



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**ANÁLISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA CALIENTE
PROVENIENTE DE REACTORES MEDIANTE TORRES DE ENFRIAMIENTO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico

**AUTORES: GUIDO LEONEL GRANDA ANZOATEGUI
ALEXIS PAÚL LÓPEZ QUEZADA**

TUTOR: LUIS FERNANDO TOAPANTA RAMOS

Quito – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Guido Leonel Granda Anzoategui con documento de identificación N° 1751312719 y Alexis Paúl López Quezada con documento de identificación N° 1723985493; manifestamos que: Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 25 de julio del año 2024

Atentamente,



Guido Leonel Granda Anzoategui

1751312719



Alexis Paúl López Quezada

1723985493

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Guido Leonel Granda Anzoategui con documento de identificación No. 1751312719 y Alexis Paúl López Quezada con documento de identificación No. 1723985493 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta tecnológica: “Análisis térmico del proceso de refrigeración del agua caliente proveniente de reactores mediante torres de enfriamiento”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de julio del año 2024

Atentamente,



Guido Leonel Granda Anzoategui

1751312719



Alexis Paúl López Quezada

1723985493

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Luis Fernando Toapanta Ramos con documento de identificación N° 1721113759 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA CALIENTE PROVENIENTE DE REACTORES MEDIANTE TORRES DE ENFRIAMIENTO, realizado por Guido Leonel Granda Anzoategui con documento de identificación N° 1751312719 y por Alexis Paúl López Quezada con documento de identificación N° 1723985493, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 25 de julio del año 2024

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Toapanta Ramos, Ph.D.

1721113759

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Guido y Nury quienes siempre me apoyaron incondicionalmente a lo largo de este camino lleno de retos además de errores, me brindaron el impulso necesario para aprender de cada experiencia, por lo tanto, a crecer como persona. Este logro no habría sido posible sin su confianza.

Dedico también este trabajo a mis hermanas Salome y Giuliana con la esperanza de ser para ellas un ejemplo que las inspire a alcanzar sus propias metas además de superarse cada día. Su apoyo ha sido una fuente constante de motivación para mí.

Guido Leonel Granda Anzoategui

DEDICATORIA

Esto únicamente se lo dedico a mi madre Celia una mujer única cuya fuerza, amor además de su apoyo incondicional han sido mi fortaleza. A pesar de todos mis errores, su constante dedicación y fe en mí han hecho posible la culminación de esto. Su ejemplo de perseverancia así mismo su bondad me ha inspirado a superar cada obstáculo para seguir persiguiendo mis sueños con determinación. Este logro no sería posible sin su incansable respaldo y su amor inagotable.

Alexis Paúl López Quezada

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi padre Guido, quien a lo largo de este extenso trayecto académico ha sido mi sustento y un apoyo invaluable para alcanzar este objetivo, un hombre admirable que siempre ha hecho lo imposible para que nunca nos faltara nada. A mi madre Nury por ser un pilar emocional constante que nunca permitió que me rindiera cuando las cosas se complicaban, su amor incondicional siempre ha guiado mi camino inspirándome a hacer las cosas bien. A mis hermanas tanto a Salome como a Giuliana que siguen mis pasos; deseo que Dios las guíe en su camino para lograr sus objetivos.

Quiero extender mi agradecimiento al Ing. Fernando Toapanta quien nos permitió desarrollar este trabajo bajo su tutoría. Sus palabras y enseñanzas en las aulas fueron fundamentales para nuestra formación.

Finalmente, quiero agradecer a mi compañero y gran amigo Alexis que la vida nos permitió conocernos en el colegio; hoy, por circunstancias del destino, nos reencontramos en la universidad para cumplir juntos este objetivo.

Guido Leonel Granda Anzoategui

AGRADECIMIENTOS

Lo primero, agradezco a mi madre Celia que, con todo su amor, dedicación, malas noches, problemas, adversidades, logró que esto fuera posible sin ella. Mi vida no tendría un rumbo, le agradezco por nunca haberse rendido conmigo. Sé que no fue un camino fácil, que no existen palabras que expresen el agradecimiento, tanto el amor como el respeto que siento hacia ella.

A mis hermanas que me han acompañado en toda mi vida, les agradezco por su ejemplo, su generosidad, además del amor que me han sabido brindar.

A mi sobrina Eileen, a la cual agradezco por llegar a nuestras vidas como una luz, en una época en que no todo iba bien, le agradezco por el amor que ha compartido conmigo.

Daniela, aparte de ser mi enamorada, es mi compañera, la cual ha estado conmigo apoyándome en cada momento.

También quiero agradecer a Víctor por escucharme, además de guiarme en varios momentos de mi vida en que necesitaba un consejo o solamente que me escucharan. También agradezco a Javier por ser un hermano para mí, sabiendo que desde niños podemos contarnos el uno con el otro.

Y finalmente quiero agradecer al Ing. Fernando Toapanta por guiarnos en este paso muy importante para nosotros. A mi amigo Guido le agradezco ya que desde el colegio nos hemos apoyado para lograr el mismo objetivo.

Alexis Paúl López Quezada

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | ii |
| CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | iii |
| CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| DEDICATORIA..... | vi |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| AGRADECIMIENTOS | viii |
| ÍNDICE GENERAL..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiv |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xv |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | xvii |
| RESUMEN..... | xviii |
| ABSTRACT | xix |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Justificación..... | 2 |
| Objetivos | 2 |
| CAPÍTULO 1 | 3 |
| 1.1 Estado del arte | 3 |
| 1.2 Aspectos teóricos..... | 5 |

| | | |
|--------|--|----|
| 1.2.1 | Transferencia de calor | 5 |
| 1.2.2 | <i>Convección</i> | 6 |
| 1.2.3 | <i>Radiación</i> | 6 |
| 1.2.4 | <i>Conducción</i> | 6 |
| 1.2.5 | Mecanismos de conducción de calor | 7 |
| 1.2.6 | <i>Convección forzada dentro de una torre</i> | 8 |
| 1.2.7 | <i>Maquina térmica</i> | 8 |
| 1.2.8 | <i>Primera ley de la termodinámica</i> | 8 |
| 1.2.9 | <i>Eficiencia térmica</i> | 11 |
| 1.2.10 | Enunciado de Kelvin-Planck..... | 11 |
| 1.2.11 | Ciclo de Carnot | 11 |
| 1.2.12 | <i>Procesos dentro del ciclo de Carnot</i> | 12 |
| 1.2.13 | <i>Ciclo inverso de Carnot</i> | 12 |
| 1.2.14 | <i>Refrigeradores y bombas de calor</i> | 13 |
| 1.2.15 | <i>Clasificación de agua según su dureza</i> | 13 |
| 1.2.16 | <i>Reactor</i> | 14 |
| 1.2.17 | <i>Principio de refrigeración de Newton y conductividad térmica de Fourier</i> | 15 |
| 1.3 | Clasificación de las torres de enfriamiento..... | 15 |
| 1.3.4 | <i>Desempeño de una torre</i> | 20 |
| 1.3.5 | <i>Balance de masa</i> | 21 |
| 1.3.6 | <i>Balance de energía</i> | 21 |
| 1.3.7 | <i>Coeficiente global de transferencia de calor</i> | 21 |
| 1.4 | Componentes | 22 |
| 1.4.4 | <i>Condensador</i> | 22 |
| 1.4.5 | <i>Bomba</i> | 22 |
| 1.4.6 | <i>Tanque de almacenamiento</i> | 22 |
| 1.4.7 | <i>Termómetro de bulbo</i> | 22 |
| 1.5 | Mantenimiento al sistema de recirculación de agua | 23 |
| 1.5.4 | <i>Cloración</i> | 23 |

| | | |
|------------------|--|----|
| 1.5.5 | <i>Ozono</i> | 24 |
| 1.5.6 | <i>Ultravioleta (UV)</i> | 24 |
| 1.5.7 | <i>Biocidas</i> | 24 |
| 1.5.8 | <i>SolidWorks</i> | 25 |
| 1.6 | Conclusiones del capítulo | 25 |
| CAPÍTULO 2 | | 26 |
| 2.1 | Área transversal | 26 |
| 2.2 | Flujo másico | 27 |
| 2.3 | Transferencia de calor..... | 27 |
| 2.4 | Área superficial..... | 27 |
| 2.5 | Largo de tubería..... | 28 |
| 2.6 | Reynolds | 28 |
| 2.7 | Prandtl..... | 29 |
| 2.8 | Nusselt | 30 |
| 2.9 | Coefficiente de transferencia de calor..... | 30 |
| 2.10 | Balance de energía..... | 31 |
| 2.11 | Eficiencia de la torre de enfriamiento..... | 31 |
| 2.12 | Conclusiones del capítulo..... | 31 |
| CAPÍTULO 3 | | 33 |
| 3.1 | Área transversal | 34 |
| 3.2 | Flujo másico del agua | 34 |
| 3.3 | Calor disipado de la torre de enfriamiento | 35 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| 3.4 | Área superficial..... | 36 |
| 3.5 | Largo de la tubería..... | 36 |
| 3.6 | Reynolds..... | 37 |
| 3.7 | Prandtl..... | 37 |
| 3.8 | Número de Nusselt..... | 37 |
| 3.9 | Coefficiente global de transferencia de calor..... | 38 |
| 3.10 | Temperatura final del agua del rociador..... | 38 |
| 3.11 | Eficiencia de la torre de enfriamiento..... | 39 |
| 3.12 | Prediseño serpentín..... | 40 |
| 3.13 | Conclusiones del capítulo..... | 40 |
| CAPÍTULO 4..... | | 41 |
| 4.1. | Geometría del sistema..... | 41 |
| 4.2. | Análisis térmico realizado en SolidWorks..... | 44 |
| 4.2.1. | Flow simulation..... | 44 |
| 4.2.2. | Generación de malla..... | 46 |
| 4.2.3. | Condiciones de frontera de la simulación..... | 47 |
| 4.3 | Resultados obtenidos..... | 49 |
| 4.3.1. | Explicación de los parámetros..... | 49 |
| 4.3.2. | Resultados..... | 50 |
| 4.3.3. | Análisis de resultados..... | 53 |
| 4.4. | Comparación entre temperaturas de entrada..... | 53 |
| 4.4.1. | Simulación a 82 °C..... | 53 |

| | |
|--|----|
| 4.4.2. Simulación a 72 °C | 55 |
| 4.5. Evaluación económica..... | 56 |
| 4.5.1. Materiales..... | 57 |
| 4.5.2. Construcción e instalación..... | 57 |
| 4.6. Conclusiones del capítulo..... | 58 |
| CONCLUSIONES | 59 |
| RECOMENDACIONES | 60 |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS..... | 61 |
| ANEXOS..... | 62 |
| REFERENCIAS | 65 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Dureza del agua según la OMS [27]. | 14 |
| Tabla 2. Parámetros y medidas del serpentín | 33 |
| Tabla 3. Parámetros y propiedades del agua a 0°C | 34 |
| Tabla 4. Parámetros del agua en el rociador..... | 39 |
| Tabla 5. Condiciones de la entrada del agua en los serpentines..... | 48 |
| Tabla 6. Condiciones de entrada del agua al rociador..... | 48 |
| Tabla 7. Condiciones ambientales..... | 48 |
| Tabla 8. Parámetros de simulación..... | 52 |
| Tabla 9. Resultados de la simulación | 53 |
| Tabla 10. Datos para la comparación | 54 |
| Tabla 11. Comparación de datos II | 55 |
| Tabla 12. Lista y precio de materiales..... | 57 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Conductividad térmica de los materiales | 7 |
| Figura 2. Diagrama P-V del proceso isócoro | 9 |
| Figura 3. Diagrama P-V del proceso adiabático | 9 |
| Figura 4. Diagrama P-V del proceso isobárico | 10 |
| Figura 5. Diagrama P-V del proceso isoterma | 10 |
| Figura 6. Diagrama representativo del ciclo de Carnot [24]..... | 12 |
| Figura 7. Diagrama representativo del inverso de Carnot [25]..... | 13 |
| Figura 8. Diagrama del proceso [28]..... | 15 |
| Figura 9. Torre de tiro natural | 16 |
| Figura 10. Torre de tiro forzado..... | 16 |
| Figura 11. Torre de flujo cruzado..... | 17 |
| Figura 12. Torre de flujo contracorriente | 17 |
| Figura 13. Torre de flujo de contracorriente de doble corriente | 18 |
| Figura 14. Torre híbrida | 18 |
| Figura 15. Torre de tiro inducido | 19 |
| Figura 16. Clasificación [13]..... | 20 |
| Figura 17. Medidor WBGT - temperatura de globo de bulbo húmedo..... | 23 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Prediseño del serpentín | 40 |
| Figura 19. Carcasa de torre de enfriamiento | 42 |
| Figura 20. Conector de los serpentines | 42 |
| Figura 21. Serpentín | 43 |
| Figura 22. Rociador..... | 43 |
| Figura 23. Torre de enfriamiento ensamblada | 44 |
| Figura 24. Flow simulation de SolidWorks | 45 |
| Figura 25. Menú del flow simulation..... | 45 |
| Figura 26. Tapón para volumen de control cerrado | 46 |
| Figura 27. Configuración del mallado..... | 47 |
| Figura 28. Mallado de la simulación..... | 47 |
| Figura 29. Escala de colores de temperatura del fluido | 49 |
| Figura 30. Dirección del fluido en el serpentín..... | 50 |
| Figura 31. Temperatura del fluido en el serpentín | 51 |
| Figura 32. Simulación a 81°C | 55 |
| Figura 33. Simulación a 72°C | 56 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1. Resultado a 81°C..... | 62 |
| Anexo 2. Resultado a 72 °C..... | 63 |
| Anexo 3. Propiedades del agua en su punto de ebullición..... | 63 |
| Anexo 4. Propiedades del agua..... | 64 |

RESUMEN

Este estudio se centra en el análisis térmico del proceso de refrigeración del agua caliente proveniente de reactores mediante torres de enfriamiento. El objetivo principal es mejorar la transferencia de calor y optimizar la operación de las torres para garantizar la seguridad y sostenibilidad en plantas de energía. Se ha desarrollado un modelo matemático detallado que simula la conducta térmica de las torres de enfriamiento, teniendo en cuenta variables críticas como la temperatura del agua, la humedad ambiental y la velocidad del aire.

El modelo se ha validado a través de experimentos realizados en una torre de enfriamiento a escala específica, utilizando cálculos numéricos basados en ecuaciones de transferencia de calor. Los resultados obtenidos han permitido identificar estrategias efectivas para mejorar tanto el diseño como la estructura de las torres, con el objetivo de aumentar su eficiencia y reducir los costos operativos asociados.

Los hallazgos de este estudio indican que una optimización adecuada puede tener un impacto significativo en la eficiencia energética y la seguridad operativa de las torres de enfriamiento. Además, se destaca la importancia de estas mejoras para minimizar el impacto ambiental del proceso de refrigeración en las plantas de energía.

Palabras clave: refrigeración, torres de enfriamiento, reactores, transferencia de calor, optimización térmica, modelado numérico.

ABSTRACT

This study is focused on the process thermal analysis of cooling hot water from reactors using cooling towers. The primary objective is to enhance heat transfer and optimize the operation of towers to ensure safety and sustainability in power plants. A comprehensive mathematical model has been developed to simulate the thermal behavior of cooling towers, considering critical variables such as water temperature, ambient humidity, and air velocity.

The model has been validated through experiments conducted in a specific-scale cooling tower, with numerical calculations based on heat transfer equations being employed. Effective strategies to improve both the design and structure of the towers have been identified based on the findings, aiming to enhance efficiency and reduce operational costs.

The results of this study indicate that significant improvements in energy efficiency and operational safety of cooling towers can be achieved through proper optimization. Furthermore, the importance of these enhancements in mitigating the environmental impact of the cooling process in power plants is underscored by the study.

Keywords: refrigeration, cooling towers, reactors, heat transfer, thermal optimization, numerical modeling.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

El proceso de refrigeración del agua caliente proveniente de reactores es importante dentro del desarrollo óptimo de un ciclo de enfriamiento eficiente en plantas industriales. El agua caliente, después de haber absorbido calor del reactor, necesita ser enfriada de manera efectiva antes de ser recirculada o liberada en el medio ambiente. Este enfriamiento se realiza comúnmente mediante torres de enfriamiento, que disipan el calor al ambiente a través de un proceso de evaporación y convección, en donde podemos identificar inconvenientes dentro del proceso, como lo son la eficiencia térmica limitada que se da debido a las variaciones en las condiciones ambientales y operativas. La falta de un control preciso sobre estos parámetros puede resultar en una refrigeración ineficiente, afectando negativamente el ciclo térmico global.

Estudios actuales de transferencia de calor además de fluidos en torres de enfriamiento a menudo simplifican la complejidad del proceso. Esto puede llevar a estimaciones imprecisas tanto en la temperatura de salida como en la eficiencia térmica, lo que dificulta el desarrollo de un plan eficiente en el control del proceso de enfriamiento. Afectando las condiciones operativas en el ciclo de enfriamiento, como el fluido y la carga térmica, que pueden variar significativamente, lo que presenta desafíos para mantener un rendimiento constante. La falta de estrategias optimizadas para manejar estas variaciones puede provocar sobrecargas térmicas y por ende disminuir la vida útil de los equipos.

Por otra parte, la eficiencia inadecuada de las torres de enfriamiento puede llevar a una mayor liberación de calor al medio ambiente, afectando los ecosistemas locales y cumpliendo con regulaciones ambientales más estrictas. Mejorar la eficiencia de las torres de enfriamiento es esencial para minimizar estos impactos.

Justificación

Para el estudio se usará el software SolidWorks, un programa especializado para el diseño estructural, además del realizado de simulaciones de dinámica de fluidos. En el cual podemos tanto diseñar como modelar el flujo de aire y agua, de igual manera la transferencia de calor existente dentro del ciclo de refrigeración.

El ciclo de refrigeración eficiente del fluido dentro de los reactores es una preocupación primordial para garantizar su seguridad y estabilidad operativa. El correcto funcionamiento de estas estructuras desempeña un papel esencial en este proceso al permitir la disipación controlada del calor residual hacia el ambiente.

Finalmente, este estudio no solo aborda el tema de la refrigeración del agua, este también implica la sostenibilidad, seguridad y optimización. La realización de este análisis numérico podría beneficiar a la industria.

Objetivos

1. Objetivo general

- Analizar de forma numérica el proceso de refrigeración del agua proveniente de reactores mediante torres de enfriamiento.

2. Objetivos específicos

- Definir los procesos de enfriamiento de reactores que utilicen agua para la reducción de temperatura.
- Diseñar de forma térmica el ciclo de refrigeración presente en los reactores utilizando una torre de refrigeración.
- Analizar el comportamiento térmico de la temperatura de los reactores y de la torre de enfriamiento utilizando software especializado.
- Evaluar mediante indicadores financieros la posible implementación estructural del proceso para la reducción de temperatura en los reactores químicos.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS

Este capítulo explora el desarrollo de la refrigeración del agua que sale caliente de un proceso industrial, haciendo efectivo el ciclo de enfriamiento de los reactores químicos por medio de torres de enfriamiento.

El objetivo del capítulo es conocer los métodos más utilizados en las torres de enfriamiento y la combinación de estos, para que la refrigeración del agua logre ser más efectiva, además de entender los procesos de enfriamiento, teniendo en cuenta las propiedades de la transmisión de temperatura que se da en el sistema, por otra parte, la intervención del software para el desarrollo de su diseño y simulación.

1.1 Estado del arte

Los reactores químicos pueden llevar a cabo diversos procesos químicos dentro de sí. Estos mecanismos se componen de un depósito cerrado en donde se encuentran sus respectivas entradas y, asimismo, sus salidas para su constituyente químico [1] Existen factores que debemos tener controlados como lo es la temperatura y en la industria existen varios métodos para enfriar dicho reactor. Para este caso se usarán las torres de enfriamiento.

El ablandamiento del agua es un conjunto de procesos el cual tiene como finalidad reducir las concentraciones de calcio, magnesio, entre otros minerales existentes en el agua, es decir, eliminar la dureza que existe en el agua [2]. Este proceso se usa en el agua para que no exista corrosión en los materiales que están en los reactores.

Los intercambiadores de calor son usados en las industrias para secado de materia prima, también como calentadores de agua, enfriamiento de agua, entre otros usos [3]. Estos equipos se originan en el siglo XIX a inicios de la segunda guerra mundial, estos eran usados para la condensación de vapor en los barcos los cuales se usaban para transporte de personas, mercancías, entre otros. Los intercambiadores de calor fueron obteniendo nuevas formas y configuraciones las cuales se fueron introduciendo al sector energético.

Además, son sistemas que tienen la función de ejecutar la condición que demanda un proceso. La condición de este es la disminución de la temperatura, cuando se relaciona el aire a un bajo porcentaje de humedad con una gran masa de agua para que pueda entrar de nuevo en el proceso fabril [4] En la industria se buscan formas eficaces de enfriar el agua de una manera rápida y sin tener mucho desperdicio del fluido, ya que su costo por ablandarla es alto. Es un dispositivo térmico usado para la refrigeración de agua por medio de evaporización a una reducida fracción de la misma sustancia (enfriamiento evaporativo) [5].

Esto se da al reducir la temperatura del fluido con el aire. Está conformado por tres tipos de fenómenos: transmisión de masa interfacial, transmisión de temperatura debido a la transición de las fases de la materia por parte de la sustancia, además del intercambio de temperatura entre el agua y el aire [6], [7], [8], [9], [10], [11].

Actualmente, las torres de enfriamiento tienen varias clasificaciones, puesto que estos dependen para varios factores que Del Olmo [12] y SPX Cooling Technologies Staff [11]. Hablan en sus respectivas investigaciones. Los principales los podríamos clasificar dependiendo del contacto que tengan el agua y el aire, estos pueden ser de contacto abierto (evaporativas o húmedas) como de contacto indirecto (circuito cerrado, secas o no evaporativas).

Por otro lado, es importante señalar la diversidad de torres existentes en diferentes situaciones de acuerdo con la necesidad que se presente, como son las de tiro mecánico, forzado e inducido. Las torres de enfriamiento, que se caracterizan por tener una actividad forzada, presentan un flujo de aire que es impulsado por respiraderos de ventilación y conducido por medio de columnas. Estos, ya sean axiales o centrífugos, generalmente se colocan en uno de los laterales del cerramiento. Algunos diseños pueden tener ventiladores en dos laterales con una división interna para evitar flujos opuestos. Por otro lado, las torres de tiro inducido cuentan con un ventilador axial que se encuentra en la cúspide de la torre de enfriamiento. Este componente de ventilación suele tener una transmisión directa, utilizando correas o, en casos de torres de gran tamaño, una caja reductora. Los motores se ubican fuera de la corriente de aire a un bajo porcentaje de humedad, permitiendo el ingreso de aire por succión [7].

En el diseño realizado por Ojeda, J., Colina, J., Perdomo, V., & Colina, S. [13]. Esta torre de enfriamiento de agua fue construida a un estilo de tiro mecánico. Este nos dice que la configuración

usada fue la “mecánica a contraflujo” donde usaron la presión de 100,977 kPa con respecto a 29 msnm promedio. El diseño presentado por los autores antes mencionados tuvo una efectividad del 52 % para la altura que escogieron, además de los factores que determinaron su resultado, entregando un valor aceptable para el diseño de las personas.

En el caso de Portero V. y Valarezo S. [14]. Presentaron un proyecto que hacía alusión al tema de la refrigeración por medio de torres, un proyecto caracterizado por ser de tiro inducido (contacto directo). Por medio de su análisis, lograron enfriar una cantidad determinada de agua a 15 °C aproximadamente en un tiempo estimado de 5 minutos y concluyeron que el diseño presentado de evaporación de tiro inducido obtuvo una eficiencia del 95 % con un consumo de energía mínimo.

Mendoza J. y Gallardo A. [15]. Concluyeron que dentro del proyecto es prescindible considerar las variables presentes en la ciudad de Guayaquil. Se planteó la implementación de este sistema de trabajo por contraflujo, vislumbrando ciertos objetivos, posteriormente cumpliendo con el levantamiento de las torres con una dimensión de 1,70 m y una eficiencia del 60 %, ya que de los 30 °C que salía el agua, esta torre lograba bajarla a 22 °C. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la temperatura del lugar situado es alta, por ende, habrá un aumento en la temperatura a medida que pase el tiempo.

Así mismo Gonzales A., Briseño J. y Chavez M. [16]. Al considerar la implementación de torres de enfriamiento en laboratorios, estos llegaron a la conclusión de que, por medio de los factores que se les presentaron, además de varios aspectos para que su diseño sea eficaz, como lo es la velocidad del ventilador que este debía alcanzar los 3450 RPM, la bomba de agua, la cual debería alcanzar una velocidad de 3600 RPM y con una altura de 1.4 m, la cual representó una efectividad.

1.2 Aspectos teóricos

1.2.1 Transferencia de calor

Se define como la importancia que presenta la existencia de un diferencial de temperatura en un proceso que radica en cómo la energía térmica se transfiere desde una región de mayor temperatura hacia otra de menor temperatura a través de mecanismos como conducción, convección y radiación. Este fenómeno se alinea con el segundo principio de la termodinámica, que establece la dirección natural de los procesos térmicos y la tendencia a la degradación de la energía [17], [18].

Esta transferencia de calor se da de un punto a otro debido a la interacción entre trabajo (W) y calor (Q) al existir esta diferencia térmica. De no cumplir con este punto, no se puede dar dicha transferencia neta de calor entre cuerpos que se encuentran a temperaturas similares [18]

1.2.2 Convección

La convección trata de cómo se da la transición de energía entre fases, tomando en cuenta una superficie sólida como un serpentín a una determinada temperatura en contacto con líquidos o gases en circulación, complementados con el movimiento que presentan los fluidos, además de la variación de su densidad. La convección se puede dar de manera forzada en donde intervienen componentes mecánicos como ventiladores o bombas que ayudan a la disipación de calor y de manera natural en donde interviene el viento circundante [18], [19].

1.2.3 Radiación

Resulta en la liberación de energía como consecuencia de las ondas electromagnéticas o fotones modificados dentro de su configuración electrónica y química entre sus átomos y moléculas. A discrepancia de los criterios de convección y conducción, este tipo de transferencia de calor se da por la radiación presente en los rayos solares que impactan en la tierra.

En el análisis de transferencia de calor, este fenómeno de radiación térmica se transmite de un medio a otro debido a sus temperaturas. Si se habla de las fases de la materia, cada una es capaz de entregar y captar radiación, mientras que en sólidos se presenta como un fenómeno más superficial [18]

1.2.4 Conducción

La conducción térmica es la propiedad que presenta un material de conducir energía térmica o calórica teniendo en cuenta estimaciones como el espesor del material, su área y la diferencia de temperatura [18] [20].

Esta propiedad conductiva de calor de un material se mide tanto en valores altos como en valores bajos, demostrando que el valor mayor representa que el material es un buen conductor de calor y el valor más bajo que el material se comporta como un aislante [18]. Dentro de la Figura 1 se

esquematiza la conductividad térmica de cada material, siendo el de cobre elegido dentro del análisis térmico de la torre de enfriamiento.

| Material | λ W/(m·K) | Material | λ W/(m·K) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Acero | 47 - 58 | Hielo | 2 |
| Acero inoxidable | 12 - 45 | Hierro | 80,2 |
| Agua | 0,58 | Hormigón | 1,7 |
| Aire | 0,025 | Ladrillo | 0,80 |
| Alcohol | 0,16 | Ladrillo refractario | 0,47 - 1,05 |
| Alpaca | 29,1 | Latón | 81 - 116 |
| Aluminio puro | 237 | Litio | 301,2 |
| Amianto | 0,04 | Madera | 0,04 - 0,4 |
| Bronce | 116 - 186 | Mercurio | 83,7 |
| Caucho | 0,16 | Mica | 0,35 |
| Cemento Portland | 0,29 | Níquel | 52,3 |
| Cinc | 106 - 140 | Oro | 318 |
| Cobre | 401 | Parafina | 0,21 |
| Corcho | 0,03 - 0,04 | Piedra arenisca | 2,4 |
| Diamante | 900 - 2300 | Plata | 429 |
| Estaño | 64,0 | Plomo | 35,0 |
| Fibra de vidrio | 0,03 - 0,07 | Polipropileno | 0,12 |
| Glicerina | 0,29 | Tierra húmeda | 0,8 |
| Helio (superfluidez) | infinito | Vidrio | 0,6 - 1,1 |

Figura 1. Conductividad térmica de los materiales

Donde:

λ : conductividad térmica

W/m·K: watts por Kelvin y metro

1.2.5 Mecanismos de conducción de calor

Una vez establecidos los tres modelos de transferencia de calor, la teoría menciona que este tipo de transición de temperaturas se da únicamente si existe diferencia entre ellas, además de que estos tres mecanismos no pueden trabajar de manera simultánea. Al hablar de un sólido, este puede adoptar comportamientos conductivos además de radiación, pero no por convección. En el caso de

un líquido, si este se encuentra estático, su transferencia se da por radiación, mientras que, si el fluido se encuentra en circulación, la transferencia se da de manera convectiva además de por radiación. A diferencia de los gases, la radiación es lo único que los afecta [18] [20].

1.2.6 Convección forzada dentro de una torre

Se refiere al movimiento de un fluido impulsado de manera externa por ventiladores que inducen aire frío, el mismo que entra en contacto con el agua caliente enfriándolo. Además, existen otros dispositivos mecánicos como condensadores que reciben vapor caliente expulsado por el trabajo, donde posterior a esto lo condensa a líquido para ser reutilizado. Además, hay bombas que ayudan a tener un ciclo de enfriamiento más eficiente al entregar el agua caliente a la torre y poner el agua fría en recirculación o enviarla al condensador.

Es importante considerar que este proceso forzado es costoso debido a su alto consumo energético [21]

1.2.7 Máquina térmica

Este dispositivo funciona transformando parcialmente el calor en energía mecánica o de trabajo. Una cierta cantidad de material dentro de la máquina suele experimentar intercambio de calor, expansión o compresión y ocasionalmente un cambio de fase cuando funciona. El material utilizado en los procedimientos mencionados se denomina sustancia de trabajo de la máquina. Mientras que el fluido de trabajo dentro de una turbina es agua, en circunstancias similares a las de un motor, es una mezcla de combustible y aire [22].

Una máquina térmica es fundamental en la industria por su capacidad de generación de energía basándose en principios de termodinámica [18]

1.2.8 Primera ley de la termodinámica

Este principio describe cómo la materia se transforma, pero no se puede destruir, aclarando que dentro de cualquier sistema la disminución o aumento de temperatura total durante el proceso es igual a la diferencia entre la temperatura total que entra y sale durante el ciclo [18] [22]. Aplicado a los siguientes procesos:

- Proceso isocórico: la transformación de energía en el interior será equivalente a la cantidad de calor. Por medio de la Figura 2 se contempla la energía interna de un proceso aumenta cuando absorbe calor y disminuye cuando lo transfiere al entorno [22].

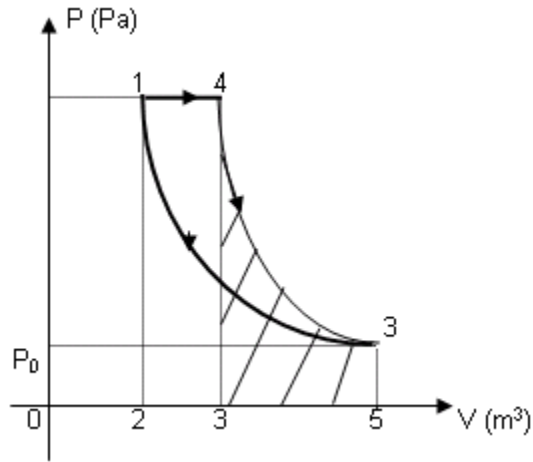


Figura 2. Diagrama P-V del proceso isocoro

- Proceso adiabático: por medio de la Figura 3 se entiende que no existe transmisión de temperatura al exterior ni al interior de un proceso. Por lo tanto, dicha cantidad de temperatura intercambiada Q resulta igual a cero [22].

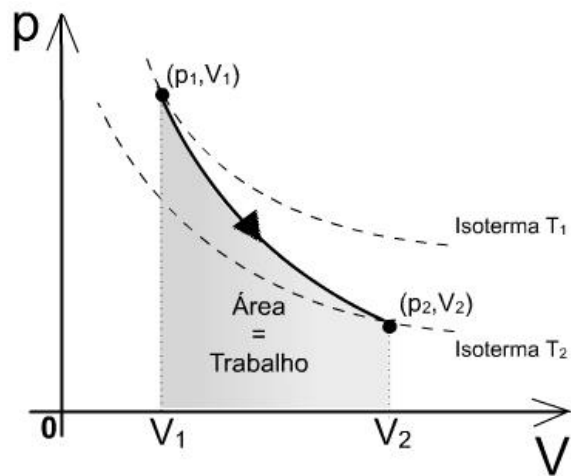


Figura 3. Diagrama P-V del proceso adiabático

- Proceso isobárico: en este caso concreto, tanto el calor como el trabajo pueden tener valores distintos de cero, lo que la Figura 4 indica que ambos contribuyen a la transformación de la energía dentro de un proceso [22].

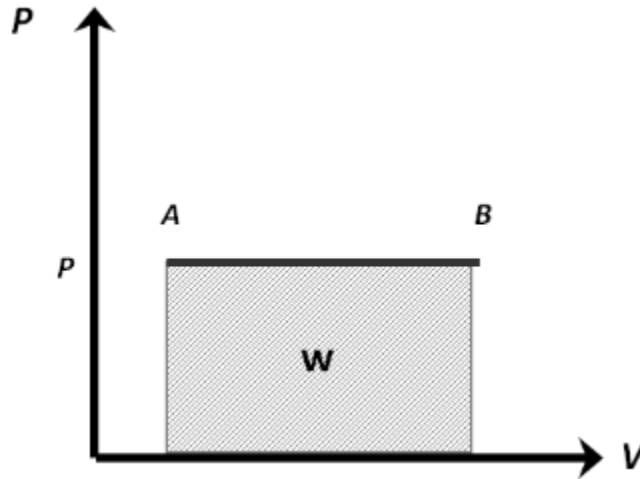


Figura 4. Diagrama P-V del proceso isobárico

- Proceso isoterma: tanto el calor como el trabajo pueden tener magnitudes distintas de cero, lo que influirá en cómo se transforma la energía dentro de un proceso. Se ha observado mediante la Figura 5 que la energía es continua por el interior de un gas. Como consecuencia, se cumple la igualdad de que el trabajo realizado y el calor transferido son iguales, es decir, $W = Q$ [22].

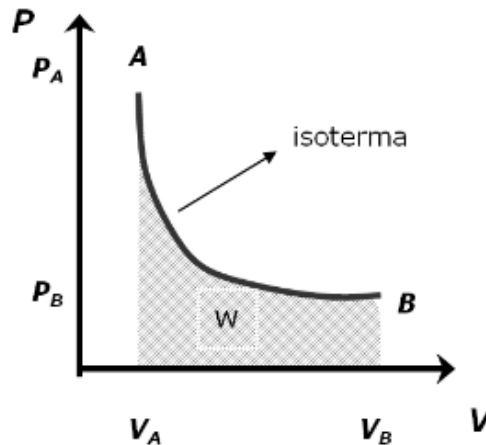


Figura 5. Diagrama P-V del proceso isoterma

- Proceso cíclico: el calor neto transferido al sistema a lo largo de un ciclo es igual al trabajo total de un sistema. De forma similar, la temperatura neta que el sistema libera al medio ambiente es igual al esfuerzo total que se realiza sobre él [22].

1.2.9 Eficiencia térmica

En termodinámica, la eficiencia térmica describe la capacidad de un sistema para convertir la energía térmica, como el calor, en trabajo útil o en otro tipo de energía deseada, minimizando las pérdidas. Es una medida de cuán efectivamente un dispositivo o proceso utiliza el calor suministrado para realizar trabajo o generar energía útil, generalmente expresada en porcentajes [18]

El trabajo neto de una máquina térmica siempre es inferior al calor que absorbe, lo que significa que la cantidad de calor que se convierte en trabajo es mínima. El rendimiento de una máquina térmica está determinado por su eficiencia térmica, que es la proporción de calor absorbido que se transforma en trabajo neto [4].

1.2.10 Enunciado de Kelvin-Planck

Una transformación en la que un sistema intercambia calor con una única fuente térmica se denomina transformación monoterma. En el caso de que un sistema realice un ciclo monoterma, utilizando trabajo (W) y calor (Q), según el primer principio de la termodinámica, al tratarse de un ciclo, debe cumplirse que la transformación de la temperatura interna (ΔU) sea cero, esto implica que el trabajo realizado sea igual al calor absorbido, es decir, $W = Q$ [23].

1.2.11 Ciclo de Carnot

Este proceso maximiza la transferencia de calor al trabajo mecánico cuando funciona al máximo rendimiento. Carnot demostró que la disparidad que existe entre temperaturas altas y temperaturas bajas alcanzadas a lo largo de un ciclo determina el rendimiento máximo de cualquier máquina. El rendimiento de la máquina aumenta a medida que lo hace esta diferencia [23].

1.2.12 Procesos dentro del ciclo de Carnot

- Expansión isotérmica: durante este proceso, el fluido se expande debido a una disminución de presión y un aumento de volumen, mientras se suministra calor al mismo [24].
- Expansión isentrópica: en esta expansión, el fluido realiza trabajo al expandirse [24].
- Compresión isotérmica: Es un proceso internamente reversible en el cual se cede calor al medio exterior mientras se comprime el fluido [24].
- Compresión isentrópica: durante este proceso, el fluido de trabajo alcanza su temperatura inicial alta [24]. Estos procesos se representan mediante la Figura 6.

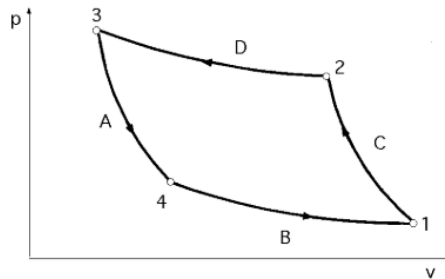


Figura 6. Diagrama representativo del ciclo de Carnot [24].

1.2.13 Ciclo inverso de Carnot

Cuando las transformaciones se llevan a cabo de manera reversible, el periodo de enfriamiento actúa como el inverso del ciclo de Carnot [25]. Las etapas de este ciclo se pueden resumir de la siguiente manera:

- El enfriamiento adiabático funciona junto con la expansión.
- Disminución de calor en temperatura reducida, manteniendo la temperatura constante (isotérmica).
- Compresión adiabática cuando el fluido aumenta su temperatura.
- Transferencia de calor en elevadas temperaturas, manteniendo la temperatura constante (isotérmica) [25].

Este ciclo es comúnmente empleado en el diseño de equipos de refrigeración, ya que permite visualizar directamente las magnitudes involucradas en el proceso. La entalpía de una sustancia es crucial, ya que aumenta las magnitudes presentes en el ciclo y refleja su contenido térmico a presión constante o el calor total que la sustancia puede absorber o liberar al entorno exterior [25]. Estas magnitudes se ilustran mediante la Figura 7.

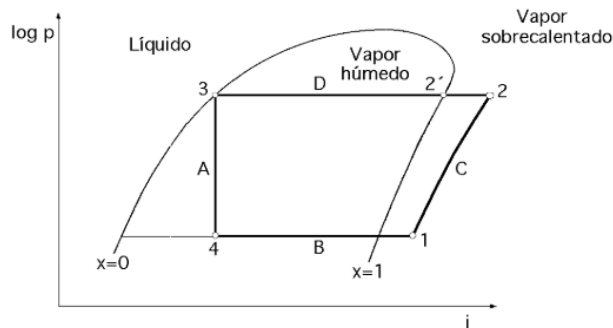


Figura 7. Diagrama representativo del inverso de Carnot [25].

1.2.14 Refrigeradores y bombas de calor

Las máquinas frigoríficas, tales como los frigoríficos y los sistemas de bombeo de calor, operan de forma contraria a las máquinas térmicas tradicionales. En lugar de generar energía, absorben energía térmica (Q_f) de una fuente fría y la transfieren como energía térmica (Q_c) a una fuente caliente mediante trabajo (W). Por ejemplo, un frigorífico extrae calor de un espacio frío y lo libera hacia un entorno con temperatura más elevada. Por otro lado, un sistema de bombeo de calor calienta un espacio aprovechando la energía del ambiente más frío y la transfiere hacia un área con temperatura superior. Asimismo, los sistemas de bombeo de calor tienen la capacidad de operar en sentido inverso, enfriando un espacio al funcionar como un frigorífico [24].

1.2.15 Clasificación de agua según su dureza

La consistencia global que presenta el agua viene determinada por la conglomeración de "formadores de dureza", como son el bario, magnesio, calcio y estroncio y otras sales de metales alcalinotérreos. Dado que el estroncio y el bario generalmente se encuentran en cantidades insignificantes en el agua, los "iones de dureza" (también conocidos como iones de calcio, Ca^{2+} e

iones de magnesio, Mg^{2+}), son los principales componentes que determinan la dureza. A menudo, su clasificación se expresa en términos de contenido de calcio, incluso cuando se refiere al contenido de magnesio, el cual se convierte en equivalentes de calcio para el cálculo [26]. Información recopilada dentro de la Tabla 1.

Tabla 1. Dureza del agua según la OMS [27].

| Categoría de agua | Dureza (mg/L $CaCO_3$) |
|--------------------------|--|
| Muy blanda | 0 – 80 |
| Blanda | 81 – 150 |
| Semi dura | 151 – 330 |
| Dura | 33 – 550 |
| Muy dura | >551 |

1.2.16 Reactor

Un reactor es un equipo o sistema en el que se llevan a cabo reacciones químicas o nucleares de manera controlada, permitiendo la transformación de materias primas en productos deseados o la conversión de energía en una forma aprovechable, mientras se gestionan los parámetros críticos como la temperatura, la presión, y el flujo de materiales para optimizar la eficiencia, seguridad y rendimiento del proceso.

El principio de funcionamiento de un reactor, en el contexto de la transferencia de calor, implica la gestión y el control eficientes del calor producido o consumido durante las reacciones químicas. Este control térmico es esencial para mantener las condiciones de operación óptimas, evitar puntos calientes, y garantizar la seguridad y la eficiencia del proceso. En los reactores, la transferencia de calor facilita la conversión efectiva de reactivos, la generación de energía y la prevención de sobrecalentamientos, asegurando un rendimiento estable y seguro del sistema [28]. Dicha transferencia de temperatura se expresa por medio de la Figura 8.

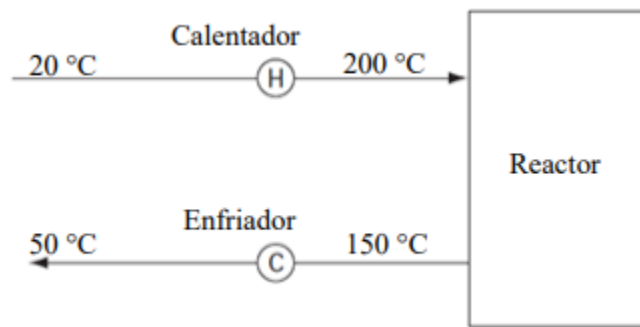


Figura 8. Diagrama del proceso [28].

1.2.17 Principio de refrigeración de Newton y conductividad térmica de Fourier

Estas reglas se emplean dentro de los análisis de transferencia de calor, cursos iniciales de química física, termodinámica y fenómenos de transporte. Se emplean en la inferencia de características de transporte en una variedad de sistemas, incluidos gases, sólidos, líquidos y soluciones, como los coeficientes de conductividad convectiva y térmica. Estos coeficientes se calculan utilizando la ecuación de evolución de Fourier y la ecuación de Newton. También se utilizan para calcular las constantes como el tiempo y la velocidad de transferencia en la fase transitoria del proceso. Estos factores son importantes para comprender las propiedades del sistema y cómo este se vincula con el ambiente [29].

1.3 Clasificación de las torres de enfriamiento

Son estructuras utilizadas para refrigerar un fluido caliente en sistemas de aire acondicionado, plantas de energía y otros procesos industriales. Hay varios tipos de torres de enfriamiento, cada uno diseñado para adaptarse a diferentes necesidades y condiciones [20]. Aquí hay algunos tipos comunes:

- Torres de tiro natural: también conocidas como torres de tiro pasivo, funcionan aprovechando la desigualdad existente entre el fluido a alta temperatura que ingresa y la temperatura del aire exterior más fría. No requieren ventiladores adicionales para el proceso de refrigeración, como se observa en la Figura 9.

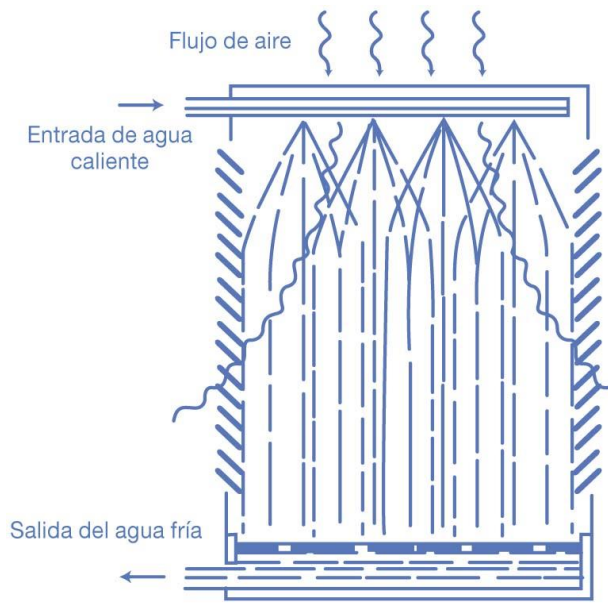


Figura 9. Torre de tiro natural

- Torres de tiro forzado: este diseño presentado en la Figura 10 utiliza ventiladores para forzar el aire a través de la estructura y así aumentar la eficiencia de enfriamiento al relacionarse el fluido a altas temperaturas con el fluido a refrigerar.

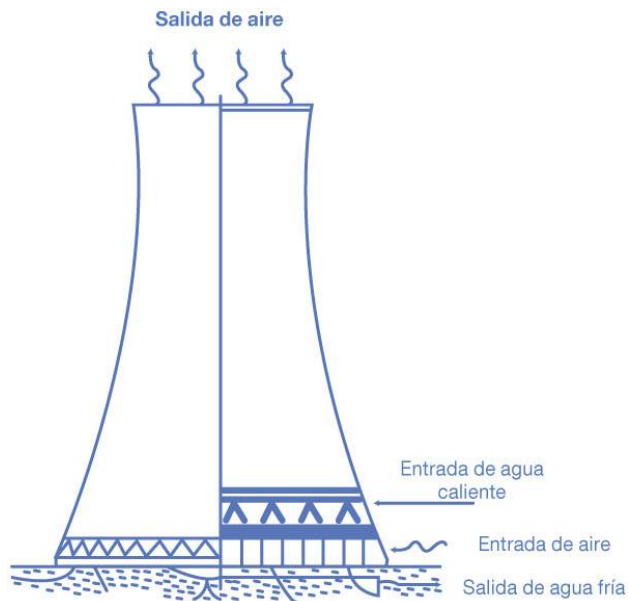


Figura 10. Torre de tiro forzado

- Torres de flujo cruzado: en estas estructuras presentes en la Figura 11, el flujo de viento circula perpendicularmente a la caída del agua. Esto proporciona una mayor eficiencia de enfriamiento y un menor riesgo de obstrucción por suciedad.

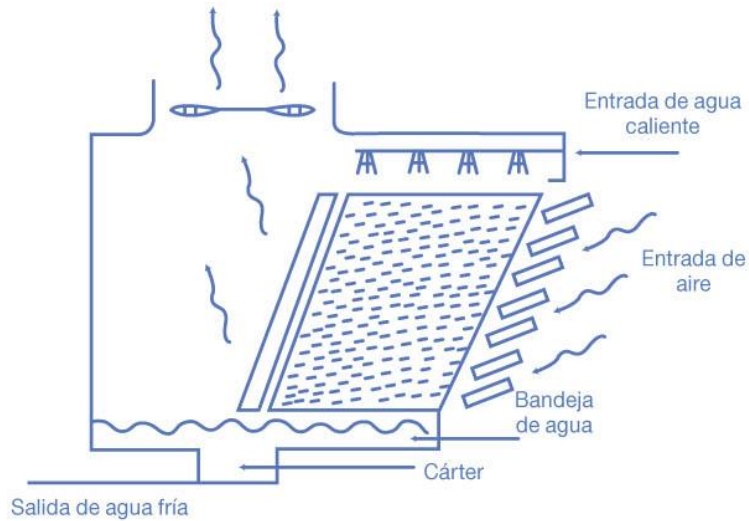


Figura 11. Torre de flujo cruzado

- Torres de flujo contracorriente: en este tipo, el agua fluye hacia abajo como se observa en la Figura 12, mientras el aire fluye en dirección opuesta. Esto permite un enfriamiento más eficiente cuando el fluido que se encuentra a mayor temperatura se relaciona con el aire frío.

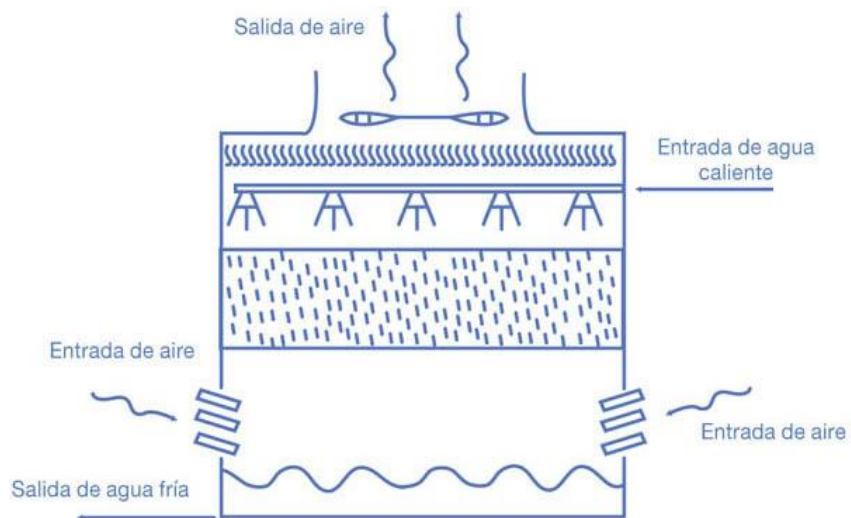


Figura 12. Torre de flujo contracorriente

- Torres de flujo de contracorriente de doble corriente: son una variante del proceso de flujo a contracorriente, observamos la Figura 13 donde el fluido y el aire fluyen en diferentes compartimentos separados, lo que mejora aún más la eficiencia de enfriamiento.

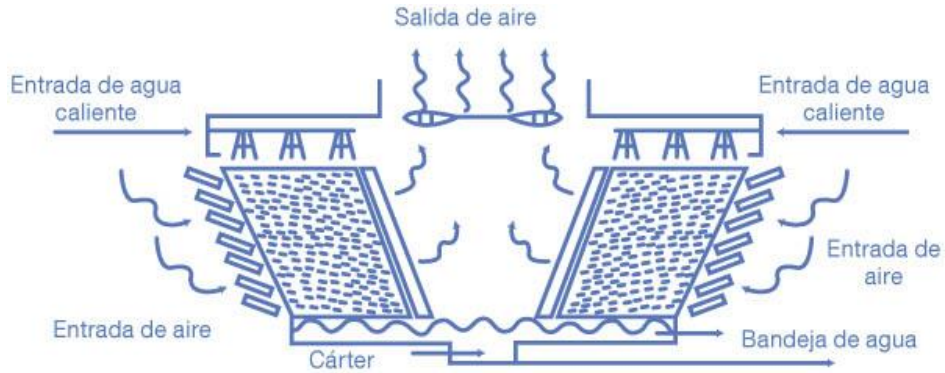


Figura 13. Torre de flujo de contracorriente de doble corriente

- Torres híbridas: estas torres mostradas en la Figura 14 combinan características de los diferentes tipos mencionados anteriormente para adaptarse a necesidades específicas de enfriamiento o limitaciones de espacio.

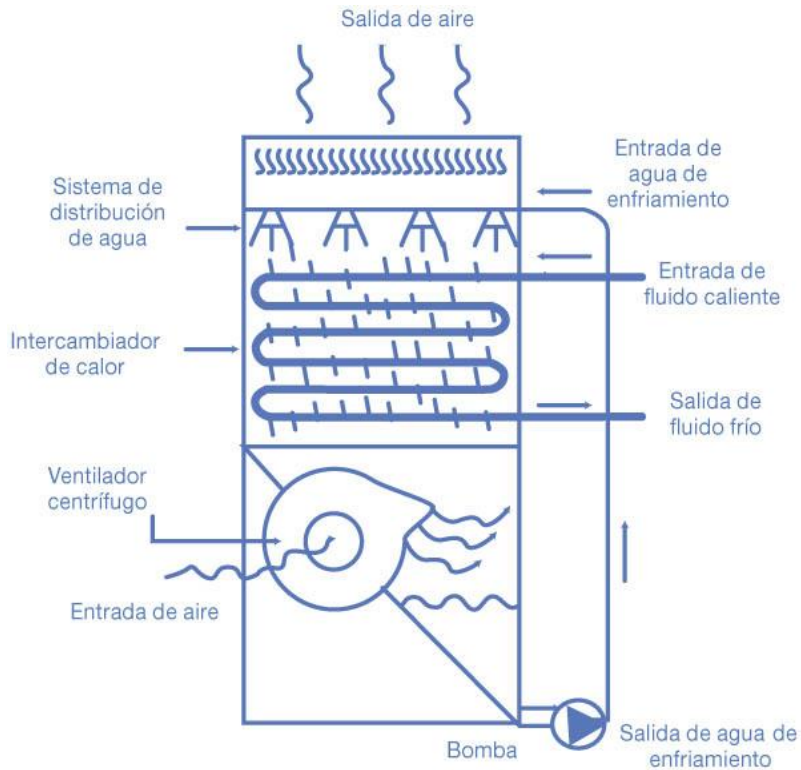


Figura 14. Torre híbrida

- Torres de tiro inducido: son sistemas utilizados en plantas industriales para disipar el calor generado. Funcionan mediante la evaporación de agua caliente rociada sobre rellenos dentro de la torre mostrada en la Figura 15. El aire se extrae mediante ventiladores en la parte superior, lo que mejora la eficiencia al aumentar la circulación y evaporación del agua.

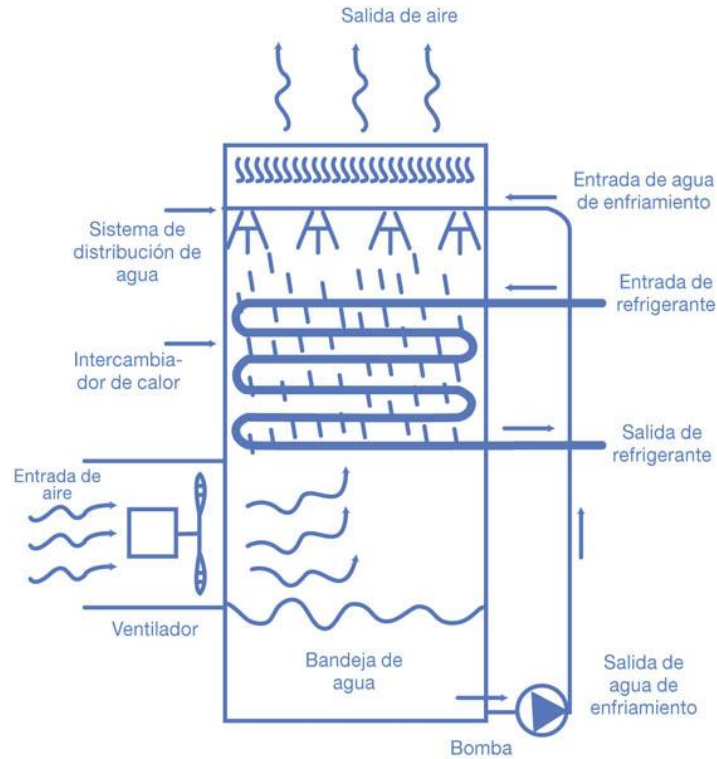


Figura 15. Torre de tiro inducido

Cada tipo de torre de enfriamiento presenta sus virtudes y problemas si se habla de eficiencia energética, requerimientos de espacio, mantenimiento y valores agregados por operación, entre otros factores. Elegir el tipo de torre adecuado depende de los requisitos específicos de enfriamiento de cada aplicación [20]. La información recopilada se expresa mediante la Figura 16.

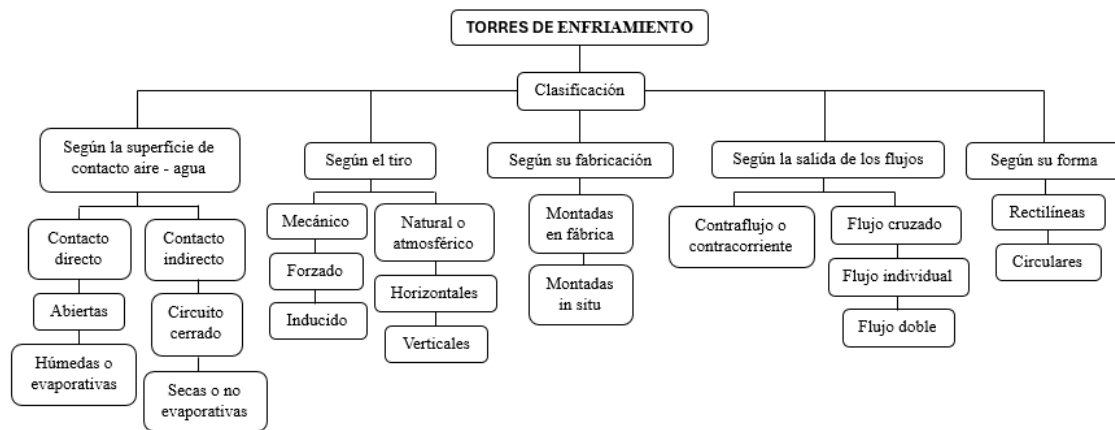


Figura 16. Clasificación [13].

1.3.4 Desempeño de una torre

Es parte esencial de las instalaciones industriales y los sistemas de calefacción, utilizada para disminuir el exceso de calor dentro de un espacio durante las operaciones de fabricación. Su objetivo principal es intercambiar calor con una corriente de aire más frío para reducir la temperatura de un fluido caliente que transita dentro del sistema.

El método de refrigeración por líquido se consigue dividiendo el líquido calentado uniformemente a través de una superficie conocida como relleno, que suele estar formada por láminas metálicas y está destinada a intercambiar calor. Este relleno crea más superficie entre el aire y el líquido, lo que favorece a una transmisión más eficaz del calor.

El procedimiento se realiza en torres de carácter mecánico, donde el líquido pasa mediante láminas de relleno, en donde una corriente de aire se involucra en dichas láminas en dirección ascendente, lo que favorece al intercambio de temperatura y la evaporación. Mientras que el líquido enfriado se recoge al pie de la torre y se bombea de nuevo al sistema para su reutilización, el aire caliente y húmedo resultante se descarga en el aire colindante [30].

Una torre de enfriamiento se divide en tres etapas fundamentales:

1.3.5 Balance de masa

La noción de equilibrio másico se fundamenta en la conservación de la masa dentro de un proceso aislado, donde las entradas de la masa se compensan entre sí con las salidas, lo que resulta en una variación neta de cero [30].

1.3.6 Balance de energía

Es un principio de preservación térmica, en donde se demuestra que la energía de un sistema que entra y sale es equivalente al resultado de las transformaciones internas de energía, masa y trabajo. Es factible examinar una torre de refrigeración desde esta premisa. Se asume que no hay transferencia de calor ni trabajo con el entorno al considerar la torre de refrigeración como un sistema cerrado. También se cree que las energías mecánicas, incluidas la cinética y la potencial, son mínimas [30].

1.3.7 Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor, también conocido como coeficiente global de transferencia térmica, es una medida que describe la eficiencia global con la que el calor se transfiere entre dos medios (por ejemplo, entre un fluido y una superficie sólida o entre dos fluidos). Este coeficiente es crucial en ingeniería térmica y procesos industriales donde se necesita controlar y optimizar la transferencia de calor, como en intercambiadores de calor, refrigeración de equipos, y sistemas de calefacción [30].

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se define como la cantidad de calor transferido a través de una superficie por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura entre los dos medios involucrados. Es una combinación de los coeficientes de transferencia de calor convectiva y conductiva que ocurren en cada lado de la interfaz.

1.4 Componentes

1.4.4 Condensador

Es un artefacto empleado en la destilación para enfriar y convertir en líquido los vapores producidos durante la evaporación. Específicamente, se colocan en la parte superior de las columnas de destilación para recuperar los elementos más volátiles presentes en el vapor [30].

1.4.5 Bomba

Es un dispositivo creado para desplazar líquidos o gases de un punto a otro mediante la generación de una disparidad de presión en el sistema. Por lo general, está compuesta por un rotor que gira en el interior de un recinto y se vincula a un motor de combustión o eléctrico, que generalmente por medio del trabajo efectuado genere la energía imprescindible para su funcionamiento [30].

1.4.6 Tanque de almacenamiento

Su propósito principal es almacenar de forma segura grandes cantidades de líquidos o gases. Estos tanques se fabrican con materiales robustos y duraderos, como acero al carbono, acero inoxidable u otros compuestos, seleccionados según las propiedades químicas y físicas del fluido que se va a contener [30].

1.4.7 Termómetro de bulbo

Un termómetro de bulbo húmedo, o psicrómetro, es similar a un termómetro convencional, pero se distingue por su bulbo recubierto con una tela húmeda. Esta tela, al evaporarse el agua que contiene, absorbe calor del bulbo, lo que causa una disminución de la temperatura medida. Este proceso permite determinar la humedad relativa en función de la temperatura ambiente y la temperatura del agua en evaporación, lo cual es esencial en el contexto de las torres de enfriamiento[31].



Figura 17. Medidor WBGT - temperatura de globo de bulbo húmedo

La temperatura del bulbo húmedo (TBH) no se define como un valor de equilibrio sino se define como un valor estacionario, el cual es determinado por la temperatura de una pequeña masa de agua evaporada al entrar en contacto con aire no saturado. A diferencia de un termómetro de bulbo seco que no cuenta con ningún recubrimiento, este mide temperaturas ambientes sin influencia de humedad ni evaporación, como lo haría un termómetro convencional [31].

1.5 Mantenimiento al sistema de recirculación de agua

La desinfección en el proceso de recirculación y torres de enfriamiento es un proceso crucial para optimizar las condiciones del fluido previniendo la proliferación de microorganismos nocivos, como bacterias, hongos y algas. Estos sistemas pueden ser propensos a la contaminación microbiológica debido a la presencia de agua estancada como nutrientes disponibles [32].

Existen varios métodos para desinfectar estos sistemas:

1.5.4 Cloración

Se puede usar cloro u otros productos químicos desinfectantes para eliminar microorganismos. El cloro es efectivo para matar bacterias y algas, pero se debe monitorear cuidadosamente su concentración para así evitar diversos problemas como dificultades en la salud de las personas, además de la corrosión dentro del sistema [32].

1.5.5 Ozono

El ozono es un poderoso desinfectante que se puede utilizar para tratar el agua en sistemas de recirculación y torres de enfriamiento. A diferencia del cloro, el ozono no deja subproductos químicos y es efectivo contra una amplia gama de microorganismos [32].

1.5.6 Ultravioleta (UV)

La radiación UV se puede utilizar para desinfectar el agua al dañar el ADN de microorganismos, lo que impide su reproducción. Es un método efectivo y no deja residuos químicos, pero puede requerir un diseño adecuado del sistema para garantizar una exposición uniforme al agua [32].

1.5.7 Biocidas

Un biocida es una sustancia química o microorganismo diseñado para eliminar, neutralizar o inhibir la actividad de organismos nocivos que pueden afectar la salud humana o animal, o causar daños a productos naturales e industriales. Estos agentes son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la desinfección de superficies, el tratamiento de aguas, la protección de cultivos y la preservación de productos industriales. Los biocidas abarcan desde desinfectantes comunes hasta formulaciones especializadas para el control de plagas y la conservación de materiales.

En el ámbito de la gestión de sistemas de recirculación y torres de enfriamiento, además del cloro, se dispone de una extensa gama de biocidas químicos. Estos biocidas muestran una variabilidad significativa en términos de eficacia, toxicidad y compatibilidad con otros componentes del sistema, lo que permite seleccionar el agente más adecuado según las necesidades específicas del entorno operativo.

Software

La empresa de software es un referente en la creación y manufactura de una extensa gama de programas para diversas aplicaciones y propósitos, abarcando áreas como el manejo autónomo de procesos de una fábrica o industria, la automatización de edificios. Sus productos están concebidos para potenciar la eficiencia, la seguridad y la rentabilidad en las actividades empresariales [30].

Software de realización:

1.5.8 SolidWorks

Es una potente herramienta de diseño que se utiliza principalmente en la industria de la ingeniería y el diseño para crear modelos tridimensionales de componentes y ensamblajes [33]. Algunas de las funciones y utilidades de SolidWorks incluyen:

Diseño de piezas: SolidWorks permite a los usuarios crear modelos tridimensionales detallados de piezas individuales, ya sean simples o complejas, utilizando una variedad de herramientas de modelado [33].

Simulación: SolidWorks ofrece capacidades de análisis de simulación que permiten a los ingenieros realizar un análisis de rendimiento y eventualmente evaluar la conducta de los diseños en condiciones específicas, como el estrés estructural, la vibración, la fatiga y el flujo de fluidos [33].

Colaboración: SolidWorks facilita la colaboración entre equipos de diseño y fabricación al permitir la creación y el intercambio de modelos en un formato estándar y compatible con otros sistemas CAD [33].

1.6 Conclusiones del capítulo

Terminado este apartado teórico se ha recopilado una variedad de datos e información crucial relacionada con las torres de enfriamiento, incluyendo tanto sus componentes como los procesos térmicos involucrados. Este tema es de suma relevancia en el ámbito industrial, dado el papel fundamental que desempeñan las torres de enfriamiento. Se destaca especialmente la importancia de discernir e interpretar estas estructuras, lo cual nos permite evaluar su eficiencia y experimentar con distintas metodologías, incluyendo la simulación y el análisis numérico. Estas herramientas nos aportan la capacidad de estudiar con mayor precisión la transmisión de temperatura en torres de enfriamiento, lo que a su vez puede conducir a la optimización de su funcionamiento.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO ANALÍTICO TÉRMICO DEL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA CALIENTE PROVENIENTE DE REACTORES MEDIANTE TORRES DE ENFRIAMIENTO

En el siguiente capítulo se desarrollará un análisis térmico referente a la torre de refrigeración por medio de agua que proviene de reactores químicos.

Para realizar un análisis correcto del enfriamiento del agua caliente mediante el proceso de tiro inducido, es necesario conocer las ecuaciones para el análisis térmico de la transmisión simultánea de energía térmica y masa, tanto su alcance como su dirección de transferencia entre estas, se da introducción al desarrollo analítico previo al diseño definiendo las bases además de criterios los cuales permitirán conocer los parámetros y propiedades que serán necesarios para el análisis necesario.

2.1 Área transversal

El área transversal es una medida importante si se habla de conducción térmica para el modelo numérico de cantidad de calor transferido mediante un material o fluido dentro de un sistema de enfriamiento o calentamiento. Haciendo referencia al serpentín en una torre de enfriamiento, el área transversal generalmente se refiere al área a través de la cual el fluido fluye y la transferencia de calor ocurre [38].

$$A_t = \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_{in}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Donde:

A_t : área transversal, [m²]

\varnothing_{in} : diámetro interno, [m]

2.2 Flujo másico

Es una medida usada para conocer la proporción de masa que tiene un fluido que se encuentra en circulación en un intervalo de tiempo [39].

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \quad (2)$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico, [kg/s].

ρ : densidad, [kg/m³].

V: velocidad, [m/s].

A: área, [m²].

2.3 Transferencia de calor

Esta conducción térmica sensible es un procedimiento donde el calor que se transmite a un cuerpo o sistema provoca un cambio en su temperatura sin que ocurra un cambio de fase. Este tipo de intercambio térmico discrepa del criterio de la transferencia de calor latente [40].

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

Donde:

Q: tasa de transferencia de calor, [kW].

\dot{m} : flujo masico, [kg/s].

C_p: calor específico, [KJ/kg·C].

ΔT : variación de temperatura, [°C].

2.4 Área superficial

El área superficial es una medida importante tanto en el estudio como el análisis de transferencia de calor, especialmente si se trata de intercambiadores de calor, serpentines y otros dispositivos donde se intercambia el calor entre fluidos por medio de una sección sólida. En el contexto de un

serpentín, como en una torre de enfriamiento, el área superficial efectiva es importante en la evaluación de la efectividad dentro del proceso de transmisión térmica [41].

$$A_s = \pi \cdot \varnothing_{in} \cdot L \cdot \# \text{ tubos} \quad (4)$$

Donde:

A_s : área superficial, [m²].

\varnothing_{in} : diámetro interno, [m]

L: largo de la tubería, [m].

2.5 Largo de tubería

Usamos la misma ecuación del área superficial para conocer el largo total de tubería que usaremos en este proyecto, despejamos L y en lugar de usar el diámetro interior usamos el diámetro exterior para obtener la respuesta que necesitamos, pero en lugar de usar el diámetro interior usamos el diámetro exterior

$$L = \frac{A_s}{\pi \cdot \varnothing_{ext}} \quad (5)$$

Donde:

L: largo de la tubería, [m].

A_s : área superficial, [m²].

\varnothing_{ext} : diámetro exterior, [m].

2.6 Reynolds

Describe el movimiento de un fluido por medio de un parámetro adimensional. Se usa para anticipar los modelos de flujo en distintos contextos, distinguiendo entre flujo laminar y flujo turbulento [42].

$$Re = \frac{V \cdot \varnothing_{int}}{\nu} \quad (6)$$

Donde:

Re: número de Reynolds.

V: velocidad, [m/s].

\varnothing_{in} : diámetro interno, [m].

ν : viscosidad cinemática, [m²/s].

El valor del número de Reynolds indica el régimen de flujo:

- $Re < 2000$: flujo laminar.
- $2000 \leq Re \leq 4000$: flujo de transición.
- $Re > 4000$: flujo turbulento.

2.7 Prandtl

Presenta un valor adimensional que caracteriza la naturaleza del transporte de calor en un fluido. Este número compara la tasa de difusión del momento (viscosidad) con la tasa de difusión térmica (conductividad térmica), proporcionando información sobre cuál de estos mecanismos domina dentro de la transmisión de energía térmica [43].

$$Pr = \frac{\nu \cdot C_p \cdot \rho}{k} \quad (7)$$

Donde:

Pr: número de Prandtl

ν : viscosidad cinemática, [m²/s].

C_p : calor específico, [KJ/kg·C].

ρ : densidad, [kg/m³].

k: conductividad térmica, [W/m · C].

2.8 Nusselt

Es un valor adimensional utilizado en los análisis de transferencia caracterizada por convección. Este número caracteriza la eficiencia de un fluido al transferir calor con relación a la transmisión de energía térmica dada por conducción. Se define que dicha transmisión térmica convectiva se relaciona con la transmisión térmica conductiva a través de una capa límite térmica [43].

$$\text{Nu} = 0.037 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Donde:

Nu: número de Nusselt.

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

2.9 Coeficiente de transferencia de calor

Cuando este se da por convección no tiene una fórmula única y universal, ya que su valor depende de varios factores tanto por sus propiedades como las condiciones de movimiento y la geometría de la superficie sólida [44].

En este caso despejamos una fórmula para sacar el principio de Nusselt:

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{k} \quad (9)$$

Despejamos para obtener h:

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L}$$

Donde:

h: coeficiente de transferencia de calor, [W/m² · C].

Nu: número de Nusselt.

k: conductividad térmica, [W/m · C].

L: largo de la tubería, [m].

2.10 Balance de energía

La primera ley de la termodinámica dice que la energía no se crea ni se destruye; en cambio, se transfiere, esta es la base del balance de energía [20].

$$Q_h = Q_c \quad (10)$$

Donde:

Q_h: calor perdido por el fluido a mayor temperatura.

Q_c: calor ganado por el fluido a menor temperatura.

2.11 Eficiencia de la torre de enfriamiento

La eficiencia de una torre de enfriamiento puede ser expresada de la siguiente manera [42].

$$\mu = \frac{(T_{in} - T_{out}) \cdot 100}{T_{in} - T_{bh}} \quad (11)$$

Donde:

T_{in}: temperatura de entrada del fluido, [°C]

T_{out}: temperatura de salida del fluido, [°C]

T_{bh}: temperatura del bulbo húmedo, [°C]

2.12 Conclusiones del capítulo

En el capítulo que acabamos de revisar están las ecuaciones descritas, las cuales infieren de manera significativa en el análisis estructural bajo un trabajo óptimo, por lo que las ecuaciones fueron escogidas de manera minuciosa y estas van de acuerdo con el funcionamiento deseado dominado por las características termodinámicas de los fluidos que van a interactuar.

Los parámetros propuestos fueron consultados en varios sectores industriales, por lo que decidimos hacer un promedio el cual pueda acercar a esta torre de enfriamiento a un modelo más versátil,

tomando en cuenta la convección forzada y natural que logra tener, permitiendo de esta manera llegar a encontrar el dimensionamiento correcto de la torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL DISEÑO TÉRMICO EN EL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA CALIENTE PROVENIENTE DE REACTORES MEDIANTE TORRES DE ENFRIAMIENTO

En el presente capítulo se recolecta información previa al diseño de una torre de enfriamiento, en donde se ilustra los parámetros correspondientes a los procesos de diseño térmico bien optimizado no solo garantiza un enfriamiento efectivo del agua caliente, sino que también minimiza el riesgo de sobrecalentamiento y asegura un funcionamiento estable y confiable del reactor

Para el diseño del serpentín, se utilizará tubería de cobre material excelente para la transferencia de calor. La medida seleccionada es de 3 plg en la Tabla 2 se pueden encontrar tanto estas medidas como otros parámetros relevantes que se emplearán en el diseño del serpentín. Estos parámetros se ajustarán a la realidad para asegurar una construcción precisa y eficiente.

Tabla 2. Parámetros y medidas del serpentín

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---------------------------|--------------|---------------|
| Diámetro interior | 0.078 | m |
| Diámetro exterior | 0.07938 | m |
| Largo máximo de cada tubo | 2.5 | m |
| Número de tubos | 75 | |

A continuación, en la Tabla 3 se presentan las propiedades del agua a 0°C y parámetros que debe tener el agua, la cual es el fluido que circulará por el serpentín para su enfriamiento.

Tabla 3. Parámetros y propiedades del agua a 0°C

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Caudal | 0.5 | m ³ /s |
| Temperatura inicial | 63 | °C |
| Temperatura final | 25 | °C |
| Calor específico | 4.22 | kJ/kg·K |
| Densidad | 1000 | kg/m ³ |
| Velocidad | 0.8 | m/s |
| Viscosidad cinemática | 1.793x10 ⁻⁶ | m ² /s |
| Conductividad térmica | 0.677 | W/m·K |

3.1 Área transversal

Cuando se habla de estos conductos, calculamos el área transversal de las tuberías el cual estima el volumen del fluido que circulara a través de ellas en un tiempo estimado.

$$AT = \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_{in}}{2}\right)^2$$

Se reemplaza el diámetro interno anteriormente especificado:

$$AT = \pi \cdot \left(\frac{0.078 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$AT = 0.0048 \text{ m}^2$$

3.2 Flujo másico del agua

Calculamos la cantidad que mide la masa del fluido que se transporta al interior de estos conductos, tuberías o cualquier otro sistema de flujo en un tiempo determinado. Convencionalmente se representa en unidades de masa sobre tiempo, como kilogramos por segundo (kg/s) o gramos por segundo (g/s) [1].

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A$$

Y utilizando los datos para este caso se obtiene:

$$\dot{m} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.8 \frac{m}{s} \cdot 0.000178 m^2$$

$$\dot{m} = 3.8227 \frac{kg}{s}$$

3.3 Calor disipado de la torre de enfriamiento

A continuación, con los datos obtenidos además de los parámetros planteados procedemos a calcular la cantidad de calor que será disipado por la torre de enfriamiento. Este proceso es fundamental para aplicaciones en las que se necesita controlar la temperatura.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \text{ agua} \cdot \Delta T$$

A continuación, se especifica que conforma la variación de temperatura:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \text{ agua} \cdot (T_{out} - T_{in})$$

Donde:

T_{out} : temperatura final, [°C]

T_{in} : temperatura inicial, [°C]

Se reemplaza con los datos del agua se obtiene:

$$Q = 3.8227 \frac{kg}{s} \cdot 4.22 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (25 - 63) ^\circ C$$

$$Q = -1839,0197 \text{ kW}$$

3.4 Área superficial

Además del calor disipado debemos calcular el área superficial el cual se refiere a la superficie total a través de la cual el calor se transfiere entre dos medios. Esta superficie puede ser la superficie de un objeto, la pared de un tubo, o cualquier otro interfaz donde exista una variación de la temperatura que impulse la transmisión de energía térmica.

$$A_s = \pi \cdot \varnothing_{in} \cdot L \cdot \#tubos$$

Con los parámetros del serpentín se tiene:

$$A_s = \pi \cdot 0.078 \text{ m} \cdot 2.5 \text{ m} \cdot 75$$

$$A_s = 45.9458 \text{ m}^2$$

3.5 Largo de la tubería

Después de los cálculos anteriormente realizados obtenemos el largo de la tubería es un parámetro fundamental en la estructura y operatividad de estos conductos.

Para este cálculo usaremos la misma ecuación con la cual se obtuvo el área superficial.

$$A_s = \pi \cdot \varnothing_{ext} \cdot L$$

Despejamos el largo de la tubería:

$$L = \frac{A_s}{\pi \cdot \varnothing_{ext}}$$

Y utilizando los datos de este caso se tiene:

$$L = \frac{45.9458 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0.07938 \text{ m}}$$

$$L = 184.2404 \text{ m}$$

El largo resultante de la tubería se redondea hacia arriba para tener un margen de error y facilitar la construcción de la tubería.

$$L \approx 185 \text{ m}$$

3.6 Reynolds

Una vez alcanzado la longitud de la tubería se establece el número de Reynolds con los datos obtenidos y proporcionados.

$$\text{Re} = \frac{V \cdot \varnothing_{\text{int}}}{\nu}$$

A continuación, se reemplaza con los datos de este caso se tiene:

$$\text{Re} = \frac{0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.078 \text{ m}}{1.793 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$\text{Re} = 44802 \rightarrow \text{Turbulento}$$

3.7 Prandtl

Se obtendrá el número de Prandtl en donde se muestra los procesos donde conducción de calor se ve afectada por la variación de temperatura del fluido

$$\text{Pr} = \frac{\nu \cdot C_p \text{ agua}}{k}$$

Y utilizando los datos de este caso se tiene:

$$\text{Pr} = \frac{1.793 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 4.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{0.677 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$\text{Pr} = 0.01117$$

3.8 Número de Nusselt

Describe como la transferencia de calor convectiva se involucra con la conductividad térmica del fluido [5].

$$Nu = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Se reemplaza con los datos de este caso se tiene:

$$Nu = 0.037 \cdot 44802.0078^{0.8} \cdot 0.0112^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 35.556$$

3.9 Coeficiente global de transferencia de calor

En este caso usamos una fórmula de Nusselt:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

Despejamos para obtener h:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Con los datos de este caso se tiene:

$$h = \frac{35.56 \cdot 0.677 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{184.24 \text{ m}}$$

$$h = 0.1306 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Una vez desarrollado el modelo matemático del serpentín se procede con los del rociador este encuentra en la parte superior del serpentín, el cual se pretende que la medida de la tubería sea la misma.

3.10 Temperatura final del agua del rociador

Para la temperatura final del agua de rociador se utiliza la ecuación del balance de energía:

$$Q_h = Q_i$$

Se empieza analizando los datos que se tiene:

$$\dot{m} \cdot C_p \text{ serpentín} \cdot (T_{in} - T_{out}) = \dot{m} \cdot C_p \text{ rociador} \cdot (T_f \text{ rociador} - T_i \text{ rociador})$$

Para el rociador usaremos los datos en se encuentran en la Tabla 4:

Tabla 4. Otros parámetros necesarios

| Parámetro | Valor | Unidad |
|----------------------------------|--------------|---------------|
| Flujo másico del rociador | 300 | kg/s |
| Temperatura inicial del rociador | 8 | °C |
| Temperatura del bulbo húmedo | 10 | °C |
| Calor específico | 4.22 | kJ/kg·K |

Se reemplaza con los datos de este caso y despejamos la temperatura final del rociador y se tiene:

$$3.82 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.22 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (63 - 25)^\circ\text{C} = 300 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.22 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (\text{Tf rociador} - 8)^\circ\text{C}$$

$$\text{Tf rociador} = 11.16^\circ\text{C}$$

3.11 Eficiencia de la torre de enfriamiento.

Para la eficiencia es necesario obtener la temperatura del bulbo húmedo el cual se obtiene mediante mediciones, en este caso se usará la temperatura especificada en la Tabla 6, además del uso de la ecuación de la eficiencia de una torre de enfriamiento.

$$\mu = \frac{(\text{Tin} - \text{Tout}) \cdot 100}{\text{Tin} - \text{Tbh}}$$

Con los datos de este caso se tiene:

$$\mu = \frac{(63^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot 100}{63^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}}$$

$$\mu = 71,7 \%$$

3.12 Prediseño serpentín

Teniendo en cuenta las consideraciones previas al diseño final, en la Figura 18 se representa uno de los tres serpentines usados su altura es de 5 m y el ancho de es de 2.5 m.

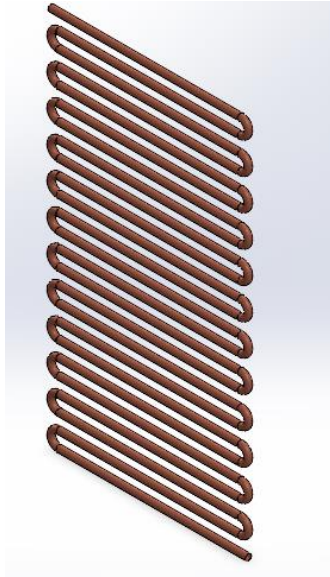


Figura 18. Prediseño del serpentín

3.13 Conclusiones del capítulo

Después de llevar a cabo el desarrollo numérico de la torre de enfriamiento en este apartado, se encuentra que la longitud total para la construcción de los serpentines es de 185 m, además su diámetro que está especificado es de 3 plg con esta longitud se garantiza que el serpentín de la torre de enfriamiento tenga la suficiente transferencia de calor para que este logre enfriar el agua a la temperatura deseada.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REFRIGERACIÓN DEL AGUA CALIENTE PROVENIENTE DE REACTORES MEDIANTE TORRES DE ENFRIAMIENTO

En este capítulo se presenta la interpretación final del diseño estructural de la torre de refrigeración tanto como su simulación de transferencia térmica del fluido involucrado en proceso de enfriamiento, posterior al análisis numérico realizado en el capítulo 3 que contribuye con el desarrollo de comparativas en la eficiencia del proceso tomando en cuenta diferentes factores que influyen en la variación de temperatura como las condiciones climáticas o debido al exceso de calor generado por trabajos industriales.

4.1. Geometría del sistema

La geometría de la torre de enfriamiento es clave en el proceso de refrigeración del agua y para la simulación de este, esto define la estructura física gracias a los cálculos realizados en el capítulo 3 podemos seleccionar los materiales que se usaran para la construcción de la torre de enfriamiento, del serpentín y del rociador.

En este apartado daremos una descripción de la geometría de la torre de enfriamiento que se usara en la simulación:

Carcasa de la torre de enfriamiento

Material: acero inoxidable

Altura: 6.5 m

Ancho: 3.5 m

Largo: 4.5 m

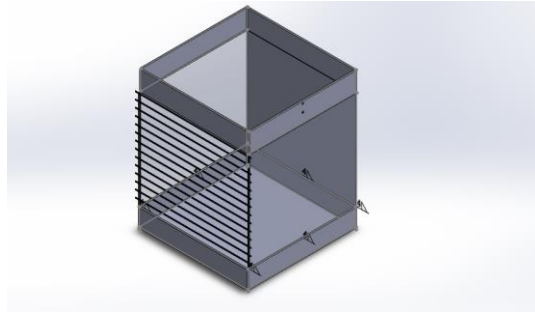


Figura 19. Carcasa de torre de enfriamiento

Conector de los serpentines

Material: cobre tipo K

Diámetro interior: 0,078 m

Diámetro exterior: 0.07938 m

Largo: 3.5 m

Separación entre serpentines: 120°

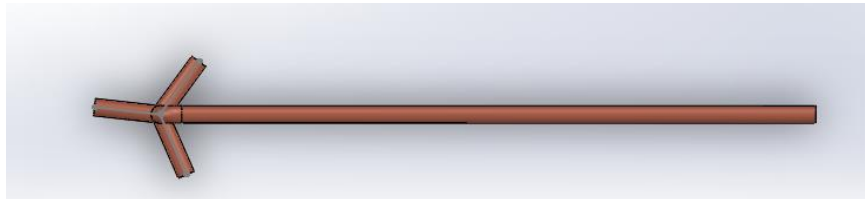


Figura 20. Conector de los serpentines

Serpentín

Material: cobre tipo K

Diámetro interior: 0,078 m

Diámetro exterior: 0.07938 m

Longitud: 61,6 m

Separación: 0.122 m

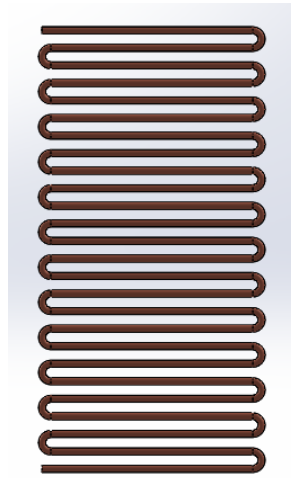


Figura 21. Serpentín

Rociador

Material: cobre tipo K

Diámetro interior: 0,078 m

Diámetro exterior: 0.07938 m

Largo de cada tubo: 3 m

Separación entre ellos: 120°

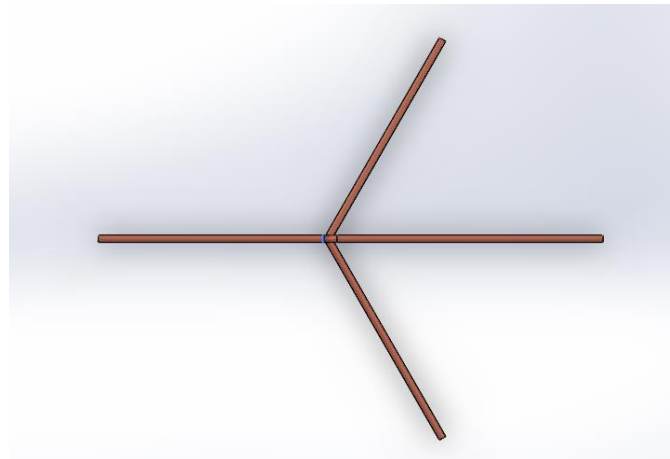


Figura 22. Rociador

Una vez presentado cada una de las partes de la torre de enfriamiento se proporciona una captura de la torre de enfriamiento ya ensamblado como se observa en la Figura 23.

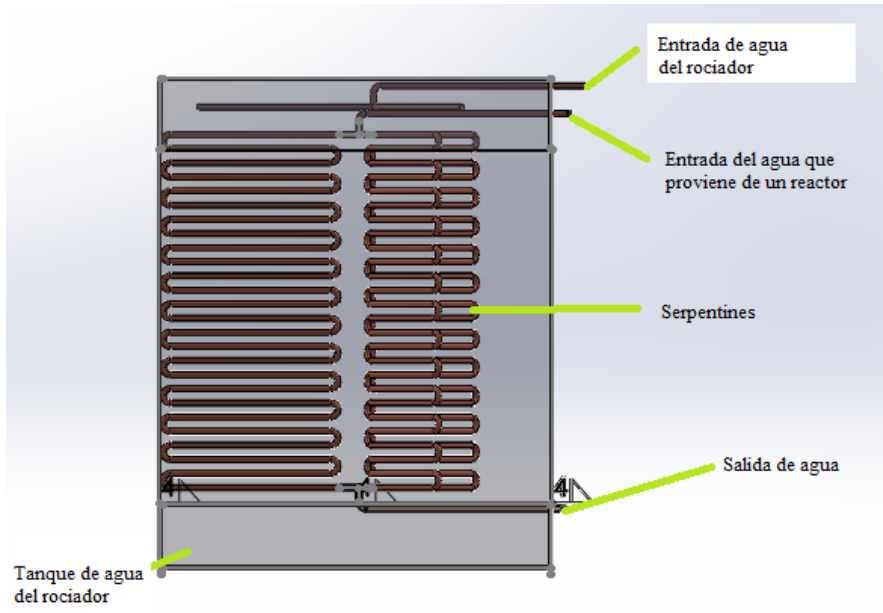


Figura 23. Torre de enfriamiento ensamblada

4.2. Análisis térmico realizado en SolidWorks

4.2.1. Flow simulation

Una vez ensamblado la torre de enfriamiento continuamos con el flow simulation, el cual es una de las muchas herramientas para simulaciones que nos ofrece SolidWorks, en la Figura 24 se puede ubicar en donde aparece esta opción y empezamos a parametrizar nuestra simulación, como por ejemplo tipo de transferencia de calor que existe y en donde queremos que se realice este estudio si es por fuera o por dentro de la tubería.

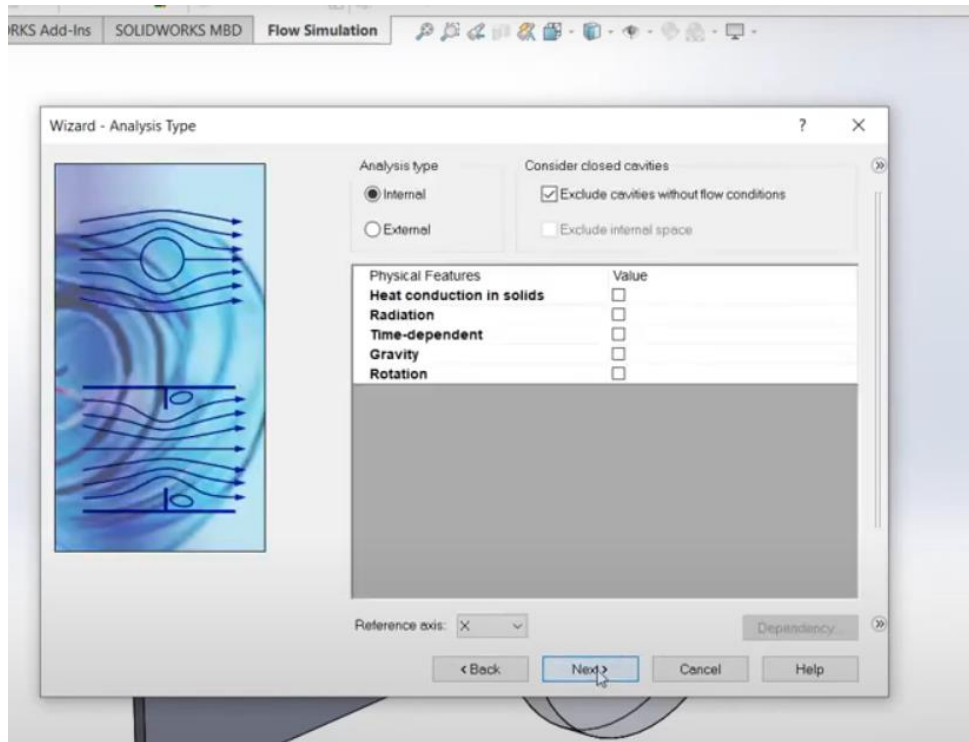


Figura 24. Flow simulation de SolidWorks

Al terminar este proceso, en la Figura 25 aparece un nuevo menú en la parte izquierda de la pantalla el cual nos ubica una serie de acciones que debemos realizar para parametrizar la simulación.

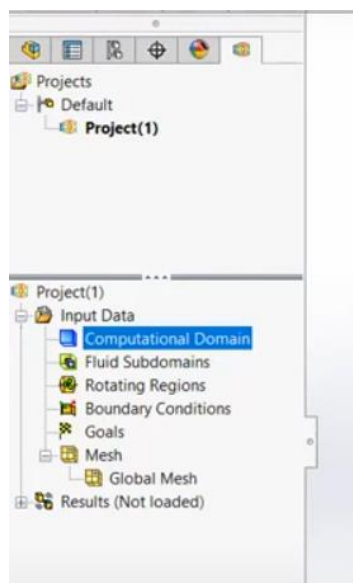


Figura 25. Menú del flow simulation

4.2.2. Generación de malla

Una vez ubicados los parámetros generales de esta simulación se procede a ubicar el control del volumen cerrado, para esto se usará tapones el cual se colocará al inicio y al final del serpentín como podemos ver en la Figura 26 esto nos servirá para ubicar el área de estudio requerido.

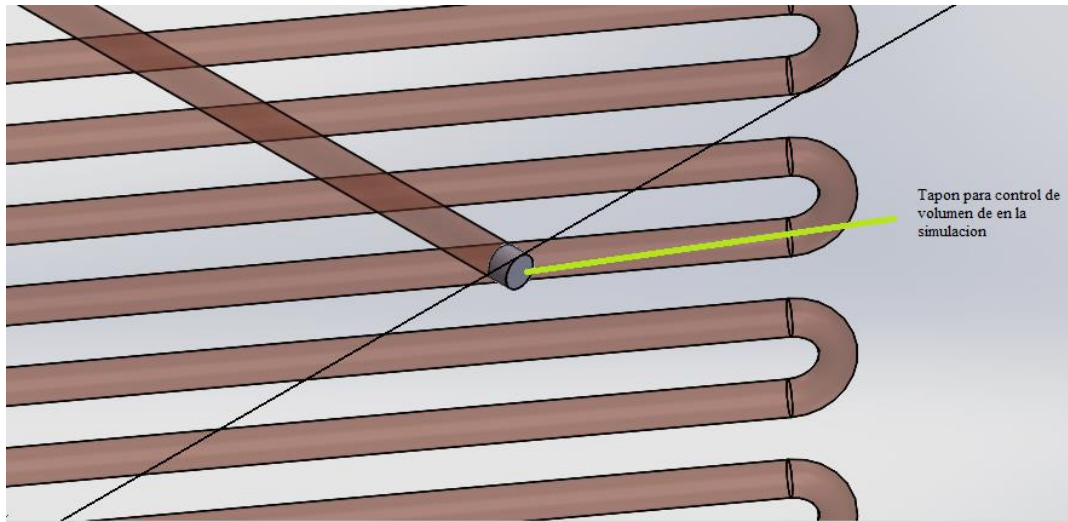


Figura 26. Tapón para volumen de control cerrado

Una vez realizado estos topones, seleccionamos la opción global mesh con el que generamos el mallado, una vez seleccionado aparecerá la opciones del mallado en nuestro caso lo ubicamos en el nivel 6, esto sirve para capturar resultados de velocidad y de temperatura, al refinar el mallado como en nuestro caso existe una mayor precisión de la transferencia calorífica y el efecto que esto tiene en cada uno de los tubos del serpentín como se puede observar en la Figura 27.

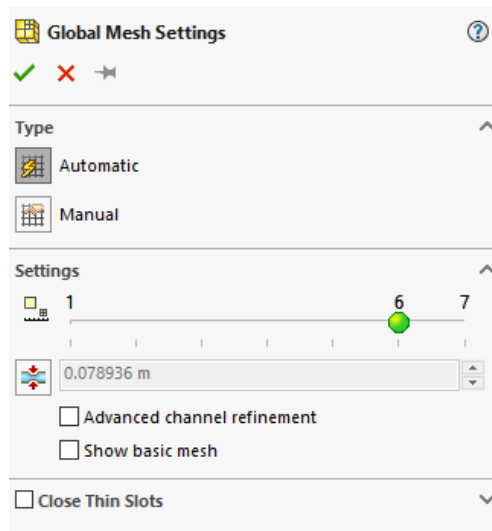


Figura 27. Configuración del mallado

Como resultado del creado del mallado y el área en el que la simulación se hará efectiva como se nos muestra en la Figura 28.

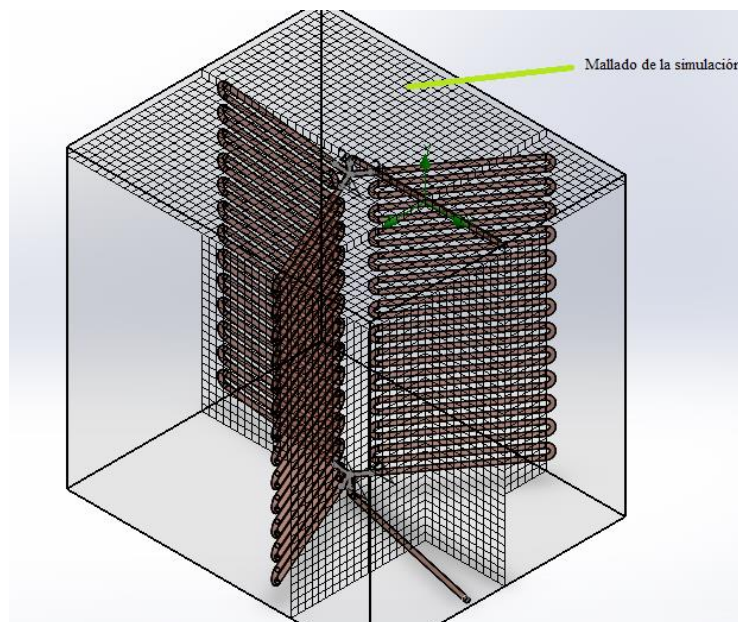


Figura 28. Mallado de la simulación

4.2.3. Condiciones de frontera de la simulación

Una vez implementado el mallado continuamos con las condiciones de frontera como el enfoque principal se usa la conducción térmica para la reducción de temperatura del agua que fluye dentro

del serpentín, en la Tabla 5 se establecen criterios que complementan la simulación, en la cual se identifica al rociador como el factor principal en el proceso de enfriamiento.

Tabla 5. Condiciones de la entrada del agua en los serpentines

| Temperatura de entrada del fluido | Presión de entrada del fluido | Material del serpentín | Caudal del fluido |
|--|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 63°C | 105 kPa | Cobre | 3.8227 kg/s |

Así mismo establecemos las condiciones de frontera de rociador los cuales se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones de entrada del agua al rociador

| Temperatura de entrada del fluido | Presión de entrada del fluido | Material del serpentín | Caudal del fluido |
|--|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 8 °C | 105 kPa | Cobre | 300 kg/s |

Además, en la Tabla 7 se procede a establecer algunos parámetros climatológicos que existen en Quito encontrados en varias fuentes [45].

Tabla 7. Condiciones en Quito [45].

| Temperatura ambiente promedio | Humedad relativa promedio en el año | Altura sobre el nivel del mar | Temperatura de bulbo húmedo en quito |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 24 °C | 65 % | 2850 m.s.n.m | 10 °C |

4.3 Resultados obtenidos

4.3.1. Explicación de los parámetros

Para analizar los resultados se procede a explicar algunos puntos que son necesarios para la comprensión de los mismo.

En la Figura 29, se puede observar una escala de color en la cual se distingue la variación de temperatura que tiene el fluido a medida que recorre el serpentín, en este ejemplo siendo máximo 63 °C y el mínimo 24.99 °C,

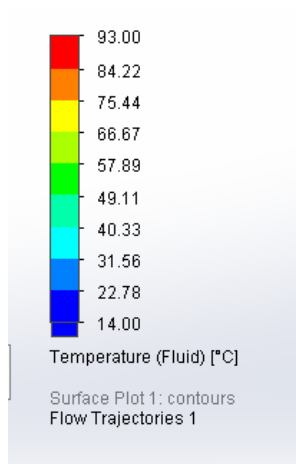


Figura 29. Escala de colores de temperatura del fluido

Además de esto, se deberá aprender a interpretar como el fluido circula por el serpentín el cual en la Figura 30 se podrá apreciar como este va circulando y como se observa se intuye que el fluido caliente recorre hasta la parte inferior del serpentín.

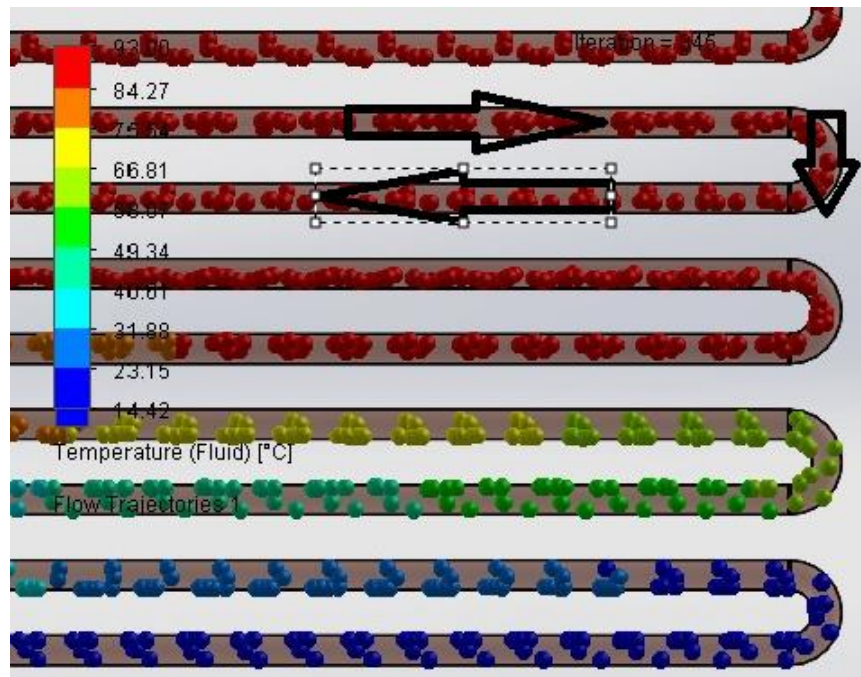


Figura 30. Dirección del fluido en el serpentín

4.3.2. Resultados

Una vez entendido estos puntos se procede al análisis la simulación por el cual podemos que la temperatura de entrada del fluido es de 63 °C y el fluido al llegar al final del serpentín se encuentra en el objetivo que se planteó en un inicio el cual es que el enfriamiento llegue a los 25 °C

La Figura 31 presenta la disminución de la temperatura a lo largo del serpentín se debe a diversos factores, como la oposición que presentan los conductos al paso del fluido dentro del serpentín y las fuerzas de fricción interna. Este modelo es especialmente óptimo porque permite estudiar cómo estas variables afectan el comportamiento del fluido a medida que se mueve dentro de un sistema cerrado.

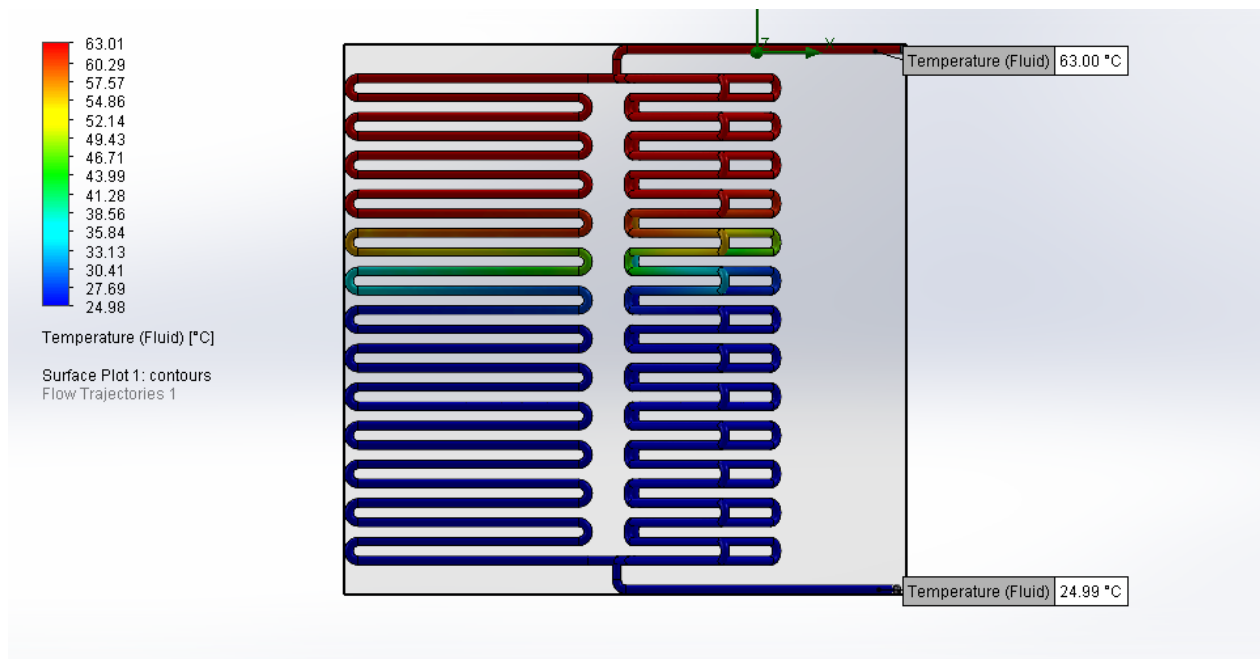


Figura 31. Temperatura del fluido en el serpentín

Además, el software nos ofrece unas tablas que se pueden exportar al Excel de la simulación del agua enfrizada, dichos datos se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros de simulación

| Parámetro | Mínimo | Máximo | Promedio | Volumen promedio | Superficie [m²] |
|---|---------------|---------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Presión [Pa] | 98056,39 | 205365,33 | 160190,79 | 149381,40 | 49,54 |
| Densidad (fluido) [kg/m ³] | 981,41 | 996,27 | 990,73 | 988,84 | 49,54 |
| Velocidad [m/s] | 0,00 | 5,39 | 0,00 | 4,93 | 49,54 |
| Velocidad (X) [m/s] | -5,39 | 4,93 | 0,00 | -0,09 | 49,54 |
| Velocidad (Y) [m/s] | -0,19 | 0,15 | 0,00 | 0,01 | 49,54 |
| Velocidad (Z) [m/s] | 0,00 | 1,06 | 0,00 | 0,46 | 49,54 |
| Coefficiente de transferencia de calor [W/m ² /K] | 0,00 | 2202,17 | 3,59 | | 49,53 |
| Esfuerzo cortante [Pa] | 0,00 | 125,51 | 6,65 | | 49,53 |
| Flujo de calor superficial [W/m ²] | -46166,30 | 16681,99 | -0,90 | | 150,59 |
| Temperatura (fluido) [°C] | 24,98 | 63,01 | 39,43 | 44,00 | 49,54 |
| Temperatura (sólido) [°C] | 24,98 | 63,01 | 39,50 | | 100,07 |
| Sobrecalentamiento por encima de la temperatura de fusión [K] | -1058,07 | -1020,04 | -1043,55 | | 100,07 |
| Presión relativa [Pa] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 100,07 |
| Densidad (sólido) [kg/m ³] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 100,07 |
| Flujo de calor superficial (convección) [W/m ²] | -3268,61 | 104040,33 | 58865,79 | 48056,40 | 49,54 |
| Flujo de calor superficial (conducción) [W/m ²] | 8960,00 | 8960,00 | 8960,00 | | 100,07 |

En la Tabla 9 se logra observar los resultados que nos arroja la simulación y lo que cabe destacar de esto es el balance de energía de que existe en el sistema.

Tabla 9. Resultados de la simulación

| | Unidad | valor | Valor promedio | Valor mínimo | Valor máximo |
|-------------------------------|---------------|--------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Balance de energía total | [kW] | 1839,10 | 1839,09 | 1838,28 | 1840,10 |
| Temperatura mínima (fluido) | [°C] | 24,98 | 24,98 | 24,98 | 24,98 |
| Temperatura promedio (fluido) | [°C] | 39,41 | 38,33 | 37,25 | 39,41 |
| Temperatura máxima (fluido) | [°C] | 63,01 | 63,01 | 63,01 | 63,01 |

4.3.3. Análisis de resultados

Los gráficos nos muestran las temperaturas que van recorriendo el serpentín, el cual logra bajar la temperatura del fluido. Nos muestra una distribución uniforme como indica la transferencia de calor y esto muestra una buena optimización del diseño de la torre de enfriamiento y del serpentín.

En cuanto a la tabla de los resultados, podemos notar un balance de energía similar a la calculada. Esto era esperado gracias al buen cálculo y a los parámetros ingresados a la simulación de la torre de enfriamiento.

Además, el análisis de temperaturas de la simulación y de las calculadas nos muestra una buena efectividad al cumplir con las expectativas esperadas del diseño y la simulación.

4.4. Comparación entre temperaturas de entrada

4.4.1. Simulación a 81 °C

Esta torre de refrigeración fue diseñada específicamente para soportar cambios térmicos repentinos, algo a lo que las industrias son especialmente susceptibles. Durante su desarrollo, se

consideraron diversos factores clave y se llevaron a cabo simulaciones detalladas para demostrar su óptimo rendimiento y su capacidad para resistir variaciones térmicas extremas. Esto asegura que la estructura está construida de manera robusta y está preparada para enfrentar cualquier fluctuación térmica que pueda surgir en su operación. Estos datos se recopilan en la Tabla 10

Tabla 10. Datos para la comparación

| Temperatura de entrada del fluido | Presión de entrada del fluido | Material del serpentín | Caudal del fluido |
|--|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 81 °C | 105 kPa | Cobre | 3.8227 kg/s |

Los datos del rociador además de las condiciones ambientales no varían ya que queremos observar cómo funciona la torre de enfriamiento ante los cambios bruscos de temperatura de entrada del fluido.

Dentro del análisis expresa los datos expuestos por la simulación teniendo en cuenta una temperatura de entrada a 81 °C como podemos observar en la Figura 32 muestra como el fluido comenzó a experimentar cambios de temperatura desde el tercer tubo de cada serpentín. Esto contrasta con la simulación principal, donde los cambios de temperatura comenzaron desde el quinto tubo de cada serpentín. Estos hallazgos indican que el modelo ha logrado mejorar su capacidad de enfriamiento, cumpliendo el propósito establecido de optimizar la eficiencia del proceso.

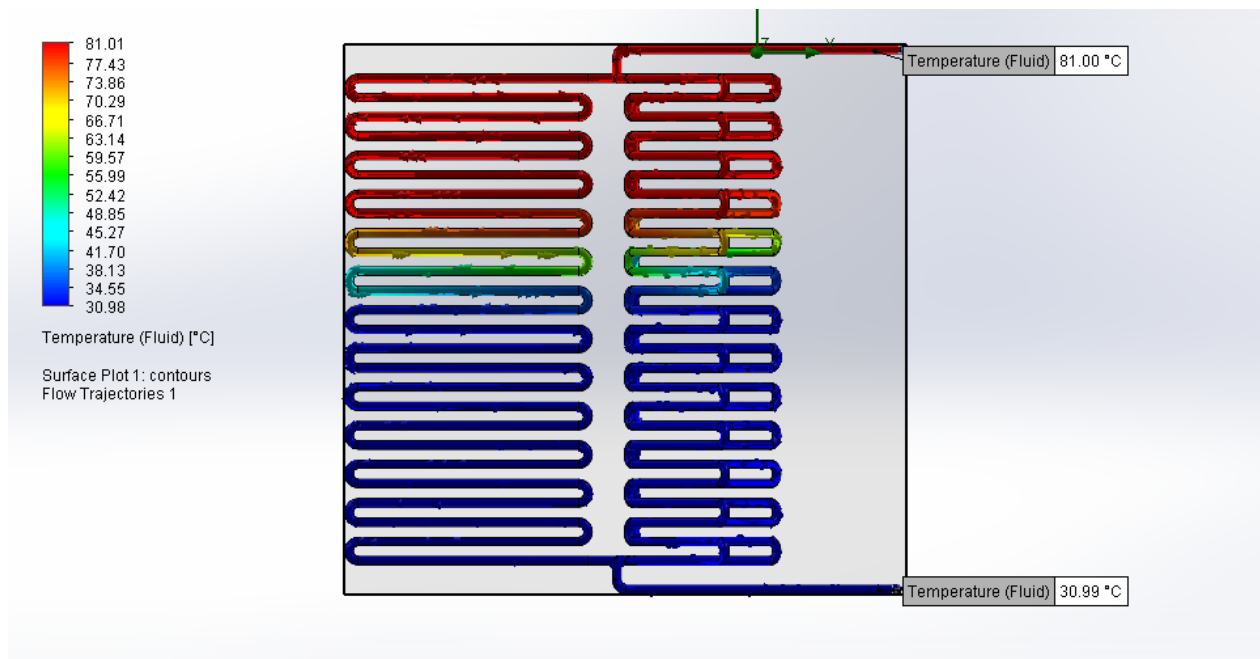


Figura 32. Simulación a 81°C

4.4.2. Simulación a 72 °C

Para demostrar la eficiencia y la capacidad de disipación de calor de la torre de enfriamiento, es fundamental realizar una nueva comparativa que evalúe si el intercambio térmico es adecuado para el ciclo de enfriamiento. Los datos recopilados en la Tabla 11 permitirá determinar la eficacia del proceso de intercambio térmico en la torre de enfriamiento, asegurando así que cumple con los requerimientos de disipación de calor necesarios para el sistema.

Tabla 11. Comparación de datos II

| Temperatura de entrada del fluido | Presión de entrada del fluido | Material del serpentín | Caudal del fluido |
|--|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 72 °C | 105 kPa | Cobre | 3.8227 kg/s |

De igual manera que la simulación anterior los datos del rociador además de las condiciones ambientales no varían ya que queremos observar cómo funciona la torre de enfriamiento ante los cambios bruscos de temperatura de entrada del fluido.

Dentro de la **Figura 33**. Simulación a 72°C. Figura 33 el análisis expresa los datos expuestos por la simulación teniendo en cuenta una temperatura de 72 °C

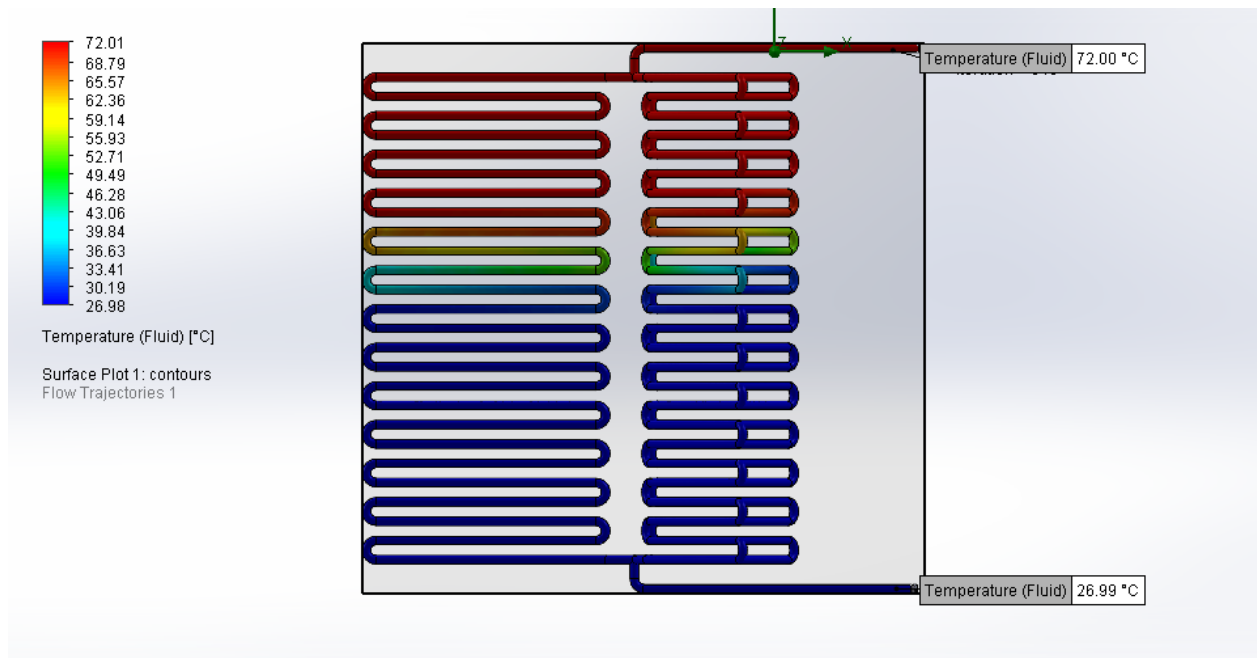


Figura 33. Simulación a 72°C

Los resultados de la simulación a 72°C revelaron que el fluido empezó a mostrar variaciones de temperatura a partir del segundo tubo de cada serpentín. En contraste, en la simulación principal, estos cambios se observaron a partir del quinto tubo de cada serpentín. Estos hallazgos señalan una mejora en la capacidad de enfriamiento del modelo, cumpliendo el propósito establecido de optimizar la eficiencia del proceso.

4.5. Evaluación económica

La evaluación económica es un aspecto muy importante para ver si se puede dar luz verde a este diseño de la torre de enfriamiento para esto es necesario demostrar que es óptimo para la industria,

esto se demuestra por la simulación y esta evaluación económica para ver si el proyecto es viable y eficiente.

4.5.1. Materiales

La Tabla 12 nos presenta la lista de materiales y su costo aproximado para construir la torre de enfriamiento.

Tabla 12. Lista y precio de materiales

| | Precio por unidad [\$] | Cantidad | Costo [\$] |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Tubería de cobre | 8 | 400 | 3 200 |
| Cable para suelda inox | 40 | 3 | 120 |
| Plancha de 3 mm de inox | 272 | 10 | 2 720 |
| Ángulos 50 x 6 | 78 | 6 | 456 |
| Total | | | 6 496 |

4.5.2. Construcción e instalación

A partir de la obtención de materiales se puede estimar una duración de construcción de la torre de enfriamiento es de 30 días con el personal máximo conformado por 5 personas capacitadas para este tipo de trabajos por lo que podemos promediar un sueldo de \$ 1 100 por mensuales.

Simultaneo al gasto de personal así mismo habrá que calcular un precio estimado por el uso de máquinas herramientas que nos podrá dar un gasto aproximado de \$ 50 por día y si multiplicamos por los 30 días que vamos a usar nos daría un valor total de \$ 1 500

En total por el personal y la maquinas que vamos a usar nos daría un precio total aproximado de \$ 7 000 para su construcción e instalación de la torre de enfriamiento.

4.6. Conclusiones del capítulo

El diseño de la torre de enfriamiento ha demostrado cumplir eficazmente con su objetivo principal gestionar de manera eficiente la disipación de calor. Este sistema no solo es capaz de mantener el control térmico bajo condiciones normales de operación, sino que también muestra una notable capacidad de adaptabilidad ante variaciones térmicas y de presión. Estas fluctuaciones pueden deberse a diversos factores operativos, comunes en la industria, que afectan la temperatura y la presión en diferentes puntos del proceso. La capacidad de la torre para ajustarse a estos cambios asegura un rendimiento óptimo, fiable, contribuyendo a la estabilidad y eficiencia de las operaciones industriales.

CONCLUSIONES

Para desarrollar el modelo matemático como el modelado mediante software, se procedió a establecer el modelo de enfriamiento de las torres de enfriamiento y con los resultados obtenidos, se consiguió que el diseño trabajara de manera correcta en varios parámetros al cual fue sometida la torre de enfriamiento.

La forma en la que están contruidos los serpentines es eficiente ya que estos están separados a 120° , con lo cual garantizamos que su coeficiente global de transferencia de calor es de 1839.01 kW al ser una cifra grande esto pueda disiparse de manera rápida, por lo tanto, capacidad de la torre de enfriamiento para reducir la temperatura es efectiva, ya que presenta un ΔT de 38°C . Esta cifra es considerablemente buena para la torre de enfriamiento; así mismo, pone de manifiesto la eficacia de la torre de enfriamiento. Además, con el modelo matemático nos da una eficiencia del 71,7 %, lo cual representa una cifra muy optima ya que las torres de enfriamiento tienen una eficiencia que va desde el 70 al 75 %.

En simulaciones, se pueden ajustar parámetros clave como la temperatura y humedad del aire de entrada, el flujo de agua y otros factores relevantes para modelar con precisión las condiciones locales y optimizar el rendimiento de una torre de enfriamiento. Sin embargo, en la práctica real, mantener la eficiencia implica una optimización meticulosa del diseño de la torre. Esto incluye la selección adecuada de materiales, un diseño eficiente del sistema de distribución de agua y aire, así como la supervisión continua de las condiciones operativas

En una posible implementación de esta torre de enfriamiento el costo puede variar ya que la estructura de la torre dependiendo de varios factores como lo son la mano de obra y la calidad de materiales de instalación, en los serpentines el costo podría variar dependiendo el tipo de material usado, en este caso como el material a usar es el cobre su precio por metro sería de \$ 22 a \$ 27.50 dependiendo el lugar de la compra, y como resultado de los cálculos nos dio un aproximado de 185 m de tubo que se usara, con esto se puede espera que la torre tenga un costo aproximado \$ 25 000 siempre y cuando el ambiente sea propicio para esta torre de enfriamiento

RECOMENDACIONES

Se recomienda revisar y optimizar la configuración de los rellenos de las torres y el sistema de recirculación del fluido. La elección de materiales avanzados y la geometría de los rellenos pueden mejorar la superficie de contacto, aumentando la eficiencia de la transmisión de energía térmica. Asimismo, un sistema de recirculación bien diseñado puede asegurar una cobertura uniforme y minimizar las zonas de recirculación.

Implementar tecnologías y estrategias para minimizar las pérdidas de vapor cuando el agua se encuentra a elevadas temperaturas, tales como sistemas de recuperación de agua y optimización del ciclo de concentración. Reduciendo de manera eficiente el alto consumo de agua al no tener una fuente y minimizando el impacto ambiental.

Capacitar al personal operativo en el uso de nuevas tecnologías, sistemas de control y mejores prácticas en la operación en el campo de la refrigeración. La formación adecuada es importante para la implementación efectiva de estrategias de optimización y la gestión de recursos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Calor. – Forma de energía transmitida por ondas electromagnéticas.

Capacidad calórica. – Capacidad de un cuerpo a subir su temperatura sin importar su masa

Difusividad térmica. – Velocidad a la que un material se calienta.

Efectividad. – Medida de cuán bien algo cumple con su propósito o alcanza sus objetivos de manera eficiente.

Enfriamiento. – Proceso de reducción de la temperatura dentro de un proceso.

Energía. – Capacidad de generación trabajo o transformación en un sistema.

Radiación. – Transmisión de calor por medio de ondas electromagnéticas.

Resistencia térmica. – Oposición de un material al flujo de calor a través de él.

Reactor. – Dispositivo utilizado en la industria para llevar a cabo trabajo bajo condiciones controladas de temperatura.

Simulación. – Modelado de un sistema real utilizando un modelo matemático o computacional para estudiar su comportamiento.

Temperatura. – Medida de la intensidad del calor de un cuerpo o sustancia.

Ventilación forzada. – Proceso mediante el cual se introduce o extrae aire de un espacio de manera mecánica.

ANEXOS

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|--|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------------------------|
| Pressure [Pa] | 97924,52585 | 205024,9847 | 159837,7386 | 148985,6151 | 49,53639599 |
| Density (Fluid) [kg/m ³] | 971,4538415 | 994,492858 | 985,9295298 | 982,9702324 | 49,53639599 |
| Velocity [m/s] | 0 | 5,447839146 | 0,000855543 | 4,963770862 | 49,53639599 |
| Velocity (X) [m/s] | -5,44783915 | 4,943207517 | -1,7526E-05 | -0,10835199 | 49,53639599 |
| Velocity (Y) [m/s] | -0,19243073 | 0,150760796 | 1,9423E-06 | 0,011534218 | 49,53639599 |
| Velocity (Z) [m/s] | 0 | 1,062369061 | 8,02457E-05 | 0,465400838 | 49,53639599 |
| Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K] | 0 | 985,495629 | 2,916923237 | | 49,52782937 |
| Shear Stress [Pa] | 0 | 122,6368752 | 6,487728508 | | 49,52782937 |
| Surface Heat Flux [W/m ²] | -21251,0317 | 26304,72953 | -1,34678418 | | 150,5902645 |
| Temperature (Fluid) [°C] | 30,97804781 | 81,00698901 | 49,97835762 | 56,00262987 | 49,53639599 |
| Temperature (Solid) [°C] | 30,97804787 | 81,00699105 | 50,08181877 | | 100,0676135 |
| Overheat above Melting Temperature [K] | -1052,07195 | -1002,04301 | -1032,96818 | | 100,0676135 |
| Bottleneck Number [] | 1,34736E-19 | 0,000755776 | 3,35858E-06 | | 100,0676135 |
| ShortCut Number [] | 1,43926E-18 | 0,000248196 | 2,17971E-07 | | 100,0676135 |
| Relative Pressure [Pa] | -3400,47415 | 103699,9847 | 58512,73857 | 47660,61506 | 49,53639599 |
| Density (Solid) [kg/m ³] | 8960 | 8960 | 8960 | | 100,0676135 |
| Surface Heat Flux (Convective) [W/m ²] | -21251,0317 | 26304,72953 | -4,09492174 | | 49,52782937 |
| Surface Heat Flux (Conductive) [W/m ²] | 0 | 0 | 0 | | 101,0624351 |

| Goal Name | Unit | Value | Averaged Value | Minimum Value | Maximum Value |
|----------------------------------|------|-------------|----------------|---------------|---------------|
| GG Total Energy Balance 1 | [W] | 4359125,021 | 4359045,239 | 4358960,605 | 4359125,021 |
| GG Minimum Temperature (Fluid) 2 | [°C] | 30,97804645 | 30,97773125 | 30,97738543 | 30,97804645 |
| GG Average Temperature (Fluid) 3 | [°C] | 49,95349327 | 48,53465644 | 47,11893068 | 49,95349327 |
| GG Maximum Temperature (Fluid) 4 | [°C] | 81,00706186 | 81,00693365 | 81,00668523 | 81,00707072 |
| GG Bulk Av Temperature (Fluid) 5 | [°C] | 49,71063132 | 48,30058241 | 46,89420386 | 49,71063132 |

Anexo 1. Resultado a 81°C

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|--|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------------------------|
| Pressure [Pa] | 97994,66235 | 205210,3249 | 160040,6407 | 149186,9341 | 49,53639313 |
| Density (Fluid) [kg/m ³] | 976,6659469 | 995,7014858 | 988,6233404 | 986,1812211 | 49,53639313 |
| Velocity [m/s] | 0 | 5,417155337 | 0,00085272 | 4,947323174 | 49,53639313 |
| Velocity (X) [m/s] | -5,41715534 | 4,936693008 | -1,572E-05 | -0,097807315 | 49,53639313 |
| Velocity (Y) [m/s] | -0,19183883 | 0,150221209 | 1,91933E-06 | 0,011394013 | 49,53639313 |
| Velocity (Z) [m/s] | 0 | 1,061173866 | 8,01416E-05 | 0,464791793 | 49,53639313 |
| Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K] | 0 | 2805,177052 | 3,373156589 | | 49,52782651 |
| Shear Stress [Pa] | 0 | 123,9144314 | 6,582496397 | | 49,52782651 |
| Surface Heat Flux [W/m ²] | -89826,113 | 24568,08453 | -1,20855488 | | 150,5902616 |
| Temperature (Fluid) [°C] | 26,97817366 | 72,00711408 | 44,08112604 | 49,50207045 | 49,53639313 |
| Temperature (Solid) [°C] | 26,97816808 | 72,0071142 | 44,17427274 | | 100,0676107 |
| Overheat above Melting Temperature [K] | -1056,07183 | -1011,04289 | -1038,87573 | | 100,0676107 |
| Bottleneck Number [] | 9,58183E-19 | 0,000740917 | 3,36815E-06 | | 100,0676107 |
| ShortCut Number [] | 5,34689E-19 | 0,000247572 | 2,18396E-07 | | 100,0676107 |
| Relative Pressure [Pa] | -3330,33765 | 103885,3249 | 58715,64075 | 47861,93411 | 49,53639313 |
| Density (Solid) [kg/m ³] | 8960 | 8960 | 8960 | | 100,0676107 |
| Surface Heat Flux (Convective) [W/m ²] | -89826,113 | 24568,08453 | -3,67463319 | | 49,52782651 |
| Surface Heat Flux (Conductive) [W/m ²] | 0 | 0 | 0 | | 101,0624351 |

| Goal Name | Unit | Value | Averaged Value | Minimum Value | Maximum Value |
|----------------------------------|------|-------------|----------------|---------------|---------------|
| GG Total Energy Balance 1 | [W] | 3921346,908 | 3921267,859 | 3921184,304 | 3921346,908 |
| GG Minimum Temperature (Fluid) 2 | [°C] | 26,97817347 | 26,97785257 | 26,97748691 | 26,97817347 |
| GG Average Temperature (Fluid) 3 | [°C] | 44,05911954 | 42,7819461 | 41,50749015 | 44,05911954 |
| GG Maximum Temperature (Fluid) 4 | [°C] | 72,00719506 | 72,0070705 | 72,00680231 | 72,00719598 |
| GG Bulk Av Temperature (Fluid) 5 | [°C] | 43,8789901 | 42,60831063 | 41,34076618 | 43,8789901 |

Anexo 2. Resultado a 72 °C

| | | | | | | | |
|------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|------|
| Agua | 100 | 2 257 | 0.0 | 333.7 | 0 | 1 000 | 4.22 |
| | | | | | 25 | 997 | 4.18 |
| | | | | | 50 | 988 | 4.18 |
| | | | | | 75 | 975 | 4.19 |
| | | | | | 100 | 958 | 4.22 |

Anexo 3. Propiedades del agua en su punto de ebullición

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

| Temp., T °C | Presión de saturación, P _{sat} , kPa | Densidad, ρ, kg/m ³ | | Entalpia de vaporización, h _{fg} , kJ/kg | Calor específico, c _p , J/kg · K | | Conductividad térmica, k W/m · K | | Viscosidad dinámica, μ, kg/m · s | | Número de Prandtl, Pr | | Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K |
|----------------|--|-----------------------------------|--------|--|--|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|--|
| | | Líquido | Vapor | | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido | Vapor | |
| 0.01 | 0.6113 | 999.8 | 0.0048 | 2 501 | 4 217 | 1 854 | 0.561 | 0.0171 | 1.792 × 10 ⁻¹ | 0.922 × 10 ⁻⁴ | 13.5 | 1.00 | -0.068 × 10 ⁻⁴ |
| 5 | 0.8721 | 999.9 | 0.0068 | 2 490 | 4 205 | 1 857 | 0.571 | 0.0173 | 1.519 × 10 ⁻¹ | 0.934 × 10 ⁻⁴ | 11.2 | 1.00 | 0.015 × 10 ⁻⁴ |
| 10 | 1.2276 | 999.7 | 0.0094 | 2 478 | 4 194 | 1 862 | 0.580 | 0.0176 | 1.307 × 10 ⁻¹ | 0.946 × 10 ⁻⁴ | 9.45 | 1.00 | 0.733 × 10 ⁻⁴ |
| 15 | 1.7051 | 999.1 | 0.0128 | 2 466 | 4 185 | 1 863 | 0.589 | 0.0179 | 1.138 × 10 ⁻¹ | 0.959 × 10 ⁻⁴ | 8.09 | 1.00 | 0.138 × 10 ⁻³ |
| 20 | 2.339 | 998.0 | 0.0173 | 2 454 | 4 182 | 1 867 | 0.598 | 0.0182 | 1.002 × 10 ⁻¹ | 0.973 × 10 ⁻⁴ | 7.01 | 1.00 | 0.195 × 10 ⁻³ |
| 25 | 3.169 | 997.0 | 0.0231 | 2 442 | 4 180 | 1 870 | 0.607 | 0.0186 | 0.891 × 10 ⁻¹ | 0.987 × 10 ⁻⁴ | 6.14 | 1.00 | 0.247 × 10 ⁻³ |
| 30 | 4.246 | 996.0 | 0.0304 | 2 431 | 4 178 | 1 875 | 0.615 | 0.0189 | 0.798 × 10 ⁻¹ | 1.001 × 10 ⁻⁴ | 5.42 | 1.00 | 0.294 × 10 ⁻³ |
| 35 | 5.628 | 994.0 | 0.0397 | 2 419 | 4 178 | 1 880 | 0.623 | 0.0192 | 0.720 × 10 ⁻¹ | 1.016 × 10 ⁻⁴ | 4.83 | 1.00 | 0.337 × 10 ⁻³ |
| 40 | 7.384 | 992.1 | 0.0512 | 2 407 | 4 179 | 1 885 | 0.631 | 0.0196 | 0.653 × 10 ⁻¹ | 1.031 × 10 ⁻⁴ | 4.32 | 1.00 | 0.377 × 10 ⁻³ |
| 45 | 9.593 | 990.1 | 0.0655 | 2 395 | 4 180 | 1 892 | 0.637 | 0.0200 | 0.596 × 10 ⁻¹ | 1.046 × 10 ⁻⁴ | 3.91 | 1.00 | 0.415 × 10 ⁻³ |
| 50 | 12.35 | 988.1 | 0.0831 | 2 383 | 4 181 | 1 900 | 0.644 | 0.0204 | 0.547 × 10 ⁻¹ | 1.062 × 10 ⁻⁴ | 3.55 | 1.00 | 0.451 × 10 ⁻³ |
| 55 | 15.76 | 985.2 | 0.1045 | 2 371 | 4 183 | 1 908 | 0.649 | 0.0208 | 0.504 × 10 ⁻¹ | 1.077 × 10 ⁻⁴ | 3.25 | 1.00 | 0.484 × 10 ⁻³ |
| 60 | 19.94 | 983.3 | 0.1304 | 2 359 | 4 185 | 1 916 | 0.654 | 0.0212 | 0.467 × 10 ⁻¹ | 1.093 × 10 ⁻⁴ | 2.99 | 1.00 | 0.517 × 10 ⁻³ |
| 65 | 25.03 | 980.4 | 0.1614 | 2 346 | 4 187 | 1 926 | 0.659 | 0.0216 | 0.433 × 10 ⁻¹ | 1.110 × 10 ⁻⁴ | 2.75 | 1.00 | 0.548 × 10 ⁻³ |
| 70 | 31.19 | 977.5 | 0.1983 | 2 334 | 4 190 | 1 936 | 0.663 | 0.0221 | 0.404 × 10 ⁻¹ | 1.126 × 10 ⁻⁴ | 2.55 | 1.00 | 0.578 × 10 ⁻³ |
| 75 | 38.58 | 974.7 | 0.2421 | 2 321 | 4 193 | 1 948 | 0.667 | 0.0225 | 0.378 × 10 ⁻¹ | 1.142 × 10 ⁻⁴ | 2.38 | 1.00 | 0.607 × 10 ⁻³ |
| 80 | 47.39 | 971.8 | 0.2935 | 2 309 | 4 197 | 1 962 | 0.670 | 0.0230 | 0.355 × 10 ⁻¹ | 1.159 × 10 ⁻⁴ | 2.22 | 1.00 | 0.653 × 10 ⁻³ |
| 85 | 57.83 | 968.1 | 0.3536 | 2 296 | 4 201 | 1 977 | 0.673 | 0.0235 | 0.333 × 10 ⁻¹ | 1.176 × 10 ⁻⁴ | 2.08 | 1.00 | 0.670 × 10 ⁻³ |
| 90 | 70.14 | 965.3 | 0.4235 | 2 283 | 4 206 | 1 993 | 0.675 | 0.0240 | 0.315 × 10 ⁻¹ | 1.193 × 10 ⁻⁴ | 1.96 | 1.00 | 0.702 × 10 ⁻³ |
| 95 | 84.55 | 961.5 | 0.5045 | 2 270 | 4 212 | 2 010 | 0.677 | 0.0246 | 0.297 × 10 ⁻¹ | 1.210 × 10 ⁻⁴ | 1.85 | 1.00 | 0.716 × 10 ⁻³ |
| 100 | 101.33 | 957.9 | 0.5978 | 2 257 | 4 217 | 2 029 | 0.679 | 0.0251 | 0.282 × 10 ⁻¹ | 1.227 × 10 ⁻⁴ | 1.75 | 1.00 | 0.750 × 10 ⁻³ |
| 110 | 143.27 | 950.6 | 0.8263 | 2 230 | 4 229 | 2 071 | 0.682 | 0.0262 | 0.255 × 10 ⁻¹ | 1.261 × 10 ⁻⁴ | 1.58 | 1.00 | 0.798 × 10 ⁻³ |
| 120 | 198.53 | 943.4 | 1.121 | 2 203 | 4 244 | 2 120 | 0.683 | 0.0275 | 0.232 × 10 ⁻¹ | 1.296 × 10 ⁻⁴ | 1.44 | 1.00 | 0.858 × 10 ⁻³ |
| 130 | 270.1 | 934.6 | 1.496 | 2 174 | 4 263 | 2 177 | 0.684 | 0.0288 | 0.213 × 10 ⁻¹ | 1.330 × 10 ⁻⁴ | 1.33 | 1.01 | 0.913 × 10 ⁻³ |
| 140 | 361.3 | 921.7 | 1.965 | 2 145 | 4 286 | 2 244 | 0.683 | 0.0301 | 0.197 × 10 ⁻¹ | 1.365 × 10 ⁻⁴ | 1.24 | 1.02 | 0.970 × 10 ⁻³ |
| 150 | 475.8 | 916.6 | 2.546 | 2 114 | 4 311 | 2 314 | 0.682 | 0.0316 | 0.183 × 10 ⁻¹ | 1.399 × 10 ⁻⁴ | 1.16 | 1.02 | 1.025 × 10 ⁻³ |
| 160 | 617.8 | 907.4 | 3.256 | 2 083 | 4 340 | 2 420 | 0.680 | 0.0331 | 0.170 × 10 ⁻¹ | 1.434 × 10 ⁻⁴ | 1.09 | 1.05 | 1.145 × 10 ⁻³ |
| 170 | 791.7 | 897.7 | 4.119 | 2 050 | 4 370 | 2 490 | 0.677 | 0.0347 | 0.160 × 10 ⁻¹ | 1.468 × 10 ⁻⁴ | 1.03 | 1.05 | 1.178 × 10 ⁻³ |
| 180 | 1 002.1 | 887.3 | 5.153 | 2 015 | 4 410 | 2 590 | 0.673 | 0.0364 | 0.150 × 10 ⁻¹ | 1.502 × 10 ⁻⁴ | 0.983 | 1.07 | 1.210 × 10 ⁻³ |
| 190 | 1 254.4 | 876.4 | 6.388 | 1 979 | 4 460 | 2 710 | 0.669 | 0.0382 | 0.142 × 10 ⁻¹ | 1.537 × 10 ⁻⁴ | 0.947 | 1.09 | 1.280 × 10 ⁻³ |
| 200 | 1 553.8 | 864.3 | 7.852 | 1 941 | 4 500 | 2 840 | 0.663 | 0.0401 | 0.134 × 10 ⁻¹ | 1.571 × 10 ⁻⁴ | 0.910 | 1.11 | 1.350 × 10 ⁻³ |
| 220 | 2 318 | 840.3 | 11.60 | 1 859 | 4 610 | 3 110 | 0.650 | 0.0442 | 0.122 × 10 ⁻¹ | 1.641 × 10 ⁻⁴ | 0.865 | 1.15 | 1.520 × 10 ⁻³ |
| 240 | 3 344 | 813.7 | 16.73 | 1 767 | 4 760 | 3 520 | 0.632 | 0.0487 | 0.111 × 10 ⁻¹ | 1.712 × 10 ⁻⁴ | 0.836 | 1.24 | 1.720 × 10 ⁻³ |
| 260 | 4 688 | 783.7 | 23.69 | 1 663 | 4 970 | 4 070 | 0.609 | 0.0540 | 0.102 × 10 ⁻¹ | 1.788 × 10 ⁻⁴ | 0.832 | 1.35 | 2.000 × 10 ⁻³ |
| 280 | 6 412 | 750.8 | 33.15 | 1 544 | 5 280 | 4 835 | 0.581 | 0.0605 | 0.094 × 10 ⁻¹ | 1.870 × 10 ⁻⁴ | 0.854 | 1.49 | 2.380 × 10 ⁻³ |
| 300 | 8 581 | 713.8 | 46.15 | 1 405 | 5 750 | 5 980 | 0.548 | 0.0695 | 0.086 × 10 ⁻¹ | 1.965 × 10 ⁻⁴ | 0.902 | 1.69 | 2.950 × 10 ⁻³ |
| 320 | 11 274 | 667.1 | 64.57 | 1 239 | 6 540 | 7 900 | 0.509 | 0.0836 | 0.078 × 10 ⁻¹ | 2.084 × 10 ⁻⁴ | 1.00 | 1.97 | — |
| 340 | 14 588 | 610.5 | 92.62 | 1 028 | 8 240 | 11 870 | 0.469 | 0.110 | 0.070 × 10 ⁻¹ | 2.235 × 10 ⁻⁴ | 1.23 | 2.43 | — |
| 360 | 18 651 | 528.3 | 144.0 | 720 | 14 690 | 25 800 | 0.427 | 0.178 | 0.060 × 10 ⁻¹ | 2.571 × 10 ⁻⁴ | 2.06 | 3.73 | — |
| 374.14 | 22 090 | 317.0 | 317.0 | 0 | — | — | — | — | 0.043 × 10 ⁻¹ | 4.313 × 10 ⁻⁴ | — | — | — |

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = \nu Pr$. Las temperaturas de 0.01 °C, 100 °C y 374.14 °C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Nota 2: La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

Fuente: Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Anexo 4. Propiedades del agua

REFERENCIAS

- [1] H. Mendiburu Diaz, “Reactores químicos”, 2008, [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/reactores-quimicos>
- [2] M. Espigares y J. Pérez, “PRECIPITACIÓN QUÍMICA ABLANDAMIENTO DEL AGUA”, *Artículo*, núm. 1, 2010.
- [3] F. Marcelo, U. Remache, y R. -Ecuador, ““DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBERÍA ALETADA PARA EL LABORATORIO DE TÉRMICAS DE LA FACULTAD DE MECÁNICA’ JAIRO LENÍN PEÑALOZA PÉREZ Previo a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”, 2009.
- [4] Yunus A. Çengel y Michael A. Boles, “Termodinámica_8va_Edicion”, abr. 2015.
- [5] A. López, “*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*”, vol. 447, núm. May. 2018.
- [6] A. FOUST, L. WENZEL, C. CLUMP, L. MAUS, y B. ANDERSEN, *Principios de operaciones unitarias. Transferencia simultánea de calor y masa – Humidificación*. Ciudad de México, 2006.
- [7] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA DE ESPAÑA., “Torres de refrigeración”, 2007.
- [8] A. Marcilla Gomis, A. Gómez Siurana, A. N. García Cortés, y P. Cayuela Martínez, *Introducción a las operaciones de separación : cálculo por etapas de equilibrio*. Universidad de Alicante, 1998.
- [9] W. MCCABE, J. SMITH, y P. HARRIOT, “Operaciones unitarias en ingeniería química. Transferencia de materia y sus aplicaciones.”, 1991.
- [10] SPX Cooling Technologies staff, “Cooling Tower Fundamentals Compiled from the knowledge and experience of the entire.”, 2009.
- [11] J. Darío, M. Cabrera, A. Roberto, y G. Segura, “Design and Construction of a Prototype of Counterflow Induced Shot Cooling Tower”, 2016.
- [12] Del Olmo Duarte, “Diseño y simulación de torres de refrigeración húmedas”, 2006.
- [13] J. Ojeda, J. Colina, V. Perdomo, y S. Colina, “Diseño de una torre de enfriamiento de agua de tiro mecánico a escala de laboratorio”, 2022. [En línea]. Disponible en: www.scopusrevista.es

- [14] V. Elizabeth, P. Lopez, S. Rolando, y V. Tixi, “Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de agua por evaporación de tiro inducido”, 2012.
- [15] A. Gonzales, J. Briseño, y M. Chávez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA EL USO EN LAS PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS”, UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, Jalisco, 2020.
- [16] A. Gonzales, J. Briseño, y M. Chávez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA EL USO EN LAS PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS”, UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, Jalisco, 2020.
- [17] A. Pérez Sánchez, E. J. Pérez Sánchez, A. Heredia Sánchez, y L. Pazos Amayuela, “Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona”, *Nexo Revista Científica*, vol. 32, núm. 01, 2019, doi: 10.5377/nexo.v32i01.7988.
- [18] Y. Cengel A. y A. Ghajar J., “Transferencia de calor y masa 4ta edición”, ene. 2006.
- [19] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, y A. S. Lavine, “heat and mass transfer - Incropera 6e”, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [20] D. William y J. Callister, “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, *Reverté*,. 1995.
- [21] P. Fernandez, “Transmisión de calor por convección correlaciones para la convección natural y forzada”, *Ingeniería térmica y de fluidos*, 1992.
- [22] Augusto Beléndez Vázquez y Universidad de Alicante, “Termodinámica”, 2017.
- [23] S. Espinosa, “5. CONCEPTOS BÁSICOS PRELIMINARES”, pp. 1–21, 2013.
- [24] Isaias Alcalde Segundo, “Termodinámica”, *Maquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica*, ago. 2018.
- [25] Pedro Fernández Díez, “REFRIGERACIÓN Y CALEFACCIÓN”, 2016.
- [26] Merckoquant, “Test dureza total”, *Clasificación del agua según su dureza*, jun. 2007.
- [27] OMS, “Hardness in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality”, 2011.
- [28] José Olmedo, “Simulación, análisis y optimización Energética de un proceso de recuperación de azufre con reactores biológicos”, nov. 2016.
- [29] D. Barragán, “Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton Entropy production and Newton’s cooling law”, *AGOSTO DE*, vol. 29, núm. 2, pp. 88–93, 2009.
- [30] Consuelo A. Rubio, “Evaluación, Optimización y Simulación de un Ciclo de refrigeración con Torre de Enfriamiento”, 2023.

- [31] P. I. S. Medrano, “Medición de Humedad Relativa con Psicrómetro Somos su Relevo a la Calidad”, 2003. [En línea]. Disponible en: www.metas.com.mx
- [32] D. Álvarez, “Desinfección en sistemas de recirculación de agua y torres de refrigeración”, pp. 1–191, jun. 2010.
- [33] Dassault System, “INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS Contents”. pp. 1–136, 1995.
- [34] Rodríguez Miranda Juan Pablo, “ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE AIRE EN UN PUNTO ALTO PARA UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA”, 2006.
- [35] E. A. Mory Loarte, “EVALUACIÓN DE LA FÓRMULA DE FLUJO MÁSSICO CON FINES DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA QUE SE PRODUCE A PARTIR DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE NIEBLA EN LA ZONA DE SAN PEDRO DE CARIPISH – CHINCHAO – HUÁNUCO.”, 2018.
- [36] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, y A. S. Lavine, “heat and mass transfer - Incropera 6e”, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [37] I. F. Meza Castro, A. E. Herrera Acuña, y L. G. Obregón Quiñones, “Experimental determination of new statistical correlations for the calculation of the heat transfer coefficient by convection for flat plates, cylinders and tube banks”, *INGE CUC*, vol. 13, núm. 2, pp. 9–17, jul. 2017, doi: 10.17981/ingecuc.13.2.2017.01.
- [38] U. R. URREA TOLEDO, “DISEÑO Y MONTAJE DEL EQUIPO HIDRÁULICO PARA EL ENSAYO EN EL LABORATORIO DEL NUMERO DE REYNOLDS Y ORIFICIOS DE DESCARGA LIBRE”, 2008.
- [39] M. D. Méndez Bohórquez, “Estudio numérico de la interdependencia de los números adimensionales Nusselt, Reynolds y Prandtl.”, 2022.
- [40] E. Torres-Tamayo, Y. Retirado-Medianeja, y E. Góngora-Leyva, “Experimental heat transfer coefficients for the liquor cooling in plate heat exchanger”, *Ingeniería Mecánica*, vol. 17, núm. 1, pp. 68–77, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu68>
- [41] G. A. coaut Cengel Yunus A, “Transferencia de Calor y Masa : Fundamentos y Aplicaciones. - Cuarta edición”, *J Chem Inf Model*, vol. 53, núm. 6, 2020.
- [42] SPX Cooling Technologies staff, “Cooling Tower Fundamentals Compiled from the knowledge and experience of the entire.”, 2009.
- [43] T. M. Pérez, Y. | rodríguez, y D. | regalado, “Cálculo de los parámetros de funcionamiento para la selección de una torre de enfriamiento Calculation of the operation parameters for the selection of cooling tower”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/399/1385>

- [44] Miguel David Méndez Bohórquez, “Estudio numérico de la interdependencia de los números adimensionales Nusselt, Reynolds y Prandtl.”, 2022.
- [45] Inamhi, “Atlas Climatico Pichincha”, 2022.