante el diseño y operación de una torre de humedecimiento, la presión estática es un elemento crucial que impacta en la eficacia y la habilidad de humedecer el sistema. Se cuantifica en pascales (Pa) y resulta crucial para asegurar un desempeño eficaz y homogéneo de la torre de humidificación.

Para calcular la presión estática de la torre se utiliza la ecuación 9:

$$P_{es} = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * v_{aire}^2 \quad (9)$$

Donde:

ρ_{aire} : Densidad del aire kg.m^{-3}

v_{aire} : Velocidad del aire m.s^{-1}

2.2.4. Selección del Ventilador de la Torre.

La elección del ventilador se ha fundamentado en la mezcla de eficiencia energética, desempeño y longevidad.

Esto no solo asegura una operación confiable y sostenible de la torre de humidificación, sino que también aporta a la eficiencia global del sistema de enfriamiento en el laboratorio, facilitando de esta manera la obtención de resultados exactos y consistentes en los experimentos.

Un ventilador de forma axial es un aparato creado para desplazar eficazmente el aire a través de su eje central en una dirección que sea paralela a este eje. Sus palas, colocadas de manera parecida a las aspas de un avión, producen un flujo de aire unidireccional, lo que implica que el aire ingresa por un extremo del ventilador y se desplaza en la misma dirección que las palas rotas.

Estos ventiladores resultan perfectos para usos que necesitan un flujo de aire elevado a presiones bajas, como sistemas de ventilación industrial, refrigeración de aparatos electrónicos y radiadores de vehículos.

La potencia del ventilador de la torre alude al volumen de energía requerido para que el ventilador pueda desplazar el flujo de aire a través del sistema de ventilación y distribución de humedad.

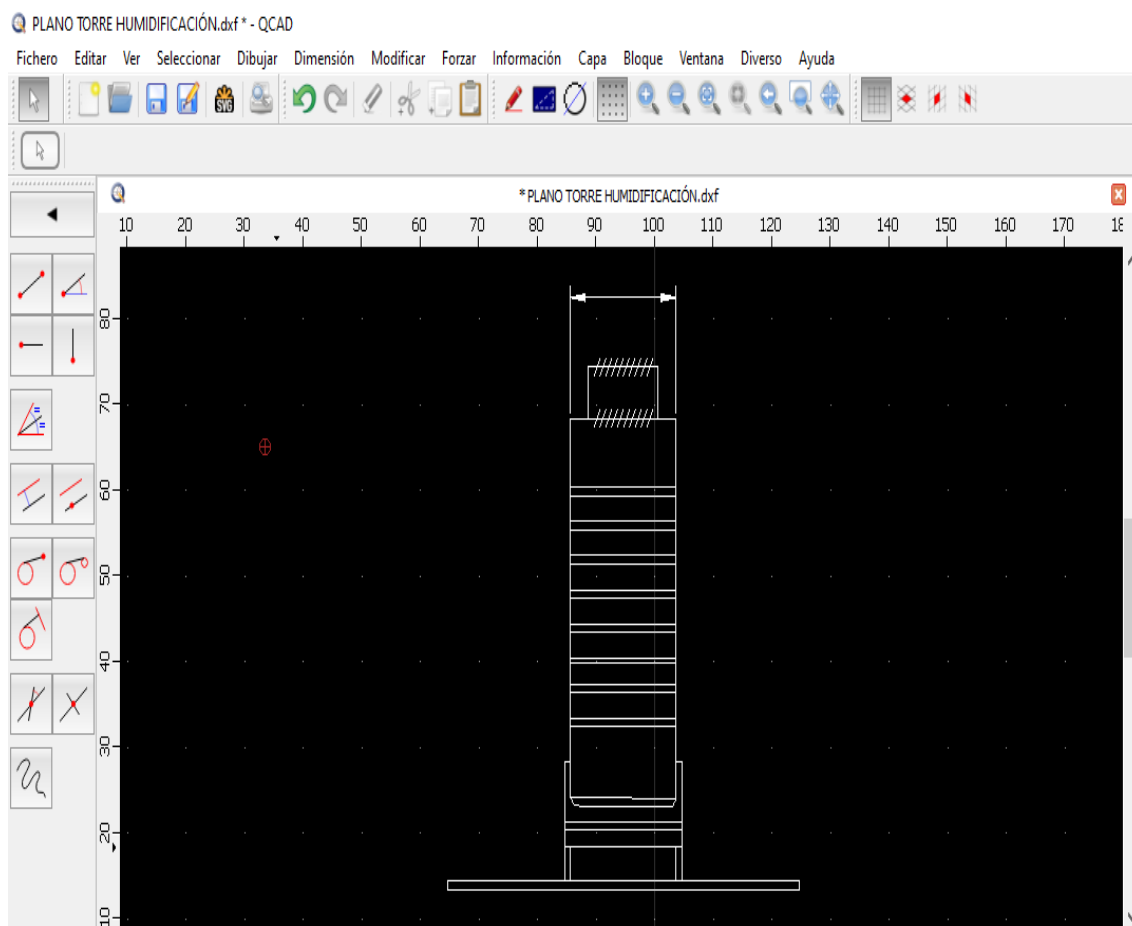
Esta potencia, que se cuantifica en vatios (W) o en caballos de fuerza (hp), es un elemento crucial para el desempeño y eficacia de la torre de humidificación. El nivel de potencia necesario se basa en diversos elementos, tales como el flujo de aire requerido, la presión estática del sistema y la eficacia del ventilador mismo.

Se relacionan estos tres factores para calcular la potencia y una eficiencia de la torre del 90%, tal como se ilustra en la ecuación 10:

$$P = \frac{\text{Caudal de aire} \cdot \text{Presión estática}}{\text{Eficiencia del ventilador}} \quad (10)$$

En la figura 15, Armazón y el ventilador de la torre de humidificación:

Figura 14 Armazón y ventilador de la torre.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

2.2.5. Selección de la Fuente de Agua Caliente.

La selección del suministro de agua caliente para el sistema de refrigeración de la torre de humidificación ha representado una elección estratégica fundamental en el proceso de diseño. El agua residual obtenida de la torre de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias es la fuente elegida, lo que demuestra un reaprovechamiento eficaz de recursos y una integración consistente entre los distintos sistemas implicados.

El seleccionar la procedencia del agua caliente no solo garantiza la uniformidad entre los sistemas internos del laboratorio, sino que también demuestra un enfoque vanguardista en la búsqueda de soluciones sustentables.

Esta sinergia entre la torre de destilación y la torre de humedecimiento demuestra una estructura detallada y una visión conjunta para potenciar la eficiencia y disminuir el efecto ecológico en las tareas del laboratorio.

2.2.6. Capacidad de la Bomba.

Es vital la capacidad de la bomba encargada de transportar el agua desde el destilador hasta la torre de humedecimiento para asegurar un flujo de agua constante y eficiente.

Con una corriente de agua a transportar de 0.0476 litros cada segundo y una altura prevista de la torre de 2 metros, la torre tiene una altura proyectada de 2 metros, se ha llevado a cabo un estudio minucioso para elegir una bomba apropiada que cumpla con estas condiciones.

Para gestionar este volumen y la altura señalada, se ha elegido una bomba centrífuga capaz de producir la presión requerida para subir el agua a lo largo de la altura de la torre.

Es crucial elegir una bomba cuya curva de rendimiento cumpla con las necesidades del sistema, lo que garantice que la bomba pueda sostener un flujo constante a la altura determinada.

Es necesario tener en cuenta tanto la capacidad de alza (presión) como la capacidad de flujo de la bomba para asegurar un abastecimiento continuo de agua a la torre de humidificación.

Teniendo en cuenta que el flujo se mide en litros cada segundo y la altura se cuantifica en metros, se multiplica por 75 para convertir las unidades y obtener la potencia en caballos de fuerza. Reemplazando los datos presentados en la ecuación 11:

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{Q \cdot H \cdot GE}{75} \quad (11)$$

Donde:

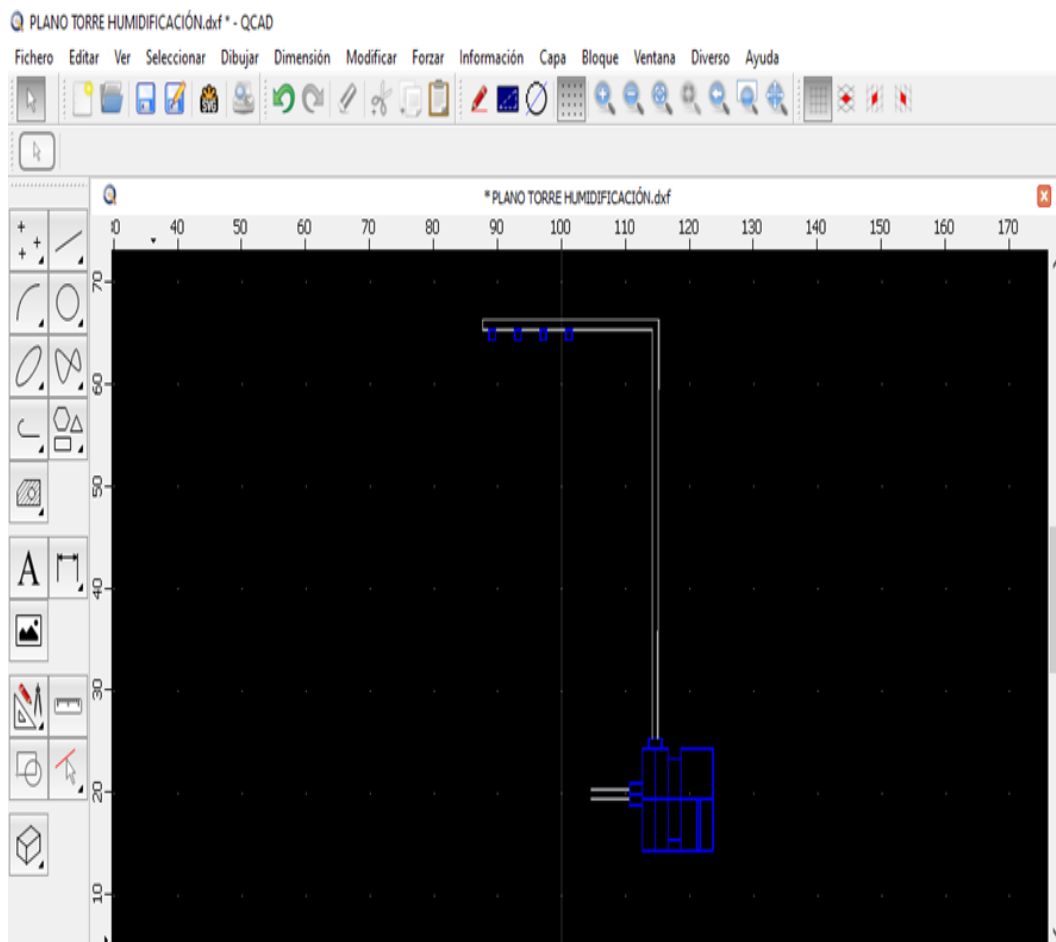
$\dot{Q}$: Caudal de agua (l.s^{-1})

H : Altura de la torre (m)

GE : Gravedad específica del agua

En la figura 16 se ilustra la representación de la bomba que impulsará el agua caliente hacia la torre:

Figura 15 Bomba en el software QCAD.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

2.2.7. Longitud de la Torre de Humidificación para el Tiro Mecánico.

Es fundamental establecer la altura de la torre de humidificación en el diseño de este sistema. La altura de la torre influirá directamente en la eficacia del proceso de refrigeración por evaporación y, por fin, necesita ser determinada con exactitud para asegurar el máximo desempeño del sistema. Durante este período, la meta es disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de la torre de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias. La altura de la torre de humidificación se establece teniendo en cuenta varias variables, tales como la velocidad de evaporación necesaria, la temperatura del agua caliente y la rapidez del movimiento del aire, entre otras, entre otras.

Una torre de mayor altura ofrecerá un período de contacto más extenso entre el agua caliente y el aire humedecido, facilitando de esta manera una transferencia de calor más eficiente y una evaporación más elevada.

El cálculo de la altura de una torre de refrigeración se basa principalmente en factores termodinámicos y de transmisión de calor. La altura de la torre mantiene una relación directa con la eficacia del proceso de refrigeración y puede ser modificada según las especificidades del diseño necesarias. Para la determinación de la altura de la torre, se utiliza la ecuación 12:

$$\frac{\dot{Q}}{H} = h * A * \Delta T \quad (12)$$

Donde:

$\dot{Q}$: Capacidad de Enfriamiento (W)

H : Altura de la Torre (m)

A : Área Transversal de la torre (m²)

ΔT : Diferencia de Temperatura (°C)

h : Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección de Aire (W.m⁻².°C⁻¹)

El coeficiente de transferencia de calor por convección habitual del aire varía entre 10 y $100 \text{ Wm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). En el proceso de cálculos, se seleccionará el valor de $100 \text{ Wm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, considerando una alta transferencia de calor por convección en el sistema..

2.2.8. Dimensiones del Relleno.

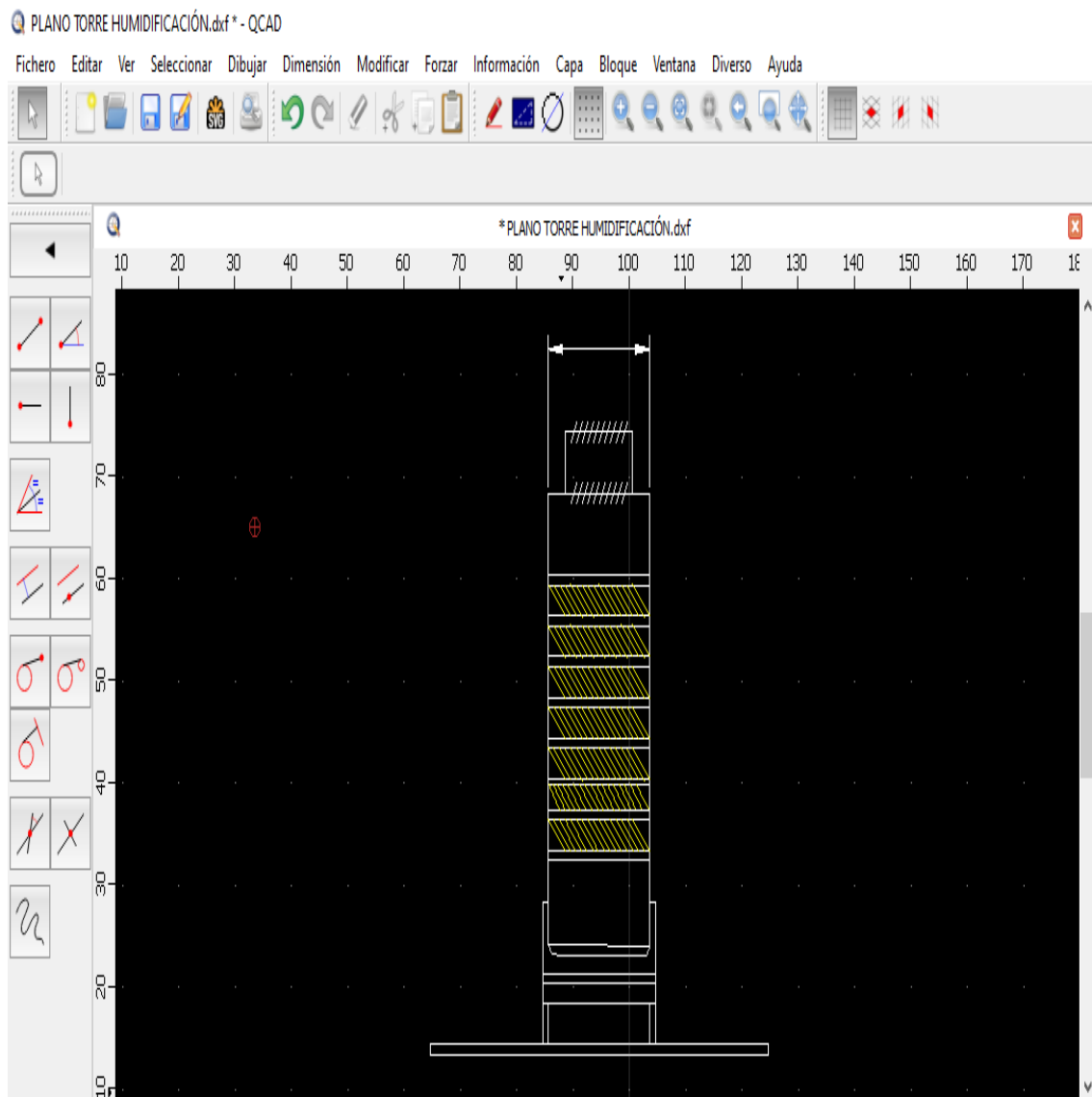
El nivel sugerido para rellenar una lámina ondulada en una torre de humidificación se basa en diversos elementos, entre ellos, la eficacia en la transferencia de masa y calor requerida, además de las condiciones particulares de su aplicación. No obstante, una norma general establece que el relleno de lámina ondulada debe abarcar una parte considerable de la altura total de la torre para garantizar una humidificación eficaz.

En diversas situaciones, es aconsejable que el relleno de lámina ondulada represente al menos el 80% de la altura de la torre. Esto posibilita un largo contacto del aire con la superficie del agua en el relleno, lo que promueve una transferencia más eficiente de masa y calor, lo que conduce a una humidificación más efectiva. La determinación matemática de la altura de relleno se realiza utilizando la ecuación 13:

$$Z_{relleno} = 0.80 * H \quad (13)$$

En la figura 17 se muestra cómo se aplica el relleno a la torre de humidificación:

Figura 16 Representación del empaque en QCAD.



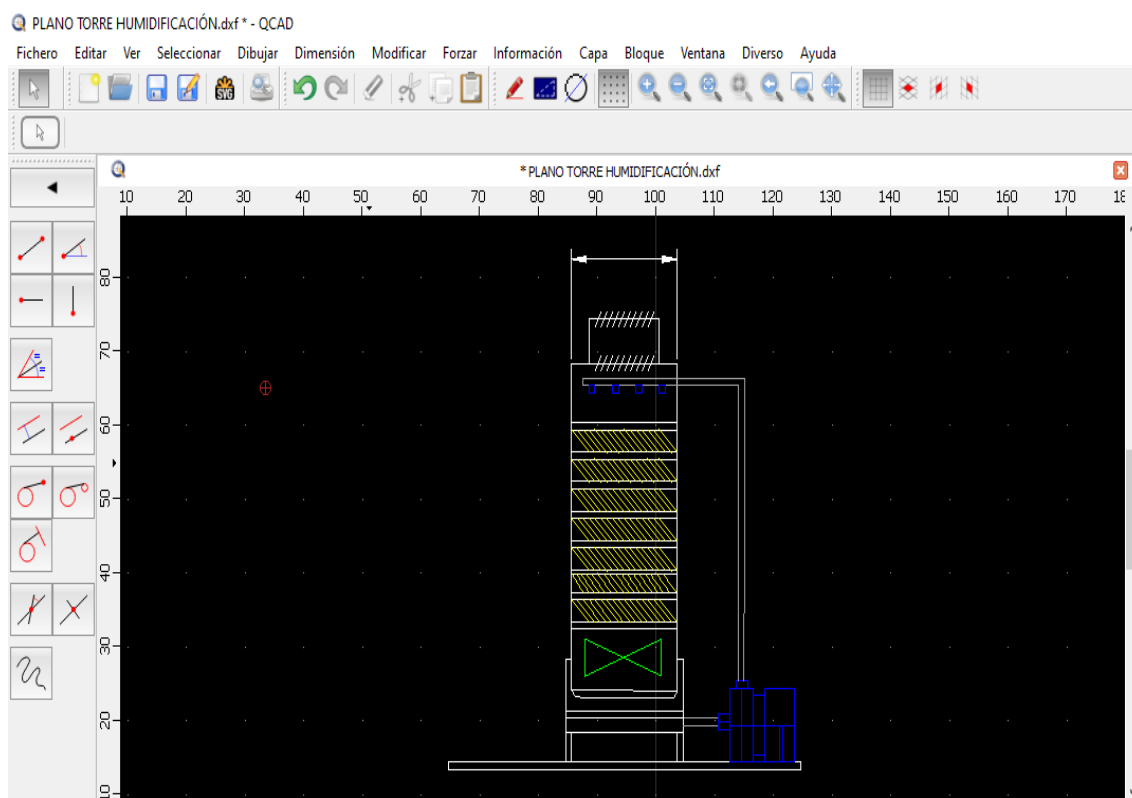
Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

2.2.9. Componentes de la Torre en el Software QCAD.

El programa QCAD dispone de una serie de valiosos instrumentos para ilustrar los distintos elementos que componen la torre de humidificación.

La figura 18 muestra un panorama final de la torre de humidificación, que incluye todas las partes que la conforman:

Figura 17 Representación final de la torre vista desde QCAD.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO III

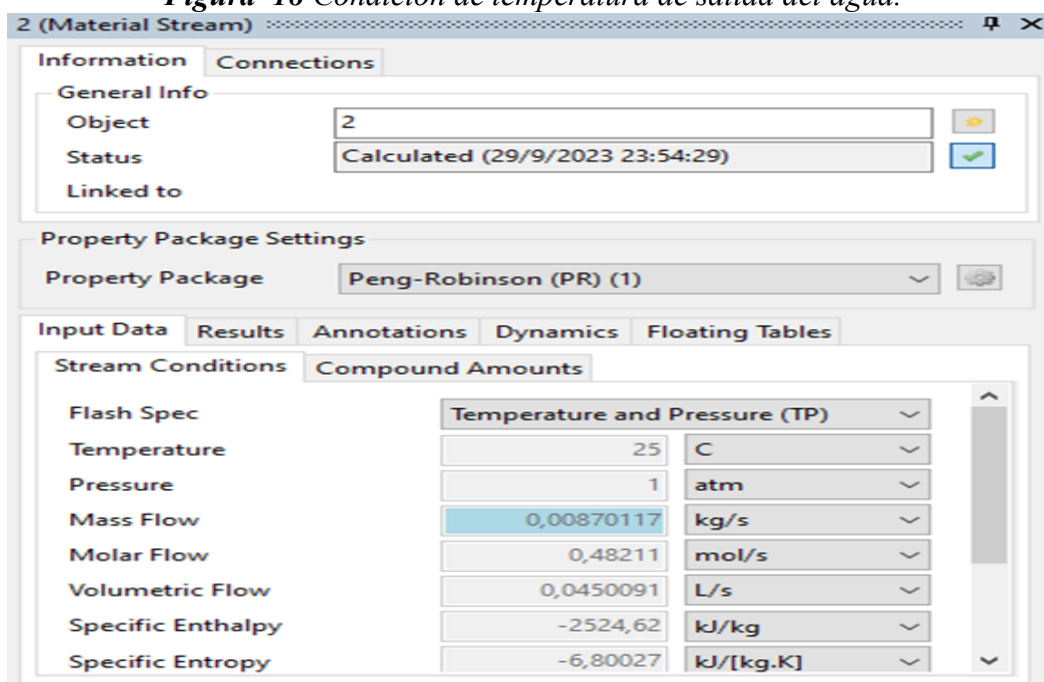
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Simulación de la Torre de Humidificación en el Programa DWSIM

En esta parte, se expondrán y analizarán minuciosamente los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el análisis de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado. La atención se centrará en el intercambio de calor entre el aire y el agua, lo que es crucial para entender el comportamiento térmico de la torre bajo diferentes condiciones de operación. Los hallazgos se mostrarán mediante gráficos, tablas y análisis detallados, resaltando las fluctuaciones en los perfiles de temperatura y la cantidad de calor transmitida a través de la torre. Estos descubrimientos son vitales para valorar y mejorar el rendimiento de la torre de humidificación.

En la sección de simulación, se centra en el intercambio de calor entre el agua y el aire que se relacionan dentro de la torre de humidificación. El objetivo de la simulación consiste en llegar a una temperatura de 25°C al concluir el proceso, tal como se muestra en la Figura 19 del simulador DWSIM. Este indicador es esencial para valorar la eficacia y el desempeño del proceso de humidificación en la torre.:

Figura 18 Condición de temperatura de salida del agua.

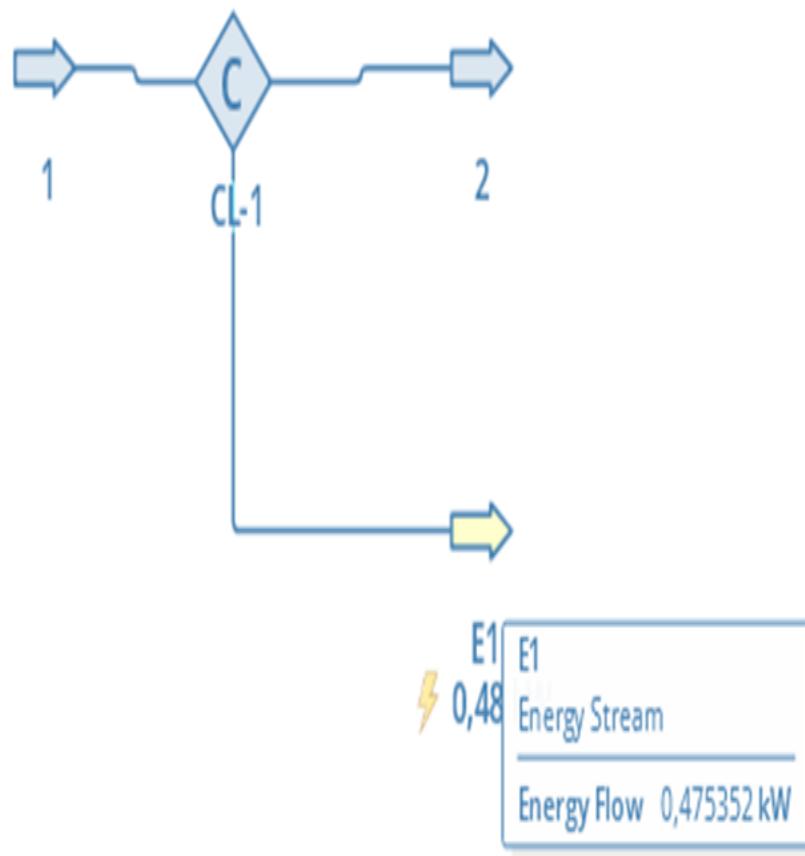


Fuente: (León et al., 2024)

Como consecuencia de la simulación, se calcula que, durante el proceso de humidificación en la torre de tiro mecánico forzado, el agua ha perdido un total de 0.475352 kilovatios (kW) de energía térmica. Esta disminución de calor ocurre a causa de la interacción entre el agua caliente y el aire que ingresa a la torre de humidificación de tiro forzado.

El intercambio de calor entre el agua y el aire es un indicador relevante de la conducta termodinámica del proceso y ofrece datos útiles para entender la eficacia y el desempeño de la torre de humidificación bajo diferentes condiciones de funcionamiento. La figura 20 muestra la cantidad de calor que se ha perdido:

Figura 19 Calor perdido por el agua en el proceso de refrigeración.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

Respecto al flujo de aire en la torre, se ilustran en la figura 21 las condiciones de entrada establecidas en el simulador DWSIM.:

Figura 20 Condiciones de entrada del aire.

1 (Material Stream) 🔍 ✕

Information **Connections**

General Info

Object 🔍

Status ✅

Linked to

Property Package Settings

Property Package ⚙️

Input Data **Results** Annotations Dynamics Floating Tables

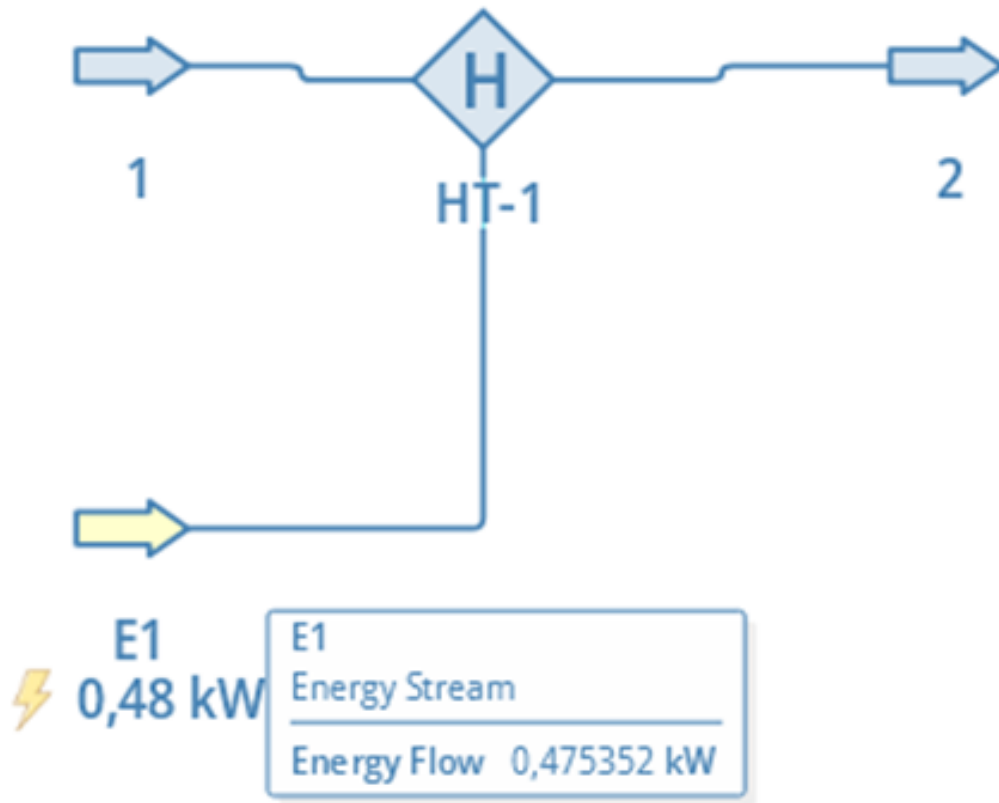
Stream Conditions **Compound Amounts**

Flash Spec	Temperature and Pressure (TP) ⌵	
Temperature	22	C ⌵
Pressure	1	atm ⌵
Mass Flow	0,0198249	kg/s ⌵
Molar Flow	1,07754	mol/s ⌵
Volumetric Flow	0,952	L/s ⌵
Specific Enthalpy	-2408,25	kJ/kg ⌵
Specific Entropy	-6,4933	kJ/[kg.K] ⌵

Fuente: (León et al., 2024)

El calor que recibe el aire de parte del agua caliente se representa de la siguiente manera en la figura 22:

Figura 21 Calor suministrado al aire durante el proceso.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

Las conclusiones de la simulación indican que, tras recibir un total de 0.475352 kilovatios (kW) de calor del agua durante el proceso de humidificación en la torre de tiro mecánico forzado, el aire experimentó un aumento considerable en su temperatura. La figura 23 ilustra la temperatura del aire que se logra al salir de la torre.

Este incremento en la temperatura es resultado del flujo de calor que proviene del agua caliente y muestra el impacto del proceso de evaporación y transmisión de calor en la torre. Este descubrimiento es esencial para entender la transferencia de energía térmica entre los fluidos laborales y la variación en la temperatura del aire mientras pasa por la torre de humidificación. Esto tiene repercusiones significativas en el desempeño y la eficacia del sistema bajo diversas circunstancias operativas.

Figura 22 Condiciones del aire a la salida.

The screenshot shows a software window titled '2 (Material Stream)'. It has two tabs: 'Information' and 'Connections'. The 'Information' tab is active, showing 'General Info' with fields for 'Object' (value: 2), 'Status' (value: Calculated (30/9/2023 0:31:40)), and 'Linked to'. Below this is the 'Property Package Settings' section with a dropdown menu set to 'Peng-Robinson (PR) (1)'. At the bottom, there are five tabs: 'Input Data', 'Results', 'Annotations', 'Dynamics', and 'Floating Tables'. The 'Results' tab is active, showing 'Stream Conditions' and 'Compound Amounts'. The 'Stream Conditions' section contains a table of properties and their values.

Property	Value	Unit
Flash Spec	Pressure and Enthalpy (PH)	
Temperature	27,3226	C
Pressure	1	atm
Mass Flow	0,0198249	kg/s
Molar Flow	1,07754	mol/s
Volumetric Flow	0,977337	L/s
Specific Enthalpy	-2384,52	kJ/kg
Specific Entropy	-6,41338	kJ/[kg.K]

Fuente: (León et al., 2024)

3.2. Plano de la torre de humidificación en QCAD

La etapa de diseño de la torre de humidificación, se han elaborado planos minuciosos que muestran las dimensiones y características principales de la torre. Estos planos ofrecen una ilustración visual exacta de la disposición de la torre y los elementos fundamentales del sistema.

3.2.1. Condiciones de Aire entrante a la Torre.

Se reemplazan los datos disponibles en las ecuaciones 7 y 8:

$$\text{Caudal de aire} = R * \dot{Q}$$

$$\text{Caudal de aire} = 20 \frac{\frac{\text{litros de aire}}{\text{segundo}}}{\frac{\text{litros de agua}}{\text{segundo}}} * 0.0476 \frac{\text{litros de agua}}{\text{segundo}}$$

$$\text{Caudal de aire} = 0.952 \frac{\text{litros de aire}}{\text{segundo}} = 3.43 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{segundos}} = 9.53 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{segundos}}$$

$$\dot{Q} = A \cdot v$$

$$v = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{9.53 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{segundos}}}{0.25 \text{ m}^2} = 3.812 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.2.2. Presión Estática de la Torre.

Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 9:

$$P_{es} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{aire}} * v_{\text{aire}}$$

$$P_{es} = \frac{1}{2} * 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3.812 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{es} = 2.33 * 10^{-3} \text{ Pa}$$

3.2.3. Potencia del Ventilador.

Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 10:

$$P = \frac{\text{Caudal de aire} * \text{Presión estática}}{\text{Eficiencia del ventilador}}$$

$$P = \frac{9.53 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{segundos}} * 2.33 * 10^{-3} \text{ Pa}}{0.90}$$

$$P = 2.5 * 10^{-6} \text{ W} = 3.35 * 10^{-9} \text{ hp}$$

Dada la potencia calculada, es recomendable seleccionar un ventilador con una potencia de 0.25 hp.

3.2.4. Potencia de la Bomba.

Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 11:

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{\dot{Q} * H * G E}{75}$$

$$Potencia (hp) = \frac{0.0476 \frac{l}{s} * 1.60 m * 1}{75} \approx 0.00102 hp$$

Por lo tanto, la potencia estimada para la bomba sería aproximadamente 0.00102 caballos de fuerza.

Como esta es una potencia bastante baja, es factible que en la práctica se emplee una bomba con una potencia nominal más similar o superior, como por ejemplo 0.25 hp o incluso 0.5 hp, en función de las alternativas existentes en el mercado y de las demandas particulares del sistema.

En este escenario, es aconsejable seleccionar una bomba de potencia de 0,50 hp para poder gestionar adecuadamente el agua que ingresa a la torre de humidificación.

3.2.5. *Altura de la Torre.*

Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 12:

$$H = \frac{\dot{Q}}{h * A * \Delta T}$$

$$H = \frac{475.352 w}{100 \frac{w}{m^2 * ^\circ C} * 0.25 * (37 - 25) ^\circ C}$$

$$H = 1.58 m \approx 1.60 m$$

3.2.6. *Altura de Relleno.*

Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 13:

$$Z_{relleno} = 0.80 * H$$

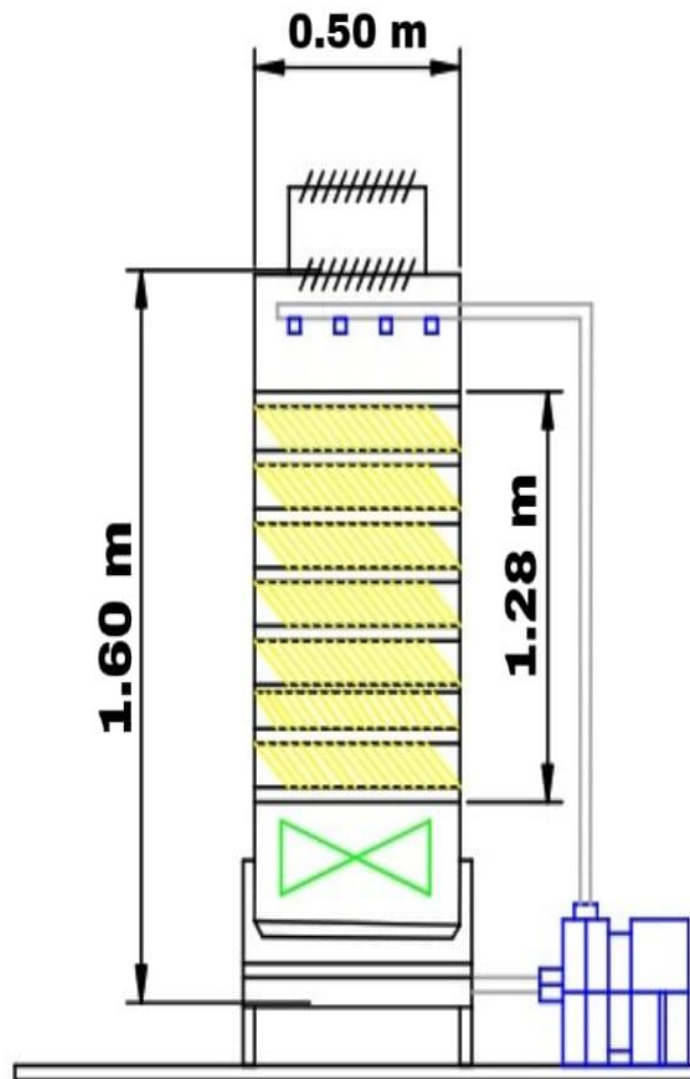
$$Z_{relleno} = 0.80 * 1.60 m$$

$$Z_{relleno} = 1.28 m$$

La torre de humidificación posee una altura total de 1.60 metros, lo que la hace una construcción modesta pero eficaz para su objetivo. Se determina la altura del relleno de la torre en 1.28 metros, lo que facilita una repartición homogénea de agua para la humidificación.

Además, se ha establecido un ancho de 25 cm en la torre para asegurar un correcto flujo de aire a través de su estructura. La figura 24 y el anexo 1 muestran el diseño del plano de la torre realizado con el software QCAD:

Figura 23 Plano acotado de la torre de humidificación en QCAD.



Fuente: (Sancen & Torres, 2023)

Respecto a los componentes, se ha incorporado una bomba centrífuga de 0.50 hp para asegurar un abastecimiento eficaz de agua al sistema de humidificación. Además, se ha integrado un ventilador de 0.25 hp para garantizar el correcto flujo de aire a través de la torre y simplificar el proceso de humidificación.

Estos planos ofrecen una perspectiva integral y minuciosa de la torre de humidificación proyectada, incluyendo sus dimensiones físicas y la incorporación de elementos esenciales para su óptimo desempeño. Además, se pueden observar las perspectivas laterales y superiores en los anexos 2, 3 y 4. Con estos datos, se establece una base firme para la posible edificación e implementación de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el laboratorio de Operaciones Unitarias.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El reconocimiento de los factores y parámetros esenciales de diseño tuvo un efecto notable en el desempeño de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado. Este saber ofrece un fundamento firme para el diseño y la simulación del proceso, facilitando un enfoque exacto y eficaz en el avance de esta tecnología.
- El uso exitoso del software DWSIM para simular el proceso de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado evidencia su eficacia como instrumento de diseño y análisis. La relevancia de disponer de instrumentos de simulación para mejorar el rendimiento de la torre y valorar su rendimiento en diversos contextos.
- Los cálculos de ingeniería efectuados para la creación de la torre de humidificación, así como su dimensionamiento, son esenciales para asegurar un funcionamiento eficiente de la torre. Resalta la importancia de los cálculos exactos en la creación de equipos de ingeniería y su influencia en la eficiencia en las operaciones.
- El éxito en la elaboración de un plano detallado de la torre de humidificación utilizando el software QCAD evidencia su eficacia como recurso de diseño. Esta conclusión subraya la relevancia de disponer de programas de diseño que muestren de forma precisa y clara las estructuras y elementos de ingeniería, simplificando la comunicación y la futura edificación de la torre.
- Es fundamental el concepto de construir una torre de humidificación en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Técnica de Machala para aplicar y profundizar en los conocimientos obtenidos en la sección teórica sobre el proceso de humidificación de manera práctica y educativa, con el objetivo de comprender los componentes esenciales en su funcionamiento y sus parámetros de operación.

4.2. Recomendaciones

4.2.1. Simulación

- Se aconseja realizar un análisis exhaustivo de las condiciones de funcionamiento de la torre de humidificación. Modificar factores como la temperatura del agua inicial y la corriente de aire puede tener un impacto considerable en la eficacia del proceso y la cantidad de calor transmitida. Una meticulosa optimización facilitará el aumento de la eficiencia energética y la habilidad para humedecer la torre.
- A pesar de que la simulación ofrece datos útiles, se recomienda llevar a cabo experimentos prácticos para corroborar los hallazgos. La recolección de información experimental auténtica permitirá verificar la exactitud del modelo termodinámico y asegurará que las condiciones de la torre de humedecimiento se adecuen a las previsiones.
- La instalación de un sistema de seguimiento constante de la temperatura y la humedad en la torre de humedecimiento en tiempo real. Esto facilitará una supervisión exacta del proceso y la habilidad para modificar las condiciones operativas de forma oportuna para preservar un desempeño óptimo.

4.2.2. Diseño

- Se aconseja realizar estudios adicionales para establecer si las dimensiones escogidas (1.60 metros de altura, 1.28 metros de altura de relleno y 25 cm de anchura) continúen siendo las más apropiadas para las necesidades particulares de la aplicación. Es crucial tener en cuenta cualquier variación en la carga laboral o en las necesidades de humidificación que puedan presentarse a lo largo del tiempo.
- Conforme progresa el diseño, se recomienda llevar a cabo un estudio detallado de las alternativas de componentes, en particular la bomba centrífuga y el ventilador, para garantizar que se han escogido las alternativas más eficaces y apropiadas para el funcionamiento.
- Es crucial tener en cuenta el efecto ecológico del diseño de la torre, particularmente en lo que respeta al uso de energía y recursos. Efectuar un estudio del ciclo de vida para valorar y reducir cualquier efecto perjudicial en el entorno ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- Adkins, K. A., & Sescu, A. (2022). Wind Farms and Humidity. *Energies*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/en15072603>
- Aguilar, H. (2017). *Diseño Y Optimización De Una Torre De Enfriamiento De Tiro Inducido*.
- Aguilar, H., & Ortega, E. (2017). *Diseño Y Optimización De Una Torre De Enfriamiento De Tiro Inducido*. Instituto Politécnico Nacional.
- AIMPLAS. (2022). *Simulación de procesos en Aspen Plus*.
<https://www.aimplas.es/blog/simulacion-de-procesos-en-aspen-plus/#:~:text=Aspen Plus® es un,optimización del modelado de procesos>.
- Alaiwi, Y., & Al-Omari, S. B. (2024). Types of Cooling Towers: A Review. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 106–114.
<https://doi.org/10.58496/BJME/2024/013>
- Alamos, J., & Fernandez, R. (2014). *Prestaciones Termo-Electro Fluidodinámicas de Una Torre de Enfriamiento de Agua de Tiro Forzado*.
- Ali, M., & Zaman, N. (2019). *Design of a Forced Draft Cooling Tower Effect of Fluid-Structure Interaction on Heat Transfer View Project Design of a Scale down Prototype of a Forced Draft Cooling Tower View Project*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31703.29605/1>
- Arango, R. (2019). *Diseño de Un Sistema de Control Para La Torre de Enfriamiento de Agua En Planta PROTISA*.
- Bin, S., Rahman, M., & Khadem, A. (2017). *Experimental Study On The Performance Of Mechanical Induced Draft Cooling Tower Using Different Quantity Of Circulating Fluids*.
- Campoverde León, J. A., Espinoza Loja, N. E., Gómez Ortega, D. B., León Cueva, W. P., & Sigsig Cabrera, D. J. (2024). Efecto de la humidificación en la exportación de

- banano. *Código Científico Revista de Investigación*, 5(1), 551–560. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n1/396>
- Castelli, M., Anderson, M. C., Yang, Y., Wohlfahrt, G., Bertoldi, G., Niedrist, G., Hammerle, A., Zhao, P., Zebisch, M., & Notarnicola, C. (2018). Two-source energy balance modeling of evapotranspiration in Alpine grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209(July 2016), 327–342. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.062>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*.
- Chen, J., Han, D., He, W., Liu, Y., & Gu, J. (2020). Theoretical and experimental analysis of the thermodynamic and economic performance for a packed bed humidifier. *Energy Conversion and Management*, 206, 112497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112497>
- Chen, X., Sun, F., Chen, Y., & Gao, M. (2019). Novel method for improving the cooling performance of natural draft wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*, 147(October 2018), 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.076>
- Contreras, O., Quezada, Lady, Edissón., Q., & Cuenca, F. (2018). Ecuación modelo operacional con aplicación de balance de materia en estado no estacionario. *Revista Ciencia UNEMI*, 11(28), 33–40. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp33-40p>
- Dalili, F. (2003). *Humidification in Evaporative Power Cycles*.
- De Tommaso, J., Rossi, F., Moradi, N., Pirola, C., Patience, G. S., & Galli, F. (2020). Experimental methods in chemical engineering: Process simulation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(11), 2301–2320. <https://doi.org/10.1002/cjce.23857>
- Dode, S., Sarode, R., Abarahim, A., Baviskar, S., Shinde, S. V., & Pagar, K. R. (2023). A Comprehensive Study of Different Types of Cooling Towers. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(10), 1926–1931. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56356>

- Dong, Q., & Yong, Y. (2014). Research on SketchUp Application in Graphing of Civil Engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 580–583, 3163–3166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3163>
- Eder, E., Hiller, S., Brüggemann, D., & Preißinger, M. (2022). Characteristics of air–liquid heat and mass transfer in a bubble column humidifier. *Applied Thermal Engineering*, 209, 118240. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118240>
- Foust, A., Wenzel, L., & Clump, C. (1984). *Principios de Operaciones Unitarias*. CECSA.
- Freychet, N., Tett, S. F. B., Yan, Z., & Li, Z. (2020). Underestimated Change of Wet-Bulb Temperatures Over East and South China. *Geophysical Research Letters*, 47(3), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2019GL086140>
- GeethaRani, M. (2019). *A Critical Investigation into the Heat and Mass Transfer Analysis of Counter Flow and Cross Flow Mechanical Draft Wet Cooling Towers*.
- Guevara Chinchayan, R., Sosa Sandoval, J., & Chucuya Huallpachoque, R. (2020). Temperatura de los fluidos de operación y su efecto en el performance de una torre de enfriamiento de laboratorio. *INGnosis*, 6(2), 1–12. <https://doi.org/10.18050/ingnosis.v6i2.2063>
- Guney, P. (2023). Humidification and Airway Secretions Management. *Noninvasive Mechanical Ventilation*, 107–111. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28963-7_10
- Gutierrez, E. (2021). Balance Energético de La Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido Del Laboratorio de Conversión de Energía. In *Universidad de las Fuerzas Armadas*.
- Hamdan Al Assaf, A., Amhamed, A., & Fawwaz Alrebei, O. (2022). State of the Art in Humidified Gas Turbine Configurations. *Energies*, 15(24), 1–32. <https://doi.org/10.3390/en15249527>
- Hashemi, Z., Zamanifard, A., Gholampour, M., Liaw, J.-S., & Wang, C.-C. (2023). Recent Progress in Fill Media Technology for Wet Cooling Towers.. *Processes*, 11, 2578. <https://doi.org/10.3390/pr11092578>

- Ircas, L., & Carranza, C. (2013). *Diseño de Una Columna de Humidificación y Enfriamiento En Tiempo Real, a Través de La Técnica de Modelamiento y Simulación*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Jaelani, A., Kusumah, Y. S., & Turmudi. (2019). The design of sketchup software-aided generative learning for learning geometry in senior high school. *Journal of Physics: Conference Series*, 1320(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1320/1/012048>
- Lafta, N., Kareem, F., & Ghafur, M. (2023). Experimental and numerical analysis of the forced draft wet cooling tower. *Journal of Thermal Engineering*, 9, 528–539. <https://doi.org/10.18186/thermal.1285257>
- Lafta, N. S., Kareem, F. A., & Ghafur, M. (2024). Experimental and numerical analysis of the forced draft wet cooling tower. *Journal of Thermal Engineering*, 10(1), 62–77. <https://doi.org/10.18186/thermal.1285257>
- Lai, L., Wang, X., Kefayati, G., & Hu, E. (2021). Evaporative cooling integrated with solid desiccant systems: A review. In *Energies* (Vol. 14, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en14185982>
- Lawal, D. U., Jawad, S. A., & Antar, M. A. (2020). Experimental and theoretical study on a heat pump driven open-air humidification dehumidification desalination system. *Energy*, 207, 118252. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118252>
- Lee, F. W. W., & Ibrahim, A. B. (2018). The Design and Effectiveness of Padlock with Closeable Keyhole in Preventing Residential Burglary: A Review. *Review. Journal of Information System and Technology Management*, 3(9), 26–36.
- León, Sancen, D., Torres, K. A., Armijos, G. V., Espinoza, W. O., & Garcia, E. J. (2024). Simulación en software libre de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado para determinar parámetros del proceso. *Brazilian Journal of Development*, 10(10). <https://doi.org/10.34117/bjdv10n10-033>
- Li, S., & Flynn, M. R. (2021). Cooling tower plume abatement and plume modeling: a review. In *Environmental Fluid Mechanics* (Vol. 21, Issue 3, pp. 521–559). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10652-021-09790-w>

- Liu, N., Zhang, L., & Jia, X. (2017). The Effect of the Air Water Ratio on Counter Flow Cooling Tower. *Procedia Engineering*, 205, 3550–3556. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.925>
- Liu, X., Wang, X., & Kapteijn, F. (2020). Water and Metal-Organic Frameworks: From Interaction toward Utilization. *Chemical Reviews*, 120(16), 8303–8377. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00746>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química. In *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Séptima).
- Medina, M. (2010). *Optimización Del Sistema De Enfriamiento-Torre Y-Me3003b De La Refinería Estatal Esmeraldas*.
- Nourani, Z., Naserbegi, A., Tayyebi, S., & Aghaie, M. (2019). Thermodynamic evaluation of hybrid cooling towers based on ambient temperature. *Thermal Science and Engineering Progress*, 14(August), 100406. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100406>
- Obregon Quiñones, L. G., Pertuz Amaya, J. C., & Domínguez Rambal, R. A. (2017). Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire. *Prospectiva*, 15(1), 42–52. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.820>
- Ocon, P., & Tojo, J. (1980). *Problemas de Ingeniería Química*. Aguilar.
- Pérez, T. (2017). *Cálculo Y Selección De Una Torre De Enfriamiento En La Ueb Primavera De Pinar Del Río*.
- Portero, V., & Valarezo, S. (2012). *Diseño Y Construcción De Una Torre De Enfriamiento De Agua Por Evaporacion De Tiro Inducido*. Escuela Superior Politécnica De De Chimborazo.
- Prado de Nicolás, A., Molina-García, A., & Vera-García, F. (2023). Performance evaluation and feasibility study of a cooling tower model for zero liquid discharge-desalination processes. *Energy Conversion and Management*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117673>

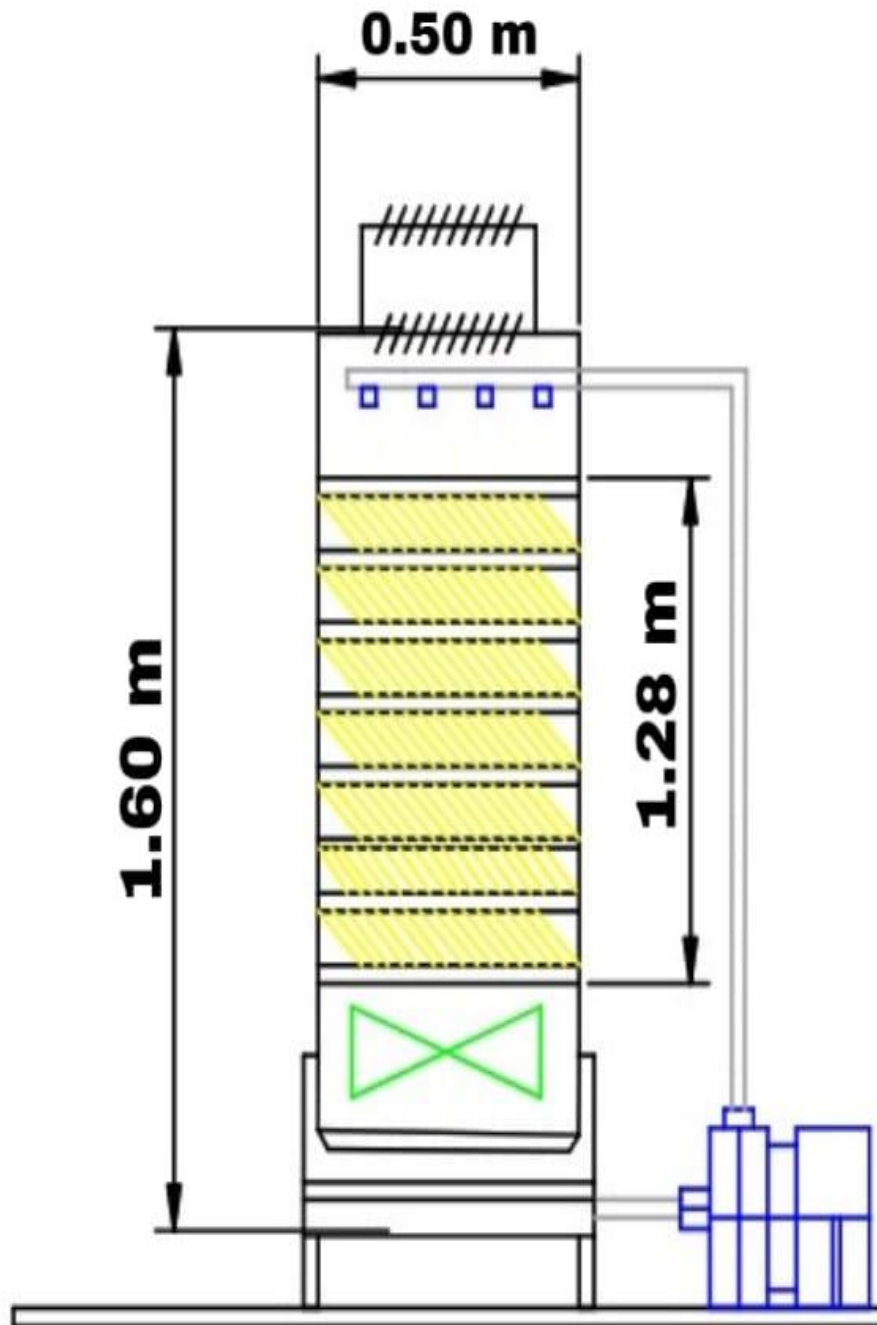
- Qasem, N. A. A., Zubair, S. M., Abdallah, A. M., Elbassoussi, M. H., & Ahmed, M. A. (2020). Novel and efficient integration of a humidification-dehumidification desalination system with an absorption refrigeration system. *Applied Energy*, 263, 114659. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114659>
- Rafael, J., Bracho, O., Manuel, V., & Velazco, P. (2020). Performance and Comparative Analysis of Two Mechanical Draft Laboratory Scale Cooling Towers. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(12), 227–232. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS120061>
- Rahimi-Ahar, Z., Hatamipour, M. S., & Ahar, L. R. (2020). Air humidification-dehumidification process for desalination: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 80, 100850. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100850>
- Raza, H. M. U., Sultan, M., Bahrami, M., & Khan, A. A. (2021). Experimental investigation of evaporative cooling systems for agricultural storage and livestock air-conditioning in Pakistan. *Building Simulation*, 14(3), 617–631. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0678-2>
- Reinoso, D. (2010). *Evaluación de Los Parámetros de Explotación de Las Torres de Enfriamiento Con Relleno de Cerámica y PVC Del Sistema de Climatización Del Aeropuerto Internacional “Simón Bolívar.”*
- Rodríguez, L. (2018). *Determinacion Del Coeficiente Global De Transferencia De Masa En Una Torre De Enfriamiento De Tiro Inducido Flujo Cruzado*. Universidad de Guayaquil.
- Romero Carrillo, P. E. (2009). *Guadalinex Y El Diseño Asistido Por Ordenador: Introducción a Qcad*. 1–9.
- Sancen, D., & Torres, K. (2023). *Diseño de torre de humidificación de tiro mecánico forzado mediante la simulación en software libre para determinar parámetros del proceso*. [Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/22338>

- Shishatskii, Y. I., Nickel, S. A., Derkanosova, A. A., Tolstov, S. A., & Panchenko, S. L. (2022). Improving the efficiency of cooling towers in the water cycle. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 84(2), 34–38. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-34-38>
- Shublaq, M., & Sleiti, A. K. (2020). Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters. *Applied Thermal Engineering*, 175(April), 115418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115418>
- Song, Y., & Jing, Y. (2021). Application prospect of cad-sketchup-ps integrated software technology in landscape planning and design. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(S3), 153–163. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.S3.153-163>
- Sun, Y., Guan, Z., & Hooman, K. (2017). A review on the performance evaluation of natural draft dry cooling towers and possible improvements via inlet air spray cooling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(September 2016), 618–637. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.151>
- Vargas, D., & García, H. (2020). *Diseño y Simulación de Torre de Enfriamiento Por Evaporación*.
- Wang, M., Wang, J., Wang, J., & Shi, C. (2018). Contrastive analysis of cooling performance between a high-level water collecting cooling tower and a typical cooling tower. *Journal of Thermal Science*, 27(1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-0982-7>
- Wilkes, A., & Williams, D. (2018). Measurement of humidity. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 19(4), 198–201. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2018.01.009>
- XIONG, Y., MENG, Q. shi, GAO, J., TANG, X. fang, & ZHANG, H. fu. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0)
- Xu, L., Chen, Y.-P., Wu, P.-H., & Huang, B.-J. (2020). Humidification–Dehumidification (HDH) Desalination System with Air-Cooling Condenser and Cellulose Evaporative Pad. *Water*, 12(1), 142. <https://doi.org/10.3390/w12010142>

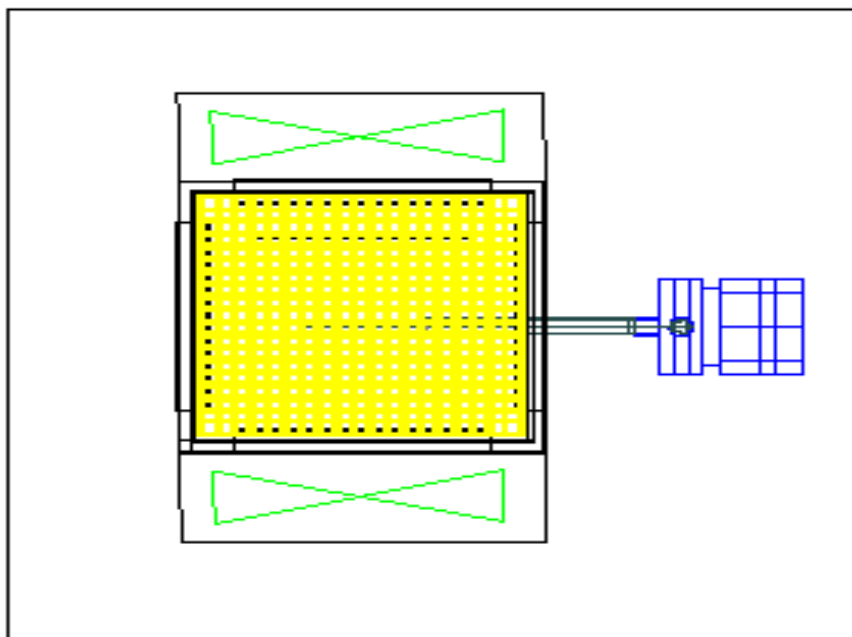
- Yang, Y., Cui, G., & Lan, C. Q. (2019). Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113(May), 109230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.037>
- Yu, Z., Sun, C., Zhang, L., Bao, B., Li, Y., Bu, S., & Xu, W. (2021). Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120910. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120910>

ANEXOS

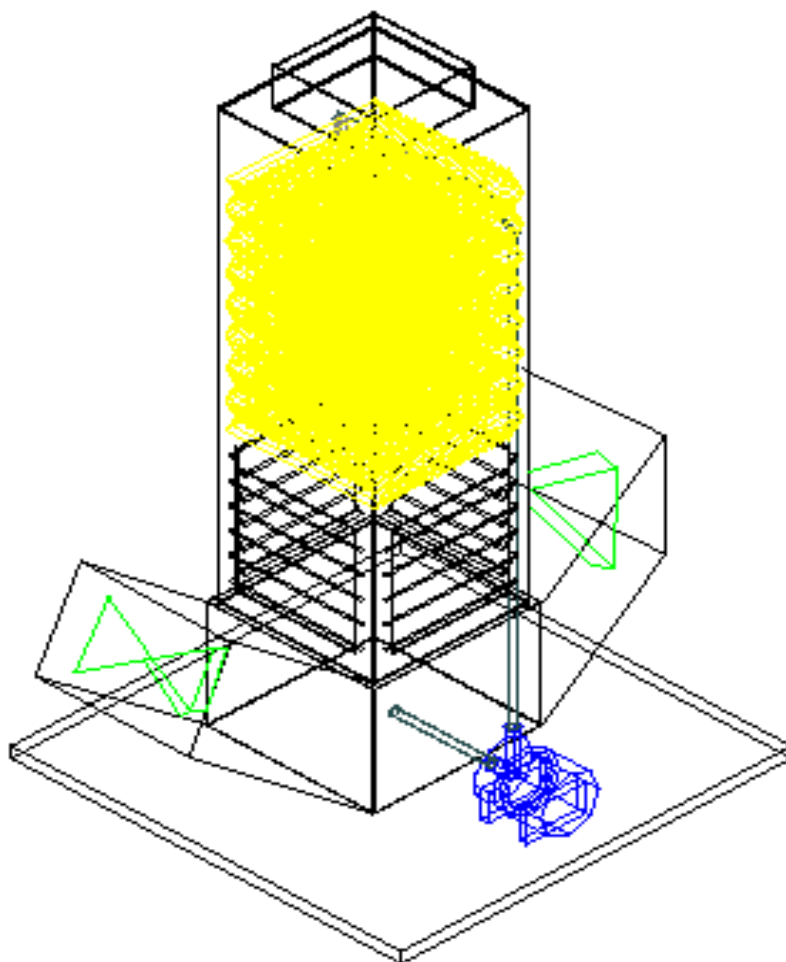
Anexo 1. Plano de la torre de humidificación realizado en QCAD



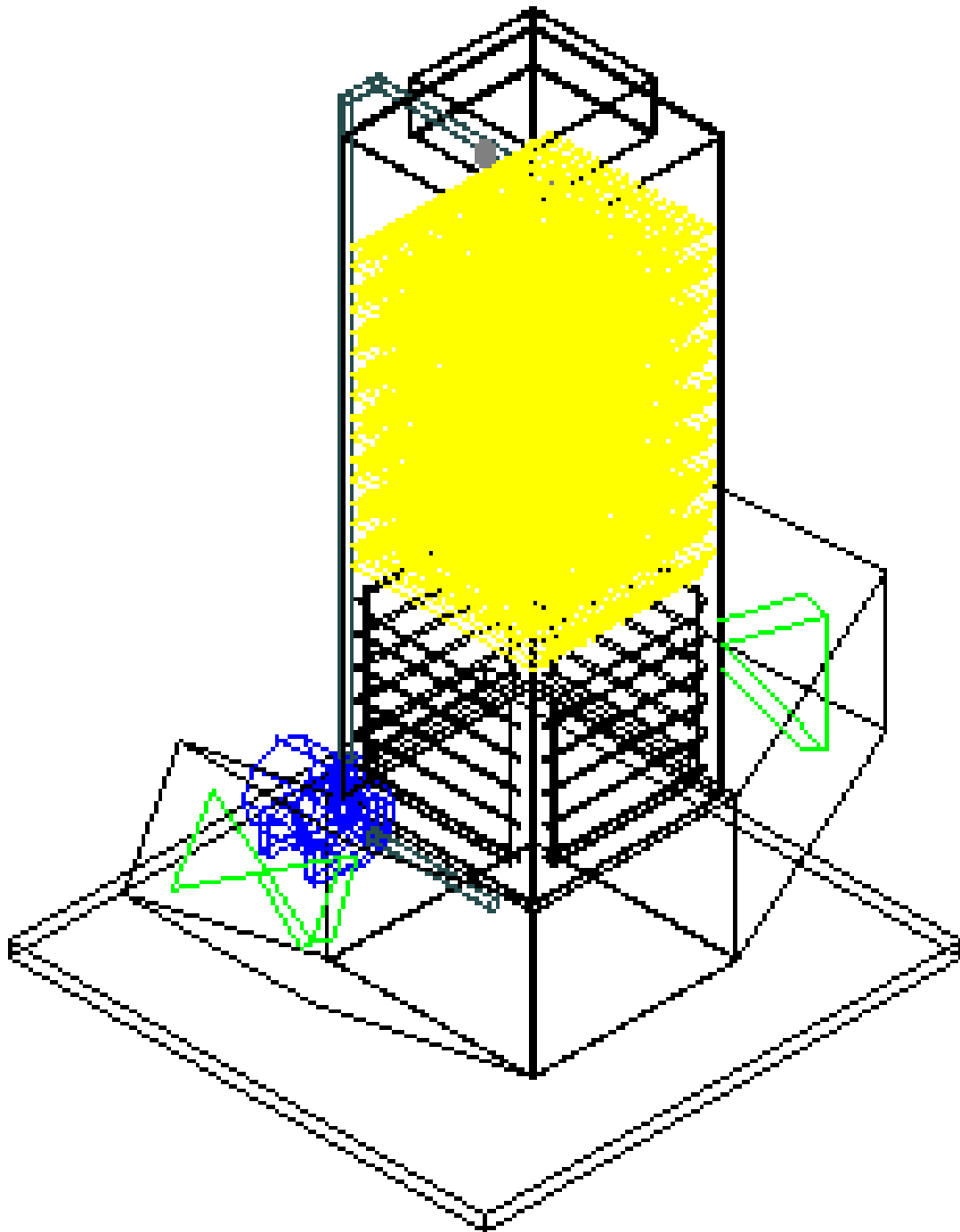
Anexo 2. Vista superior de la torre de humidificación



Anexo 3. Vista lateral derecha de la torre de humidificación



Anexo 4. Vista lateral izquierda de la torre de humidificación



Anexo 5. Torre de humidificación de tiro mecánico construida en el laboratorio de Operaciones Unitarias



PDF

International Publication Technical Data

Title: Torre de Humidificación para Enfriamiento de Aguas Industriales.
Diseño, Construcción y Aportes a la Ingeniería Química.

Publisher: Editorial Hambatu Sapiens

Cover Design: Editorial Hambatu Sapiens

Authors: Wilson Patricio León Cueva, Gabriela Viviana Armijos
Cabrera, Washington Omar Espinoza Ramón.

Format: PDF

Pages: 110 pág.

Size: A4 21x29.7cm

System Requirements: Adobe Acrobat Reader

Access Mode: World Wide Web

ISBN: 978-9942-7442-3-4

DOI: <https://doi.org/10.63862/ehs-978-9942-7442-3-4>

ISBN: 978-9942-7442-3-4



HS
Editorial

