



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

Diseño de torre de humidificación de tiro mecánico forzado mediante la simulación en software libre para determinar parámetros del proceso.

**TORRES LOOR KENNETH ARIEL
INGENIERO QUIMICO**

**SANCEN NAVARRETE DALEMBERG BENJAMIN
INGENIERO QUIMICO**

**MACHALA
2023**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

**Diseño de torre de humidificación de tiro mecánico forzado
mediante la simulación en software libre para determinar
parámetros del proceso.**

**TORRES LOOR KENNETH ARIEL
INGENIERO QUIMICO**

**SANCEN NAVARRETE DALEMBERG BENJAMIN
INGENIERO QUIMICO**

**MACHALA
2023**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**Diseño de torre de humidificación de tiro mecánico forzado
mediante la simulación en software libre para determinar
parámetros del proceso.**

**TORRES LOOR KENNETH ARIEL
INGENIERO QUIMICO**

**SANCEN NAVARRETE DALEMBERG BENJAMIN
INGENIERO QUIMICO**

LEON CUEVA WILSON PATRICIO

**MACHALA
2023**

DISEÑO DE TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO MEDIANTE LA SIMULACIÓN EN SOFTWARE LIBRE PARA DETERMINAR PARÁMETROS DEL PROCESO

por Dalemberg Benjamín Sancén Navarrete - Torres Loor Kenneth Ariel

Fecha de entrega: 13-oct-2023 08:19a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2193938411

Nombre del archivo: TESIS_FINAL-SANC_N-TORRES.docx (631.26K)

Total de palabras: 21207

Total de caracteres: 113271

DISEÑO DE TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO MEDIANTE LA SIMULACIÓN EN SOFTWARE LIBRE PARA DETERMINAR PARÁMETROS DEL PROCESO

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	qdoc.tips Fuente de Internet	2%
2	de.slideshare.net Fuente de Internet	1%
3	archive.org Fuente de Internet	1%
4	vsip.info Fuente de Internet	1%
5	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%
6	redepapa.org Fuente de Internet	<1%
7	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
8	doku.pub Fuente de Internet	<1%

9	doczz.es Fuente de Internet	<1 %
10	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
11	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
12	es.unionpedia.org Fuente de Internet	<1 %
13	biblus.us.es Fuente de Internet	<1 %
14	baixardoc.com Fuente de Internet	<1 %
15	aprenderly.com Fuente de Internet	<1 %
16	www.u-cursos.cl Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
18	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
19	rodin.uca.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía Activo

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

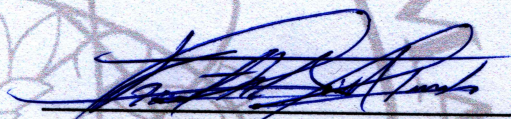
Los que suscriben, TORRES LOOR KENNETH ARIEL y SANCEN NAVARRETE DALEMBERG BENJAMIN, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Diseño de torre de humidificación de tiro mecánico forzado mediante la simulación en software libre para determinar parámetros del proceso., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

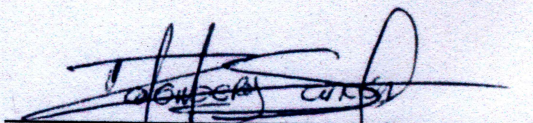
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



TORRES LOOR KENNETH ARIEL

0706424439



SANCEN NAVARRETE DALEMBERG BENJAMIN

0706469152

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de investigación a mis queridos padres, Benjamín y Narcisa, cuyo amor, apoyo inquebrantable y sacrificios han sido la fuente de mi inspiración y fortaleza a lo largo de este camino académico. Sus valores, enseñanzas y ejemplo de perseverancia me han guiado en esta travesía. Este logro es un reflejo de su dedicación y el regalo más grande que puedo ofrecerles en agradecimiento por todo lo que han hecho por mí. Con profundo cariño y gratitud, este trabajo es para ustedes.

Sancén Navarrete Dalemberg Benjamín

Este trabajo de investigación es dedicado inicialmente a dios y mis padres, Manuel y Nelly que con estar a mi lado en este proceso fue demasiada motivación e inspiración, aparte de su esfuerzo, sacrificio, apoyo, motivación e inspiración incesantes día a día que me dieron para superar todo proceso académico.

Dedico este logro a dos personas que influyeron de manera contundente compartiendo su amistad y valores que el dinero no pudiese comprar y que fueron fundamentales para que este trabajo sea parte del presente, de esta manera resalto y extiendo mis agradecimientos con aprecio, admiración y respeto a mi amigo Dalemberg Sancén, ya que, un amigo es un hermano que uno elige, cada vez que se propongan una meta, luchan cada día por alcanzarla con trabajo y constancia, y a mi gran instructor y mentor deportivo Kleber Augusto Torres Salas, gracias por todo el apoyo, enseñanzas, por enseñarme el buen camino, ayudarme a superar mis límites, creer en mí y ser el catedrático de lo que amo hacer.

Agradezco a mi apreciada novia que estuvo acompañándome en este proceso de titulación incondicionalmente y que me estuvo brindando motivación constante para no abandonar y tener razones por las cuales concluir este trabajo.

Este trabajo es dedicado a personas que no han tenido la oportunidad de estudiar y que es o fue su sueño, pero por cosas de la vida no han podido cumplirlo, también a los compañeros presentes y ausentes que algún día ofrecieron su apoyo. Extiendo mi agradecimiento a quienes me ayudaron a consolidarme, a los seres vivos que están presentes y los que no están, ya que, me dejaron motivaciones para concluir.

Torres Loor Kenneth Ariel

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no habría sido posible sin la contribución y apoyo de cada una de estas personas, y sinceramente agradecemos su compromiso y confianza en nuestro trabajo. Su influencia ha dejado una marca indeleble en nuestra formación académica y en nuestro desarrollo como investigadores.

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación. En primer lugar, extendemos nuestro profundo agradecimiento a nuestros padres, quienes han sido una fuente constante de apoyo, inspiración y amor incondicional a lo largo de este camino académico.

Deseamos agradecer de manera especial a nuestros respetados tutores, cuyo invaluable conocimiento, orientación y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Agradecemos al Ing. Quím. Wilson León, a la Ing. Quím. Tanya Carchi, Ing. Quím. Byron Lapo y la Ing. Gabriela Armijos por compartir su experiencia y conocimientos, brindándonos su tiempo y esfuerzo para guiarnos en cada etapa de este proceso de investigación.

A nuestra querida profesora y especialista Ing. Quím. Gabriela Armijos, le expresamos nuestro profundo agradecimiento con el corazón lleno de gratitud y emoción, por el apoyo inquebrantable que nos ha brindado durante este proceso. Sus palabras de aliento, paciencia infinita y sabios consejos que, aunque son puntuales y directos han sido la luz que nos guio en este desafiante camino. Este trabajo no solo representa horas interminables de trabajo y dedicación, sino también un testimonio de su dedicación incansable como educadora, sus enseñanzas trascendieron el aula, llegando al corazón, de una manera que va más allá de las palabras. Ha sido mucho más que una profesora, ha sido una inspiración y guía en nuestro proceso académico

Sus palabras de aliento en momentos de duda, sus correcciones meticulosas, dedicadas, con paciencia y sus consejos perspicaces han sido un faro de esperanza en los momentos más oscuros. A través de su sabiduría, hemos aprendido que el conocimiento es un regalo precioso, y la humildad y pasión son las llaves que nos abren las puertas hacia un futuro mejor.

Sobre todo, destacamos que es una mujer decidida, tenaz, valiente y resiliente a parte de su paciencia, su dedicación, su igualdad con todos los estudiantes y su insistencia por que aprendamos y nos dediquemos en las aulas y en nuestro futuro profesional.

Al finalizar este trabajo no podemos evitar recordar todas las veces que nos animó a superar los obstáculos, a nunca rendirnos y a perseguir nuestros sueños con determinación. Cada palabra que nos ha compartido, cada gesto de apoyo, nos ha forjado un espíritu indomable y de una gratitud eterna.

Sus enseñanzas no solo han nutrido nuestra mente, sino también nuestra alma. En cada página de esta tesis, encontrará una parte de su dedicación y amor. Usted es la razón por la que hoy podemos decir que hemos llegado a este punto de nuestra vida académica.

Gracias por ser la brújula que nos guio a través de este viaje. Sus lecciones, su paciencia y su bondad han dejado una huella imborrable en nuestro corazón. No tenemos palabras suficientes para expresar nuestra gratitud, pero esperamos que estas simples líneas sean un reflejo de lo que sentimos en lo más profundo de nuestro ser luego de esta vida académica de la cual formó parte. Con el más sincero agradecimiento y afecto, la extrañaremos y siempre la llevaremos presente en éxitos y adversidades.

Sancén Navarrete Dalemberg Benjamín

Torres Loor Kenneth Ariel

RESUMEN

En este trabajo, se buscó identificar las variables fundamentales en un proceso de torre de humidificación de tiro mecánico forzado y diseñarla a escala de laboratorio. Para lograrlo, se empleó la simulación mediante el software DWSIM con el fin de determinar los parámetros de operación necesarios para dimensionar la torre con ayuda del programa QCAD.

Las características de los fluidos de trabajo son cruciales en este contexto, lo que motivó la realización de mediciones clave para ambos fluidos. En el caso del agua, procedente de la torre de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Técnica de Machala, se registró una temperatura de 37 °C mediante un termómetro de mercurio. Además, se determinó el caudal de agua, que se fijó en 0.0476 litros por segundo al medir el tiempo necesario para llenar una cubeta de 20 litros. En cuanto al aire utilizado, este era de origen atmosférico y se encontraba a una temperatura de 22 °C. Estas mediciones proporcionaron datos fundamentales para el desarrollo y la simulación del proceso en la torre de humidificación.

La simulación del fenómeno de humidificación de la torre se desarrolló en el software DWSIM, en el cual se evalúan diferentes modelos como NRTL, Wilson, UNIQUAC y Peng-Robinson para determinar cuál es el más idóneo para esta simulación. Dadas las condiciones operativas en las que la principal interacción entre el agua y el aire es la transferencia de calor con una mínima evaporación de agua, se concluyó que el modelo de Peng-Robinson es la elección óptima debido a su simplicidad y capacidad para representar sistemas binarios como el agua y el aire.

Por el lado del diseño, las medidas necesarias para poder realizar el plano en el programa QCAD se determinaron analíticamente utilizando los datos obtenidos de la simulación del proceso de humidificación.

En cuanto a los resultados de la simulación, se centró en la cantidad de calor intercambiado entre el aire y el agua. Se determinó que el agua pierde 0.475352 kW de calor durante el proceso, mientras que el aire experimentó un aumento de temperatura hasta llegar a los 27.3226 °C después de recibir el calor.

Con el valor del calor intercambiado se determinó los siguientes valores para el diseño: potencia de ventilador de 0,25 hp, potencia de bomba de 0.5 hp, altura de torre de 1.60m, altura de empaquetamiento de 1.28 m y área transversal de 0.25 m².

La precisión al ingresar datos es crítica en la simulación de una torre de humidificación de tiro mecánico. El modelo de Peng-Robinson se destaca por su eficacia en la representación de las interacciones agua-aire en la transferencia de calor, lo que garantiza resultados confiables. Además, el software QCAD se revela como una herramienta valiosa al permitir la creación de planos detallados, respaldando la propuesta de construcción exitosa de la torre a escala de laboratorio.

Se espera que planos resultantes puedan servir para una futura construcción de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el laboratorio de Operaciones Unitarias.

Palabras Clave

Humidificación, simulación, diseño, torre de humidificación de tiro mecánico forzado, transferencia de calor.

ABSTRACT

In this work, the aim was to identify the fundamental variables in a forced-draft mechanical draft humidification tower process and design it on a laboratory scale. To achieve this, simulation was conducted using the DWSIM software to determine the necessary operating parameters for sizing the tower with the assistance of the QCAD program.

The characteristics of the working fluids are crucial in this context, which motivated the measurement of key parameters for both fluids. For the water, which came from the distillation tower in the Unit Operations laboratory at the Technical University of Machala, a temperature of 37°C was recorded using a mercury thermometer. Furthermore, the water flow rate was determined, fixed at 0.0476 liters per second by measuring the time required to fill a 20-liter bucket. As for the air used, it was of atmospheric origin and was at a temperature of 22°C. These measurements provided fundamental data for the development and simulation of the humidification process in the tower.

The simulation of the tower's humidification phenomenon was carried out in the DWSIM software, evaluating different models such as NRTL, Wilson, UNIQUAC, and Peng-Robinson to determine which one was most suitable for this simulation. Given the operational conditions in which the primary interaction between water and air is heat transfer with minimal water evaporation, it was concluded that the Peng-Robinson model is the optimal choice due to its simplicity and ability to represent binary systems like water and air.

On the design side, the necessary measurements to create the plan in the QCAD program were determined analytically using the data obtained from the humidification process simulation.

Regarding the simulation results, the focus was on the amount of heat exchanged between air and water. It was determined that water loses 0.475352 kW of heat during the process, while the air's temperature increased to 27.3226°C after receiving the heat. With the value of heat exchanged, the following design parameters were determined: fan power of 0.25 hp, pump power of 0.5 hp, tower height of 1.60 meters, packing height of 1.28 meters, and cross-sectional area of 0.25 square meters. Data accuracy is critical in the simulation of a forced-draft mechanical draft humidification tower.

The Peng-Robinson model stands out for its effectiveness in representing water-air interactions in heat transfer, ensuring reliable results. Additionally, the QCAD software proves to be a valuable tool for creating detailed plans, supporting the successful construction proposal of the laboratory-scale tower.

It is expected that the resulting plans can be used for the future construction of a forced-draft mechanical draft humidification tower in the Unit Operations laboratory.

Key Words

Humidification, simulation, design, forced draft humidification tower, heat transfer.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	21
1.1 HUMIDIFICACIÓN EN TORRES DE HUMIDIFICACIÓN	21
1.1.1 <i>Psicrometría</i>	21
1.1.2 <i>Carta Psicrométrica</i>	21
1.1.3 <i>Humedad Relativa</i>	22
1.4.1 <i>Humedad Absoluta</i>	23
1.1.5 <i>Humedad Específica</i>	24
1.1.6 <i>Temperatura del Bulbo Húmedo</i>	24
1.1.7 <i>Temperatura de Bulbo Seco</i>	24
1.1.8 <i>Punto de Rocío</i>	24
1.1.9 <i>Transferencia de Calor</i>	24
1.1.10 <i>Transferencia de Masa</i>	25
1.2 TORRES DE HUMIDIFICACIÓN.....	27
1.2.1 <i>Torres de Entrada Natural de Aire</i>	28
1.3 TERMODINÁMICA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN.....	38
1.3.1 <i>Balance de Masa</i>	38
1.3.3 <i>Rendimiento</i>	39
1.4 SOFTWARES DE DISEÑO	39
1.4.1 <i>AutoCAD</i>	39
1.4.2 <i>QCAD</i>	40
1.4.3 <i>SolidWorks</i>	41
1.4.4 <i>Autodesk Inventor</i>	41
1.4.5 <i>SketchUp</i>	42

1.5	SOFTWARES DE SIMULACIÓN.....	44
1.5.1	<i>Simulink</i>	45
1.5.2	<i>Aspen Plus</i>	45
1.5.3	<i>DWSIM</i>	47
1.6	ESTRUCTURA DE LAS TORRES DE HUMIDIFICACIÓN.....	47
1.6.1	<i>Estructura del Cuerpo de la Torre</i>	47
1.6.2	<i>Tuberías de la Torre de Humidificación</i>	49
1.6.3	<i>Bomba de Circulación de Agua</i>	49
1.6.4	<i>Paneles de control</i>	50
1.6.5	<i>Sensores de Temperatura</i>	51
1.6.6	<i>Medidores de Caudal</i>	52
1.6.7	<i>Psicrómetro</i>	53
1.6.8	<i>Hidrómetro</i>	54
1.6.9	<i>Medidor de Presión en la Torre de Humidificación</i>	55
1.6.10	<i>Válvulas y Reguladores de Flujo en la Torre de Humidificación</i>	56
1.6.11	<i>Sistema de Motopropulsor (Ventilador y Extractor)</i>	57
1.6.12	<i>Sistema de Agua de Aporte</i>	58
1.6.13	<i>Chimenea o Virola</i>	59
1.6.14	<i>Sistema de Distribución de Agua en la Torre de Humidificación</i>	60
1.6.15	<i>Pulverizadores o Rociadores</i>	61
1.6.16	<i>Separadores de Gotas</i>	62
1.6.17	<i>Rellenos</i>	62
1.6.18	<i>Cuba de Depósito y Sistema de Salida de Agua</i>	64
1.7	MATERIALES UTILIZADOS EN LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	65
1.8	RECUBRIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	66
1.9	EMPAQUETADURAS DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN (RELLENO DE LÁMINA ONDULADA)	67
1.10	VENTAJAS DEL RELLENO	67
	CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	69
2.1	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE DWSIM.....	69
2.1.1	<i>Selección de la Metodología de Investigación</i>	69
2.1.2	<i>Características de Fluidos de Trabajo</i>	69
2.1.3	<i>Recopilación de Datos</i>	70
2.1.4	<i>Diagrama de Flujo del proceso de humidificación</i>	71
2.1.5	<i>Modelo de Simulación</i>	72
2.1.6	<i>Configuración del modelo de simulación</i>	72

2.1.7 Definición de los componentes que influyen en la simulación	74
2.2 DISEÑO DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO EN EL SOFTWARE QCAD	75
2.2.1 Diseño e Implementación de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado	75
2.2.2 Caudal y Velocidad de Aire Entrante a la Torre	76
2.2.3 Presión Estática de la Torre	77
2.2.4 Selección del Ventilador de la Torre	77
2.2.5 Selección de la Fuente de Agua Caliente	79
2.2.6 Capacidad de la Bomba	80
2.2.7 Altura de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado	81
2.2.8 Dimensiones del Relleno	82
2.2.9 Representación de Componentes de la Torre en el Software QCAD	83
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
3.1 SIMULACIÓN DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO EN EL PROGRAMA DWSIM.....	85
3.2 DISEÑO DEL PLANO DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO EN QCAD	89
3.2.1 Caudal y Velocidad de Aire Entrante A la Torre	90
3.2.2 Presión Estática de la Torre	90
3.2.3 Potencia del Ventilador	90
3.2.4 Potencia de la Bomba	90
3.2.5 Altura de la Torre	91
3.2.6 Altura de Relleno	91
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
4.1 CONCLUSIONES	94
4.2 RECOMENDACIONES	95
4.2.1 Simulación	95
4.2.2 Diseño.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CARTA PSICOMÉTRICA DE AIRE – AGUA A 1 ATM.....	22
FIGURA 2. SISTEMA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DEL TIPO ATMOSFÉRICA.....	29
FIGURA 3. FLUJOS PRESENTES EN LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO NATURAL	30
FIGURA 4. TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO INDUCIDO Y SUS COMPONENTES.....	32
FIGURA 5. FLUJOS PRESENTES EN LA TORRE DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO DE FLUJO EN CONTRACORRIENTE.....	33
FIGURA 6. FLUJOS PRESENTES EN LA TORRE DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO DE FLUJO CRUZADO	34
FIGURA 7. FLUJOS PRESENTES EN LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO FORZADO	36
FIGURA 8. COMPONENTES DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO FORZADO CRUZADO	37
FIGURA 9. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL CON SIMULINK.....	45
FIGURA 10. DIAGRAMA REALIZADO CON EL SOFTWARE ASPEN PLUS	46
FIGURA 11. SELECCIÓN DEL MODELO DE PENG-ROBINSON EN EL SIMULADOR DWSIM.....	73
FIGURA 12. ESQUEMA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN EN EL PROGRAMA DWSIM	74
FIGURA 13. PROPIEDADES DEL AGUA A LA ENTRADA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	75
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DEL ARMAZÓN Y VENTILADOR DE LA TORRE	79
FIGURA 15. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA BOMBA EN EL SOFTWARE QCAD	81
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DEL EMPAQUE EN LA TORRE VISTA EN QCAD	83
FIGURA 17. REPRESENTACIÓN FINAL DE LA TORRE VISTA DESDE QCAD	84
FIGURA 18. CONDICIÓN DE TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA A LA SALIDA DE LA TORRE..	85
FIGURA 19. CANTIDAD DE CALOR PERDIDO POR EL AGUA EN EL PROCESO DE REFRIGERACIÓN.	86
FIGURA 20. PROPIEDADES DE ENTRADA DEL AIRE A LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN.....	87
FIGURA 21. CALOR SUMINISTRADO AL AIRE DURANTE EL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA.....	88
FIGURA 22. CONDICIONES DEL AIRE A LA SALIDA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	89
FIGURA 23. PLANO ACOTADO DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO EN QCAD.....	92

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO (AGUA Y AIRE)	70
---	-----------

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE HUMIDIFICACIÓN	71
--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. PLANO DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN REALIZADO EN QCAD	106
ANEXO 2. VISTA SUPERIOR DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	107
ANEXO 3. VISTA LATERAL DERECHA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	107
ANEXO 4. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN.....	108
ANEXO 5. TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO CONSTRUIDA POS- PROPUESTA EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	109
ANEXO 6. VISTA LATERAL DE LA TORRE DE HUMIDIFICACIÓN DE TIRO MECÁNICO FORZADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	110

INTRODUCCIÓN

Antes de la llegada de los softwares de diseño, los encargados de presentar los planos de equipos industriales o prototipos, realizaban todo el proceso manualmente, lo cual retrasaba el avance de proyectos y la producción, ya que no se abastecían los parámetros de funcionabilidad del equipo, de igual manera resultaba complejo el diseñar planos a mano. Ahora con los programas de diseño (CAD), todo resultó más sencillo y cómodo solo con el uso de un ordenador, obteniéndose con esto, mejor detalle y precisión, ahorro de tiempo y comodidad, siendo así que, se puede presentar y modificar planos o dibujos en dos y tres dimensiones.¹

Las herramientas tecnológicas facilitan y agilizan los procesos de diseño y colaboración generando ahorros en las empresas de infraestructura y construcción.² Es de vital interés conocer cuáles son los principales simuladores inclinados a los procesos químicos y, en especial, aquellos que se centren en la humidificación, para a partir de ahí, adoptar la mejor metodología a seguir en el desarrollo de la simulación elegida. Diversos softwares de simulación, como Aspen Plus, Aspen HYSYS o DWSIM, ofrecen a investigadores e ingenieros la posibilidad de modelizar, simular y diseñar sus procesos.³

Las ventajas de la simulación de procesos son, en primer lugar, reducir el tiempo de diseño de equipos industriales al permitir a los diseñadores probar rápidamente varias configuraciones de los mismos, también a mejorar los procesos actuales respondiendo a preguntas del tipo "qué pasaría si...", determinando las condiciones óptimas del proceso y ayudando a localizar las limitaciones del proceso. Los objetivos últimos de la simulación de procesos son acelerar la resolución de problemas, controlar el rendimiento en línea y en tiempo real.³

La torre de enfriamiento permitirá identificar de manera directa el proceso de enfriamiento evaporativo, utilizados en diferentes sistemas térmicos, lo que facilitará realizar balances energéticos, balances de masa y análisis de Transferencia de Calor y masa mediante la obtención de datos para su respectiva interpretación.⁴

En el presente trabajo se busca identificar las variables involucradas en el proceso en una torre de humidificación de tiro mecánico forzado, mediante la simulación del proceso en condiciones previamente establecidas así, como los aspectos a tener en cuenta para el diseño de la torre a escala de laboratorio.

Antes de la llegada de los softwares de diseño, los encargados de presentar los planos de equipos industriales o prototipos, realizaban todo el proceso manualmente, lo cual retrasaba el avance de proyectos y la producción, ya que no se abastecían los parámetros de funcionabilidad del equipo, de igual manera resultaba complejo el diseñar planos a mano. Ahora con los programas de diseño (CAD), todo resultó más sencillo y cómodo solo con el uso de un ordenador, obteniéndose con esto, mejor detalle y precisión, ahorro de tiempo y comodidad, siendo así que, se puede presentar y modificar planos o dibujos en dos y tres dimensiones.¹

Las herramientas tecnológicas facilitan y agilizan los procesos de diseño y colaboración generando ahorros en las empresas de infraestructura y construcción.² Es de vital interés conocer cuáles son los principales simuladores inclinados a los procesos químicos y, en especial, aquellos que se centren en la humidificación, para a partir de ahí, adoptar la mejor metodología a seguir en el desarrollo de la simulación elegida. Diversos softwares de simulación, como Aspen Plus, Aspen HYSYS o DWSIM, ofrecen a investigadores e ingenieros la posibilidad de modelizar, simular y diseñar sus procesos.³

Las ventajas de la simulación de procesos son, en primer lugar, reducir el tiempo de diseño de equipos industriales al permitir a los diseñadores probar rápidamente varias configuraciones de los mismos, también a mejorar los procesos actuales respondiendo a preguntas del tipo "qué pasaría si...", determinando las condiciones óptimas del proceso y ayudando a localizar las limitaciones del proceso. Los objetivos últimos de la simulación de procesos son acelerar la resolución de problemas, controlar el rendimiento en línea y en tiempo real.³

La torre de enfriamiento permitirá identificar de manera directa el proceso de enfriamiento evaporativo, utilizados en diferentes sistemas térmicos, lo que facilitará realizar balances energéticos, balances de masa y análisis de Transferencia de Calor y masa mediante la obtención de datos para su respectiva interpretación.⁴

En el presente trabajo se busca diseñar una torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el programa QCAD a través de la simulación del proceso de humidificación en el software DWSIM, lo cual permitirá identificar las variables involucradas en el proceso en una torre de humidificación de tiro mecánico forzado.⁵

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar una torre de humidificación de tiro mecánico forzado mediante el uso de los datos proporcionados de la simulación del proceso de humidificación en un software libre para determinar los parámetros involucrados en el equipo.

Objetivos Específicos

- Identificar las variables y parámetros de diseño que definen el comportamiento de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado.
- Simular en el software DWSIM el proceso realizado por una torre de humidificación de tiro mecánico forzado.
- Realizar los cálculos de ingeniería para el diseño de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado y su respectivo dimensionamiento.
- Realizar el plano de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el software libre QCAD.
- Realizar la propuesta de una futura construcción de una torre de humidificación de tiro mecánico de tiro forzado.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Humidificación en Torres de Humidificación

La humidificación en torres de humidificación hace referencia a la acción de introducir agua en el aire en una torre diseñada específicamente con este propósito. Estas torres son ampliamente empleadas en contextos industriales para regular y ajustar los niveles de humedad relativa del aire.⁶ El procedimiento de humidificación en estas torres generalmente implica la dispersión controlada o rociado de agua en el aire circundante, lo que resulta en un incremento de la humedad del aire. Esto puede aportar ventajas en diversas aplicaciones, como la refrigeración por evaporación, en sistemas de climatización o para mantener condiciones óptimas en procesos industriales.⁷

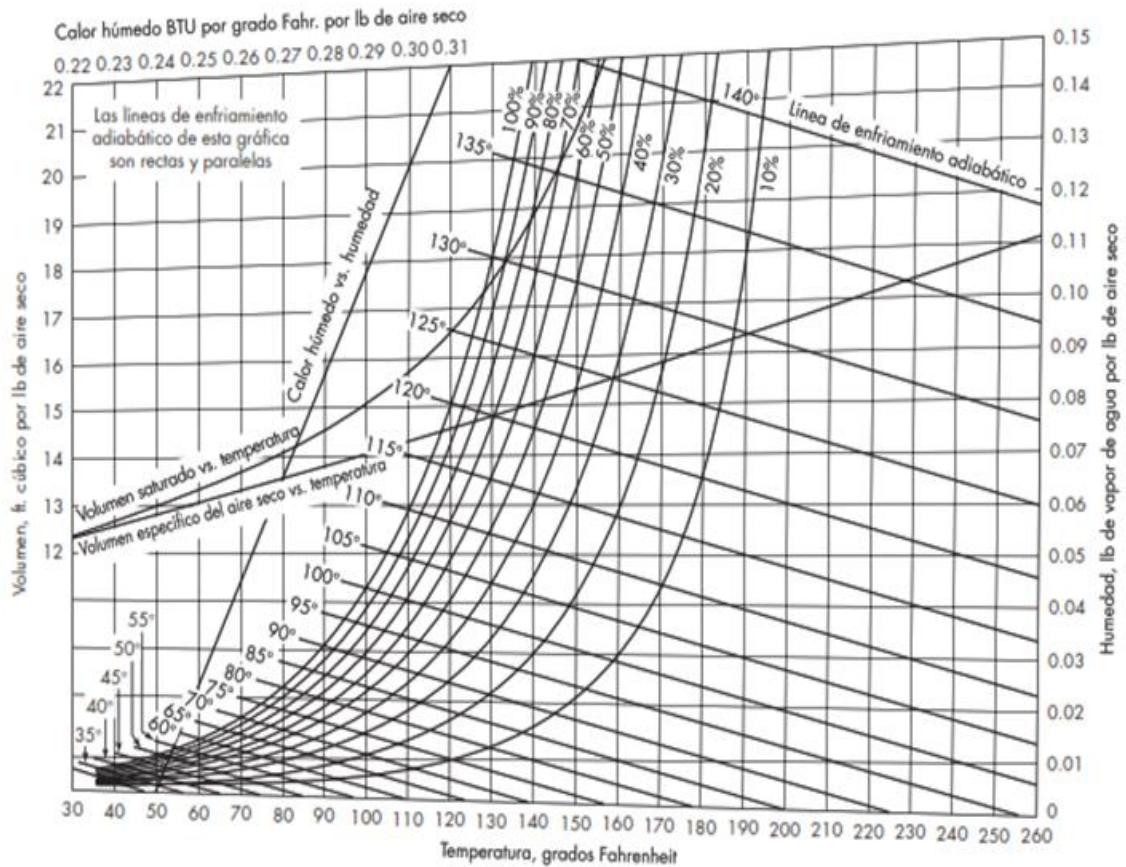
1.1.1 *Psicrometría*. Entender las características psicrométricas del aire se convierte en un elemento crucial para disminuir el gasto energético y minimizar las pérdidas de agua por evaporación. El proceso de evaporación en las torres de refrigeración está intrínsecamente vinculado a la carga y a las particularidades psicrométricas del aire que ingresa en la torre de refrigeración.⁸

Reducir la carga resultará en un mayor ahorro de energía y en una disminución de la velocidad de evaporación, lo que a su vez reducirá la necesidad de purgar agua del sistema. Esto se debe a que la cantidad de agua evaporada está directamente relacionada con la carga, y la cantidad de purga se correlaciona con la evaporación. La aplicación de las propiedades psicrométricas del aire en un sistema de enfriamiento con agua tiene el potencial de reducir el consumo de agua y energía.⁸

1.1.2 *Carta Psicrométrica*. Comprender las propiedades psicrométricas del aire puede ser un factor importante para reducir el consumo de energía y las pérdidas por evaporación de agua. La evaporación en las torres de refrigeración depende de la carga y de las propiedades psicrométricas del aire que entra en la torre de refrigeración.⁹

Reducir la carga se traduce en un mayor ahorro de energía y en la reducción de la velocidad de evaporación, lo que a su vez reduce la necesidad de eliminar agua del sistema. Esto ocurre porque la cantidad de agua que se evapora está vinculada directamente a la carga, y la purga está relacionada con la evaporación. Al aplicar las características psicrométricas del aire en un sistema de refrigeración basado en agua, existe el potencial de disminuir el uso de agua y energía.⁹ En la figura 1, se muestra la carta psicrométrica para una mezcla de aire – agua:

Figura 1. Carta psicrométrica de Aire – agua a 1 atm



Fuente:¹⁰

La base de la CP es la regla de la fase de Gibbs, que especifica que, para un sistema de aire húmedo con dos componentes y una fase, hay que especificar tres variables intensivas (grados de libertad) para fijar todas las propiedades del sistema. A una presión de una atmósfera, la CP, puede representar todas las propiedades intrínsecas del sistema.¹¹

1.1.3 Humedad Relativa. La humedad relativa (HR) hace mención a la proporción de vapor de agua real que presenta una masa de aire en relación a la cantidad de vapor de agua que el aire tendría en su estado de saturación a una determinada temperatura. En otros términos, la HR es un indicador de la proximidad del aire al alcanzar su estado de saturación, siendo expresada en porcentaje desde 0 hasta 100%, donde 0 indica una masa de aire seca, mientras que el 100% corresponde a una masa de aire saturada.¹²

La HR no es una medida absoluta del vapor de agua en el aire, ya que depende tanto del punto de rocío como de la temperatura.¹³

La humedad es crucial para la existencia. A menudo se describe como HR, que representa la proporción entre la humedad absoluta y la humedad máxima a una temperatura dada, lo que nos muestra cuánto vapor de agua se encuentra en el aire a esa temperatura. Como un elemento ambiental fundamental, desempeña un papel crucial en la calidad del aire.¹²

A continuación, en la ecuación 1, se muestra la relación para determinar la humedad relativa en base porcentual:

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

Donde:

H_R : Humedad relativa (%)

P_A : Presión parcial del vapor (Pa)

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

1.4.1 *Humedad Absoluta*. Es la masa de vapor de agua presente por unidad de volumen de gas. Si el gas está totalmente saturado de vapor de agua, se habla de humedad absoluta de saturación. Los gases se dilatan al calentarse, por lo que la HA disminuirá ligeramente al aumentar la temperatura.¹⁴

La humedad absoluta (HA) se puede derivar de la HR al calcular primero la presión de vapor de agua en condiciones de saturación, dependiendo de la temperatura, y posteriormente calcular la presión de vapor según la HR. Luego, es posible determinar la HA al considerar tanto la presión de vapor como la temperatura.¹³

La relación matemática para la determinación de la humedad absoluta se expone en la ecuación 2:

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

Donde:

H_A = Humedad absoluta (g.m⁻³)

P = Presión total (Pa)

H_R = Humedad relativa (%)

P_A = Presión parcial del vapor (Pa)

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

1.1.5 *Humedad Específica*. La humedad específica (HE) representa la cantidad de vapor de agua por unidad de masa de gas. La masa de aire y, por lo tanto, la HE, se mantienen constantes a medida que cambian la temperatura y la presión.¹⁴

1.1.6 *Temperatura del Bulbo Húmedo*. En Psicometría, se denomina temperatura de bulbo húmedo o temperatura de bulbo mojado, como también es común denominarla, a aquella que se registra mediante el uso de un termómetro, cuando éste se encuentra cubierto por una gasa saturada con agua. La medición de dicha temperatura se realiza haciendo pasar la corriente de aire de interés bajo el bulbo húmedo.¹⁵

Para calcular la temperatura de bulbo húmedo (TBH) se necesitan temperaturas de bulbo seco y humedad relativa fiables.¹⁶

1.1.7 *Temperatura de Bulbo Seco*. La temperatura de bulbo seco, también conocida como temperatura seca, representa la temperatura medida sin considerar las influencias atmosféricas que afectan la sensación térmica. En otras palabras, el bulbo seco es la temperatura real a la que se encuentra el aire y que los termómetros miden en condiciones de funcionamiento normales.¹⁶

1.1.8 *Punto de Rocío*. La temperatura de rocío es aquella temperatura a la que una masa de aire debe enfriarse de manera isobárica para alcanzar su punto de saturación; es decir, una medida del contenido de humedad del ambiente.¹⁶

Así es, el punto de rocío es la temperatura a la cual una cantidad de aire se satura después de enfriarse a una temperatura constante.

1.1.9 *Transferencia de Calor*. Es el proceso mediante el cual se transfiere energía desde las partículas con mayor energía de un sistema hacia aquellas con menor energía, lo que se produce debido a la interacción entre estas partículas y se manifiesta como un gradiente de temperatura entre ellas.¹⁷

Si hay un gradiente de temperatura en un material continuo, se produce un desplazamiento de sustancia sin que ocurra la transferencia de calor. En este proceso de conducción, ocurre a nivel molecular y se trata del transporte de la cantidad de movimiento de moléculas individuales a través de un sólido. Un ejemplo común de conducción se evidencia cuando el calor se mueve a través de sólidos opacos, como los ladrillos en las paredes de un horno o la pared de un tubo metálico.¹⁷

1.1.9.1 *Convección*. Es uno de los métodos o procesos de transferencia de calor en sistemas de fases binarias. En este proceso, el calor se transfiere entre una sustancia líquida y una fase gaseosa cercana que están en movimiento. La convección implica la combinación de los efectos de conducción de calor y el movimiento del fluido.¹⁷

La convección es un fenómeno macroscópico, perceptible a simple vista, que ocurre cuando fuerzas capaces de mantener el movimiento actúan sobre partículas o corrientes de un fluido para superar las fuerzas de fricción. La convección tiene una estrecha relación con la mecánica de fluidos. Desde una perspectiva termodinámica, la convección no se considera como una transferencia de calor, sino como una densidad de flujo de entalpía.¹⁷

En un flujo de fluido bajo la influencia de la gravedad, donde existen zonas con variaciones en la densidad, las áreas más densas, que suelen corresponder a temperaturas más bajas, tienden a ubicarse en la parte superior. Estas áreas se desplazan hacia las regiones de menor densidad que se encuentran en la parte inferior, generalmente más cálidas, desplazando el fluido que se encuentra en estas áreas.

Por ejemplo, en un radiador, el aire frío, al ser más denso que el aire caliente, desciende hacia las partes más bajas, desplazando el aire caliente que asciende hacia las áreas superiores. Las partículas con mayor energía térmica tienden a dirigirse hacia las zonas con menor temperatura, y viceversa. Este proceso de movimiento se conoce como convección.¹⁷

1.1.9.2 *Radiación*. “La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electro-magnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.”¹⁷

La radiación es el término que se utiliza para describir la transferencia de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.¹⁷

Cuando la radiación se propaga a través del vacío, no se convierte en calor ni se desvía de su curso. Sin embargo, si encuentra materia en su camino, puede ser transmitida, reflejada o absorbida. Solo la energía absorbida se convierte cuantitativamente en calor. Por ejemplo, una superficie negra o mate absorbe prácticamente toda la radiación que recibe, transformando la energía absorbida en calor de manera cuantitativa.¹⁷

1.1.10 *Transferencia de Masa*. Dentro del campo de la Ingeniería Química, en el área de Transferencia de Masa, se destaca una operación unitaria fundamental.

Esta operación se enfoca en la modificación de la composición de soluciones y mezclas, empleando métodos o técnicas que no necesariamente involucran reacciones químicas.¹⁷

Las separaciones de las mezclas se pueden dar de una manera totalmente mecánica, como cuando se filtra un sólido a partir de la suspensión de cierto líquido “x” o cuando un sólido es cribado y se clasifica de acuerdo a su tamaño de partícula o también separando partículas basándose en su densidad.

En resumen, si una operación altera la composición de soluciones, se clasifica como una operación de Transferencia de Masa.¹⁷

Las operaciones de Transferencia de Masa se distinguen por su capacidad de transferir un compuesto de una fase a otra a nivel molecular. Por ejemplo, en un proceso de evaporación, como el agua que se evapora desde una piscina o un depósito artificial y se integra a una corriente de aire que se desplaza sobre la superficie del agua. En este proceso, las moléculas de vapor de agua se difunden a través de las moléculas de aire en la superficie del agua, y luego son transportadas por la corriente de aire.¹⁷

En el contexto de la Transferencia de Masa, el fenómeno de interés no está vinculado principalmente al movimiento generado por diferencias de presión, como ocurre al bombear líquido a través de una tubería. En cambio, los problemas abordados en la Transferencia de Masa se centran en las diferencias de concentración, es decir, gradientes. En estos casos, la sustancia que se difunde se mueve desde una zona de alta concentración a una de menor concentración, lo que da lugar al fenómeno en cuestión.¹⁷

1.1.11 *Enfriamiento por Evaporación*. Los procesos de enfriamiento son procedimientos sencillos y algunos de los más antiguos de los que se tiene conocimiento. Para enfriar el agua, el requisito fundamental es exponer su superficie al aire. Algunos de estos procesos pueden ser bastante lentos, como el enfriamiento gradual del agua en la superficie de un estanque. Por otro lado, hay métodos más rápidos, como cuando se rocía agua al aire, lo que produce un enfriamiento efectivo en menor tiempo.¹⁸ Estos procesos mencionados involucran la exposición de la superficie del agua al aire, y su eficiencia varía dependiendo de las condiciones específicas de cada proceso.¹⁹

En la industria, el propósito principal del agua es eliminar el calor, condensando y enfriando diversos productos. Después de su uso en esta función, el agua suele estar caliente, y se puede optar por descargarla o enfriarla para luego recircularla.¹⁹

La transferencia de calor latente se produce debido a un cambio de estado, específicamente de líquido a vapor, en una pequeña parte del agua. Además, se presenta una transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire.¹⁹

Para evaporar 1 kg de agua se requieren 600 calorías o 2,5 Joules. Estos valores son suficientes para enfriar 100 kg de agua a 6 °C. Esto implica que, por cada 6 °C de efecto refrigerante, se pierde aproximadamente el 1% del agua debido a la evaporación. Además, existe una pérdida adicional relacionada con el rociado de agua, que generalmente no supera el 0,2% en las torres de enfriamiento de tiro natural o mecánico, siempre y cuando estén bien diseñadas.¹⁹

1.2 Torres de Humidificación

En el contexto industrial, las torres de humidificación o de refrigeración desempeñan un papel fundamental como operaciones unitarias para la Transferencia de Calor. Un aspecto crítico para el correcto funcionamiento de una torre de refrigeración es la entrada de aire en su interior, ya que es aquí donde ocurre la Transferencia de Calor del agua al aire. La Transferencia de Calor latente es el resultado de la vaporización de una pequeña parte del agua, mientras que la Transferencia de Calor sensible se origina debido a la diferencia entre la temperatura del agua y la del aire.²⁰

El proceso de enfriamiento principal en una torre de refrigeración se basa en la evaporación. Durante este proceso, se lleva a cabo una Transferencia de Masa del agua en estado líquido al aire en estado gaseoso, lo que conlleva a la reducción de la temperatura del agua que fluye a través de la torre de enfriamiento.

Esta transformación tiene lugar cuando el agua caliente cae desde la parte superior de la torre y desciende lentamente en contracorriente con una corriente de aire a temperatura ambiente. La evaporación del agua representa aproximadamente el 80% del enfriamiento total, mientras que el 20% restante se debe a la diferencia de temperatura entre el aire y el agua.²⁰

Las torres de humidificación son dispositivos utilizados para disipar el calor de un fluido particular, que normalmente es agua, utilizando otro fluido a menor temperatura, generalmente aire. El agua que se debe enfriar se introduce en la torre y se distribuye a lo largo de la superficie de Transferencia de Calor.

Por otro lado, el aire entra en la torre de forma natural o a través de algún dispositivo. El proceso de enfriamiento del agua se produce a través de la evaporación que resulta del contacto entre el aire y el agua.²¹

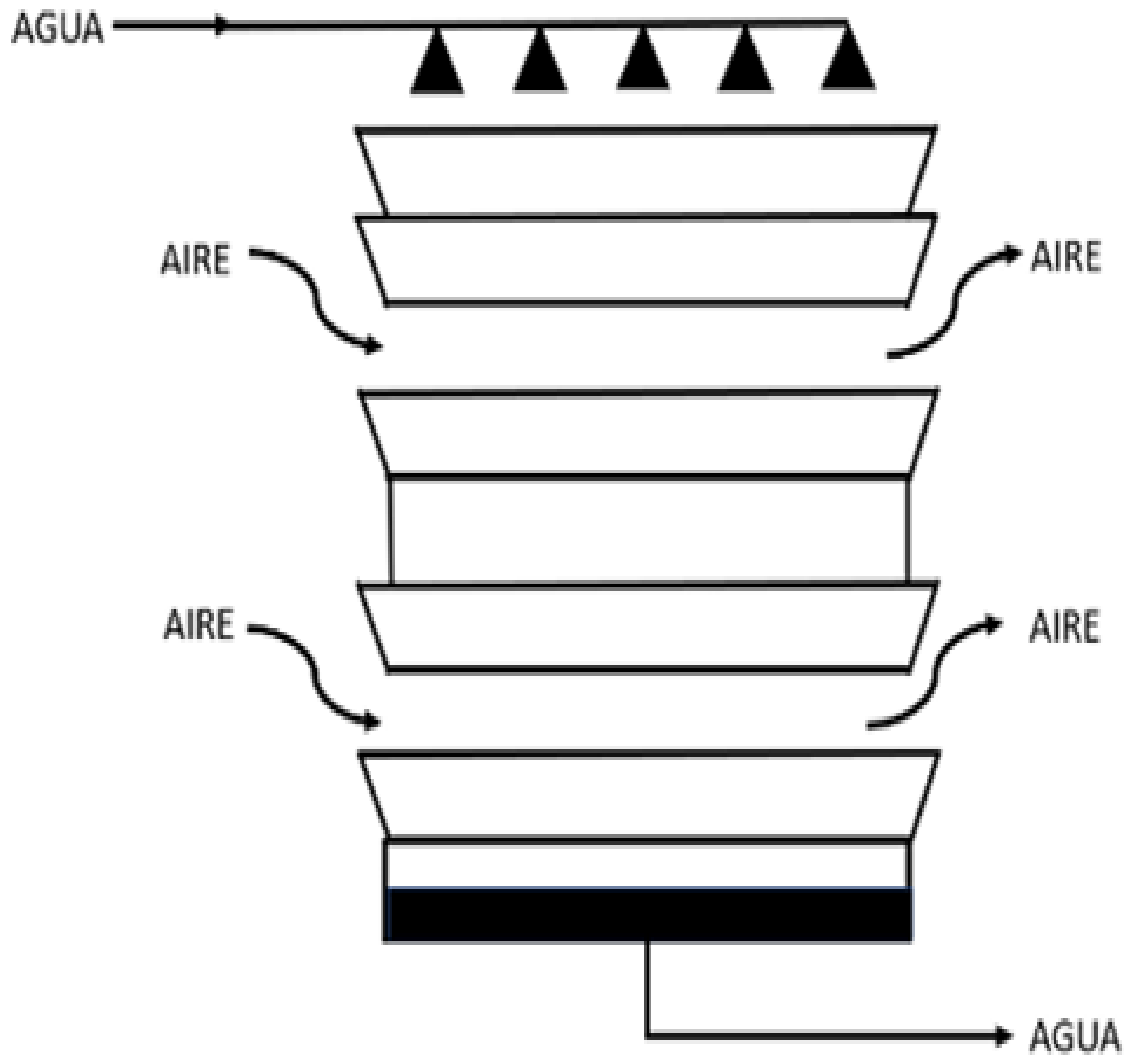
Una de las principales ventajas que presentan las torres de humidificación sobre los intercambiadores de calor habituales es la manipulación de grandes cantidades de agua de una planta completa, mientras que los intercambiadores de calor comunes se suelen utilizar para tratar el agua de equipos simples.²¹

1.2.1 Torres de Entrada Natural de Aire

Las Torres de Entrada Natural de Aire, también llamadas ENA por sus siglas en inglés ("Natural Air Inlet Towers"), son construcciones diseñadas con el propósito de promover la ventilación y la entrada de aire fresco en edificios de manera natural. Estas torres aprovechan las corrientes de aire y las diferencias de presión para estimular la circulación del aire en el interior de los edificios. Además, a menudo se diseñan siguiendo principios de sostenibilidad y eficiencia energética.²²

1.2.1.1 *Torres de Humidificación Atmosféricas.* El flujo de aire necesario en las Torres de Entrada Natural de Aire se genera gracias a la diferencia de densidades entre el aire más frío del exterior y el aire más húmedo en el interior de la torre. Para lograr esto, se utilizan chimeneas de gran altura que generan el flujo de aire deseado. Dado el tamaño considerable de estas torres, se requieren caudales de agua sustanciales, superiores a 200,000 galones por minuto (gpm). Esto las convierte en una opción ampliamente empleada en las centrales térmicas debido a su capacidad significativa de enfriamiento.¹⁷ En la figura 2 se puede apreciar la torre de humidificación atmosférica y sus componentes.

Figura 2. Sistema de la torre de humidificación del tipo atmosférica



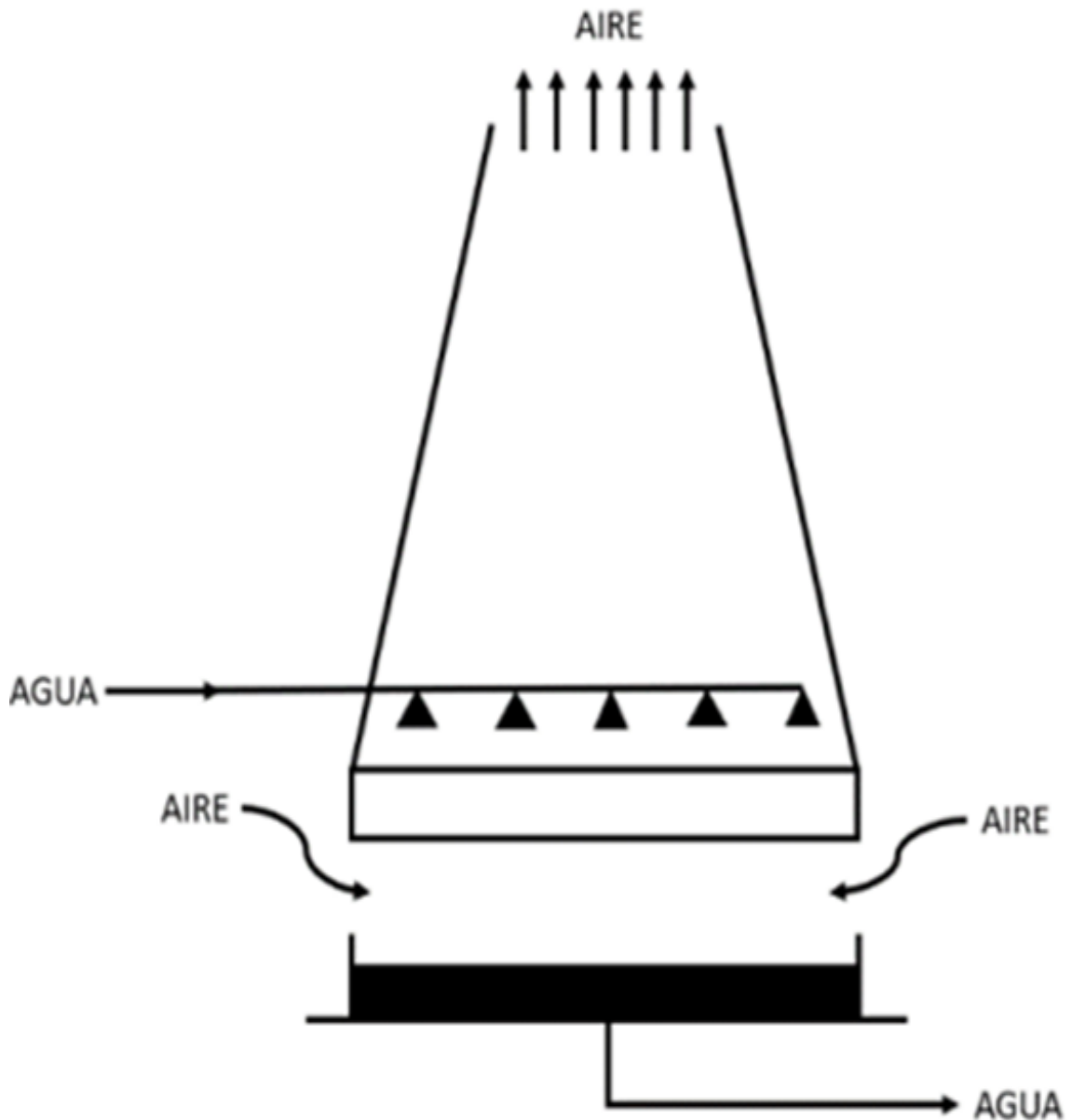
Fuente:⁴

1.2.1.2 *Tiro Natural*. Las torres de enfriamiento de tiro natural (TETN) tienen una aplicación extendida en centrales térmicas y nucleares para enfriar el agua que ingresa al condensador. Según el proceso de enfriamiento utilizado, se pueden categorizar en dos tipos: las torres de refrigeración húmedas de tiro natural (TEHTN) y las torres de refrigeración secas de tiro natural (TESTN).²³

A pesar de la variedad de diseños y sistemas de transferencia de calor, el principio básico se mantiene constante. La diferencia en densidad entre el aire dentro y fuera de la torre de refrigeración genera un flujo que se rige por el "efecto de flotación". El aire caliente contenido en la torre se eleva, al mismo tiempo que el aire frío del entorno es atraído hacia el interior de la torre.²⁴

El efecto de tiro natural se utiliza para disipar el calor del fluido de trabajo caliente hacia la atmósfera. Aunque estas torres son comunes en las centrales eléctricas, rara vez se aplican en plantas industriales debido a la alta inversión inicial que requieren.²⁵ En la figura 3 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro natural y sus componentes.

Figura 3. Flujos presentes en la torre de humidificación de tiro natural



Fuente:⁴

Debido a que las torres de refrigeración tienen características como un alto rendimiento del intercambio de calor, un tamaño reducido y un menor consumo de energía, su uso está muy extendido.²⁶

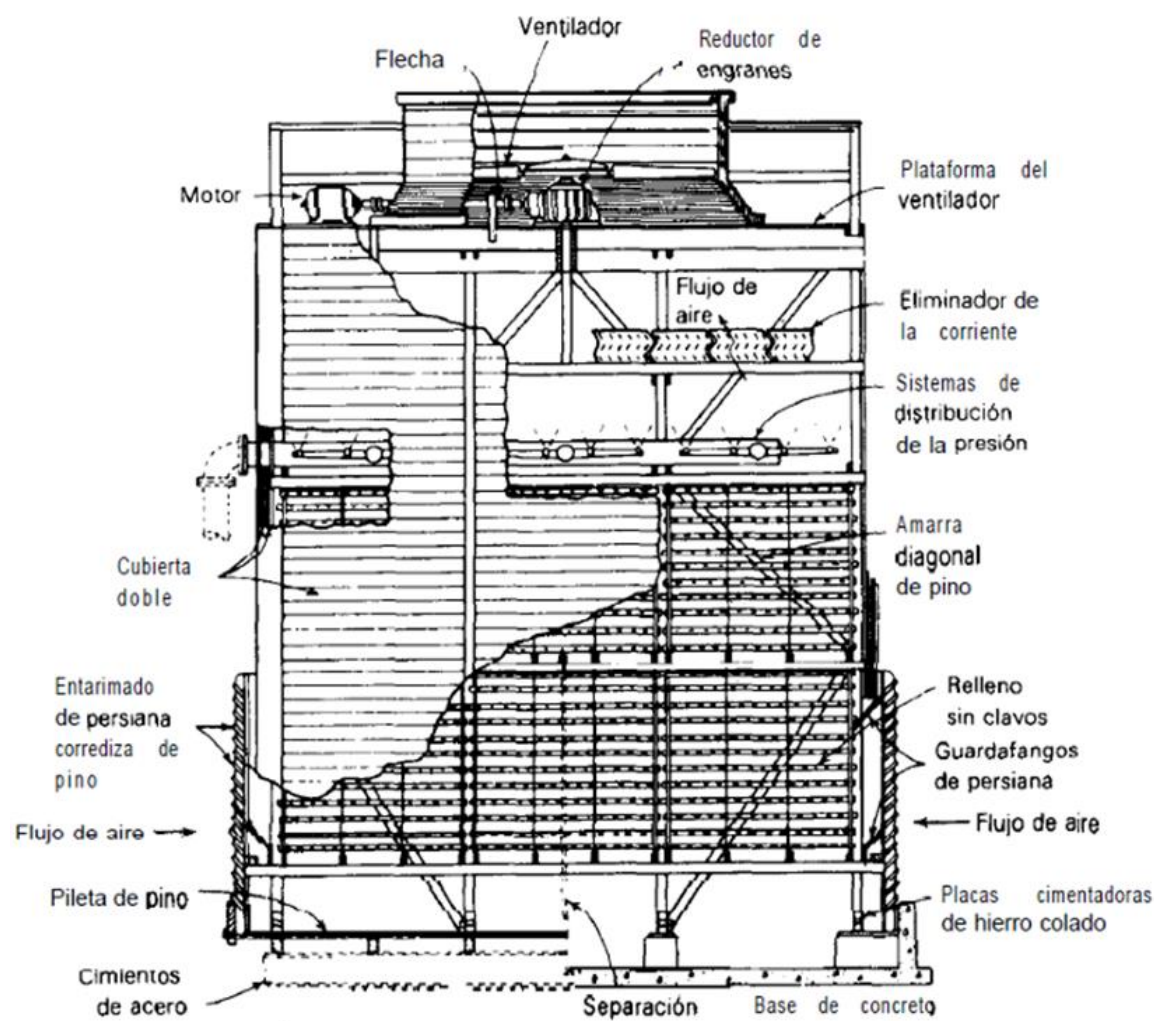
1.2.1.3 *Torres de Tiro Mecánico*. Se habla de torres compactas que poseen una sección transversal y altura de bombeo significativamente menores en comparación con las torres de tiro natural. En este tipo de torres, es posible controlar con precisión la temperatura del agua de salida, permitiendo alcanzar valores de acercamiento muy reducidos, a veces tan bajos como 1 o 2 grados Celsius, aunque en la mayoría de los casos se sitúan en torno a 3 o 4 grados Celsius en la práctica.¹⁷

Cuando el ventilador se coloca en la entrada de aire, se trata de un tiro forzado. Por otro lado, si el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se denomina tiro inducido.¹⁷

1.2.1.4 *Torres de Tiro Inducido*. Las torres de tiro inducido pueden adoptar dos configuraciones: flujo a contracorriente o flujo cruzado. En el caso del flujo a contracorriente, el aire se desplaza verticalmente a través del relleno, de modo que los flujos de agua y aire transcurren en la misma dirección, pero en sentido opuesto.

La principal ventaja de estas torres radica en que el agua más fría entra en contacto con el aire más seco, lo que se traduce en un rendimiento óptimo. Además, permiten que el aire ingrese a través de una o más paredes de la torre, lo que reduce significativamente la altura de la entrada de aire.¹⁷ En la figura 4 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro inducido y sus componentes.

Figura 4. Torre de humidificación de tiro inducido y sus componentes



Fuente:¹⁷

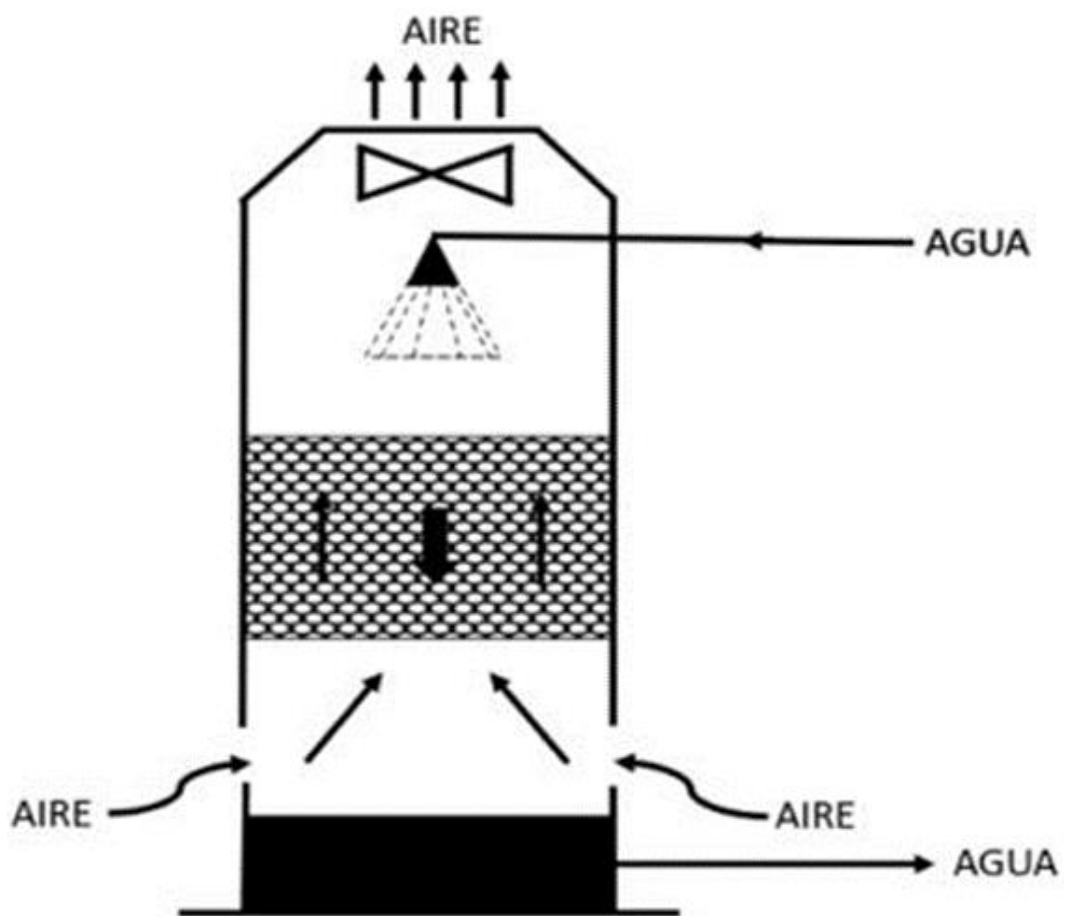
Otro aspecto a considerar es que la alta velocidad con la que el aire penetra aumenta el riesgo de arrastrar partículas de suciedad y objetos extraños hacia el interior de la torre. La resistencia del aire que se desplaza hacia arriba y se opone al flujo descendente del agua resulta en una notable pérdida de presión estática y en un mayor requerimiento de potencia del ventilador en comparación con las torres de flujo cruzado

1.2.1.5 *Torre de Tiro Mecánico Inducido de Flujo en Contracorriente.* En este tipo de torre, el aire se introduce por la base de la estructura, lo que da lugar a un flujo a contracorriente, ya que asciende hasta que entra en contacto con el agua, que se administra desde la parte superior de la torre. La distribución del agua se logra mediante celdas que forman una especie de red en la parte superior de la torre.

Estas celdas están compuestas por múltiples orificios distribuidores que aseguran una densidad de lluvia uniforme a través del relleno de contacto.¹⁷

La ventaja clave de esta torre radica en la interacción entre el agua y el aire. Cuando el agua más fría se encuentra con el aire más seco y el agua más caliente entra en contacto con el aire más húmedo, se logra un rendimiento óptimo.¹⁷ En la figura 5 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro inducido de flujo en contracorriente y sus componentes.

Figura 5. Flujos presentes en la torre de tiro mecánico inducido de flujo en contracorriente



Fuente:⁴

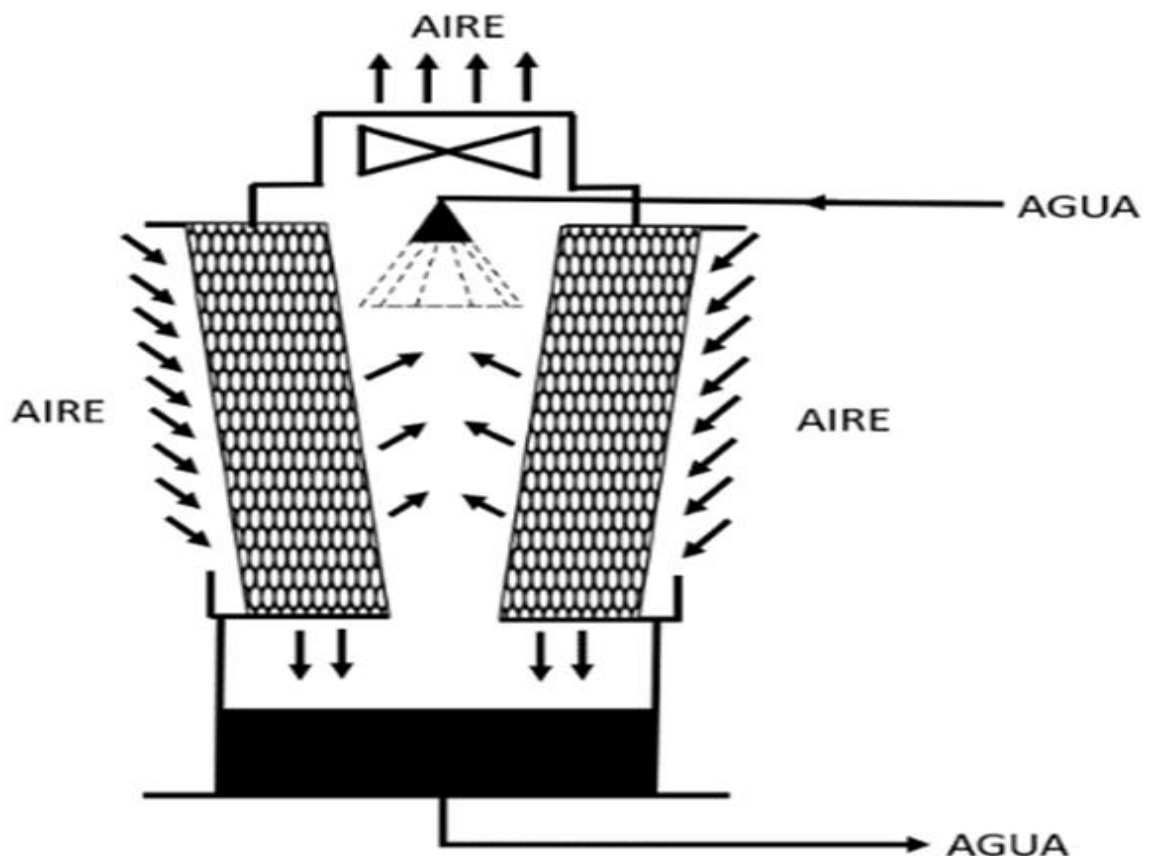
Como desventajas se conocen las siguientes:

- La zona restringida en la base y las elevadas velocidades del aire en la entrada resultan en un aumento de la potencia requerida para el ventilador.

- La resistencia generada por el flujo de aire en contra del flujo de agua conlleva a una mayor pérdida de carga, lo que, a su vez, aumenta la potencia necesaria del ventilador.
- La velocidad del aire a través del relleno no es uniforme, con una menor circulación de aire en las paredes.
- El sistema de distribución del agua no es accesible para el mantenimiento durante la operación.¹⁷

1.2.1.6 *Torre de Tiro Mecánico Inducido de Flujo Cruzado*. En este diseño de torre, el aire es introducido de manera horizontal a lo largo de toda la altura de la torre, mientras que el agua fluye verticalmente a través del relleno de contacto. La extracción del aire se lleva a cabo mediante ventiladores ubicados en la parte superior de la torre.¹⁷ En la figura 6 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro inducido de flujo cruzado y sus componentes.

Figura 6. Flujos presentes en la torre de tiro mecánico inducido de flujo cruzado



Fuente:⁴

Sus ventajas principales son:

- Una pérdida de carga de aire reducida, lo que se traduce en una menor demanda de potencia de los ventiladores.
- Dispone de arreglos sencillos para la distribución del agua.
- Facilita el acceso al sistema de distribución durante la operación de la torre.
- La altura del relleno de contacto es prácticamente igual a la altura total de la torre.

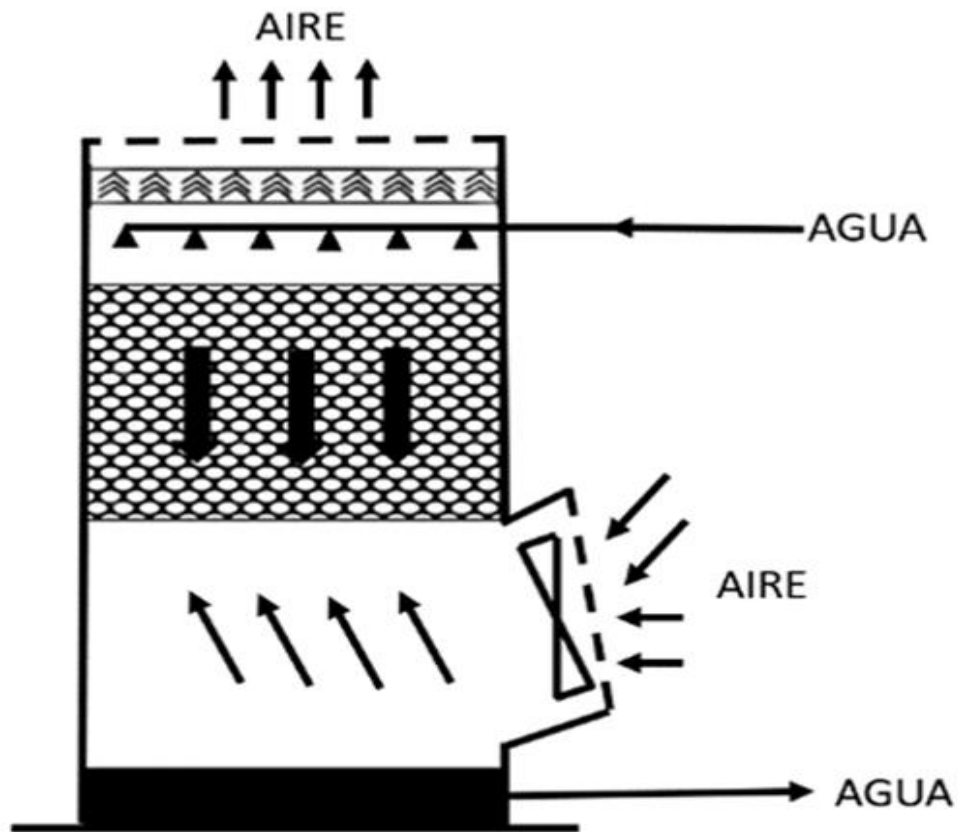
Como desventajas se presentan las siguientes:

- Existe una mayor propensión a la formación de algas en los sistemas de distribución, debido a su exposición a la atmósfera.
- Este diseño requiere ajustes considerables debido a la distribución de temperaturas a lo largo de la torre, especialmente en casos con amplios "rangos" y aproximaciones reducidas. Por lo tanto, se necesitan áreas más extensas y una potencia de ventilador menor en comparación con las torres de flujo a contracorriente.¹⁷

1.2.1.7 *Tiro Forzado*. En las torres de tiro forzado, el aire se expulsa a una velocidad más baja desde la parte superior de la torre. En la mayoría de los casos, estas torres son de tipo contracorriente.¹⁷

En la figura 7 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro forzado a contracorriente de y sus componentes.

Figura 7. Flujos presentes en la torre de humidificación de tiro forzado



Fuente:⁴

Estas torres de tiro forzado ofrecen una mayor eficiencia en comparación con las torres de tiro inducido. Esto se debe a que la presión dinámica se convierte en presión estática, lo que realiza un trabajo útil. El aire en movimiento es más frío y denso que en el caso de las torres de tiro inducido. Además, esto significa que el equipo mecánico suele tener una vida útil más prolongada, ya que el ventilador opera con aire frío y no saturado, que es menos corrosivo que el aire caliente y saturado que se encuentra en la salida. Como desventaja, es importante mencionar la posibilidad de recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, generada por el ventilador en la entrada de aire.²⁷

El aire es succionado por un ventilador ubicado en la parte inferior de la torre de tiro forzado y se expulsa por la parte superior de la misma. El aire que rodea la torre está más frío, lo que se traduce en una mayor densidad en comparación con el aire caliente presente en el interior de la torre.

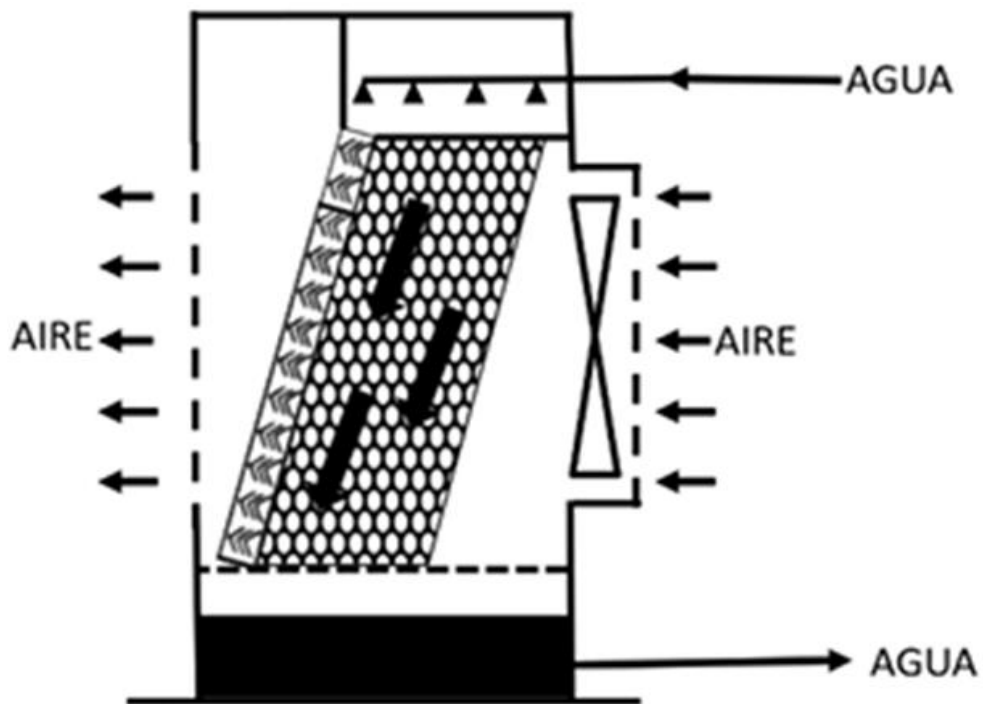
Este proceso resulta en una vida útil prolongada para el ventilador y sus componentes en comparación con las torres de tiro inducido. Esto se debe a que el ventilador aspira aire frío que no está saturado ni es corrosivo, a diferencia del aire caliente y saturado que sale de la torre.

Se clasifican en:

- Tiro forzado en contracorriente
- Tiro forzado en cruzado

En la figura 8 se puede apreciar la torre de humidificación de tiro forzado cruzado y sus componentes.

Figura 8. Componentes de la torre de humidificación de tiro forzado cruzado



Fuente:⁴

1.2.1.8 *Torre de Platos*. Las torres de platos son altamente efectivas, pero tienen desventajas relacionadas con su costo y una caída de presión relativamente elevada, a menos que se den ciertas circunstancias especiales. Por lo tanto, a pesar de su eficacia, no son comúnmente utilizadas en operaciones de humidificación, deshumidificación o enfriamiento de gases.¹⁷

1.3 Termodinámica de la Torre de Humidificación

1.3.1 *Balance de Masa*. Los balances de masa pueden clasificarse como estático o no estático. El balance de masa en estado transitorio o no estacionario se utiliza en procesos continuos y semicontinuos; los procesos continuos también pueden estar en este estado, pero los semicontinuos son puramente no estacionarios; este balance de materiales se aplica para resolver problemas en el sector industrial, entre ellos la llegada de un equipo a un proceso, la actualización de un parámetro y la disminución del tiempo de cálculo.²⁸

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 a la torre de enfriamiento (kg.min-1).

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

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

X_1 : Humedad absoluta del aire húmedo a condiciones de entrada de la torre de enfriamiento (g.m-3).

X_2 : Humedad absoluta del aire húmedo a condiciones de salida de la torre de enfriamiento (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 a la torre de enfriamiento (kg.min-1).

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

1.3.2 *Balance de Energía*. Un balance energético es una consideración de la entrada, salida y consumo o generación de energía en un proceso o etapa.²⁹ Al establecer un balance energético, todas las fuentes de energía térmica se sitúan en el lado de la entrada, y todos los elementos de utilización del calor en el lado de la salida.³⁰

En la ecuación 5 se manifiesta matemáticamente 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 a la torre de enfriamiento (kg.min-1).

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

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

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

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

1.3.3 *Rendimiento*. El rendimiento de la torre de humidificación viene dado por la relación entre el acercamiento de la torre, el cual es la diferencia la temperatura entre el agua de salida y la temperatura húmeda del aire, y el rango, que no es más que la diferencia entre la temperatura del agua de entrada y la temperatura del agua refrigerada de salida.²⁷

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*. Muchos ingenieros utilizan AutoCAD por defecto para crear anteproyectos, dibujos, planos, estructuras y otros elementos que deben ajustarse a determinadas especificaciones solicitadas por el cliente.³¹

Además, AutoCAD es una herramienta polifacética que permite desarrollar proyectos de ingeniería, industriales, mecánicos, arquitectónicos y mecatrónicos. AutoCAD es uno de los programas de diseño digital líderes del mercado porque permite a los usuarios ver los diseños tanto en 2D como en 3D.³¹ Posee las siguientes características:

- Permite la creación de diseños bidimensionales y tridimensionales que posibilitan la visualización global.

- Acepta la creación de piezas mediante la estrategia de dibujo técnico global.
- Se puede crear cualquier tipo de diseño parametrizado, incluyendo planos, cianotipos, dibujos, estructuras y piezas componentes.
- Trabajar en proyectos urbanísticos, civiles, mecánicos, industriales y de muchos otros tipos es posible con AutoCAD.
- Tiene una interfaz fácil de usar con funciones específicas para que un profesional pueda familiarizarse rápidamente con él y entender cómo utilizarlo.³¹

1.4.2 QCAD. Es una aplicación de código abierto y gratuita para el dibujo asistido por ordenador (CAD) en dos dimensiones (2D). Con QCAD, es posible crear dibujos técnicos, como planos de edificios, diseños de interiores, piezas mecánicas, así como esquemas y diagramas. QCAD es compatible con sistemas operativos como Windows, macOS y Linux. El código fuente de QCAD se distribuye bajo la Licencia Pública General de GNU versión 3 (GPLv3), que es una licencia de código abierto ampliamente reconocida.³²

Este es un programa gratuito que está orientado al dibujo gráfico por ordenador. Es uno de los programas con mayor proyección, ya que es sencillo y tiene similitud con otros programas que son comercializados y tienen mayor potencia. QCAD es perteneciente al grupo de programas de dibujo vectorial, el programa permite dibujar objetos que se basen en ecuaciones matemáticas, de cierto modo que se pueden manipular las imágenes (distorsionar, reducir, ampliar) todo esto sin perder calidad.³³ Posee las siguientes ventajas:

- Posee herramientas intuitivas.
- Las funciones son fáciles de usar y comprender, sobre todo las de impresión y diseño.
- Fácil configuración.
- Se pueden crear diseños en 2D tanto sencillos como complejos.
- Posibilidad de importar y modificar archivos CAD.
- Disponible en varios idiomas.
- Utiliza pocos recursos y requisitos.³⁴

Posee las siguientes desventajas:

- Es incompatible con los dibujos en 3D.³⁴

1.4.3 *SolidWorks*. Es un paquete profesional para el diseño 3D de productos industriales y la producción de documentación. El núcleo del programa es Parasolid, generalmente reconocido como el más cómodo para el diseño 3D, por lo que también se utiliza en algunos sistemas CAD pesados.³⁵

Es posible adquirir un módulo de cálculo con la posibilidad de optimizar los productos examinados. El desarrollador también ofrece un módulo de creación de programas de control para máquinas NC y otras herramientas adicionales.³⁵

Las principales ventajas de este programa son:

- La principal ventaja con respecto a otros programas CAD es una interfaz intuitiva, que hace que este CAD sea el más fácil de usar.
- Abundancia de complementos para resolver tareas muy especializadas.
- Existe una amplia gama de herramientas para el diseño de productos de formas diferentes y complejas, así como un módulo avanzado para trabajar con superficies.³⁵

Las principales desventajas de este programa son:

- Ausencia de bibliotecas incorporadas GOST.
- Tiene elevados requisitos de rendimiento informático.³⁵

1.4.4 *Autodesk Inventor*. Es un software que permite al usuario crear productos excelentes con soluciones de ingeniería de nivel profesional. Incluye herramientas como la simulación, el diseño de sistemas enrutados y la creación de herramientas para cualquier producto avanzado.³⁶

Las principales ventajas de este programa son:

- Posee herramientas de colaboración integradas.
- Se pueden crear productos personalizados y procesos automatizados.

1.4.5 *SketchUp*. Sketchup es una herramienta ampliamente utilizada por arquitectos, ingenieros y diseñadores para la visualización de proyectos antes de su implementación. Con Sketchup, es posible modelar una variedad de elementos, incluyendo espacios, ecosistemas, paisajes, mobiliario, entornos urbanos, proyectos de arquitectura, videojuegos y sistemas de información geográfica (GIS), entre otros. Además, Sketchup ofrece la capacidad de realizar impresiones en tercera dimensión, lo que amplía sus capacidades de diseño y representación.³⁷

Sketchup es un programa o herramienta de diseño con orientación directa a los procesos de diseño. Aporta y ayuda a los diseñadores con la concepción visual en el ordenador. Todo esto con la concepción más clara, con más detalles, el modelo resultante al final se puede pasar a otro software de renderizado para que de esta manera se realice el renderizado final.³⁷

Con ello, los diseñadores pueden evitar el contacto y reducir la manipulación mecánica y controlar la precisión de los resultados del diseño trabajado. Sketchup se puede utilizar de una manera sencilla y fácil que resulta cómodo aprender para los profesores y estudiantes universitarios, para esto no se necesitará demasiado tiempo de estudio.³⁷

Este programa no se limita al diseño de bocetos, sino que también se pueden realizar gráficos precisos y se dispone de una cómoda función push-pull, con sketchup los diseñadores puede producir geometría 3D mediante un gráfico, en lugar de realizar complejos modelados tridimensionales. Sketchup combina la gracia del lápiz y la naturalidad de los gráficos, y donde se puede crear, mostrar y editar modelos tridimensionales rápidamente.³⁷

Al mismo tiempo puede guiar en CAD y archivo de imagen, se puede guiar la imagen de dos dimensiones y modelo tridimensional, combinar con Revit, AutoCAD, 3DMAX, PIRANESI y algún otro programa, guía de inmediatamente dentro y fuera de DWG, DXF, JPG, 3DS archivo de formato, lograr una combinación perfecta entre el diseño del esquema y el efecto de imagen y construcción de imagen de gráficos, proporcionar plugin con AutCAD, ARCHICAD y varias herramientas de diseño. Además, puede lograr entrelazar sin problemas con otros lightScape, guiar los modelos en sketchup en 3Ds Max, corregir el material y el modelo y una nueva iluminación. así que se puede realizar la construcción con una alta calidad de una manera fácil y sencilla.³⁸

Sketchup es un programa que está guiado al proceso de diseño para así resolver el problema de la expresión del diseño. Este programa es intuitivo en tres dimensiones. Puede producir dibujos de construcción en sección y mostrar diferentes efectos pintados a mano, se lo puede utilizar para diseño industrial, arquitectura, planificación, etc.³⁹

SketchUp tiene una versión libre o gratuita con fines de educación, para que no tengamos que pagar y podamos utilizarlo legalmente, en nuestra preparación académica.⁴⁰

Mediante la aplicación de SketchUp, los estudiantes pueden tener una mejor comprensión de la intención de diseño y leer la construcción gráfica rápidamente por el estudio de modelado simple y la construcción del cuerpo de ingeniería compleja.³⁸

Las principales ventajas de este programa se tienen:

- Es un programa sencillo y versátil.
- Ofrece la capacidad de personalizar estilos para adaptarse a las necesidades del proyecto.
- Es fácil de aprender y utilizar, especialmente para estudiantes.
- Ofrece precisión en las medidas, asegurando la exactitud de los diseños.
- Permite la importación de archivos DWG de CAD y la exportación a DWG, lo que es muy ventajoso.
- Facilita la geolocalización de proyectos a través de Google Earth.
- Es un programa ligero que no sobrecarga el ordenador.
- Ofrece licencias especiales para estudiantes a precios reducidos.
- Proporciona 10 GB de almacenamiento en la nube.
- Permite la visualización de proyectos en dispositivos móviles.
- Ofrece la capacidad de estudiar las sombras en tiempo real.
- Es compatible con diversos motores de renderizado, como Lumion, Keyshot, Twinmotion, Thea Render, Enscape y V-ray.
- Su amplia adopción a nivel mundial es un punto a favor en el ámbito laboral.
- Ofrece una amplia gama de posibilidades y aplicaciones sin necesidad de utilizar otros programas.
- Permite una creación de diseños más rápida en comparación con software más complejos.
- Ofrece extensiones y bibliotecas para la descarga de nuevos componentes.
- Permite la creación de renders realistas.
- Facilita la incorporación de iluminación artificial y natural.
- Es compatible con sistemas operativos Mac y Windows.

- Permite la inclusión de texturas personalizadas además de las proporcionadas por SketchUp.
- Ofrece una variedad de estilos para presentar proyectos de manera dinámica y atractiva.⁴¹

Las principales ventajas de este programa se tienen:

- La capacidad de manejar geometría depende del plan descargado, lo que puede restringir el trabajo en proyectos más grandes.
- Su código de licencia no es de código abierto.
- Para crear formas orgánicas, es necesario descargar complementos adicionales en el ordenador.
- La fluidez del programa puede verse afectada cuando se trabaja con archivos que contienen muchos objetos.
- Los tiempos de renderizado pueden ser prolongados y dependerán de la configuración aplicada.
- Las versiones actualizadas de SketchUp para estudiantes solo son compatibles con Mac OS X y Windows 10.⁴¹

1.5 Softwares de Simulación

Los simuladores de procesos resuelven ecuaciones matemáticas no sólo para caracterizar reactores, columnas de destilación, intercambiadores de calor, bombas, compresores y otras operaciones unitarias, sino también para diseñar y optimizar procesos.⁴² Además, ofrecen a los ingenieros una herramienta para estimar los costes de la planta, tanto los gastos de explotación como los gastos de capital. Los usuarios introducen la presión de funcionamiento, la temperatura, los caudales, la composición y los paquetes termodinámicos, y el programa calcula los balances de masa y energía de cada flujo y módulo.⁴³

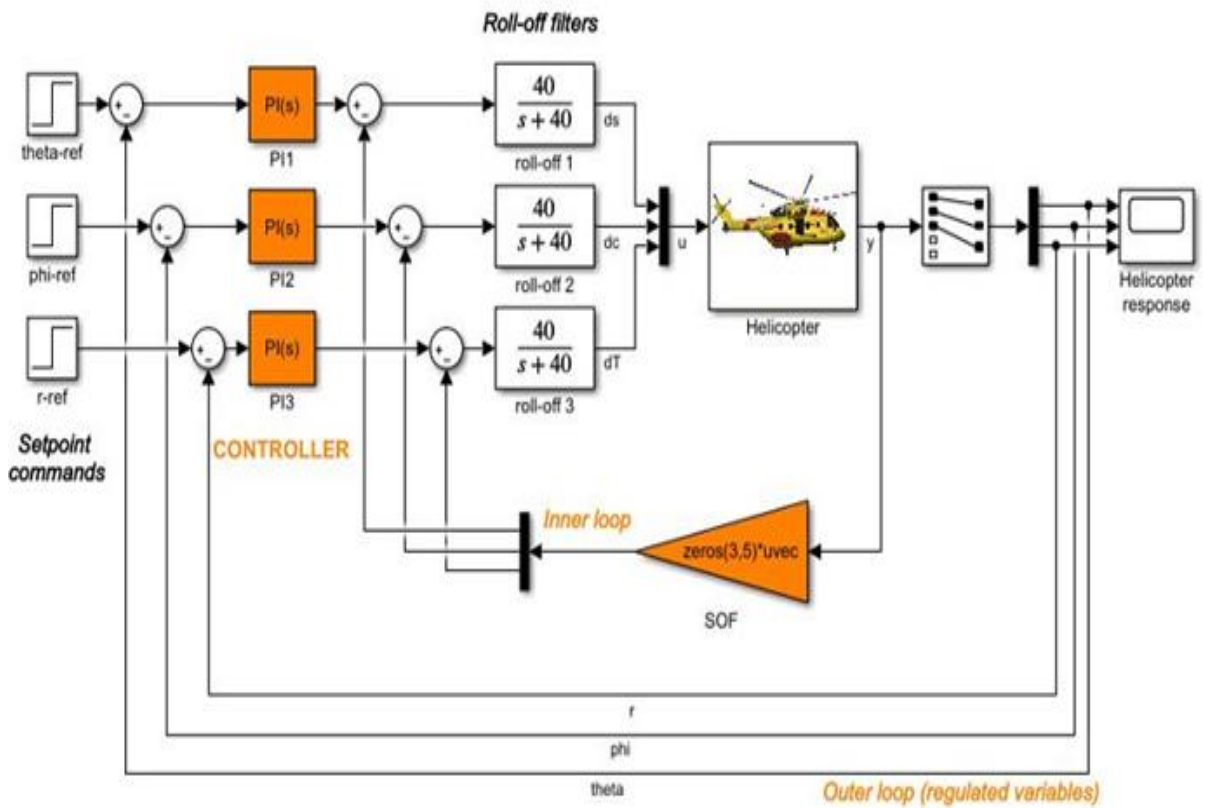
Los simuladores de procesos también son herramientas para calcular propiedades termodinámicas (entalpía, entropía, energía libre de Gibbs, densidad, viscosidad) como entrada para estimar la cinética de reacción, los servicios de calor y los cambios de fase.⁴³

Los simuladores de procesos realizan análisis de puntos pinch (APP) para diseñar una red de intercambio de calor óptima y minimizar las necesidades energéticas del proceso.⁴³

Varios paquetes de software disponibles en el mercado incorporan una sección de APP, como HYSIM, HEXTRAN, ADVENT de Aspen Tech, TARGET o, más recientemente, FI2 EPI. Los simuladores combinan el análisis de APP con un modelo de intercambio de calor y, de este modo, trabajan en el diseño de la red fuera del entorno de simulación. Comparten la posibilidad de importar los resultados del balance calor y masa desde el exterior, y la presencia de al menos un diseño manual y otro diseño automático.⁴³

1.5.1 *Simulink*. El software Simulink es un entorno de diagrama de bloques inclinado al diseño de sistemas con modelos multidominio y en la simulación sin la necesidad de escribir códigos. Este software funciona bajo la plataforma del MATLAB, permite realizar modelos, simulaciones y análisis de sistemas, ya sea lineales o no lineales.⁴⁴ En la figura 9 se aprecia un ejemplo de simulación realizado en SIMULINK.

Figura 9. Simulación de un sistema de control con SIMULINK



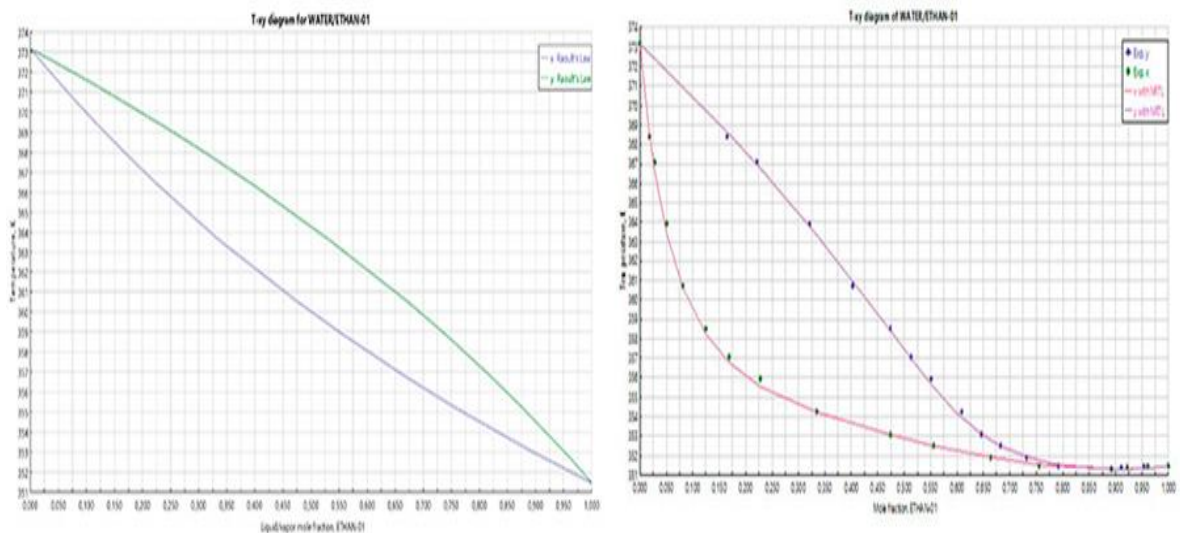
Fuente:⁴⁴

1.5.2 *Aspen Plus*. es una aplicación de software que se utiliza para simular procesos químicos y que permite integrar en un solo entorno diversas operaciones unitarias empleadas en la industria. Este programa es ampliamente utilizado en la ingeniería química y en la industria para modelar, analizar y optimizar procesos químicos y petroquímicos.

Aspen Plus proporciona una amplia variedad de herramientas que permiten la creación y optimización de modelos de procesos. El simulador cuenta con una extensa base de datos de sustancias que se actualiza en cada nueva versión. Esto facilita la simulación de una amplia gama de procesos químicos y la selección precisa de sustancias para los cálculos termodinámicos y de transporte en la industria.

También es capaz de gestionar una amplia variedad de estados, incluyendo líquidos, sólidos y gases, así como el análisis de equilibrios de fases en sistemas de tuberías. Aspen Plus ofrece un conjunto de herramientas completo para la simulación y análisis de procesos químicos y permite abordar una variedad de condiciones y estados en la industria.⁴⁵ En la figura 10 se puede apreciar un diagrama realizado en el programa Aspen Plus.

Figura 10. Diagrama realizado con el software ASPEN PLUS



Fuente:⁴⁵

Dentro de las aplicaciones que se le pueden dar a este software resaltan:

- Análisis de propiedades físicas, como la determinación de los puntos de ebullición a temperaturas y presiones específicas para sustancias puras o mezclas.
- Estudio de separaciones y purificaciones de mezclas a través de procesos de destilación (como la destilación atmosférica, al vacío, extractiva, etc.), decantación líquido-líquido o absorción líquida. Esto permite reducir el tiempo requerido para experimentación

- Análisis del equilibrio de reacciones químicas para definir parámetros de reacción y comparar con reacciones químicas que se han clasificado de diferentes maneras.
- Condiciones del proceso para determinar las cantidades necesarias de reactivos.
- Análisis tecno-económico de un proceso.⁴⁵

1.5.3 *DWSIM*. Es un simulador de procesos químicos que se destaca por ser compatible con la norma CAPE-OPEN y proporciona una interfaz gráfica de fácil uso con numerosas características que solían encontrarse solo en simuladores de procesos químicos comerciales. Este programa se ha convertido en una herramienta valiosa para ingenieros y científicos que trabajan en la simulación y el diseño de procesos químicos en diversas industrias.⁴⁶

DWSIM permite a los usuarios modelar y simular una amplia variedad de procesos químicos, incluyendo la termodinámica y el equilibrio de fases, lo que facilita la comprensión y la optimización de estos procesos. Al ser compatible con la norma CAPE-OPEN, *DWSIM* se integra fácilmente con otros programas y herramientas de simulación, lo que lo convierte en una opción versátil y potente para aquellos que desean realizar análisis detallados de procesos químicos.⁴⁶

El potente motor termodinámico de *DWSIM* también está disponible como librería de enlace dinámico independiente que puede enlazarse con aplicaciones propietarias.⁴⁶

Las principales ventajas de este programa se son:

- Posee una gran variedad de operaciones unitarias.
- Interfaz muy intuitiva.
- Modelos termodinámicos avanzados.
- Es de código abierto.

1.6 Estructura de las Torres de Humidificación

1.6.1 *Estructura del Cuerpo de la Torre*. Las estructuras de las torres de humidificación pueden ser construidas empleando una diversidad de materiales, y la decisión sobre el material a utilizar dependerá de diversos factores como las circunstancias específicas de aplicación, el presupuesto asignado y los requisitos particulares del proyecto.⁴⁷

Algunos de los materiales más frecuentemente empleados en la edificación de estas estructuras son:

- Acero inoxidable: El acero inoxidable goza de gran popularidad en la construcción de torres de humidificación debido a su resistencia a la corrosión y su durabilidad. Este material es especialmente apropiado para entornos industriales y situaciones donde la resistencia a la corrosión es fundamental.⁴⁸
- Aluminio: El aluminio es un material ligero y fuerte que se utiliza comúnmente en las torres de humidificación, en especial en aplicaciones donde la corrosión no representa un problema significativo. Es una opción muy popular en sistemas de humidificación para edificios comerciales y residenciales.⁴⁹
- Plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP): El FRP es una opción que combina la resistencia química del plástico con la durabilidad de la fibra de vidrio. Este material es resistente a la corrosión y se emplea en situaciones donde se requiere una alta resistencia química.⁵⁰
- PVC (policloruro de vinilo): El PVC es un material plástico económico que se utiliza en torres de humidificación en aplicaciones más sencillas o en entornos donde la corrosión no es un factor crítico. Puede ser adecuado para sistemas de humidificación más pequeños.⁵¹
- Madera: En algunas situaciones específicas, como invernaderos o proyectos de jardinería, se pueden emplear estructuras de madera para la construcción de torres de humidificación.
- Sin embargo, la madera tiende a ser menos duradera y más susceptible a la corrosión en comparación con otros materiales.
- Hormigón o concreto: En proyectos de gran envergadura o aplicaciones industriales particulares, es posible utilizar estructuras de hormigón o concreto reforzado. Estos materiales son robustos y duraderos, aunque suelen ser más costosos de construir.⁵¹

La elección del material debe fundamentarse en los requerimientos específicos de la aplicación, considerando aspectos como la resistencia a la corrosión, las condiciones ambientales de operación y el presupuesto disponible. Es crucial asegurarse de que el material seleccionado sea apropiado para resistir las condiciones en las que se utilizará la torre de humidificación, cumpliendo con las regulaciones y normativas de seguridad aplicables.⁵²

1.6.2 *Tuberías de la Torre de Humidificación*. Las tuberías utilizadas en las torres de humidificación deben ser apropiadas para el agua y el ambiente en el que operan, y deben tener la capacidad de resistir la corrosión debido a la exposición al agua y, en ocasiones, a productos químicos utilizados en el proceso de humidificación.⁵³ A continuación, se mencionan algunos de los materiales habituales empleados en las tuberías de las torres de humidificación:

- **Acero inoxidable:** El acero inoxidable es una elección popular para las tuberías en las torres de humidificación debido a su excelente resistencia a la corrosión y su durabilidad. Se destaca particularmente en aplicaciones que requieren una alta resistencia química y una larga vida útil.⁵⁴
- **PVC (policloruro de vinilo):** El PVC es un material plástico ampliamente utilizado en las tuberías de las torres de humidificación. Es económico y se adecua a aplicaciones donde la resistencia química no es un aspecto crítico. Se encuentra comúnmente en sistemas de humidificación comerciales y residenciales.
- **CPVC (policloruro de vinilo clorado):** El CPVC es una variante del PVC que ofrece una mayor resistencia a la temperatura y la corrosión. Puede ser una opción adecuada en situaciones donde se requieren temperaturas más elevadas.
- **PPR (polipropileno random):** El PPR es otro material plástico que se utiliza en las tuberías de algunas torres de humidificación. Es resistente a la corrosión y es adecuado para aplicaciones de baja presión y temperaturas moderadas.⁵⁵
- **Polietileno:** El polietileno es un material plástico flexible que se utiliza en algunas aplicaciones de torres de humidificación. Se ajusta bien a situaciones de baja presión y temperaturas moderadas.⁵⁶

La elección del material de las tuberías dependerá de factores como la aplicación específica, las condiciones ambientales, la presión y la temperatura del agua, así como el presupuesto disponible.⁵³ Es esencial tener en cuenta la compatibilidad química y la capacidad de resistir la corrosión al seleccionar el material de las tuberías para asegurar un funcionamiento seguro y fiable de la torre de humidificación.

1.6.3 *Bomba de Circulación de Agua*. En las torres de humidificación, se emplean bombas centrífugas o bombas de atomización para mover y dispersar el agua en forma de aerosoles en el aire, con el fin de aumentar la humedad.⁵⁷ La elección de la bomba depende de la capacidad de la torre de humidificación y de las especificaciones del sistema. A continuación, se explican brevemente ambos tipos de bombas:

1.6.3.1 *Bomba Centrífuga*. Las bombas centrífugas son las más comunes en las torres de humidificación. Estas bombas funcionan al tomar agua de un depósito o fuente y forzarla a través de un impulsor giratorio, generando una corriente de agua de alta velocidad. Luego, el agua se dirige desde la bomba a través de una tubería hacia el sistema de distribución de agua, donde se atomiza o se dispersa en el aire.⁵⁸

- **Ventajas:** Las bombas centrífugas son eficientes, fiables y adecuadas para sistemas de humidificación de diferentes capacidades. Son capaces de manejar caudales variables y se pueden controlar fácilmente mediante válvulas y reguladores de velocidad.
- **Limitaciones:** Las bombas centrífugas no son adecuadas para sistemas de alta presión y no son ideales para atomizar el agua en partículas extremadamente finas.⁵⁸

1.6.3.2 *Bombas de Atomización*. En algunas torres de humidificación, especialmente en aquellas que requieren una atomización muy fina del agua, se utilizan bombas de atomización. Estas bombas están diseñadas específicamente para crear aerosoles muy pequeños y uniformes al descomponer el agua en pequeñas gotas.⁵⁹

- **Ventajas:** Las bombas de atomización son ideales para generar una fina neblina de agua, lo que facilita la distribución uniforme de la humedad en el aire. Son apropiadas para aplicaciones que exigen un control preciso de la humedad.
- **Limitaciones:** Las bombas de atomización son más especializadas y costosas que las bombas centrífugas y generalmente se emplean en sistemas de humidificación más pequeños o en aplicaciones que requieren una humedad extremadamente fina.⁵⁹

La elección entre una bomba centrífuga y una bomba de atomización depende de las necesidades específicas del sistema de humidificación. Las bombas centrífugas son más versátiles y comunes en sistemas de gran envergadura, mientras que las bombas de atomización son ideales para sistemas que requieren una dispersión muy fina del agua en el aire.⁵⁹

1.6.4 *Paneles de control*. Los paneles de control incluyen dispositivos como termostatos, humidistatos y controladores que permiten ajustar y monitorear la temperatura y la humedad en el ambiente.⁶⁰

1.6.5 *Sensores de Temperatura*. Los sensores de temperatura se emplean en las torres de humidificación para supervisar y regular tanto las condiciones ambientales como el proceso de humidificación.⁶¹ A continuación, se detalla el propósito de estos sensores y su contribución al funcionamiento de las torres de humidificación:

- Regulación de la temperatura del agua: Los sensores de temperatura se emplean para medir la temperatura del agua utilizada en el proceso de humidificación. Esto es fundamental para asegurar que el agua se encuentre a la temperatura adecuada para la humidificación, evitando problemas como la congelación o la ebullición excesiva.⁶²
- Control de la temperatura del aire: También es posible ubicar sensores de temperatura en el aire circundante para monitorizar la temperatura del entorno. Esto permite ajustar la operación de la torre de humidificación con el objetivo de mantener las condiciones ideales de temperatura y humedad en el espacio que se está humidificando.⁶³
- Salvaguardia en situaciones extremas: Los sensores de temperatura resultan esenciales para proteger tanto la torre de humidificación como el sistema en circunstancias extremas. Si la temperatura del agua o del aire se desvía de los rangos seguros, estos sensores pueden enviar señales de alarma o interrumpir el funcionamiento de la torre para prevenir daños.⁶⁴
- Gestión de la eficiencia energética: El monitoreo de la temperatura es esencial para preservar la eficiencia energética de la torre de humidificación. Si la temperatura del agua es excesivamente elevada, podría requerirse una mayor cantidad de energía para enfriarla antes de su uso, lo que aumentaría los costos operativos.⁶⁵
- Optimización del proceso de humidificación: La medición y el control efectivo de la temperatura permiten lograr una distribución uniforme de la humedad en el aire, aspecto fundamental para mantener un entorno interior cómodo y saludable.⁶⁶

En resumen, los sensores de temperatura cumplen un rol esencial en las torres de refrigeración al verificar que las condiciones de temperatura y humedad sean las apropiadas para asegurar su operación efectiva y segura. Estos sensores son vitales para lograr un control preciso de los procesos y promover la comodidad y la eficiencia en una variedad de entornos, que incluyen edificios comerciales, industriales y residenciales.⁶⁷

1.6.6 *Medidores de Caudal*. Los medidores de caudal, también conocidos como medidores de flujo, son instrumentos empleados en una torre de humidificación con el propósito de cuantificar la cantidad de agua que fluye dentro del sistema. Su función principal consiste en supervisar y regular la velocidad o la cantidad de agua que se suministra a las boquillas encargadas de atomizar o distribuir el agua en la torre.⁶⁸

A continuación, se detalla de manera exhaustiva qué son y cuál es la utilidad de los medidores de caudal en una torre de humidificación:

- **Medición del caudal:** Los medidores de caudal efectúan un registro de la cantidad de agua que atraviesa sus componentes durante un período de tiempo específico, generalmente expresado en términos de litros por minuto (L/min) o galones por minuto (GPM). Esta medición proporciona datos acerca de la velocidad o el flujo del agua dentro del sistema de humidificación.⁶⁹
- **Control de la cantidad de agua:** Al medir el caudal de agua de manera precisa, los medidores posibilitan una regulación exacta de la cantidad de agua que se suministra al sistema de humidificación. Este control resulta fundamental para ajustar la humedad relativa en el ambiente de forma minuciosa y eficiente.⁷⁰
- **Ahorro de agua y energía:** La medición precisa del caudal de agua permite evitar despilfarros innecesarios de este recurso, lo que, a su vez, conlleva a la reducción de los costos operativos y del consumo de energía asociado con la generación de humedad.⁷¹
- **Mantenimiento y diagnóstico:** Los medidores de caudal pueden utilizarse con fines de mantenimiento y diagnóstico del sistema. Si se detectan variaciones en el caudal, esto puede indicar problemas en las boquillas de atomización, obstrucciones en las tuberías o en el suministro de agua, entre otros posibles inconvenientes.
- **Cumplimiento de regulaciones:** En determinadas situaciones, especialmente en aplicaciones industriales y comerciales, es imprescindible cumplir con regulaciones ambientales y de seguridad que requieren la monitorización y el registro del caudal de agua empleado en el proceso de humidificación.⁷¹
- **Optimización del rendimiento:** El control preciso del caudal de agua posibilita la adaptación de la humedad relativa según las necesidades específicas del espacio, lo que contribuye a un desempeño óptimo y al bienestar de las personas en el entorno.⁷²

1.6.7 *Psicrómetro*. Un psicrómetro es un dispositivo de medición empleado en torres de humidificación con el propósito de evaluar la humedad relativa del aire. Su función principal consiste en medir y registrar la humedad presente en el ambiente en el que se halla instalado. Un psicrómetro está compuesto por dos termómetros: uno seco y otro húmedo. A continuación, se ofrece una explicación detallada acerca de lo que implica un psicrómetro y cómo se utiliza en una torre de humidificación:

1.6.7.1 *Elementos del psicrómetro*:

- Termómetro seco: Este termómetro mide la temperatura del aire circundante sin ningún tipo de protección ni humedad adicional.
- Termómetro húmedo: El termómetro húmedo se cubre con una tela de algodón que se mantiene empapada mediante agua destilada. El proceso de evaporación del agua desde la tela provoca un descenso en la temperatura del bulbo húmedo.⁷³

1.6.7.2 *Principio de operación*:

El funcionamiento del psicrómetro se basa en la explotación del enfriamiento que ocurre durante la evaporación del agua. El termómetro húmedo se enfría más que el termómetro seco debido a que el agua se evapora de la tela que lo envuelve. La discrepancia de temperatura entre estos dos termómetros se encuentra vinculada a la humedad relativa del aire.⁷⁴

- Determinación de la humedad relativa: Comparando las lecturas de ambos termómetros, es posible calcular la humedad relativa del aire utilizando una tabla de psicrometría o una fórmula específica.⁷⁵ La disparidad entre la temperatura del termómetro seco y la temperatura del termómetro húmedo proporciona los datos necesarios para calcular la humedad relativa.⁷³
- Utilidad en la torre de humidificación: El psicrómetro desempeña un papel esencial en una torre de humidificación al facilitar la supervisión y el control de la humedad relativa en el entorno. La humedad relativa es un parámetro crítico que garantiza la adecuación de las condiciones de humedad, especialmente en aplicaciones industriales, comerciales y en entornos de confort en edificios.⁶⁰
- Control y ajuste de la torre de humidificación: La información recopilada por el psicrómetro se emplea para determinar si es necesario incrementar o reducir la cantidad de humedad que se añade al aire a través de la torre de humidificación.⁷⁶

- En situaciones de baja humedad relativa, puede ser necesario aumentar la humidificación, mientras que, en casos de alta humedad, se puede disminuir o detener la humidificación con el fin de evitar un exceso de humedad.

1.6.8 *Hidrómetro*. Un hidrómetro en una torre de humidificación es un dispositivo utilizado para medir la humedad relativa del aire en el ambiente. Su función principal es proporcionar información precisa sobre el nivel de humedad presente en el aire circundante.

Esto es esencial para el control y el monitoreo de las condiciones ambientales en el espacio que se está humidificando. A continuación, se explica en qué consiste y para qué sirve un hidrómetro en una torre de humidificación:

1.6.8.1 *Función del hidrómetro:*

- **Medición de la humedad relativa:** El hidrómetro es un dispositivo que cuantifica la humedad relativa del aire, es decir, la cantidad de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que el aire puede retener a una temperatura y presión específicas. Normalmente, este valor se representa en forma de un porcentaje.⁷⁷
- **Control y ajuste de la humidificación:** La información proporcionada por el hidrómetro se utiliza para determinar si es necesario aumentar o disminuir la cantidad de humedad que se agrega al aire a través de la torre de humidificación. Si la humedad relativa es baja y está por debajo del rango deseado, se puede aumentar la humidificación. Por otro lado, si la humedad relativa es alta, se puede reducir o detener la humidificación para evitar un exceso de humedad en el ambiente.⁷⁸
- **Mantenimiento de condiciones óptimas:** El hidrómetro es esencial para mantener las condiciones ambientales dentro de los rangos óptimos de humedad relativa. Esto es crítico en aplicaciones donde se requiere un control preciso, como en procesos industriales o en la gestión de la calidad del aire en edificios comerciales y residenciales.⁷⁹
- **Prevención de problemas asociados con la humedad:** El monitoreo constante de la humedad relativa con un hidrómetro ayuda a prevenir problemas como el moho, la corrosión, la proliferación de ácaros y otros problemas relacionados con la humedad. Al mantener la humedad en niveles adecuados, se crea un ambiente más saludable y seguro.⁷³

1.6.9 *Medidor de Presión en la Torre de Humidificación.* Un medidor de presión en una torre de humidificación es un dispositivo utilizado para medir y monitorear la presión dentro del sistema de humidificación. Su principal función es proporcionar información precisa sobre la presión del aire o el agua en el sistema, lo que es fundamental para asegurar un funcionamiento efectivo y seguro de la torre de humidificación.⁸⁰

A continuación, se proporciona una explicación detallada sobre qué es y para qué se utiliza un medidor de presión en una torre de humidificación:

1.6.9.1 *Función del medidor de presión:*

- **Medición de la presión del aire:** En ciertas torres de humidificación, se utiliza un medidor de presión para medir la presión del aire en el sistema. Esto puede ser ventajoso para monitorear y regular la velocidad del flujo de aire a través de la torre de acuerdo a requisitos específicos.⁸¹
- **Medición de la presión del agua:** En otras circunstancias, se recurre a un medidor de presión para medir la presión del agua que se suministra al proceso de humidificación. Esto es fundamental para asegurar que el agua se entregue a una presión adecuada, lo cual garantiza un rendimiento óptimo de los componentes de humidificación, como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.
- **Control y ajuste del sistema:** Los datos proporcionados por el medidor de presión permiten a los operadores de la torre de humidificación supervisar y ajustar el sistema según sea necesario. Si la presión se encuentra fuera de los rangos deseados, se pueden tomar medidas correctivas para garantizar que el sistema funcione de manera eficiente y segura.⁸¹
- **Prevención de problemas:** El seguimiento constante de la presión mediante el medidor ayuda a prevenir problemas potenciales, como obstrucciones en las tuberías, fugas o situaciones de presión excesiva que podrían ocasionar daños al sistema.⁸¹
- **Sistemas de control y seguridad:** Para garantizar la seguridad de la operación, se pueden incluir sistemas de seguridad que apagan automáticamente la torre de humidificación en caso de condiciones críticas o problemas graves.⁸²
- **Controladores de velocidad de la bomba:** Estos controladores regulan la velocidad de la bomba de agua para ajustar la cantidad de agua atomizada en el aire. Esto permite un control preciso de la humedad relativa.⁸²

- Comunicación y supervisión remota: En algunos casos, se pueden implementar sistemas de comunicación que permiten la supervisión y el control remoto de la torre de humidificación a través de una red de computadoras. Esto es útil para el monitoreo continuo y el diagnóstico de problemas a distancia.⁸³
- Alarmas y notificaciones: Los sistemas de control pueden estar equipados con alarmas que se activan en caso de condiciones anormales, como niveles bajos de agua, fallas en los sensores o problemas de funcionamiento. Estas alarmas pueden generar notificaciones visuales, audibles o incluso alertas a través de sistemas de gestión de edificios (BMS, por sus siglas en inglés).⁸³

1.6.10 *Válvulas y Reguladores de Flujo en la Torre de Humidificación.* Estos componentes permiten controlar y regular la cantidad de agua que se introduce en el sistema de humidificación, lo que es esencial para ajustar la humedad relativa según sea necesario.⁸⁴

Las válvulas y reguladores de flujo en la torre de humidificación son componentes cruciales que desempeñan un papel fundamental en la gestión y control del flujo de agua y aire en el sistema de humidificación.

Su principal objetivo es ajustar y mantener los niveles adecuados de caudal de agua y aire, lo cual resulta esencial para garantizar el funcionamiento eficaz y preciso de la torre de humidificación.⁸⁰ A continuación, se describe en detalle su propósito y funciones:

- Válvulas de agua: Estos dispositivos tienen la función de regular la cantidad de agua que fluye hacia los elementos de humidificación, como boquillas de atomización, paneles de evaporación o pulverizadores. Su tarea principal es controlar el flujo de agua, permitiendo su aumento o reducción según las necesidades específicas para mantener las condiciones de humedad deseadas en el ambiente. Estas válvulas son esenciales para evitar situaciones de exceso o insuficiencia de humedad en el proceso de humidificación.
- Reguladores de flujo de aire: Los reguladores de flujo de aire son componentes que controlan la cantidad de aire que circula a través de la torre de humidificación. Tienen la capacidad de ajustar la velocidad del ventilador o el flujo de aire de entrada para lograr un equilibrio óptimo entre el suministro de aire y el proceso de humidificación. Este equilibrio es crucial para garantizar que el aire atraviese adecuadamente los elementos de humidificación y se sature de humedad antes de ser liberado al entorno.⁸²

- Reguladores de presión: Estos dispositivos se emplean para controlar la presión del agua en el sistema de humidificación. Mantener una presión adecuada resulta esencial para garantizar un rendimiento óptimo de los elementos de humidificación, como las boquillas de atomización. Los reguladores de presión ajustan la presión del agua de acuerdo con las especificaciones del sistema, evitando presiones excesivas que puedan dañar los componentes.⁸⁵
- Válvulas de control proporcional: Estas válvulas representan dispositivos avanzados que permiten un control extremadamente preciso del caudal de agua o aire, basado en señales o parámetros del sistema, como la humedad relativa o la demanda de humidificación.
Estas válvulas ofrecen una regulación gradual en lugar de simplemente abrir o cerrar el flujo, lo que contribuye a mantener condiciones de humedad constantes y estables.⁸⁶

1.6.11 *Sistema de Motopropulsor (Ventilador y Extractor)*. El componente fundamental en una torre de humidificación es el sistema de motopropulsor o ventilador, cuyo propósito principal es impulsar el aire a través de la torre para facilitar el proceso de humidificación.⁸⁷ Su función principal radica en generar un flujo de aire que atraviese los elementos de humidificación, como boquillas de atomización o paneles de evaporación, permitiendo la mezcla y evaporación del agua en el entorno circundante.⁸⁸ A continuación, se detalla la naturaleza y el propósito del sistema de motopropulsor o ventilador en una torre de humidificación:

1.6.11.1 *Función del sistema de motopropulsor o ventilador:*

- Circulación del aire: El ventilador o sistema de motopropulsor crea un flujo de aire dentro de la torre de humidificación. Esto resulta fundamental para garantizar que el aire circule por los medios de humidificación (como paneles, almohadillas o boquillas) y entre en contacto con el agua, lo que propicia el proceso de evaporación.⁸⁹
- Promoción de la evaporación: El flujo de aire generado por el ventilador maximiza la superficie de interacción entre el aire y el agua, agilizando así la tasa de evaporación.⁹⁰ Cuanto más rápido sea el flujo de aire, mayor será la velocidad de evaporación, incrementando la capacidad de la torre para elevar la humedad relativa del aire.⁹¹

- Distribución uniforme de la humedad: El sistema de ventilación asegura que la humedad generada se distribuya de forma equitativa en el área destinada a la humidificación. Esto es esencial para mantener condiciones de humedad uniformes en todo el espacio circundante.
- Control de la humedad relativa: A través de la regulación de la velocidad del ventilador, es posible controlar la cantidad de humedad que se inyecta en el aire. Esto permite mantener la humedad relativa en el rango deseado y cumplir con las especificaciones particulares de comodidad o proceso.⁹²
- Refrigeración adicional: En algunas circunstancias, las torres de humidificación también desempeñan el papel de sistemas de enfriamiento evaporativo. El flujo de aire inducido por el ventilador contribuye al enfriamiento del aire mientras se realiza la humidificación, lo cual puede ser ventajoso en situaciones donde es necesario controlar tanto la temperatura como la humedad.⁹³

1.6.11.2 *Función de los extractores:*

- Eliminación de aire viciado: Los extractores en las torres de humidificación se utilizan para eliminar el aire viciado o excesivamente húmedo del ambiente. Esto es especialmente importante en aplicaciones industriales o comerciales donde se necesita evacuar el aire contaminado o con alta humedad para mantener condiciones óptimas.⁹⁴
- Control de la humedad excesiva: En situaciones donde la humedad relativa es demasiado alta, los extractores ayudan a reducir la humedad excesiva al eliminar parte del aire húmedo. Esto puede ser necesario para prevenir problemas como el moho o el deterioro de materiales.
- Mejora de la calidad del aire: La extracción del aire viciado contribuye a mejorar la calidad del aire en el espacio, lo que es esencial para la salud y la comodidad de las personas.

1.6.12 *Sistema de Agua de Aporte.* Un componente esencial en una torre de humidificación es el Sistema de Agua de Aporte, que se encarga de suministrar agua al proceso de humidificación. Su función principal es proporcionar un flujo continuo y regulado de agua a los elementos de humidificación, como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación, con el fin de generar la humedad requerida en el aire circundante.⁹⁵

Para entender mejor la importancia y funcionalidad del Sistema de Agua de Aporte, es necesario analizar en detalle sus funciones:

- Suministro constante de agua: El Sistema de Agua de Aporte se encarga de almacenar y suministrar agua de manera ininterrumpida al proceso de humidificación. Esto asegura que siempre haya suficiente agua disponible, especialmente en situaciones de alta demanda o cuando el suministro de agua es intermitente.
- Regulación del flujo de agua: Este sistema está equipado con dispositivos de control como válvulas, medidores de caudal y bombas, los cuales regulan la cantidad de agua que se libera hacia los elementos de humidificación. Esto permite un control preciso de la cantidad de humedad que se agrega al aire.⁹²
- Mantenimiento del nivel de agua: El Sistema de Suministro de Agua garantiza la constancia del nivel de agua en el tanque o depósito, lo cual es esencial para mantener el funcionamiento uniforme y eficaz de los componentes de humidificación.⁹⁶
- Eficiencia y seguridad: Controlando cuidadosamente el suministro de agua, se evita el desperdicio de este recurso y se garantiza un funcionamiento seguro y eficiente de la torre de humidificación

1.6.13 *Chimenea o Virola*. La chimenea o virola en una torre de humidificación es una estructura diseñada para expulsar el aire húmedo y caliente generado en el proceso de humidificación hacia el ambiente exterior. Su función principal es proporcionar una vía de escape para el aire humidificado, permitiendo que salga de la torre de humidificación y se mezcle con el aire circundante en el exterior.⁹⁷

A continuación, se explica en detalle qué es y para qué sirve la chimenea o virola en una torre de humidificación:

1.6.13.1 *Función de la chimenea o virola:*

- Extracción del aire humidificado: Después de que el aire pasa a través de los elementos de humidificación, como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación, se carga con humedad y a menudo se calienta. La chimenea o virola permite que este aire humidificado y caliente sea expulsado de la torre de humidificación.
- Mezcla con el aire exterior: El aire caliente y húmedo que se evacua a través de la chimenea se combina con el aire circundante en el exterior de la torre. Esta mezcla contribuye a disminuir tanto la temperatura como la humedad del aire antes de ser liberado en el entorno exterior.⁹⁸

- Prevención de la recirculación: La chimenea evita que el aire humidificado vuelva a entrar en la torre de humidificación, lo que podría causar problemas de sobrecarga de humedad o recirculación del aire ya humidificado.⁹⁷
- Control de las condiciones ambientales: Al expulsar el aire humidificado, la chimenea contribuye al control de las condiciones de humedad y temperatura en el espacio que se está humidificando, manteniendo así el equilibrio necesario para el confort y la eficiencia.⁹⁷

1.6.14 *Sistema de Distribución de Agua en la Torre de Humidificación.* El Sistema de Distribución de Agua en una torre de humidificación es un componente esencial del sistema que tiene la responsabilidad de conducir y dispersar el agua de manera controlada hacia los componentes de humidificación, como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.

Su función principal es asegurar una distribución uniforme y precisa del agua para facilitar la generación de humedad en el aire circundante de manera eficaz.⁴⁷ A continuación, se detalla más profundamente qué es y para qué sirve el Sistema de Distribución de Agua en una torre de humidificación:

1.6.14.1 *Funciones del Sistema de Distribución de Agua:*

- Suministro de agua a los elementos de humidificación: El sistema se encarga de transportar el agua desde la fuente o el depósito principal hasta los componentes responsables de introducir humedad en el aire, como las boquillas de atomización o los paneles de evaporación.
- Regulación del caudal de agua: El sistema de distribución de agua está equipado con válvulas, bombas y otros dispositivos de control que permiten ajustar la cantidad de agua que se libera hacia los elementos de humidificación. Esto garantiza un control preciso de la humedad que se añade al aire.⁹⁶
- Distribución uniforme: Su diseño se ha concebido para asegurar que el agua se distribuya de manera uniforme en toda la superficie de los elementos de humidificación. Esto previene la formación de áreas con exceso de humedad o zonas secas, lo que resulta fundamental para mantener niveles homogéneos de humedad relativa en el espacio que se está humidificando.
- Prevención de obstrucciones y problemas: El Sistema de Distribución de Agua se ha diseñado con la finalidad de evitar obstrucciones en las tuberías o boquillas, lo que podría afectar el rendimiento del sistema de humidificación. Además, un mantenimiento adecuado contribuye a prevenir problemas como la corrosión o bloqueos que puedan surgir con el tiempo.

- Eficiencia y control: Al distribuir el agua de forma controlada y uniforme, el sistema contribuye a un funcionamiento eficiente de la torre de humidificación y permite un control preciso de las condiciones de humedad relativa en el ambiente.

1.6.15 *Pulverizadores o Rociadores*. Los pulverizadores utilizados en las torres de humidificación son dispositivos diseñados para transformar el agua en diminutas gotas que se dispersan en el aire ambiente. Su propósito principal es generar una fina neblina de agua que se mezcla con el aire, aumentando así la humedad relativa en el entorno.⁹⁹ Estos dispositivos son cruciales en el proceso de humidificación, y a continuación, se proporciona una descripción más detallada acerca de qué son y cuál es su propósito:

1.6.15.1 Funciones de los pulverizadores en las torres de humidificación:

- Atomización del agua: Los pulverizadores toman el agua proveniente del sistema de suministro y la transforman en minúsculas gotas o aerosoles. Este proceso es fundamental, ya que las gotas más pequeñas ofrecen una mayor área de superficie para la evaporación, lo que acelera el proceso de humidificación.
- Aumento de la humedad relativa: Al dispersar gotas de agua en el aire, los pulverizadores contribuyen a elevar la humedad relativa en el ambiente. Esto resulta especialmente valioso en entornos donde es necesario mantener niveles específicos de humedad, ya sea para propósitos de confort, salud o aplicaciones industriales.
- Distribución uniforme: Los pulverizadores están diseñados de manera que el agua se distribuye de manera homogénea en todo el espacio que se desea humidificar. De este modo, se evita la formación de zonas con humedad excesiva o áreas secas, lo que es crucial para mantener condiciones uniformes de humedad relativa.
- Control de la humedad: Los pulverizadores posibilitan la regulación de la cantidad de agua que se libera al aire, lo que facilita un control preciso de las condiciones de humedad relativa de acuerdo a las necesidades específicas del ambiente. Este control es esencial en aplicaciones que abarcan desde entornos comerciales hasta industriales y residenciales.
- Enfriamiento adicional (en algunas aplicaciones): Además de su función de humidificación, en ciertos casos, los pulverizadores también pueden contribuir al enfriamiento del ambiente al dispersar agua finamente atomizada. Esto resulta beneficioso en aplicaciones donde se requiere control tanto de la temperatura como de la humedad.¹⁰⁰

1.6.16 *Separadores de Gotas*. Los separadores de gotas en las torres de humidificación son dispositivos diseñados para recoger y eliminar las gotas de agua que puedan ser transportadas por el flujo de aire húmedo generado durante el proceso de humidificación.

Su función principal es evitar que estas gotas de agua lleguen a áreas no deseadas o a componentes sensibles en el sistema, como ventiladores, conductos de aire o equipos eléctricos.⁹⁹ Estos separadores de gotas desempeñan un rol crítico en el proceso de humidificación, garantizando el funcionamiento eficiente y seguro de la torre.¹⁰⁰ A continuación, se proporciona una explicación más detallada de lo que son y para qué se utilizan:

1.6.16.1 *Funciones de los separadores de gotas en las torres de humidificación:*

- **Captura de gotas de agua:** Los dispositivos separadores de gotas tienen como objetivo capturar y retener las gotas de agua que podrían ser transportadas por el flujo de aire húmedo. Este proceso evita que dichas gotas se dispersen en zonas no deseadas o entren en contacto con elementos del sistema que son sensibles a la humedad.
- **Protección de equipos y componentes:** La función principal de estos separadores es salvaguardar los componentes del sistema, como ventiladores, motores eléctricos y conductos de aire, de la exposición a la humedad excesiva o al contacto directo con el agua, lo cual podría ocasionar daños o reducir la eficiencia.⁹⁹
- **Mantenimiento de la calidad del aire:** Al prevenir que las gotas de agua alcancen áreas de salida de aire, los separadores de gotas contribuyen a mantener la calidad del aire y a prevenir problemas como la formación de manchas de agua o la corrosión en superficies.
- **Eficiencia en el proceso:** Al eliminar las gotas de agua del flujo de aire, estos dispositivos colaboran en un funcionamiento más eficiente de la torre de humidificación, reduciendo la carga de humedad no deseada en el entorno.
- **Prevención de problemas de recirculación:** Los separadores de gotas también ayudan a evitar la recirculación del aire ya humidificado, lo que podría generar problemas relacionados con una sobrecarga de humedad en la torre de humidificación.⁹⁹

1.6.17 *Rellenos*. Los rellenos utilizados en las torres de humidificación son elementos esenciales que se emplean para ampliar la superficie de interacción entre el agua y el aire durante el proceso de humidificación.

Su función principal radica en proporcionar una estructura o material con una gran área superficial que facilite la evaporación del agua y su mezcla eficiente con el aire circundante.¹⁰¹ Estos rellenos desempeñan un papel fundamental en el proceso de humidificación y en el mantenimiento de condiciones óptimas de humedad relativa en el entorno. A continuación, se detalla con mayor precisión su propósito y sus funciones:

1.6.17.1 *Funciones de los rellenos en las torres de humidificación:*

- Superficie de evaporación: Los rellenos se diseñan con múltiples superficies rugosas o estructuras con forma de panal, lo que favorece la distribución del agua y su conversión en pequeñas gotas que se evaporan de manera rápida. Este aumento en la superficie mejora considerablemente la eficacia del proceso de evaporación del agua.
- Aumento de la humedad relativa: Al proporcionar una superficie extensa para la evaporación del agua, los rellenos contribuyen al incremento de la humedad relativa en el aire. Esta función es especialmente valiosa en entornos donde es necesario mantener niveles específicos de humedad para el confort, la salud o para procesos industriales.¹⁰⁰
- Distribución uniforme: Los rellenos se diseñan de manera que aseguren una distribución homogénea del agua en toda su superficie. Esto evita la formación de áreas con exceso de humedad o zonas secas, lo cual es esencial para mantener niveles uniformes de humedad relativa en el espacio que está siendo humidificado.
- Control de la humedad: Al aumentar la superficie de evaporación y distribuir de manera uniforme el agua, los rellenos permiten un control preciso de las condiciones de humedad relativa, adaptándose a las necesidades específicas del entorno. Esto resulta fundamental en aplicaciones comerciales, industriales y residenciales.¹⁰⁰

En las torres de humidificación, existen diferentes tipos de rellenos diseñados para facilitar la evaporación del agua y aumentar la humedad relativa en el aire.¹⁰² Los principales tipos de relleno utilizados incluyen:

- Relleno de panel: Este tipo de relleno consta de paneles planos de material absorbente, como celulosa, fibra de vidrio, papel kraft o materiales sintéticos. Los paneles se disponen en capas y proporcionan una gran área de superficie para la evaporación del agua. Los rellenos de panel son conocidos por su eficiencia y capacidad para distribuir uniformemente el agua.

- Relleno de tipo panel: Los rellenos en forma de panel están compuestos por láminas corrugadas de plástico, aluminio o acero inoxidable que se ensamblan para formar una estructura en forma de panel.
Estas láminas están diseñadas con crestas y canales que permiten que el agua fluya y se distribuya de manera uniforme, maximizando así la evaporación.⁸⁵
- Relleno de tipo malla: Los rellenos de malla están fabricados con alambre o material plástico en forma de malla o tejido. Este diseño permite una distribución eficiente del agua y proporciona una gran área de superficie para la evaporación. Los rellenos de malla son duraderos y resistentes a la corrosión.⁹⁷
- Relleno de tipo bloques apilados: Estos rellenos consisten en bloques apilados o torres construidas con material plástico o cerámico. Los bloques están diseñados con estructuras internas que facilitan la distribución del agua y la evaporación eficiente.

La elección del tipo de relleno depende de varios factores, como la aplicación específica, el tipo de agua utilizada y los requisitos de rendimiento. Cada tipo de relleno tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de eficiencia, durabilidad y mantenimiento, por lo que es importante seleccionar el adecuado según las necesidades particulares de la torre de humidificación y su entorno de operación.¹⁰²

1.6.18 *Cuba de Depósito y Sistema de Salida de Agua.* El componente esencial en una torre de humidificación es el sistema de depósito y distribución de agua, que almacena y suministra el agua requerida para el proceso de humidificación.¹⁰³ Su función principal consiste en asegurar un flujo de agua constante y regulado hacia los elementos de humidificación, como boquillas de atomización o paneles de evaporación, para permitir la generación de la humedad necesaria en el ambiente.⁵² A continuación, se describe el propósito y la utilidad del sistema de depósito y distribución de agua en una torre de humidificación:

1.6.18.1 *Función del sistema de depósito y distribución de agua:*

- Almacenamiento de agua: El depósito de agua es un tanque diseñado para retener una cantidad considerable de agua. Esto garantiza que siempre haya suficiente agua disponible para el proceso de humidificación, especialmente en situaciones de alta demanda o cuando el suministro de agua puede ser irregular.
- Suministro controlado: El sistema de distribución de agua regula la cantidad de agua que se libera hacia los elementos de humidificación. Esto posibilita un control preciso sobre la cantidad de humedad que se introduce en el aire y asegura que se mantenga la humedad relativa dentro del rango deseado.⁸⁴

- Prevención de desbordamientos: El sistema de distribución de agua generalmente incorpora mecanismos de control, como válvulas o dispositivos de flotación, que previenen el desbordamiento o el exceso de agua en la torre de humidificación.
- Mantenimiento del nivel de agua: El propósito de la cuba y el sistema de distribución de agua es mantener un nivel de agua constante. Esto es crucial para asegurar un funcionamiento eficaz y uniforme de los componentes de humidificación en la torre.⁵²
- Seguridad y eficiencia: Al regular minuciosamente el suministro de agua, se evita el desperdicio de este recurso y se garantiza un funcionamiento seguro y eficiente de la torre de humidificación.⁵⁴

1.7 Materiales Utilizados en la Torre de Humidificación

El diseño de una torre de humidificación implica la selección de materiales que sean compatibles con las condiciones de operación, la humedad y los productos químicos presentes en el proceso. Los materiales deben ser resistentes a la corrosión y mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo.

Los materiales que se recomiendan en el diseño de la torre de humidificación se detallan de la siguiente manera:

- Acero inoxidable: El acero inoxidable es una elección común para las torres de humidificación debido a su excepcional resistencia a la corrosión y su durabilidad. Viene en diferentes grados, como el 304 y el 316, que ofrecen diferentes niveles de resistencia a productos químicos y corrosión. El acero inoxidable es especialmente adecuado para aplicaciones en las que se manipulan productos químicos corrosivos o se requiere una alta resistencia a la humedad.
- Plásticos de ingeniería: Los plásticos de ingeniería como el PVC y el PP son ligeros y resistentes a la corrosión. Se utilizan en torres de humidificación para aplicaciones donde no se requiere una resistencia extrema a productos químicos agresivos. El PVC es especialmente conocido por su resistencia a productos químicos ácidos y alcalinos.
- Fibra de vidrio reforzada con plástico (FRP): El FRP es un material compuesto que combina fibras de vidrio con una matriz de plástico. Ofrece una excelente resistencia a la corrosión y es ligero.

- Se utiliza en torres de humidificación donde se requiere resistencia química y una estructura liviana. El FRP también es conocido por su durabilidad en entornos agresivos.
- Aluminio: El aluminio es un metal ligero que se utiliza en algunas torres de humidificación. Tiene una buena resistencia a la corrosión en ciertas condiciones, pero no es tan resistente como el acero inoxidable o el FRP en entornos altamente corrosivos. Se utiliza en aplicaciones donde se necesita resistencia estructural y no se requiere una resistencia química extrema.
- Cobre y aleaciones de cobre: El cobre y sus aleaciones, como el bronce, son resistentes a la corrosión y se utilizan en aplicaciones específicas donde la resistencia química es esencial. Estos materiales pueden ser costosos y se utilizan en situaciones que requieren propiedades específicas de transferencia de calor.
- Materiales recubiertos: En algunos casos, los materiales base más económicos pueden recubrirse con un revestimiento resistente a la corrosión. Esto se hace para mejorar la durabilidad de los materiales menos costosos en entornos corrosivos. El tipo de recubrimiento se elige en función de la composición química del fluido de humidificación y las condiciones de operación.

1.8 Recubrimiento de la Torre de Enfriamiento

El recubrimiento de la torre de humidificación es una parte esencial de su diseño, ya que desempeña un papel crítico en la protección de los componentes internos y en la prevención de la corrosión. Uno de los materiales más comúnmente utilizados para este propósito es el acero inoxidable.

El acero inoxidable es una elección preferida para el recubrimiento de torres de humidificación debido a su destacada resistencia a la corrosión y durabilidad. Este material es conocido por su capacidad para resistir la humedad, productos químicos corrosivos y otros factores ambientales que pueden degradar rápidamente otros materiales.

Al utilizar acero inoxidable para el recubrimiento, se asegura que la torre de humidificación mantenga su integridad estructural y continúe funcionando de manera eficiente durante un largo período de tiempo. Además de su resistencia a la corrosión, el acero inoxidable es fácil de mantener y limpiar, lo que contribuye a la longevidad de la torre.

El recubrimiento de acero inoxidable no solo protege los componentes internos de la torre de humidificación contra la corrosión, sino que también proporciona un aspecto limpio y profesional. Esto es particularmente importante en aplicaciones industriales y comerciales donde la apariencia y la higiene son consideraciones importantes.

1.9 Empaquetaduras de la Torre de Humidificación (Relleno de lámina Ondulada)

El relleno de lámina ondulada, a veces llamado relleno de lámina corrugada o relleno de panal, es uno de los tipos más habituales de relleno utilizado en las torres de humidificación y torres de enfriamiento. Su diseño se ha concebido para maximizar la superficie de contacto entre el aire y el agua, lo que facilita la transferencia de masa y calor en el proceso de humidificación o enfriamiento evaporativo.

El relleno de lámina ondulada consta de láminas planas de material plástico PVC dispuestas en forma de ondas o crestas. Estas láminas onduladas crean canales y espacios de aire entre ellas. La estructura ondulada proporciona una gran área de superficie para la interacción entre el aire y el agua.

El aire fluye a través de los canales formados entre las láminas onduladas, y el agua se distribuye sobre las láminas o se rocía desde la parte superior. El aire caliente y seco absorbe la humedad del agua a medida que fluye a través del relleno. Como resultado, el aire se humidifica y se enfría mientras que el agua se evapora.¹⁰⁴

1.10 Ventajas del Relleno

El relleno de lámina ondulada en torres de humidificación y enfriamiento evaporativo ofrece varias ventajas significativas debido a su diseño eficiente y al material comúnmente utilizado, como el PVC. Algunas de las principales ventajas incluyen:

- **Alta Eficiencia de Transferencia:** El diseño de lámina ondulada crea una gran superficie de contacto entre el aire y el agua, lo que permite una transferencia de calor y masa altamente efectiva. Esto resulta en una humidificación eficiente o un enfriamiento rápido del aire.¹⁰⁵
- **Baja Pérdida de Carga:** A pesar de su alta eficiencia, el relleno de lámina ondulada generalmente presenta una baja pérdida de carga en comparación con otros tipos de relleno. Esto significa que el sistema no requiere una cantidad significativa de energía para hacer circular el aire a través del relleno.

- Durabilidad y Resistencia: El PVC es un material duradero y resistente a la corrosión. El relleno de lámina ondulada de PVC puede soportar condiciones ambientales adversas, incluyendo exposición al agua y a la intemperie.
- Bajo Mantenimiento: El mantenimiento del relleno de lámina ondulada es relativamente sencillo. Se puede limpiar periódicamente para eliminar la acumulación de sedimentos o depósitos minerales, lo que ayuda a mantener su eficiencia a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Simulación en el Software DWSIM

2.1.1 *Selección de la Metodología de Investigación.* La selección de la metodología de investigación para abordar el estudio de la simulación y diseño de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado implica la combinación de diversas metodologías complementarias. En primer lugar, se aplicará el método analítico, que permitirá un análisis detallado de los principios fundamentales de transferencia de calor y masa involucrados en el proceso de humidificación.

A través de esta metodología, se desarrollarán ecuaciones matemáticas y modelos teóricos que describirán el comportamiento del sistema y servirán como base para la simulación. Además, se empleará el método de modelación, que se apoyará en herramientas de software de simulación específico para crear un modelo computacional que simulará el desempeño de la torre de humidificación en diferentes condiciones operativas.

El enfoque de la investigación también incorporará el método sistemático, que garantizará la estructuración lógica de los pasos a seguir en el diseño y la simulación de la torre. Esto implica un análisis detenido de las variables clave y la planificación ordenada de experimentos virtuales y pruebas en la vida real. Finalmente, el método de medición será relevante para la validación de los resultados de la simulación mediante la comparación de datos obtenidos experimentalmente con los datos simulados, lo que permitirá evaluar la precisión del modelo desarrollado.

Esta combinación de metodologías asegurará un enfoque riguroso y completo para la investigación de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado, garantizando resultados confiables y relevantes para su diseño y optimización.

2.1.2 *Características de Fluidos de Trabajo.* Las características de los fluidos de trabajo, agua y aire, son esenciales para entender y modelar adecuadamente el proceso de humidificación en la torre. En la tabla 1 se detallan estas características:

TABLA 1. Características de los Fluidos de Trabajo (Agua y Aire)

Características	Agua	Aire	Referencias Bibliográficas
Temperatura (°C)	37	22	Elaboración propia
Presión (atm)	1	1	Elaboración propia
Densidad (kg/m ⁻³)	985	1.205	106
Viscosidad (Pa.s)	0.25 – 0.30	1.85*10 ⁻⁵	106

Fuente: Elaboración propia

Las propiedades físicas y termodinámicas mencionadas son de vital importancia para calcular los intercambios de calor y masa en la torre de humidificación, ya que inciden directamente en la eficiencia de la transferencia de energía y humedad en el proceso. La temperatura y la presión del agua y del aire son especialmente cruciales al definir las propiedades termodinámicas y el comportamiento de los fluidos en el sistema de la torre.

2.1.3 Recopilación de Datos. La obtención de los datos necesarios para este estudio de simulación y diseño de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado se realizó de manera meticulosa, empleando diversas fuentes y técnicas de medición. En cuanto a las condiciones de entrada para los fluidos de trabajo, el caudal de agua se determinó midiendo el tiempo necesario para llenar un recipiente de 20 litros con agua residual caliente proveniente de la torre de destilación ubicada en el laboratorio de Operaciones Unitarias. La temperatura del agua se registró con la ayuda de un termómetro de mercurio altamente preciso, garantizando mediciones confiables y consistentes.

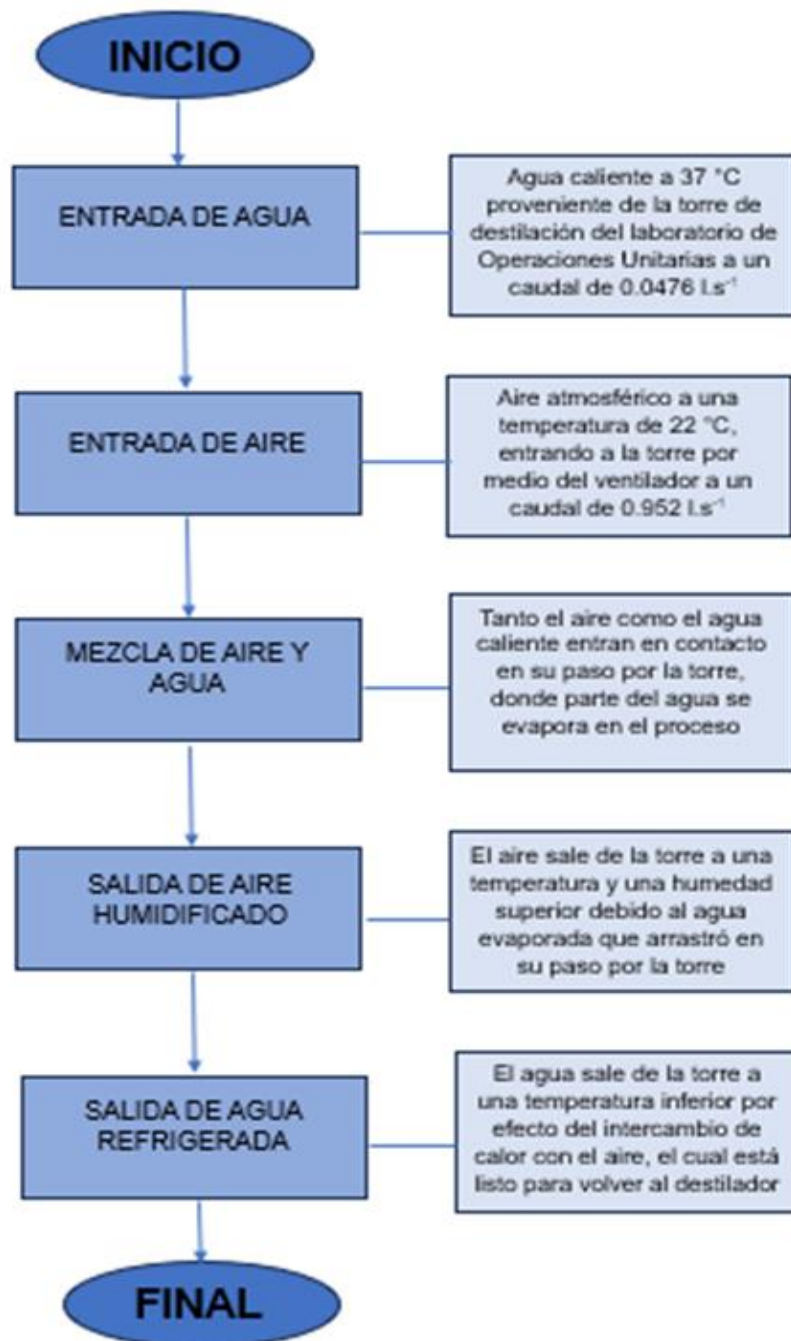
Por otro lado, en lo que respecta al aire, se llevaron a cabo mediciones de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo. La temperatura de bulbo seco se registró utilizando un termómetro de mercurio convencional, mientras que la temperatura de bulbo húmedo se determinó mediante un proceso de enfriamiento adiabático. Esto implicó colocar un paño húmedo alrededor del bulbo del termómetro de mercurio y posteriormente registrar la temperatura resultante.

Los demás datos esenciales para caracterizar el aire, tales como la humedad relativa, la presión atmosférica y la densidad del aire, se calcularon con la ayuda de la carta psicrométrica. Esto asegura una representación meticulosa de las condiciones termodinámicas del aire que fluye hacia la torre de humidificación.

Este enfoque riguroso en la recopilación de datos sienta las bases para una simulación y un diseño preciso de la torre de humidificación.

2.1.4 *Diagrama de Flujo del proceso de humidificación.* El proceso desarrollado en la torre de humidificación de tiro mecánico forzado se resume en el diagrama 1:

Diagrama 1. Diagrama de flujo del proceso de humidificación



Fuente: Elaboración propia.

2.1.5 *Modelo de Simulación.* El software DWSIM será empleado para crear el modelo de simulación de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado. DWSIM es una aplicación bien establecida en la industria química y de procesos, conocida por su capacidad para desarrollar modelos minuciosos y exactos de sistemas termodinámicos, así como para analizar transferencias de calor y masa.

Esto lo convierte en la elección adecuada para este estudio de simulación.

Desarrollo del Modelo:

- El proceso de modelado comenzará con la definición de las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo (agua y aire) en DWSIM, utilizando las características físicas y termodinámicas proporcionadas en la sección 2.2, como temperatura, presión, densidad y viscosidad.
- Se establecerán los componentes y las corrientes de entrada y salida de la torre de humidificación en el simulador, considerando el diseño y la geometría específicos de la torre.
- Se definirán los parámetros de operación, como caudales de agua y aire, temperaturas y humedad relativa de entrada, velocidades de tiro mecánico forzado, y cualquier otro parámetro relevante para la simulación.

2.1.6 *Configuración del modelo de simulación*

2.1.6.1 *Selección del Modelo Termodinámico a Emplear.* La elección del modelo termodinámico Peng-Robinson para la simulación de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado se sustenta en varias consideraciones fundamentales.

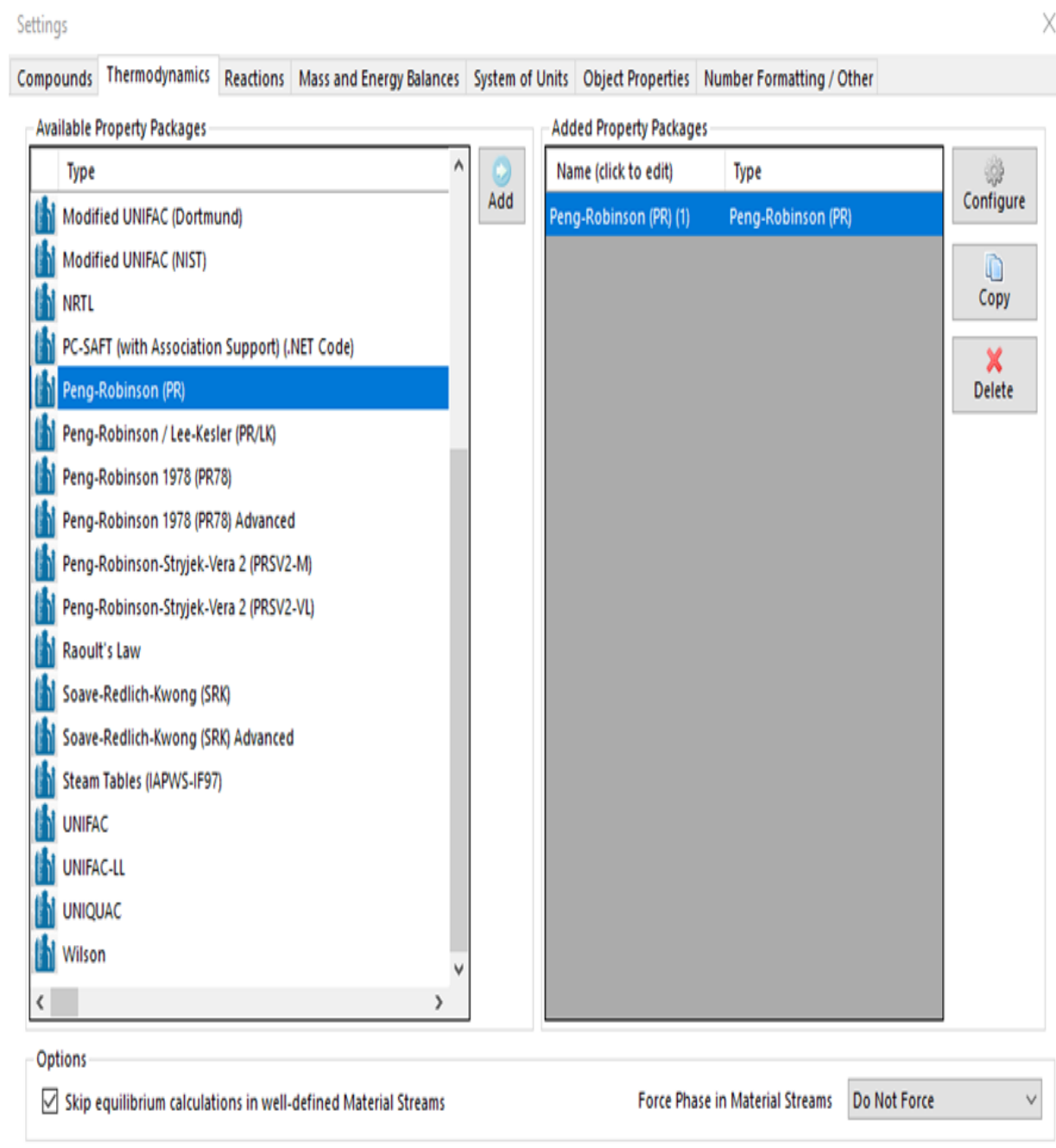
El modelo de Peng-Robinson es un modelo de estado termodinámico ampliamente utilizado y reconocido en la industria de la ingeniería química y de procesos.

Su capacidad para describir con precisión el comportamiento de sistemas multicomponentes en una amplia gama de condiciones lo hace particularmente adecuado para abordar sistemas complejos como el proceso de humidificación.¹⁰⁷

Además, el modelo de Peng-Robinson tiene en cuenta las desviaciones del comportamiento ideal y las interacciones entre moléculas de manera efectiva, lo que es esencial para capturar los fenómenos termodinámicos presentes en la torre de humidificación.

Su aplicabilidad se ha demostrado en una variedad de aplicaciones industriales y de procesos, respaldando su elección como una herramienta robusta y confiable para representar las propiedades termodinámicas, los equilibrios de fases y la transferencia de calor en esta simulación.¹⁰⁷ En la figura 11 se representa la selección del modelo termodinámico en el simulador DWSIM.

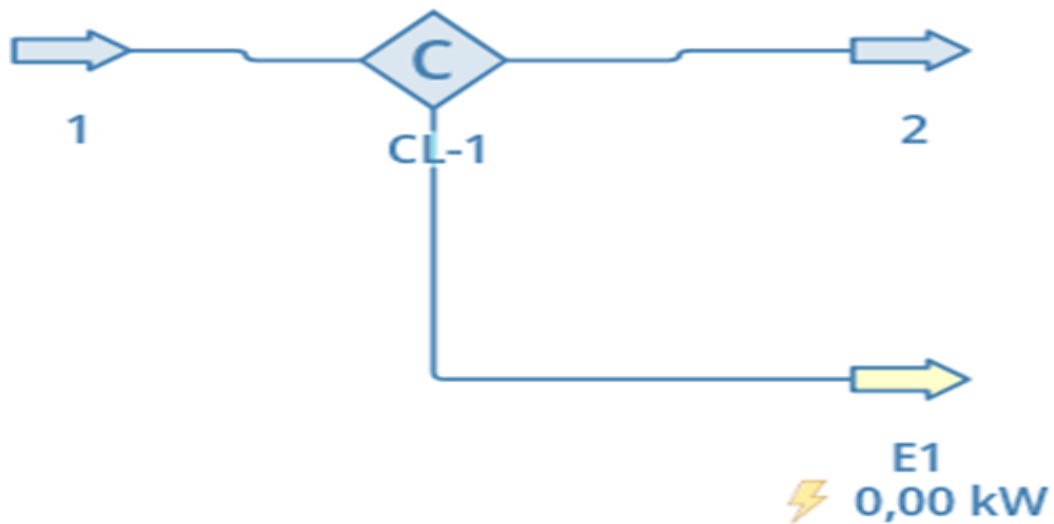
Figura 11. Selección del modelo de Peng-Robinson en el simulador DWSIM



Fuente: Elaboración propia.

2.1.6.2 *Selección de la Torre de humidificación*: Para poder llevar a cabo la simulación, es indispensable seleccionar adecuadamente el tipo de equipo a emplear; en el caso de la torre de humidificación, la selección se hace en el apartado de “coolers”, refrigeradores, el cual se puede encontrar en la cinta inferior del simulador DWSIM. El esquema del equipo se representa en la figura 12:

Figura 12. Esquema de la torre de humidificación en el programa DWSIM

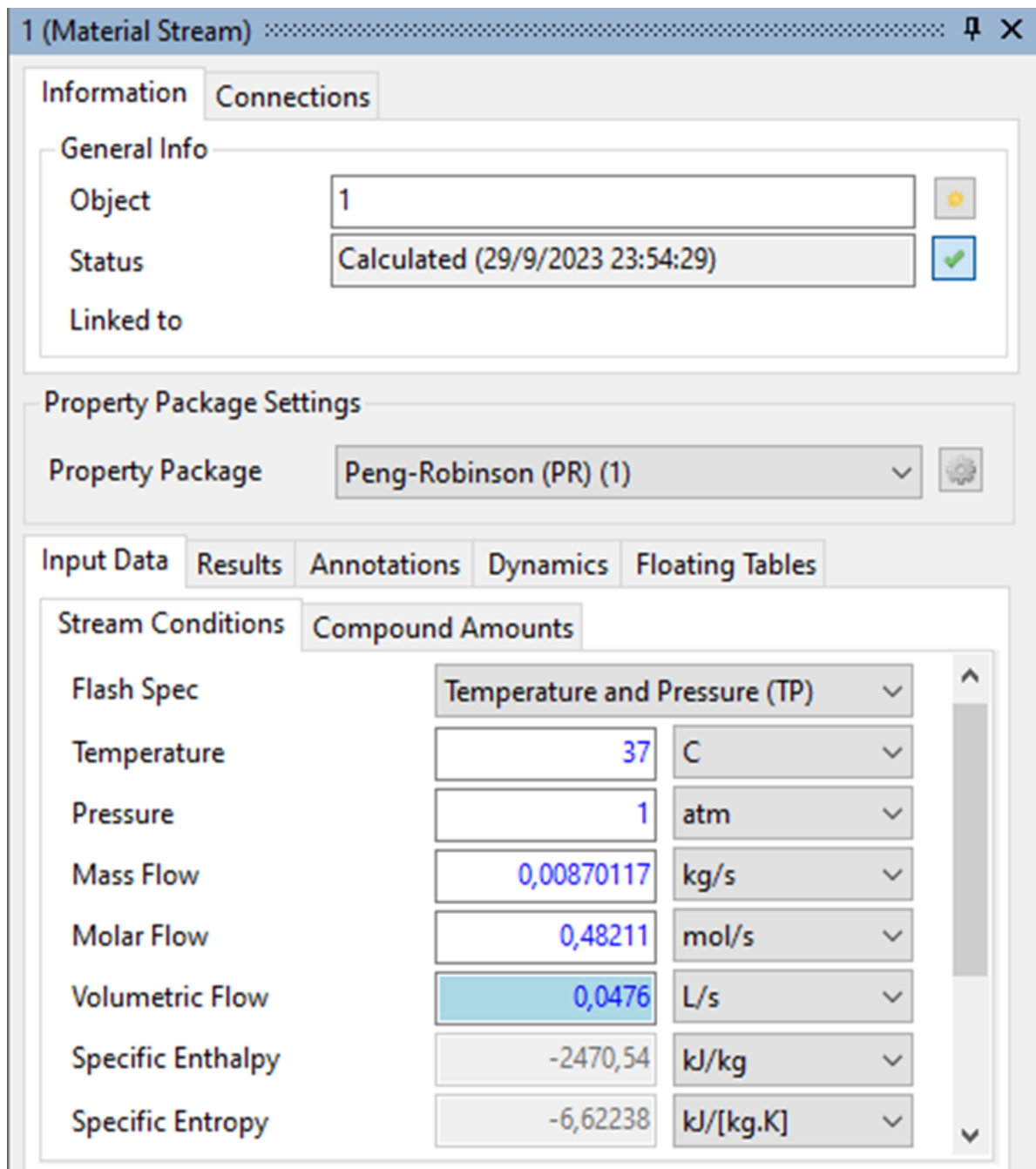


Fuente: Elaboración propia.

2.1.7 *Definición de los componentes que influyen en la simulación*. En la simulación de la torre de humidificación, se definen dos componentes principales: agua (H₂O) y aire. El agua, representada por su fórmula química H₂O, es esencial para el proceso de humidificación, ya que se evapora y se mezcla con el aire para aumentar la humedad relativa del flujo de salida. Sus propiedades termodinámicas críticas, como la temperatura crítica y la presión crítica, son fundamentales para calcular la fase de vapor en la torre.

Por otro lado, el componente de aire se modela como una mezcla binaria de nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), los dos componentes principales del aire atmosférico. Cada uno de estos gases se caracteriza mediante sus propias propiedades termodinámicas críticas. Esta representación permite simular con precisión el comportamiento del aire en el proceso de humidificación, considerando las interacciones entre estos gases y su influencia en la transferencia de calor y masa en la torre. En la figura 13 se ilustran las propiedades que mantiene el agua en la corriente de entrada de la torre:

Figura 13. Propiedades del agua a la entrada de la torre de humidificación



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Diseño de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado en el Software QCAD

2.2.1 Diseño e Implementación de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado.

Con respecto a la labor de enfriar el agua caliente procedente de la torre de destilación del laboratorio, hemos desarrollado un diseño para una torre de humidificación de alta eficiencia utilizando la aplicación de código abierto QCAD.

El propósito fundamental de esta torre es disminuir la temperatura del agua caliente a través de un proceso de enfriamiento controlado por evaporación. El diseño se ha concebido de manera holística con el objetivo de asegurar un rendimiento máximo y un funcionamiento confiable en el entorno del laboratorio.

El diseño de la torre de humidificación se ha desarrollado con base en una estructura eficiente y funcional, con un enfoque particular en la optimización del enfriamiento por evaporación.

La torre se compondrá de una estructura vertical que albergará un sistema de distribución de agua caliente en su parte superior. El área transversal de la torre ha sido establecida en 0.25 m² para asegurar un flujo de aire adecuado y una interacción eficiente entre el agua caliente y el aire. A medida que el agua caliente desciende por el sistema de distribución, se encontrará con una corriente de aire humidificado ascendente. Este aire humidificado inducirá la evaporación controlada del agua caliente, resultando en un descenso de la temperatura del líquido.

El diseño también contempla que la cantidad de agua proveniente de la torre sea regulada a una cantidad constante de agua caliente y el flujo de aire que ingresan a la torre. Esto permitirá ajustar la tasa de evaporación y, por ende, la cantidad de enfriamiento proporcionado.

Asimismo, se deberá considerar materiales resistentes a la corrosión y duraderos para la construcción de la torre, garantizando así su funcionalidad a largo plazo en el entorno del laboratorio. En conjunto, el diseño de la torre de humidificación busca ofrecer una solución confiable y efectiva para enfriar el agua caliente de la torre de destilación, contribuyendo de manera significativa al funcionamiento global del sistema de laboratorio.

2.2.2 Caudal y Velocidad de Aire Entrante a la Torre. La relación típica de aire/agua en sistema de humidificación utilizada por diversos fabricantes se encuentra en el intervalo de 20 – 30 de aire/litro de agua. Para el caso de esta torre de humidificación en específico, se trabaja con un caudal de agua de 0.0476 litros/segundos y con una relación agua/aire de 20 litros/litros, por lo que, el caudal de aire a emplear 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 calcular la velocidad por la cual transita el aire por la torre de humidificación se utiliza 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 Presión Estática de la Torre. La presión estática en una torre de humidificación es la medida de la presión del aire en el interior de la torre cuando el flujo de aire se encuentra en un estado estacionario o se mueve a una velocidad constante.

Esta presión estática es esencial para evaluar la resistencia al flujo de aire en la torre y se emplea para asegurarse de que el sistema de ventilación pueda superar cualquier obstrucción, conducto o componente del sistema, lo que garantiza una distribución uniforme de la humedad en el aire.

En el diseño y funcionamiento de una torre de humidificación, la presión estática es un factor fundamental que influye en la eficiencia y la capacidad de humidificación del sistema. Se mide en unidades de presión como pascales (Pa) y es esencial para garantizar un rendimiento efectivo y uniforme de la torre de humidificación.

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

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

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 selección del ventilador se ha basado en la combinación de eficiencia energética, rendimiento y durabilidad.

Esto no solo garantiza un funcionamiento confiable y sostenible de la torre de humidificación, sino que también contribuye a la eficacia general del sistema de refrigeración en el laboratorio, permitiendo así la obtención de resultados precisos y consistentes en los experimentos.

Un ventilador del tipo axial es un dispositivo diseñado para mover el aire de manera eficiente a lo largo de su eje central en una dirección paralela a este eje. Sus palas, dispuestas de forma similar a las aspas de un avión, generan un flujo de aire unidireccional, lo que significa que el aire entra por un extremo del ventilador y sale en la misma dirección en la que giran las palas.

Estos ventiladores son ideales para aplicaciones que requieren un alto caudal de aire a bajas presiones, como sistemas de ventilación industrial, enfriamiento de equipos electrónicos y radiadores de automóviles.

La potencia del ventilador de la torre se refiere a la cantidad de energía necesaria para que el ventilador pueda mover el flujo de aire a través del sistema de ventilación y distribución de humedad.

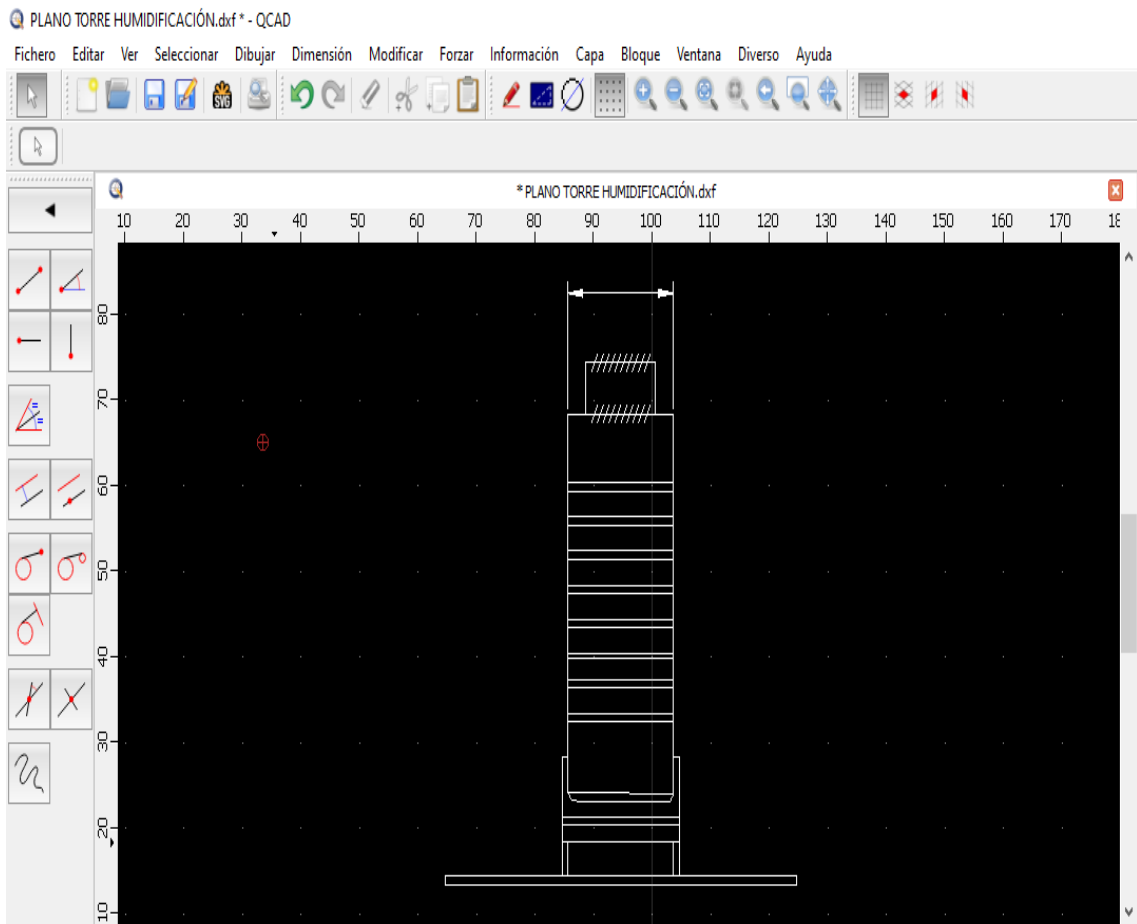
Esta potencia se mide en vatios (W) o en caballos de fuerza (hp) y es un factor crítico en el rendimiento y eficiencia de la torre de humidificación. La cantidad de potencia requerida depende de varios factores, como el caudal de aire deseado, la presión estática del sistema y la eficiencia del propio ventilador.

Para el cálculo de la potencia y una eficiencia de la torre del 90%, se relacionan estos 3 factores como se muestra en la ecuación 10:

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

En la figura 14, se ilustra el armazón y el ventilador que presenta la torre de humidificación:

Figura 14. Representación del armazón y ventilador de la torre



Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 Selección de la Fuente de Agua Caliente. La elección de la fuente de agua caliente para el sistema de enfriamiento de la torre de humidificación ha sido una decisión estratégica clave en el proceso de diseño. La fuente seleccionada es el agua residual procedente de la torre de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias, lo que refleja una reutilización eficiente de recursos y una integración coherente entre los diversos sistemas involucrados.

La selección de la fuente de agua caliente no solo garantiza la coherencia entre los sistemas internos del laboratorio, sino que también demuestra un enfoque innovador en la búsqueda de soluciones sostenibles.

Esta sinergia entre la torre de destilación y la torre de humidificación refleja una planificación cuidadosa y una visión integrada para maximizar la eficiencia y minimizar el impacto ambiental en las operaciones del laboratorio.

2.2.6 *Capacidad de la Bomba*. La capacidad de la bomba encargada de transportar el agua desde el destilador hasta la torre de humidificación es un aspecto esencial para asegurar un flujo constante y eficiente del líquido.

Con un caudal de agua a transportar de 0.0476 litros por segundo y una altura estimada de la torre de 2 metros, se ha realizado un cálculo detallado para seleccionar una bomba adecuada que satisfaga estas condiciones.

Para manejar este caudal y la altura mencionada, se ha optado por una bomba centrífuga que pueda generar la presión necesaria para elevar el agua a lo largo de la altura de la torre.

Es importante seleccionar una bomba cuya curva de rendimiento esté en línea con los requisitos del sistema, lo que asegura que la bomba pueda mantener un flujo constante a la altura especificada.

Se debe considerar tanto la capacidad de elevación (presión) como la capacidad de flujo de la bomba para garantizar un suministro constante de agua a la torre de humidificación.

Dado que el caudal está en litros por segundo y la altura está en metros, se divide por 75 para convertir las unidades y obtener la potencia en caballos de fuerza. Sustituyendo los valores proporcionados en la ecuación 11:

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

Donde:

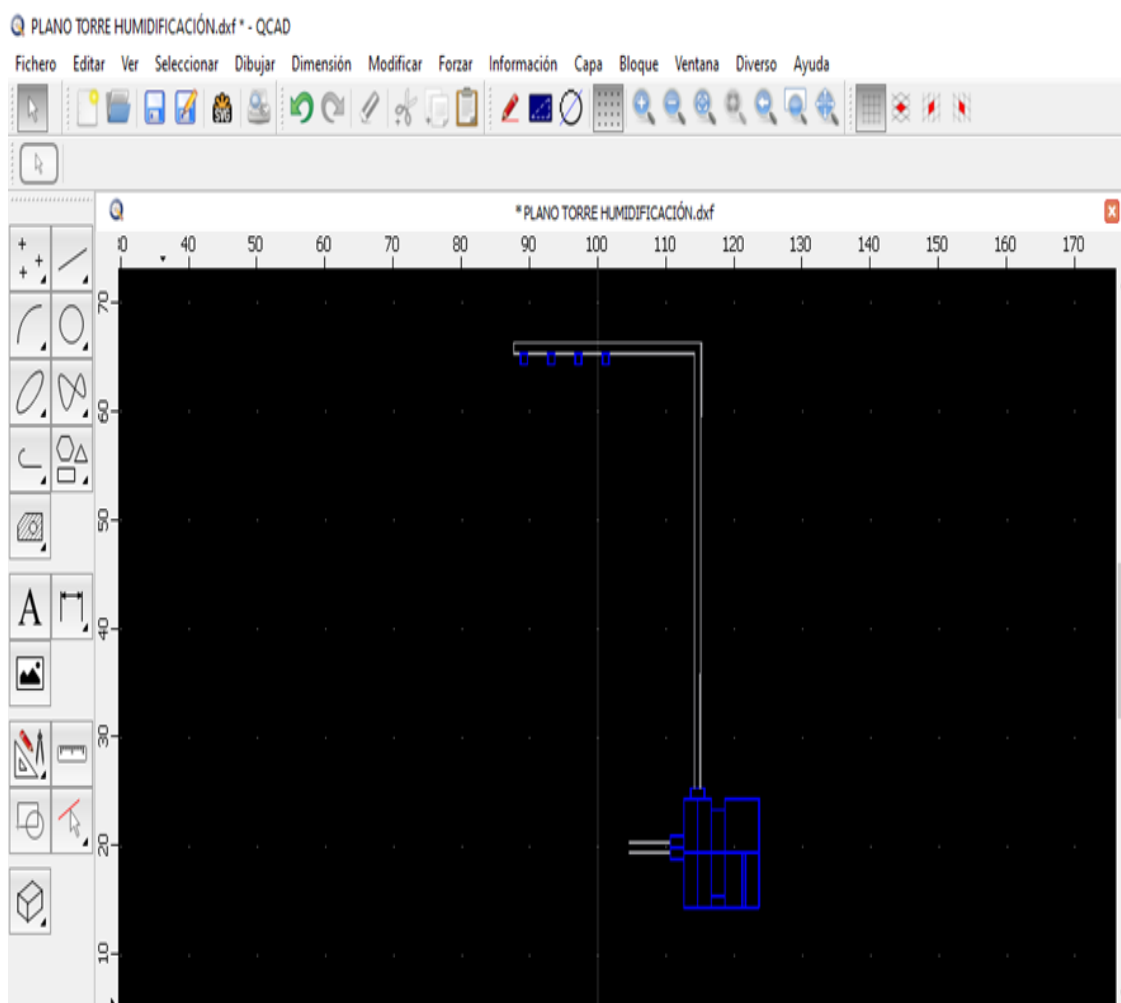
\dot{Q} : Caudal de agua (l.s⁻¹)

H : Altura de la torre (m)

GE : Gravedad específica del agua

En la figura 15 se ilustra la representación de la bomba que impulsará el agua caliente hacia la torre:

Figura 15. Representación gráfica de la bomba en el software QCAD



Fuente: Elaboración propia.

2.2.7 Altura de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado. La determinación de la altura de la torre de humidificación es un paso crucial en el diseño de este sistema. La altura de la torre afectará directamente la eficiencia del proceso de enfriamiento por evaporación y, por lo tanto, debe ser calculada de manera precisa para garantizar el rendimiento óptimo del sistema.

En esta instancia, el objetivo es reducir la temperatura del agua caliente procedente de la torre de destilación del laboratorio de Operaciones Unitarias. La altura de la torre de humidificación se determina considerando diversos factores, como la tasa de evaporación requerida, la temperatura del agua caliente y la velocidad del flujo de aire, entre otros.

Una torre más alta proporcionará un tiempo de contacto más largo entre el agua caliente y el aire humidificado, permitiendo así una mayor transferencia de calor y una mayor evaporación.

La determinación de la altura de una torre de enfriamiento se fundamenta mayormente en aspectos termodinámicos y de transferencia de calor. La altura de la torre guarda una correlación directa con la eficiencia del proceso de enfriamiento y puede ajustarse de acuerdo a las particularidades del diseño requerido. 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 típico del aire se encuentra en el rango de 10 a 100 W.m⁻².°C⁻¹), a la hora de realizar los cálculos, se elegirá el valor de 100 W.m⁻².°C⁻¹, suponiendo una elevada transferencia de calor por convección en el sistema.

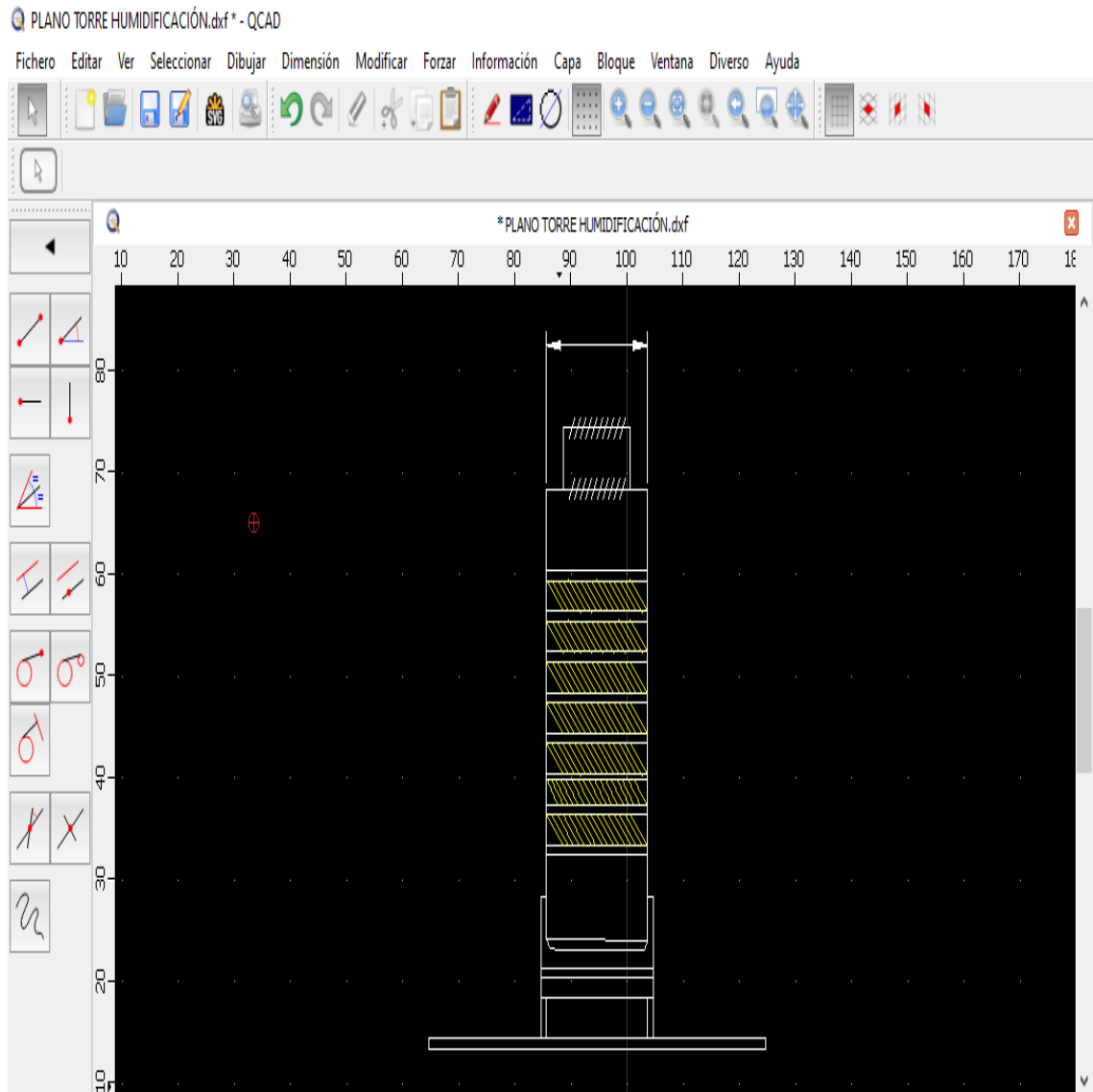
2.2.8 Dimensiones del Relleno. La altura recomendada para el relleno de lámina ondulada en una torre de humidificación depende de varios factores, incluida la eficiencia de transferencia de masa y calor deseada, así como las condiciones específicas de tu aplicación. Sin embargo, una regla general es que el relleno de lámina ondulada debe cubrir una porción significativa de la altura total de la torre para asegurar una humidificación efectiva.

En muchas aplicaciones, se recomienda que el relleno de lámina ondulada ocupe al menos el 80% de la altura de la torre. Esto permite que el aire tenga un contacto prolongado con la superficie de agua en el relleno, lo que facilita una mayor transferencia de masa y calor, lo que resulta en una mejor humidificación. La determinación matemática de la altura de relleno se realiza utilizando la ecuación 13:

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

Implementando el relleno a la torre de humidificación, la torre de humidificación queda representada como se ilustra en la figura 16:

Figura 16. Representación del empaque en la torre vista en QCAD

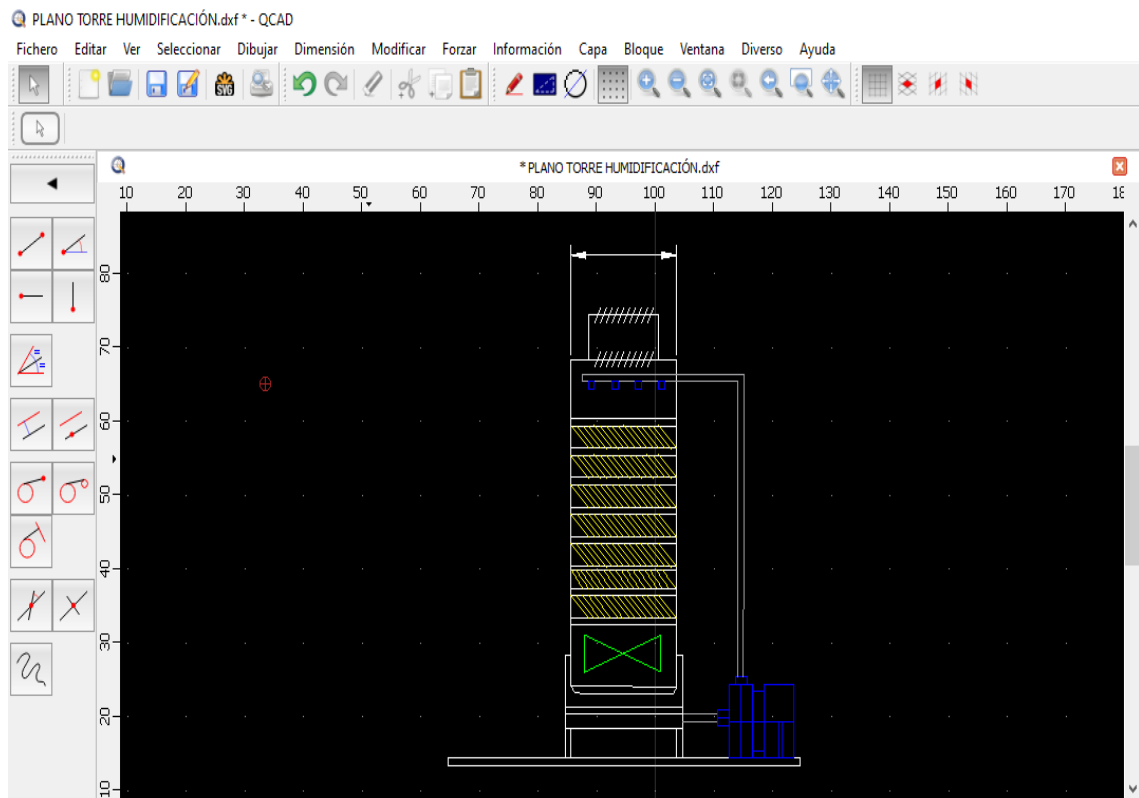


Fuente: Elaboración propia.

2.2.9 Representación de Componentes de la Torre en el Software QCAD. El software QCAD cuenta con una variedad de herramientas útiles para la representación de los diferentes componentes que conforman la torre de humidificación.

Una vista final de la torre de humidificación, en donde engloba todas las partes que la componen se ilustra en la figura 17:

Figura 17. Representación final de la torre vista desde QCAD



Fuente: Elaboración propia.

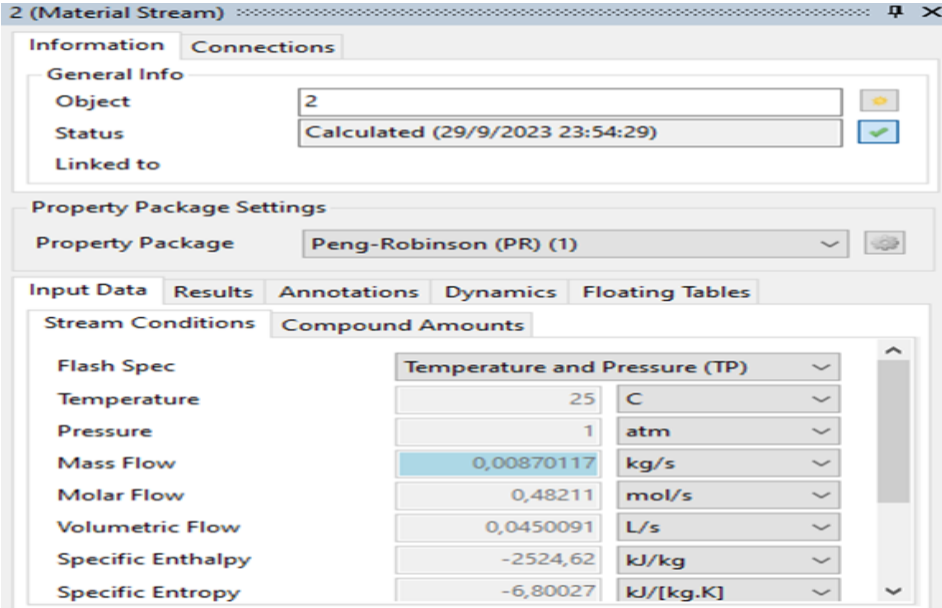
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Simulación de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado en el Programa DWSIM

En esta sección, se presentarán y examinarán en detalle los resultados derivados de las simulaciones llevadas a cabo en el estudio de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado. El enfoque estará en la cantidad de calor intercambiado entre el aire y el agua, lo cual resulta fundamental para comprender el comportamiento térmico de la torre en diversas condiciones operativas. Los resultados se expondrán a través de gráficos, tablas y análisis minuciosos, destacando las variaciones en los perfiles de temperatura y la cantidad de calor transferido a lo largo de la torre. Estos hallazgos son cruciales para evaluar y optimizar el desempeño de la torre de humidificación.

En la sección de simulación, el enfoque principal se dirige hacia la cantidad de calor que se intercambia entre el agua y el aire que interactúan dentro de la torre de humidificación. El objetivo de la simulación es alcanzar una temperatura de 25°C al final del proceso, como se ilustra en la Figura 18 del simulador DWSIM. Este parámetro es fundamental para evaluar el rendimiento y la eficiencia del proceso de humidificación en la torre:

Figura 18. Condición de temperatura de salida del agua a la salida de la torre



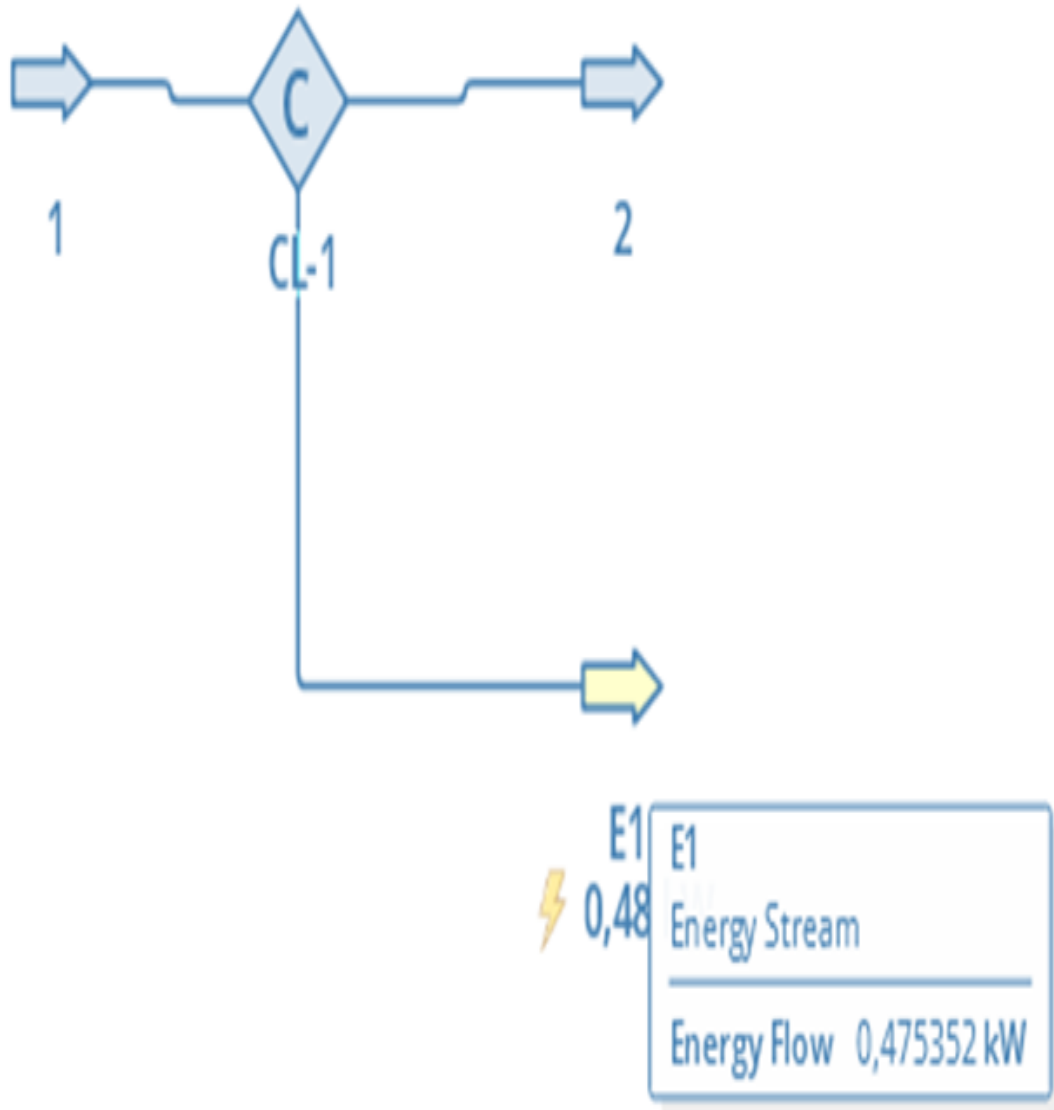
2 (Material Stream)		
Information		
General Info		
Object	2	
Status	Calculated (29/9/2023 23:54:29)	
Linked to		
Property Package Settings		
Property Package	Peng-Robinson (PR) (1)	
Input Data		
Stream Conditions		
Flash Spec	Temperature and Pressure (TP)	
Temperature	25	C
Pressure	1	atm
Mass Flow	0,00870117	kg/s
Molar Flow	0,48211	mol/s
Volumetric Flow	0,0450091	L/s
Specific Enthalpy	-2524,62	kJ/kg
Specific Entropy	-6,80027	kJ/[kg.K]

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de la simulación, se ha determinado 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 calor. Esta pérdida de calor se produce debido a la interacción que se da entre el agua caliente y el aire circulante que entra a la torre de humidificación de tiro forzado.

La cantidad de calor intercambiado entre el agua y el aire es un indicador significativo del comportamiento termodinámico del proceso y proporciona información valiosa para comprender la eficiencia y el rendimiento de la torre de humidificación en diversas condiciones de operación. La cantidad de calor perdido se refleja en la figura 19:

Figura 19. Cantidad de calor perdido por el agua en el proceso de refrigeración.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al aire que circula en la torre, las condiciones de entrada configuradas en el simulador DWSIM, se reflejan en la figura 20:

Figura 20. Propiedades de entrada del aire a la torre de humidificación

The screenshot displays the '1 (Material Stream)' window in DWSIM. It is divided into several sections:

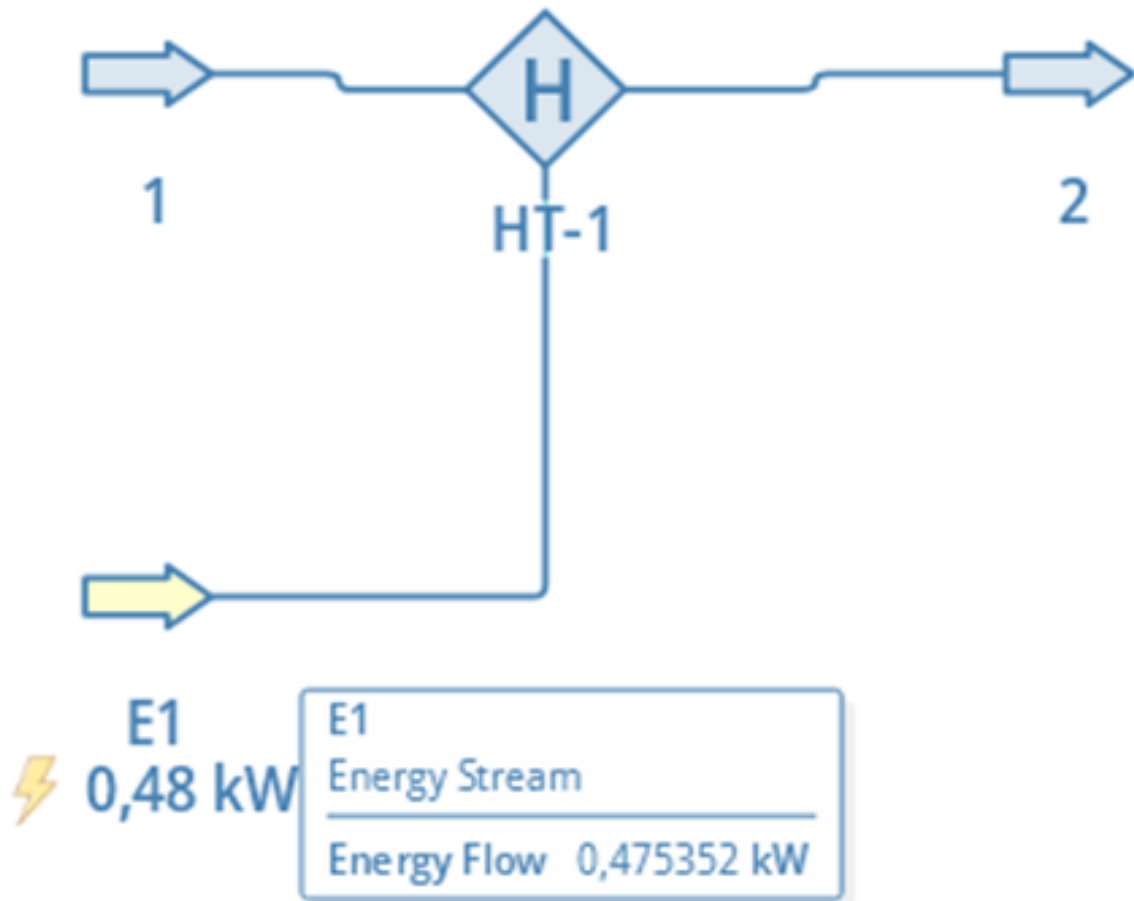
- Information:** Contains 'General Info' with fields for 'Object' (1), 'Status' (Calculated (30/9/2023 0:31:40)), and 'Linked to'.
- Property Package Settings:** Shows 'Property Package' set to 'Peng-Robinson (PR) (1)'.
- Input Data:** Includes tabs for 'Results', 'Annotations', 'Dynamics', and 'Floating Tables'. Under 'Input Data', there are sub-tabs for 'Stream Conditions' and 'Compound Amounts'. The 'Stream Conditions' table is as follows:

Stream Conditions	Value	Unit
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: Elaboración propia.

El calor que recibe el aire de parte del agua caliente se representa de la siguiente manera en la figura 21:

Figura 21. Calor suministrado al aire durante el proceso de refrigeración del agua

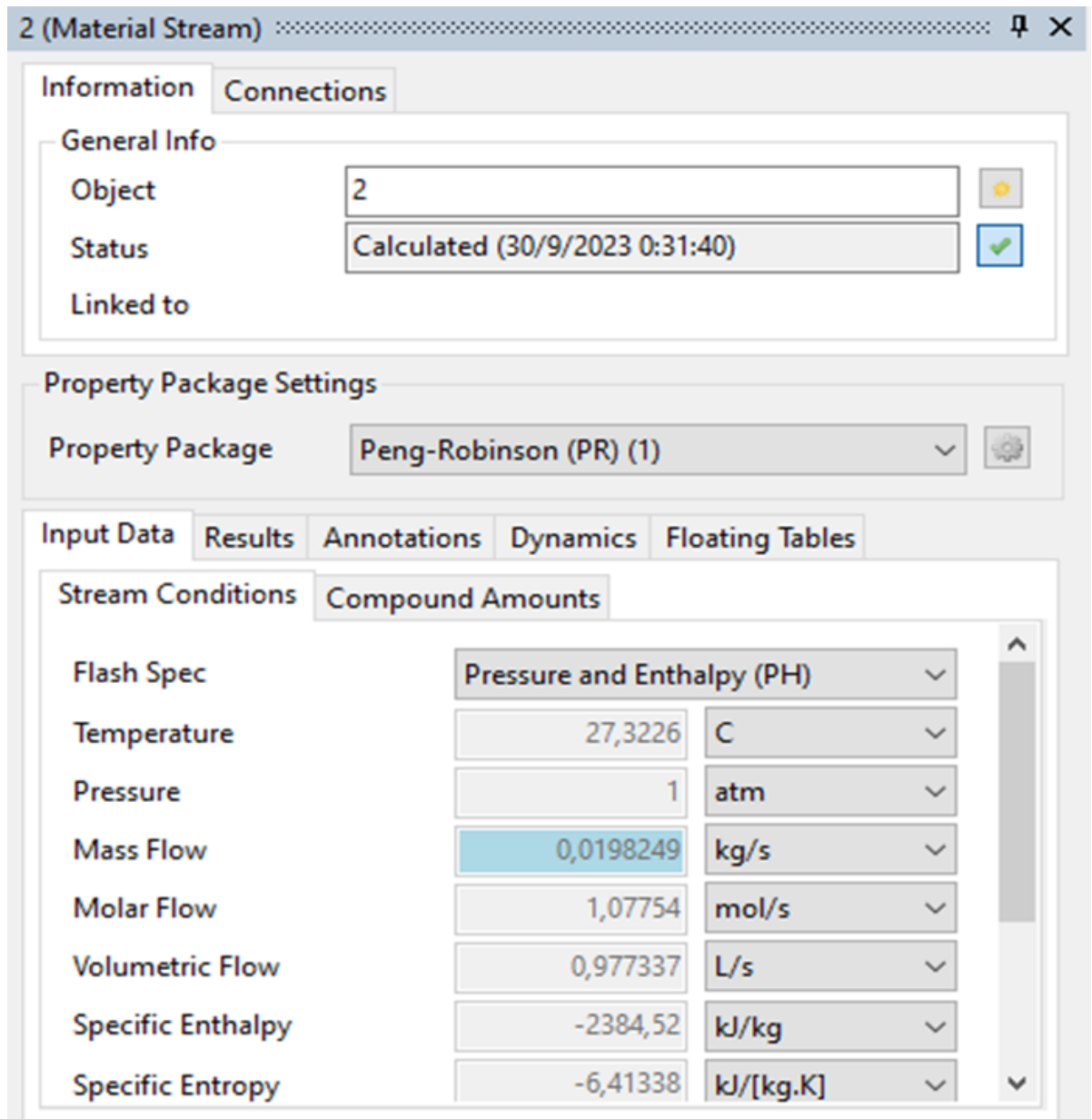


Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de la simulación, se observa que el aire, después de recibir un total de 0.475352 kilovatios (kW) de calor del agua durante el proceso de humidificación en la torre de tiro mecánico forzado, experimentó un incremento significativo en su temperatura. La temperatura del aire alcanzada en la salida de la torre se muestra en la figura 22.

Este aumento de temperatura se debe al flujo de calor entrante desde el agua caliente y refleja el efecto del proceso de evaporación y la transferencia de calor en la torre. Este hallazgo es crucial para comprender cómo la energía térmica se transfiere entre los fluidos de trabajo y cómo la temperatura del aire se modifica a medida que atraviesa la torre de humidificación, lo que tiene implicaciones importantes en el rendimiento y la eficiencia del sistema en diferentes condiciones operativas.

Figura 22. Condiciones del aire a la salida de la torre de humidificación



2 (Material Stream)

Information Connections

General Info

Object: 2

Status: Calculated (30/9/2023 0:31:40)

Linked to:

Property Package Settings

Property Package: Peng-Robinson (PR) (1)

Input Data Results Annotations Dynamics Floating Tables

Stream Conditions Compound Amounts

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: Elaboración propia.

3.2 Diseño del Plano de la Torre de Humidificación de Tiro Mecánico Forzado en QCAD

En la fase de diseño de la torre de humidificación, se han desarrollado planos detallados que presentan las dimensiones y especificaciones clave de la torre. Estos planos proporcionan una representación visual precisa de la estructura de la torre y los componentes esenciales del sistema.

3.2.1 *Caudal y Velocidad de Aire Entrante A la Torre.* Se reemplazan los datos disponibles en las ecuaciones 7 y 8:

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

Dado que esta es una potencia muy baja, es posible que en la práctica se utilice una bomba con una potencia nominal más cercana y superior, como por ejemplo 0.25 hp o incluso 0.5 hp, dependiendo de las opciones disponibles en el mercado y de las necesidades específicas del sistema.

Para este caso es recomendable la elección de una bomba de 0.50 hp de potencia, para poder manipular correctamente el agua que entre a la torre de humidificación.

3.2.5 *Altura de la Torre.* Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 12:

$$H = \frac{\dot{Q}}{h \cdot A \cdot \Delta T}$$
$$H = \frac{475.352 \text{ w}}{100 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.25 \cdot (37 - 25) ^\circ\text{C}}$$
$$H = 1.58 \text{ m} \approx 1.60 \text{ m}$$

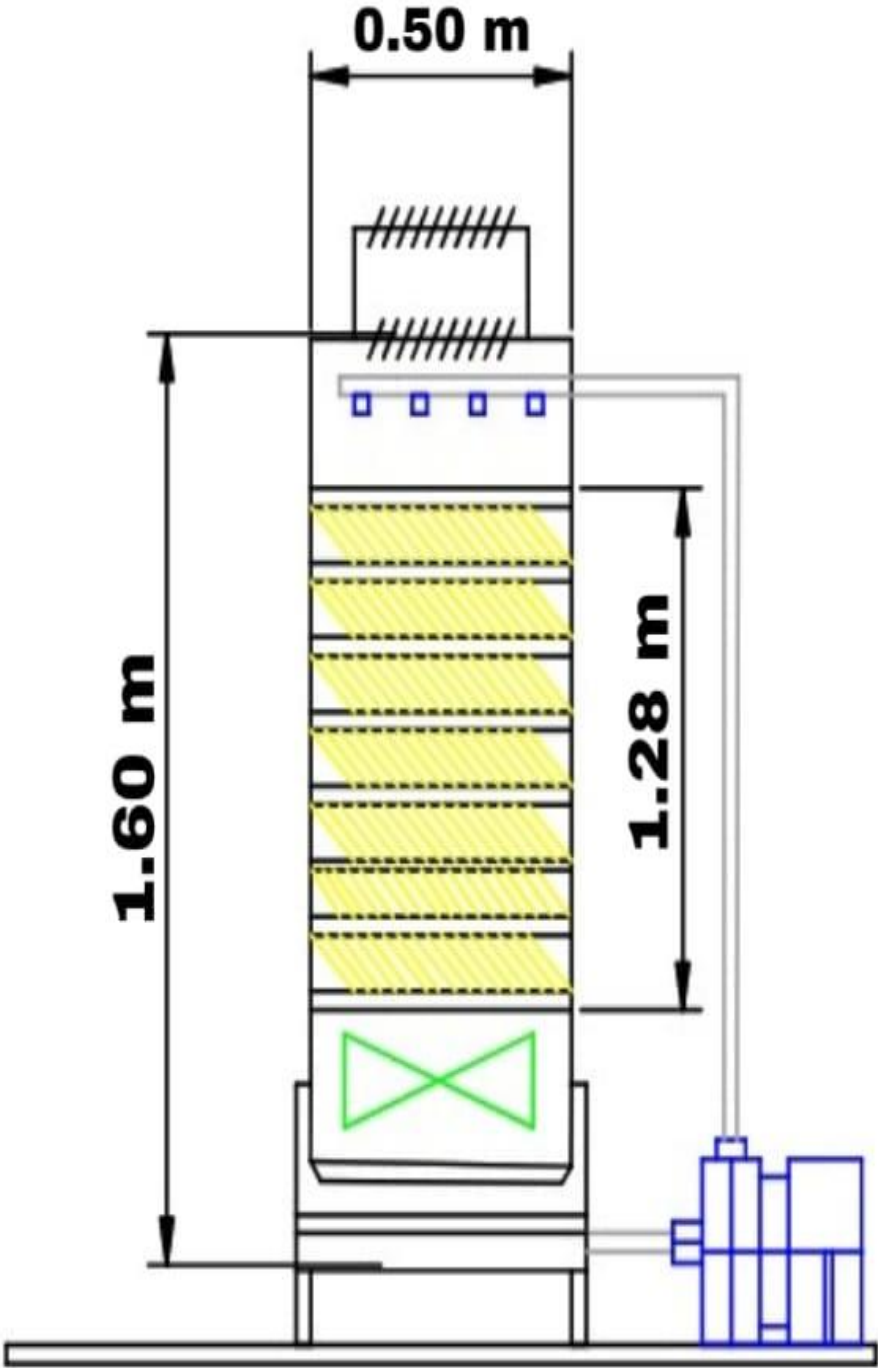
3.2.6 *Altura de Relleno.* Se reemplazan los datos disponibles en la ecuación 13:

$$Z_{relleno} = 0.80 \cdot H$$
$$Z_{relleno} = 0.80 \cdot 1.60 \text{ m}$$
$$Z_{relleno} = 1.28 \text{ m}$$

La torre de humidificación tiene una altura total de 1.60 metros, lo que la convierte en una estructura compacta pero efectiva para su propósito. La altura del relleno de la torre se establece en 1.28 metros, lo que permite una distribución uniforme de agua para la humidificación.

Además, el ancho de la torre se ha dimensionado a 25 cm para garantizar una adecuada circulación de aire a través de la estructura. En la figura 23 y el anexo 1, se visualiza el plano de la torre diseñado en el programa QCAD:

Figura 23. Plano acotado de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado en QCAD



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los componentes, se ha incluido una bomba centrífuga con una potencia de 0.50 hp para garantizar un suministro de agua eficiente al sistema de humidificación. Además, se ha incorporado un ventilador con una potencia de 0.25 hp para asegurar la circulación adecuada del aire a través de la torre y facilitar el proceso de humidificación.

Estos planos proporcionan una visión completa y detallada de la torre de humidificación diseñada, incluyendo sus dimensiones físicas y la integración de componentes críticos para su funcionamiento óptimo. También las vistas laterales y superior se pueden apreciar en los anexos 2, 3 y 4. Con esta información, se logra una base sólida para la posible construcción y puesta en marcha de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el laboratorio de Operaciones Unitarias.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La identificación de las variables y parámetros de diseño fundamentales tuvo un impacto significativo en el funcionamiento de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado. Este conocimiento proporciona una base sólida para el diseño y la simulación del proceso, permitiendo un enfoque preciso y efectivo en el desarrollo de esta tecnología.
- La simulación exitosa del proceso de una torre de humidificación de tiro mecánico forzado utilizando el software DWSIM demuestra su utilidad como herramienta de diseño y análisis. La importancia de contar con herramientas de simulación para optimizar el funcionamiento de la torre y evaluar su desempeño en diferentes escenarios.
- Los cálculos de ingeniería realizados para el diseño de la torre de humidificación, junto con su dimensionamiento, son fundamentales para garantizar que la torre funcione eficazmente. Se destaca la relevancia de los cálculos precisos en el diseño de equipos de ingeniería y su impacto en la eficiencia operativa.
- La creación exitosa de un plano detallado de la torre de humidificación en el software QCAD demuestra su utilidad como herramienta de diseño. Esta conclusión resalta la importancia de contar con programas de diseño para representar de manera clara y precisa las estructuras y componentes de ingeniería, facilitando la comunicación y la construcción futura de la torre.
- La propuesta de construir una torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Técnica de Machala es fundamental para aplicar y complementar los conocimientos obtenidos en la parte teórica respecto al proceso de humidificación de una manera práctica y didáctica, para poder comprender los aspectos importantes en su funcionamiento y sus parámetros de operación.

4.2 Recomendaciones

4.2.1 Simulación

- Se recomienda llevar a cabo un estudio detallado de las condiciones de operación de la torre de humidificación. Ajustar parámetros como la temperatura del agua de entrada y el caudal de aire puede influir significativamente en la eficiencia del proceso y la cantidad de calor transferido. Una optimización cuidadosa permitirá maximizar la eficiencia energética y la capacidad de humidificación de la torre.
- Aunque la simulación proporciona información valiosa, se sugiere realizar experimentos prácticos para validar los resultados. La recopilación de datos experimentales reales ayudará a confirmar la precisión del modelo termodinámico y garantizará que las condiciones de la torre de humidificación se ajusten a las expectativas.
- La implementación de un sistema de monitoreo continuo de temperatura y humedad en la torre de humidificación en tiempo real. Esto permitirá un control preciso del proceso y la capacidad de ajustar las condiciones operativas de manera oportuna para mantener un rendimiento óptimo.

4.2.2 Diseño

- Se recomienda llevar a cabo análisis adicionales para determinar si las dimensiones seleccionadas (altura de 1.60 metros, altura de relleno de 1.28 metros y ancho de 25 cm) siguen siendo las más adecuadas en función de las necesidades específicas de la aplicación. Es importante considerar cualquier cambio en la carga de trabajo o en los requisitos de humidificación que puedan surgir con el tiempo.
- A medida que avanza el diseño, se aconseja realizar un análisis exhaustivo de alternativas de componentes, especialmente la bomba centrífuga y el ventilador, para asegurarse que se han seleccionado las opciones más eficientes y adecuadas para la operación.
- Es importante considerar el impacto ambiental del diseño de la torre, especialmente en términos de consumo de energía y recursos. Realizar un análisis de ciclo de vida para evaluar y minimizar cualquier impacto negativo en el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Erazo-Arteaga, V. A. El Diseño, La Manufactura y Análisis Asistido Por Computadora (CAD/CAM/CAE) y Otras Técnicas de Fabricación Digital En El Desarrollo de Productos En América Latina. *Información tecnológica* **2022**, 33 (2), 297–308. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200297>.
- (2) Autodesk. *Del dibujo a mano al dibujo asistido por computadora, beneficios de la transición a CAD*. <https://blogs.autodesk.com/latam/2016/02/25/del-dibujo-a-mano-al-dibujo-asistido-por-computadora-beneficios-de-la-transicion-a-cad/>.
- (3) Pasha, M. K.; Dai, L.; Liu, D.; Guo, M.; Du, W. An Overview to Process Design, Simulation and Sustainability Evaluation of Biodiesel Production. *Biotechnol Biofuels* **2021**, 14 (1), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>.
- (4) Gutierrez, E. Balance Energético de La Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido Del Laboratorio de Conversión de Energía, 2021.
- (5) Montes Valencia, N. Industria Química: Importancia y Retos. *Lámpsakos* **2015**, 12, 72–85.
- (6) Cárdenas-Rodríguez, R. E.; García Solorzano, L. A.; Esparza Lopez, C. J.; Moreno Peña, J. R.; Navarro Arellano, J. F. Sistemas de Enfriamiento Evaporativo Para Uso En Elementos Verticales: Una Revisión Del Estado Del Arte. *Ciencia Nicolaita* **2022**, No. 87. <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663>.
- (7) Torres, Y. Eficiencia Energética y Ahorro de Energía Residencial. *South Sustainability* **2020**, 1, 1–4. <https://doi.org/10.21142/ss-0101-2020-011>.
- (8) Shublaq, M.; Sleiti, A. K. Experimental Analysis of Water Evaporation Losses in Cooling Towers Using Filters. *Appl Therm Eng* **2020**, 175 (April), 115418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115418>.
- (9) Yang, Y.; Cui, G.; Lan, C. Q. Developments in Evaporative Cooling and Enhanced Evaporative Cooling - A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, 113 (May), 109230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.037>.
- (10) McCabe, W.; Smith, J.; Harriott, P. *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química*, Séptima.; Ciudad de México, 2007.

- (11) Liu, X.; Wang, X.; Kapteijn, F. Water and Metal-Organic Frameworks: From Interaction toward Utilization. *Chem Rev* **2020**, *120* (16), 8303–8377. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00746>.
- (12) XIONG, Y.; MENG, Q. shi; GAO, J.; TANG, X. fang; ZHANG, H. fu. Effects of Relative Humidity on Animal Health and Welfare. *J Integr Agric* **2017**, *16* (8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0).
- (13) Adkins, K. A.; Sescu, A. Wind Farms and Humidity. *Energies (Basel)* **2022**, *15* (7). <https://doi.org/10.3390/en15072603>.
- (14) Wilkes, A.; Williams, D. Measurement of Humidity. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine* **2018**, *19* (4), 198–201. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2018.01.009>.
- (15) Acevedo Chávez, R.; Eugenia Costas Basin, M. Determinación de Presiones Parciales: El Caso de H₂O(v) En Aire. *Revista Mexicana de Física E* **2017**, *63* (1), 21–24.
- (16) Freychet, N.; Tett, S. F. B.; Yan, Z.; Li, Z. Underestimated Change of Wet-Bulb Temperatures Over East and South China. *Geophys Res Lett* **2020**, *47* (3), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2019GL086140>.
- (17) Aguilar, H.; Ortega, E. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO, Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- (18) Lai, L.; Wang, X.; Kefayati, G.; Hu, E. Evaporative Cooling Integrated with Solid Desiccant Systems: A Review. *Energies*. MDPI September 1, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14185982>.
- (19) CANDERALIO, M. Diseño De Una Torre De Enfriamiento Usando Visual Basic. **2000**.
- (20) Nourani, Z.; Naserbegi, A.; Tayyebi, S.; Aghaie, M. Thermodynamic Evaluation of Hybrid Cooling Towers Based on Ambient Temperature. *Thermal Science and Engineering Progress* **2019**, *14* (August), 100406. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100406>.
- (21) Obregon Quiñones, L. G.; Pertuz Amaya, J. C.; Domínguez Rambal, R. A. 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* **2017**, 15 (1), 42–52. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.820>.
- (22) Aguirre, J.; Villarroel, C. Diseño de Una Torre de Enfriamiento de Agua Para Una Planta Ensambladora de Vehículos, 2007.
- (23) Chen, X.; Sun, F.; Chen, Y.; Gao, M. Novel Method for Improving the Cooling Performance of Natural Draft Wet Cooling Towers. *Appl Therm Eng* **2019**, 147 (October 2018), 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.076>.
- (24) Guney, P. Humidification and Airway Secretions Management. *Noninvasive Mechanical Ventilation* **2023**, 107–111. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28963-7_10.
- (25) Sun, Y.; Guan, Z.; Hooman, K. 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* **2017**, 79 (September 2016), 618–637. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.151>.
- (26) Liu, N.; Zhang, L.; Jia, X. The Effect of the Air Water Ratio on Counter Flow Cooling Tower. *Procedia Eng* **2017**, 205, 3550–3556. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.925>.
- (27) Guevara Chinchayan, R.; Sosa Sandoval, J.; Chucuya Huallpachoque, R. Temperatura de Los Fluidos de Operación y Su Efecto En El Performance de Una Torre de Enfriamiento de Laboratorio. *INGnosis* **2020**, 6 (2), 1–12. <https://doi.org/10.18050/ingnosis.v6i2.2063>.
- (28) Contreras, O.; Quezada, Lady; Edissón., Q.; Cuenca, F. Ecuación Modelo Operacional Con Aplicación de Balance de Materia En Estado No Estacionario. *Revista Ciencia UNEMI* **2018**, 11 (28), 33–40. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp33-40p>.
- (29) Ndukwu, M. C.; Manuwa, S. I.; Bennamoun, L.; Olukunle, O. J.; Abam, F. I. In-Situ Evolution of Heat and Mass Transfer Phenomena and Evaporative Water Losses of Three Agro-Waste Evaporative Cooling Pads: An Experimental and Modeling Study. *Waste Biomass Valorization* **2019**, 10 (10), 3185–3195. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0315-9>.
- (30) Castelli, M.; Anderson, M. C.; Yang, Y.; Wohlfahrt, G.; Bertoldi, G.; Niedrist, G.; Hammerle, A.; Zhao, P.; Zebisch, M.; Notarnicola, C. Two-Source Energy Balance

- Modeling of Evapotranspiration in Alpine Grasslands. *Remote Sens Environ* **2018**, 209 (July 2016), 327–342. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.062>.
- (31) ARCUX. *¿Qué es AutoCAD y para qué sirve?* . <https://arcux.net/blog/que-es-autocad-y-para-que-sirve/> (accessed 2023-02-23).
- (32) QCAD. *QCAD - QCAD: 2D CAD FOR WINDOWS, LINUX AND MAC*. <https://www.qcad.org/en/> (accessed 2023-02-23).
- (33) Romero Carrillo, P. E. *Guadalinux Y El Diseño Asistido Por Ordenador: Introducción a Qcad*. **2009**, 1–9.
- (34) MUNDOBYTES. *¿Qué es QCAD? Usos, Características, Opiniones, Precios*. <https://mundobytes.com/qcad/> (accessed 2023-02-23).
- (35) Митев, И. С.; Шестопалов, К. К. CAD СИСТЕМЫ – ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЫХ САПР НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура.* = *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura* **2020**, 1 (23).
- (36) Lee, F. W. W.; Ibrahim, A. B. The Design and Effectiveness of Padlock with Closeable Keyhole in Preventing Residential Burglary: A Review. *Review. Journal of Information System and Technology Management* **2018**, 3 (9), 26–36.
- (37) SketchUp_ Qué Es, Para Qué Sirve y Cómo Usarlo, Ejemplos de Proyectos 3D. *ESCUELA BRITÁNICA DE ARTES CREATIVAS Y TECNOLÓGICAS* **2022**.
- (38) Dong, Q.; Yong, Y. Research on SketchUp Application in Graphing of Civil Engineering. *Applied Mechanics and Materials* **2014**, 580–583, 3163–3166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3163>.
- (39) Song, Y.; Jing, Y. Application Prospect of Cad-Sketchup-Ps Integrated Software Technology in Landscape Planning and Design. *Comput Aided Des Appl* **2021**, 18 (S3), 153–163. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.S3.153-163>.
- (40) Jaelani, A.; Kusumah, Y. S.; Turmudi. The Design of Sketchup Software-Aided Generative Learning for Learning Geometry in Senior High School. *J Phys Conf Ser* **2019**, 1320 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1320/1/012048>.
- (41) Crehana. *Aprende Sobre El Software SketchUp y Para Qué Sirve*. **2021**.

- (42) Ircas, L.; Carranza, C. Diseño de Una Columna de Humidificación y Enfriamiento En Tiempo Real, a Través de La Técnica de Modelamiento y Simulación, Universidad Nacional de Trujillo, 2013.
- (43) De Tommaso, J.; Rossi, F.; Moradi, N.; Pirola, C.; Patience, G. S.; Galli, F. Experimental Methods in Chemical Engineering: Process Simulation. *Canadian Journal of Chemical Engineering* **2020**, *98* (11), 2301–2320. <https://doi.org/10.1002/cjce.23857>.
- (44) *Simulación y diseño basado en modelos con Simulink*. <https://la.mathworks.com/products/simulink.html> (accessed 2023-02-21).
- (45) AIMPLAS. *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.> (accessed 2023-02-23).
- (46) DWSIM. *Chemical Process Simulation for Everyone DWSIM for Desktop is free and open-source*. <https://dwsim.org/> (accessed 2023-02-26).
- (47) Rafael, J.; Bracho, O.; Manuel, V.; Velazco, P. Performance and Comparative Analysis of Two Mechanical Draft Laboratory Scale Cooling Towers. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* **2020**, *9* (12), 227–232. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS120061>.
- (48) Medina, M. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO-TORRE Y-ME3003B DE LA REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS. **2010**.
- (49) Mendoza, D.; Gallardo, A. Diseño y Construcción de Un Prototipo de Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido a Contraflujo. **2016**, 11.
- (50) Bergsten, B. Evaporative Cooling Tower and Chilled Beams: Design Aspects for Cooling in Office Buildings in Northern Europe. **2009**.
- (51) Ruíz, A. DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE LOS VENTILADORES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO TOWER TECH Y BOMBAS DISTRIBUIDORAS DE AGUA FRÍA CHILLERS PARA CADA UNA DE LAS PLANTAS DE LA COMPAÑIA. **2008**.
- (52) Ali, M.; Zaman, N. 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. **2019**.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31703.29605/1>.

- (53) López, D.; Barceló, J. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UNA TORRE EMPACADA PARA LA EXPERIMENTACIÓN DE HUMIDIFICACIÓN DE AIRE Y ENFRIAMIENTO DE AGUA A NIVEL LABORATORIO, 2015.
- (54) Apxuac, M. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL INGENIO "SANTA ANA." **2008**.
- (55) Reinoso, D. 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," 2010.
- (56) Hashemi, Z.; Zamanifard, A.; Gholampour, M.; Jane-Sunn, L.; Chi-Chuan, W. Recent Progress in Fill Media Technology for Wet Cooling Towers. *Process* **2023**, *11*, 2578. <https://doi.org/10.3390/pr11092578>.
- (57) Bin, S.; Rahman, M.; Khadem, A. EXPERIMENTAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF MECHANICAL INDUCED DRAFT COOLING TOWER USING DIFFERENT QUANTITY OF CIRCULATING FLUIDS, 2017.
- (58) Kloppers, J.-C. A CRITICAL EVALUATION AND REFINEMENT OF THE PERFORMANCE PREDICTION OF WET-COOLING TOWERS, 2003.
- (59) Jimeno, I.; Olmos, C. Estudio Y Calculo Para La Selección De Una Torre De Enfriamiento En La Compañía Colombina De Clinker S.a., CORPORACION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR, 1999.
- (60) Portero, V.; Valarezo, S. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE AGUA POR EVAPORACION DE TIRO INDUCIDO, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE DE CHIMBORAZO, 2012.
- (61) Rodríguez, L. DETERMINACION DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO FLUJO CRUZADO, Universidad de Guayaquil, 2018.
- (62) Hossain, R.; Moral, N. A.; Islam, M. Performance Investigation of a Wet Counter Flow Type Cooling Tower with Corrugated Film Fill. **2014**.
- (63) Al-Shalawi, I. Experimental Investigation and Thermodynamic Analysis of a Cross-Flow Humidifier. **2014**.

- (64) Alonso, A. P.; Flynn, M. R. Numerical Simulation of a Cooling Tower and Its Plume. **2019**, 55.
- (65) Katagiri, Y.; Araki, H. Dynamic Simulations of the Humidification Tower for an Advanced Humid Air Turbine System. **2011**. <https://doi.org/10.1299/kikaib.77.867>.
- (66) Muñiz, H. Diseño de Un Sistema de Tratamiento de Agua Para Enfriamiento Recirculante Abierto. **2005**.
- (67) GeethaRani, M. A Critical Investigation into the Heat and Mass Transfer Analysis of Counter Flow and Cross Flow Mechanical Draft Wet Cooling Towers. **2019**.
- (68) Hernández Santana, S. DISEÑO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO. **1998**.
- (69) Gladstone, M. John, S.; Lienhard, J. H. Design and Optimization of a Humidifier for an HDH System. **2012**.
- (70) Freire, C. DISEÑO DE UN DESALINIZADOR DE AGUA A ESCALA PILOTO POR HUMIDIFICACIÓN DESHUMIDIFICACIÓN DE AIRE EMPLEANDO COLUMNAS DE BURBUJEO. **2014**.
- (71) Joty, M.; Sharar, S.; Khan, S. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON COUNTER-FLOW INDUCED DRAFT COOLING TOWER AND PERFORMANCE ANALYSIS. **2017**.
- (72) Wadzani, S. G.; Christiana, A.-B.; Imoh, R. U.; Afulike, N. Design , Fabrication and Determination of Performance of a Cooling Tower. **2017**, 3.
- (73) González, O. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DEL DISEÑO DEL ASPERSOR DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO A CONTRA FLUJO, 2015.
- (74) Dalili, F. Humidification in Evaporative Power Cycles. **2003**.
- (75) Morales, N.; Sanchez, A. COMISIONAMIENTO Y AUTOMATIZACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DIDÁCTICA, UBICADA EN EL LABORATORIO DE TRASFERENCIA DE CALOR. **2011**.
- (76) Aguirre, J.; Villarroel, C. Diseño de Una Torre de Enfriamiento de Agua Para Una Planta Ensambladora de Vehículos. **2007**.
- (77) Celestino, S.; Fernandez, H. RENDIMIENTO TÉRMICO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO EN CONTRACORRIENTE. **2017**.

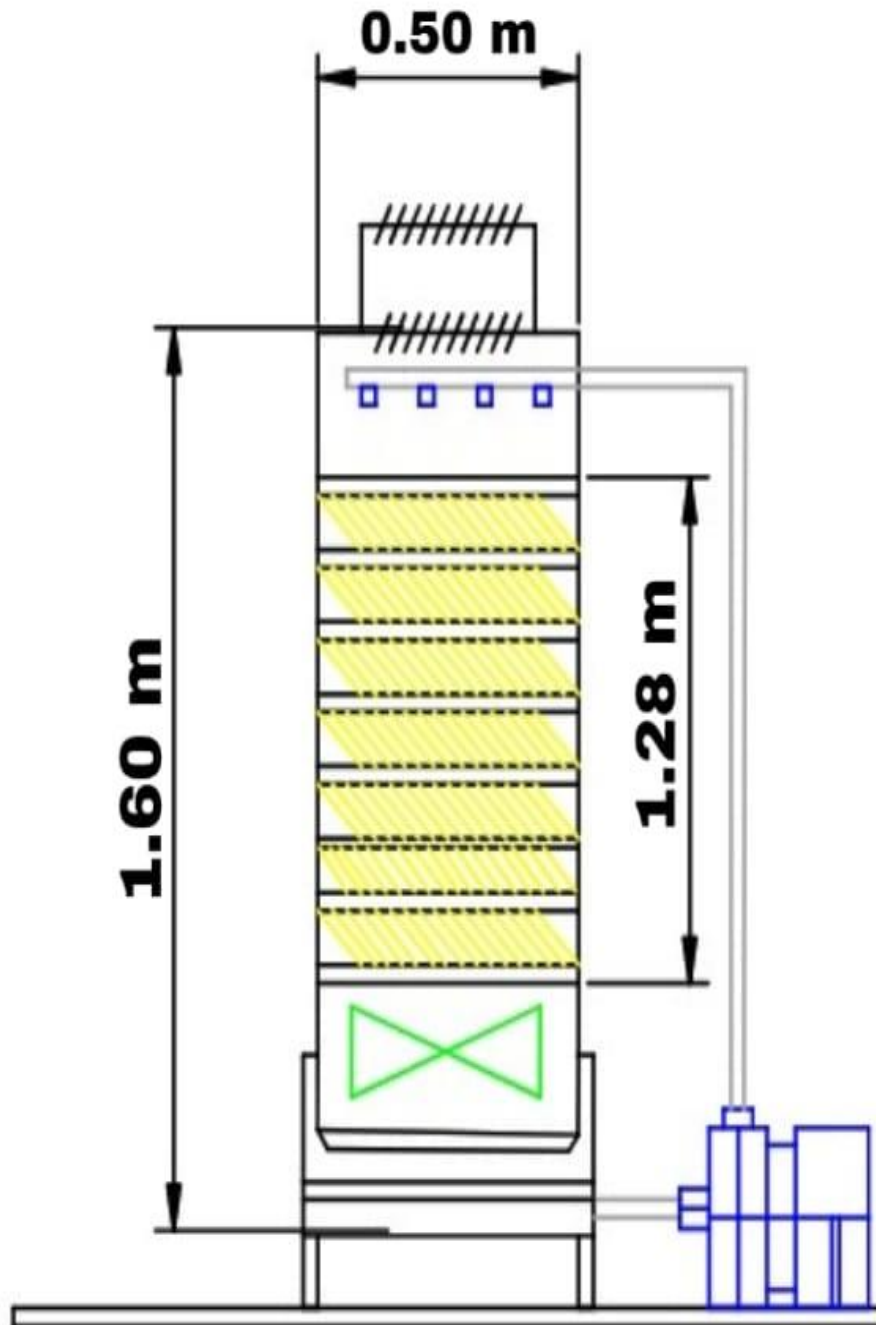
- (78) Padilla, D. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA EN DE ENFRIAMIENTO. **2013**.
- (79) Urrutia, F. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA DE COQUE, COMPAÑIA SIDERURGICA HUACHIPATO. **2014**.
- (80) Carías, A. ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y PROPUESTA DE MEJORA DE EFICIENCIA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO, EN EL ÁREA DE COGENERACIÓN, INGENIO TULULÁ, 2010.
- (81) López, A. Diseño e Implementación de Una Torre de Enfriamiento Con Un Relleno Alternativo Identificando Las Correlaciones de La Tasa Global de Transferencia de Calor y Caída de Presión, 2019.
- (82) Pérez, T. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN LA UEB PRIMAVERA DE PINAR DEL RÍO. **2017**.
- (83) Aguilar, D.; González, I.; Ruiz, N.; Tinetti, M. PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE PLANTA EN UNA CENTRAL GEOTÉRMICA, 2012.
- (84) Arango, R. Diseño de Un Sistema de Control Para La Torre de Enfriamiento de Agua En Planta PROTISA. **2019**.
- (85) Chaves, F.; Alban, E. DISEÑO TEÓRICO Y SELECCIÓN GENERAL DE TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO MECÁNICO. **1995**.
- (86) Villa, S. Determinación de Correlaciones Para Tasa Global de Transferencia de Calor y Caída de Presión En Un Determinado Relleno de Torre de Enfriamiento Utilizando Un Equipo Experimental. **2008**.
- (87) Hamdan Al Assaf, A.; Amhamed, A.; Fawwaz Alrebei, O. State of the Art in Humidified Gas Turbine Configurations. *Energies (Basel)* **2022**, *15* (24), 1–32. <https://doi.org/10.3390/en15249527>.
- (88) Therm, M. Humidification Processes in Gas Turbine Cycles, Lund University, 2005.
- (89) Hensley, J. C. Cooling Tower Fundamentals. Compiled from the Knowledge and Experience of the Entire SPX Cooling Technologies Staff, 2009.

- (90) Raza, H. M. U.; Sultan, M.; Bahrami, M.; Khan, A. A. Experimental Investigation of Evaporative Cooling Systems for Agricultural Storage and Livestock Air-Conditioning in Pakistan. *Build Simul* **2021**, *14* (3), 617–631. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0678-2>.
- (91) KARA, E. HEAT AND MASS TRANSFER ANALYSIS OF A COUNTER FLOW COOLING TOWER UNDER VARIOUS AIR AND WATER FLOW ARRANGEMENTS. **2010**.
- (92) Escaff, C.; Herrera, J. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO DE LA EMPRESA PROPILCO S.A. **2012**.
- (93) Lafta, N.; Kareem, F.; Ghafur, M. Experimental and Numerical Analysis of the Forced Draft Wet Cooling Tower. *Journal of Thermal Engineering* **2023**, *9*, 528–539. <https://doi.org/10.18186/thermal.1285257>.
- (94) Ramírez, D.; Villarreal, R. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO CT- 502. **2008**.
- (95) Alamos, J.; Fernandez, R. Prestaciones Termo-Electro Fluidodinámicas de Una Torre de Enfriamiento de Agua de Tiro Forzado. **2014**.
- (96) Del Olmo, V. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE TORRES DE REFRIGERACIÓN HÚMEDAS. **2013**.
- (97) Restrepo, J. DISEÑO OPERACIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO ADIABÁTICA DE AGUA DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO CONTRACORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO, 2011.
- (98) Timur, E. IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER'S OF SCIENCE IN SUSTAINABLE ENVIRONMENT AND ENERGY SYSTEMS, 2013.
- (99) Vargas, D.; García, H. Diseño y Simulación de Torre de Enfriamiento Por Evaporación, 2020.
- (100) Aguilar, H. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO INDUCIDO, 2017.
- (101) Wang, M.; Wang, J.; Wang, J.; Shi, C. Contrastive Analysis of Cooling Performance between a High-Level Water Collecting Cooling Tower and a Typical

- Cooling Tower. *Journal of Thermal Science* **2018**, 27 (1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-0982-7>.
- (102) Hashemi, Z.; Zamanifard, A.; Gholampour, M.; Liaw, J.-S.; Wang, C.-C. Recent Progress in Fill Media Technology for Wet Cooling Towers.. *Processes* **2023**, 11, 2578. <https://doi.org/10.3390/pr11092578>.
- (103) Li, S.; Flynn, M. R. Cooling Tower Plume Abatement and Plume Modeling: A Review. *Environmental Fluid Mechanics*. Springer Science and Business Media B.V. June 1, 2021, pp 521–559. <https://doi.org/10.1007/s10652-021-09790-w>.
- (104) Prado de Nicolás, A.; Molina-García, A.; Vera-García, F. Performance Evaluation and Feasibility Study of a Cooling Tower Model for Zero Liquid Discharge-Desalination Processes. *Energy Convers Manag* **2023**, 297. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117673>.
- (105) Askeland, D. R.; Wright, W. J. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*; 2016.
- (106) Cengel, Y.; Boles, M. *Termodinámica*; 2009.
- (107) Mercado, R. Z. *Determinación de Constantes Óptimas Para La Ecuación de Estado Peng-Robinson Stryjec-Vera (PRSV) a Presiones Elevadas*; Vol. 4.

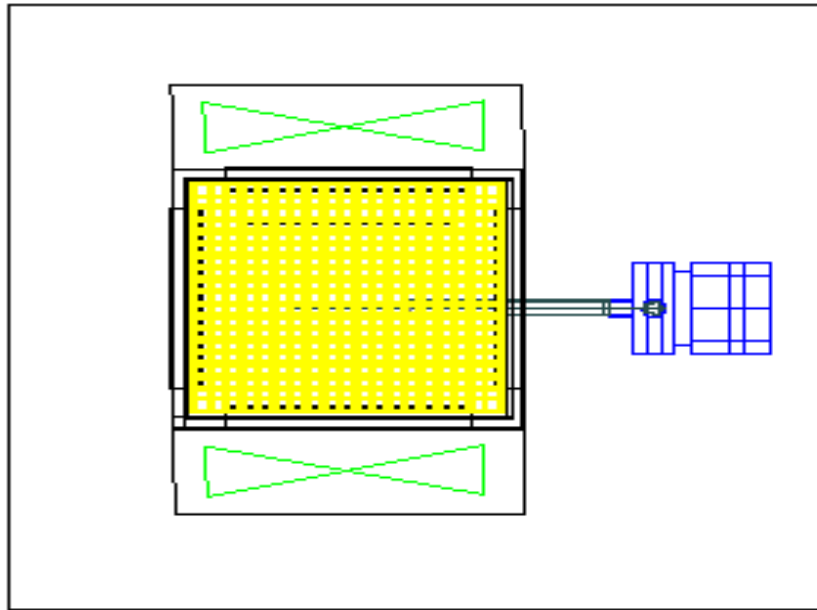
ANEXOS

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



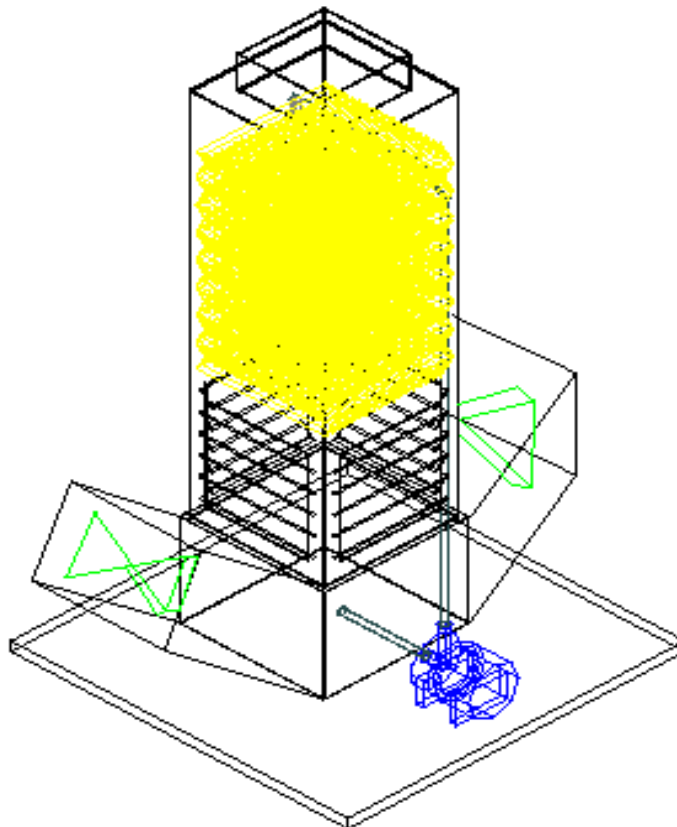
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Vista superior de la torre de humidificación



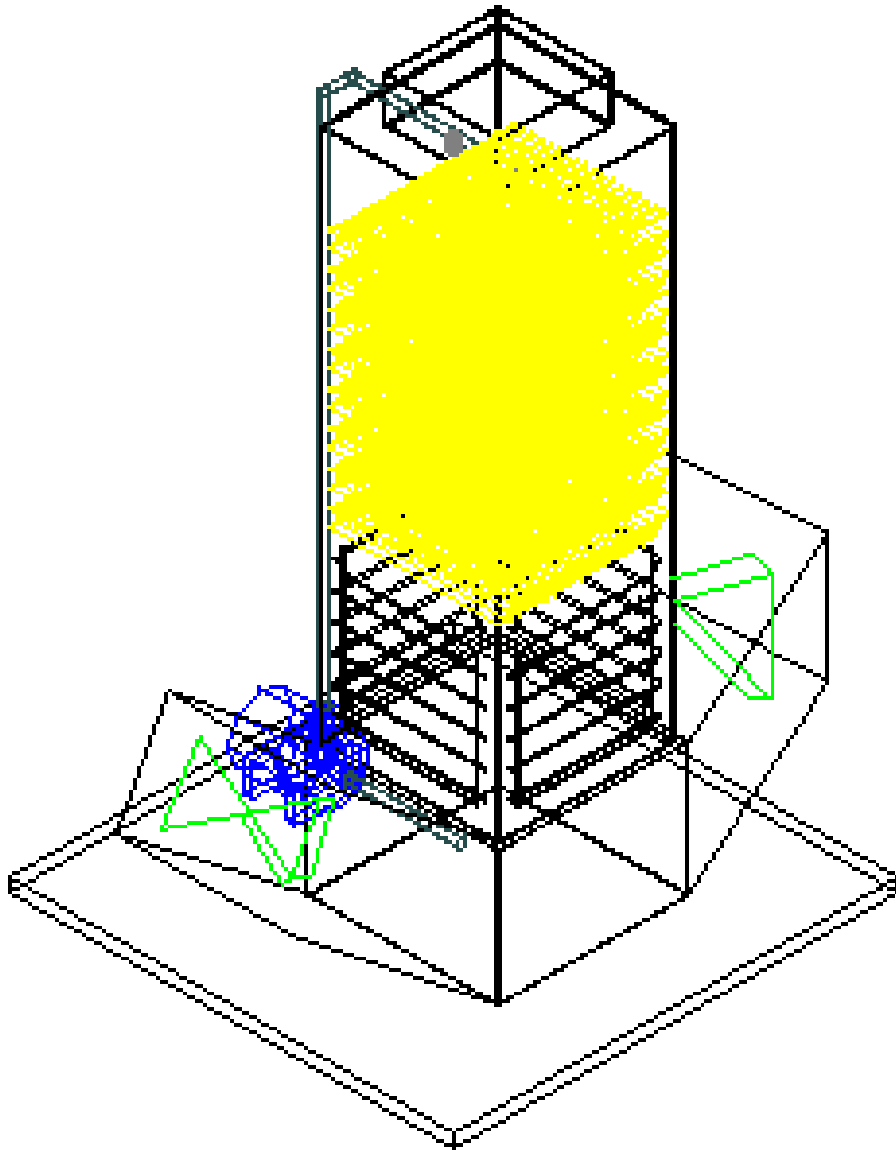
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Vista lateral derecha de la torre de humidificación



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Vista lateral izquierda de la torre de humidificación



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Torre de humidificación de tiro mecánico forzado construida pos-propuesta en el laboratorio de Operaciones Unitarias



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Vista lateral de la torre de humidificación de tiro mecánico forzado en el laboratorio de Operaciones Unitarias



Fuente: Elaboración propia.