



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **Balance Energético de la torre de enfriamiento de tiro inducido del Laboratorio de Conversión de Energía**

Coloma Pérez, Luis Adrián y Vásquez Jarrín, Jhonatan Xavier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Gutiérrez Gualotuña, Eduardo Roberto Msc.

2 de septiembre del 2021



### Document Information

|                          |                                                                   |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Analyzed document</b> | Torre de Enfiamiento_COLOMA_VASCONEZ URKUNDFINAL.pdf (D111898432) |
| <b>Submitted</b>         | 9/1/2021 3:55:00 AM                                               |
| <b>Submitted by</b>      |                                                                   |
| <b>Submitter email</b>   | vaerazo@utn.edu.ec                                                |
| <b>Similarity</b>        | 2%                                                                |
| <b>Analysis address</b>  | vaerazo.utn@analysis.orkund.com                                   |

### Sources included in the report

|           |                                                                                                                                                                                                                                                             |  |   |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---|
| <b>W</b>  | URL: <a href="https://core.ac.uk/download/71397706.pdf">https://core.ac.uk/download/71397706.pdf</a><br>Fetched: 8/18/2021 1:14:20 AM                                                                                                                       |  | 1 |
| <b>SA</b> | <b>urcom.docx</b><br>Document urcom.docx (D16292031)                                                                                                                                                                                                        |  | 1 |
| <b>SA</b> | <b>1578354401_681__Humidificacion.docx</b><br>Document 1578354401_681__Humidificacion.docx (D61938243)                                                                                                                                                      |  | 1 |
| <b>SA</b> | <b>1528001738_48__INFORME_PRÁCTICA_1.pdf</b><br>Document 1528001738_48__INFORME_PRÁCTICA_1.pdf (D40398054)                                                                                                                                                  |  | 2 |
| <b>W</b>  | URL: <a href="http://www.soypracticante.com/libro/Termo.pdf">http://www.soypracticante.com/libro/Termo.pdf</a><br>Fetched: 3/6/2021 11:01:02 PM                                                                                                             |  | 2 |
| <b>W</b>  | URL: <a href="https://archive.org/stream/TermodinamicaCengel7th_201704/Termodinamica%20-%20Cengel%207th_djvu.txt">https://archive.org/stream/TermodinamicaCengel7th_201704/Termodinamica%20-%20Cengel%207th_djvu.txt</a><br>Fetched: 11/21/2019 11:27:58 PM |  | 1 |

Firma:

.....

**Ing. Gutiérrez Gualotuña Eduardo Roberto Msc.**

C. C.: 1711011385

**DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Balance energético de la torre de enfriamiento de tiro inducido del laboratorio de conversión de energía**" fue realizado por los señores: **Coloma Pérez Luis Adrián** y **Vásquez Jarrín Jhonatan Xavier**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 2 de septiembre de 2021

Firma:

.....  
Ing. Gutiérrez Gualotuña Eduardo Roberto Msc.

C. C.: 1711011385

DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Coloma Pérez Luis Adrián** y **Vásconez Jarrín Jhonatan Xavier**, con cédulas de ciudadanía n°1722385216, n°1726361593, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Balance energético de la torre de enfriamiento de tiro inducido del laboratorio de conversión de energía** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 2 de septiembre de 2021

Firmas:

Sr. Coloma Pérez Luis Adrián

C.C.: 1722385216

Sr. Vásconez Jarrín Jhonatan Xavier

C.C.: 1726361593



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros **Coloma Pérez Luis Adrián** y **Vásconez Jarrín Jhonatan Xavier**, con cédulas de ciudadanía n°1722385216, n°1726361593, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Balance energético de la torre de enfriamiento de tiro inducido del laboratorio de conversión de energía** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 2 de septiembre de 2021**

Firmas:

Sr. Coloma Pérez Luis Adrián

C.C.: 1722385216

Sr. Vásconez Jarrín Jhonatan Xavier

C.C.: 1726361593

## Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mis padres: Elvia y Fredy, a hermanas: Mariela, Renata, Lisbeth y Jessica que son el pilar fundamental en mi vida y siempre me han apoyado a pesar de todas las dificultades y obstáculos.

Luis A. Coloma P.

A mis padres

A mis hermanos

A mis padrinos y madrinas

A toda mi familia y amigos

Jhonatan Vásquez J.

## Agradecimiento

A mi familia por su cariño, paciencia y esfuerzo.

A los docentes que por su vocación impulsaron mi formación académica, especialmente a  
Roberto Buenaño y Roberto Gutiérrez.

A las personas que indirectamente me permitieron culminar esta etapa.

Finalmente agradezco a la Carrera de Ingeniería Mecánica y a la Universidad de las Fuerzas Armadas por ser parte de mi formación profesional y por todo el conocimiento adquirido.

Luis A. Coloma P.

A mis padres y familiares por la paciencia.

A mi director de proyecto

Ing. Roberto Gutiérrez

A profesores que me apoyaron

Ing. Roberto Buenaño y MSc. Ángel Villavicencio

A docentes que apoyaron con conocimientos y motivación.

A mis amigos compañeros

Y todos los que de una u otra forma me apoyaron en el trayecto.

Jhonatan Vásquez J.

**Índice de contenido**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Hoja de resultados de la herramienta URKUND..... | 2  |
| Certificación .....                              | 3  |
| Responsabilidad de autoría.....                  | 4  |
| Autorización de publicación.....                 | 5  |
| Dedicatoria.....                                 | 6  |
| Agradecimiento.....                              | 7  |
| Índice de Tablas .....                           | 12 |
| Índice de Figuras .....                          | 13 |
| Resumen .....                                    | 16 |
| Abstract.....                                    | 17 |
| Capítulo I: Introducción.....                    | 18 |
| Antecedentes .....                               | 18 |
| Planteamiento del problema .....                 | 18 |
| Justificación.....                               | 19 |
| Justificación Técnica.....                       | 19 |
| Justificación académica.....                     | 19 |
| Justificación económica .....                    | 20 |
| Objetivos.....                                   | 20 |
| Objetivo General .....                           | 20 |
| Objetivo Específicos .....                       | 20 |
| Meta.....                                        | 20 |
| Capitulo II: Marco teórico .....                 | 21 |
| Termodinámica de la Torre de enfriamiento .....  | 21 |
| Balance de masa .....                            | 21 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Balance de energía .....                                                 | 23 |
| Balance de entropía .....                                                | 24 |
| Eficiencia térmica .....                                                 | 25 |
| Vapor Flash .....                                                        | 26 |
| Humedad Específica .....                                                 | 26 |
| Humedad Relativa .....                                                   | 26 |
| Temperatura de Punto de Rocío .....                                      | 27 |
| Temperatura de saturación adiabática .....                               | 27 |
| Temperatura de bulbo húmedo .....                                        | 27 |
| Carta psicrométrica aplicada a la torre de enfriamiento.....             | 28 |
| Torre de enfriamiento.....                                               | 28 |
| Clasificación de torres de enfriamiento según el suministro de aire..... | 30 |
| Torres de circulación natural.....                                       | 30 |
| Atmosférica.....                                                         | 30 |
| Tiro natural.....                                                        | 30 |
| Torres de tiro mecánico.....                                             | 31 |
| Tiro inducido.....                                                       | 31 |
| Tiro forzado.....                                                        | 32 |
| Tipos de empaquetadura .....                                             | 33 |
| Separador de gotas .....                                                 | 35 |
| Sistema de distribución de agua .....                                    | 36 |
| Ventilador .....                                                         | 37 |
| Generalidades de Bombas .....                                            | 38 |
| Capitulo III: Determinación del estado inicial y actual .....            | 40 |
| Estado inicial .....                                                     | 40 |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Carcasa .....                                     | 41 |
| Motor – Ventilador .....                          | 42 |
| Empaquetadura .....                               | 44 |
| Tuberías de la Torre de Enfriamiento.....         | 45 |
| Estado actual.....                                | 47 |
| Reparación estructural.....                       | 47 |
| Recuperación Motor – Ventilador.....              | 51 |
| Sustitución de empaquetadura deteriorada .....    | 53 |
| Fabricación de separador de gotas .....           | 54 |
| Mantenimiento del sistema de tuberías .....       | 55 |
| Capitulo IV: Instrumentación .....                | 57 |
| Descripción de instrumentación implementada ..... | 57 |
| Caudalímetro ultrasónico TUF 2000B.....           | 57 |
| Anemómetro HP-846A.....                           | 59 |
| Termómetro digital .....                          | 59 |
| Termohigrómetro digital.....                      | 60 |
| Capítulo V: Balance másico y energético .....     | 62 |
| Balance energético del condensador .....          | 62 |
| Obtención de datos.....                           | 66 |
| Cálculos.....                                     | 67 |
| Balance de masa de agua inicial.....              | 72 |
| Balance de energía inicial.....                   | 74 |
| Eficiencia inicial.....                           | 76 |
| Resultados.....                                   | 77 |
| Análisis de resultados.....                       | 79 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Capítulo VI: Análisis económico .....              | 85 |
| Costos directos.....                               | 85 |
| Costo neto.....                                    | 86 |
| Costos indirectos.....                             | 87 |
| Costos Totales .....                               | 87 |
| Capitulo VII: Conclusiones y recomendaciones ..... | 88 |
| Conclusiones .....                                 | 88 |
| Recomendaciones .....                              | 89 |
| Referencias .....                                  | 90 |
| Anexos .....                                       | 94 |

### Índice de Tablas

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> Variación del Cp con respecto a la temperatura del aire seco .....                                                                 | 22 |
| <b>Tabla 2</b> Numeración de los componentes de la torre de enfriamiento .....                                                                    | 40 |
| <b>Tabla 3</b> Descripción del motor .....                                                                                                        | 44 |
| <b>Tabla 4</b> Especificación sonda de temperatura .....                                                                                          | 60 |
| <b>Tabla 5</b> Especificación Termohigrómetro .....                                                                                               | 61 |
| <b>Tabla 6</b> Variables de medición .....                                                                                                        | 66 |
| <b>Tabla 7</b> Tabulación de datos iniciales.....                                                                                                 | 67 |
| <b>Tabla 8</b> Promedio de datos iniciales .....                                                                                                  | 67 |
| <b>Tabla 9</b> Resultados iniciales .....                                                                                                         | 77 |
| <b>Tabla 10</b> Tabulación de datos finales .....                                                                                                 | 78 |
| <b>Tabla 11</b> Promedio de datos finales.....                                                                                                    | 78 |
| <b>Tabla 12</b> Resultados finales.....                                                                                                           | 78 |
| <b>Tabla 13</b> Comparación del estado inicial y final del flujo másico de reposición.....                                                        | 79 |
| <b>Tabla 14</b> Comparación del estado inicial y final de la energía transferida .....                                                            | 80 |
| <b>Tabla 15</b> Comparación del estado inicial y final de la eficiencia térmica basada en la humedad relativa .....                               | 80 |
| <b>Tabla 16</b> Variación de eficiencia térmica con respecto a la humedad relativa .....                                                          | 81 |
| <b>Tabla 17</b> Comparación del estado inicial y final de la eficiencia térmica basada en la energía trasferida en la torre de enfriamiento ..... | 83 |
| <b>Tabla 18</b> Comparación del estado inicial y final de la velocidad de aire de entrada y salida .....                                          | 84 |
| <b>Tabla 19</b> Costos de recuperación y puesta a punto .....                                                                                     | 85 |
| <b>Tabla 20</b> Costos de implementación de instrumentación .....                                                                                 | 85 |
| <b>Tabla 21</b> Remuneración a docente (tutor).....                                                                                               | 86 |
| <b>Tabla 22</b> Remuneración a estudiantes responsables del proyecto .....                                                                        | 86 |
| <b>Tabla 23</b> Costo neto del proyecto .....                                                                                                     | 86 |
| <b>Tabla 24</b> Costos Indirectos.....                                                                                                            | 87 |
| <b>Tabla 25</b> Costo total de proyecto.....                                                                                                      | 87 |

## Índice de Figuras

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Diagrama de flujo de la torre de enfriamiento.....             | 21 |
| <b>Figura 2</b> Diagrama de flujo másico de la Torre de Enfriamiento .....     | 21 |
| <b>Figura 3</b> Diagrama de flujo de energía de la Torre de Enfriamiento ..... | 23 |
| <b>Figura 4</b> Diagrama de flujo de entropía de la Torre de Enfriamiento..... | 24 |
| <b>Figura 5</b> Rango y aproximación de la torre de enfriamiento.....          | 25 |
| <b>Figura 6</b> Torre de enfriamiento.....                                     | 29 |
| <b>Figura 7</b> Torre de enfriamiento atmosférica .....                        | 30 |
| <b>Figura 8</b> Torre de enfriamiento de tiro natural .....                    | 30 |
| <b>Figura 9</b> Tiro inducido a flujo cruzado.....                             | 31 |
| <b>Figura 10</b> Tiro inducido a contracorriente.....                          | 32 |
| <b>Figura 11</b> Tiro forzado en contracorriente .....                         | 32 |
| <b>Figura 12</b> Tiro forzado cruzado .....                                    | 33 |
| <b>Figura 13</b> Empaquetadura de película o laminar .....                     | 34 |
| <b>Figura 14</b> Empaquetadura por goteo o salpicadura.....                    | 35 |
| <b>Figura 15</b> Empaquetadura combinada.....                                  | 35 |
| <b>Figura 16</b> Separador de gotas .....                                      | 36 |
| <b>Figura 17</b> Aspersión en hilera .....                                     | 36 |
| <b>Figura 18</b> Única boquilla de aspersión .....                             | 37 |
| <b>Figura 19</b> Ventilador axial .....                                        | 38 |
| <b>Figura 20</b> Ventilador centrifugo .....                                   | 38 |
| <b>Figura 21</b> Bomba centrifuga.....                                         | 39 |
| <b>Figura 22</b> Componentes del sistema de enfriamiento .....                 | 40 |
| <b>Figura 23</b> Carcasa torre de enfriamiento .....                           | 41 |
| <b>Figura 24</b> Parte superior Torre de Enfriamiento .....                    | 41 |
| <b>Figura 25</b> Interior de la Torre de Enfriamiento .....                    | 42 |
| <b>Figura 26</b> Ventilador .....                                              | 42 |
| <b>Figura 27</b> Sujeción de álabes.....                                       | 43 |
| <b>Figura 28</b> Apoyos del ventilador .....                                   | 43 |
| <b>Figura 29</b> Álabes del ventilador.....                                    | 43 |
| <b>Figura 30</b> Empaquetadura Interna .....                                   | 44 |
| <b>Figura 31</b> Limpieza de empaquetadura.....                                | 45 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 32</b> Empaquetadura desgastada.....                                    | 45 |
| <b>Figura 33</b> Sistema de Tuberías .....                                        | 46 |
| <b>Figura 34</b> Tubería de agua fría y drenaje .....                             | 46 |
| <b>Figura 35</b> Brida de tubería de agua caliente .....                          | 47 |
| <b>Figura 36</b> Empaque brida de agua caliente .....                             | 47 |
| <b>Figura 37</b> Carcasa restaurada.....                                          | 48 |
| <b>Figura 38</b> Colocación de fibra de vidrio y resina .....                     | 48 |
| <b>Figura 39</b> Aplicación de pintura (fondo).....                               | 49 |
| <b>Figura 40</b> Restauración de la campana .....                                 | 50 |
| <b>Figura 41</b> Pintura interior.....                                            | 50 |
| <b>Figura 42</b> Conexiones empernadas internas .....                             | 51 |
| <b>Figura 43</b> Ventilador y sus partes restauradas .....                        | 51 |
| <b>Figura 44</b> Placa de motor .....                                             | 52 |
| <b>Figura 45</b> Reparación y restauración de componentes del motor .....         | 52 |
| <b>Figura 46</b> Empaquetadura deteriorada.....                                   | 53 |
| <b>Figura 47</b> Matriz de tol para la fabricación .....                          | 53 |
| <b>Figura 48</b> Sección rectangular termoformada .....                           | 53 |
| <b>Figura 49</b> Construcción de bloques de empaquetadura .....                   | 54 |
| <b>Figura 50</b> Separador de gotas fabricado .....                               | 54 |
| <b>Figura 51</b> Sistema de tuberías restaurado .....                             | 55 |
| <b>Figura 52</b> Reemplazo de brida .....                                         | 56 |
| <b>Figura 53</b> Ubicación de los dispositivos en la torre de enfriamiento .....  | 57 |
| <b>Figura 54</b> Ultrasonic flow meter .....                                      | 57 |
| <b>Figura 55</b> Transductores Ultrasónicos TS-2.....                             | 58 |
| <b>Figura 56</b> Medidor de flujo de aire .....                                   | 59 |
| <b>Figura 57</b> Termómetro digital con sonda de temperatura y pantalla LCD ..... | 59 |
| <b>Figura 58</b> Termohigrómetro digital.....                                     | 60 |
| <b>Figura 59</b> Diagrama del balance energético del condensador .....            | 62 |
| <b>Figura 60</b> Propiedades del agua saturada .....                              | 63 |
| <b>Figura 61</b> Área de caudal de aire de entrada .....                          | 68 |
| <b>Figura 62</b> Área de caudal de aire de salida.....                            | 69 |
| <b>Figura 63</b> Diagrama del balance másico del agua .....                       | 72 |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 64</b> Diagrama del balance de energía .....                                                  | 74 |
| <b>Figura 65</b> Explicación de la variación de la entalpía en la carta psicrométrica.....              | 82 |
| <b>Figura 66</b> Gráfica de la variación de eficiencia térmica con respecto a la humedad relativa ..... | 83 |

### **Resumen**

En el presente proyecto se detalla el balance de masa y energía de la torre de enfriamiento del Laboratorio de Conversión de la Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en primer lugar, se analizó el estado inicial, se caracterizó los componentes y el principio de funcionamiento del equipo. Con el fin de aumentar la vida útil de la torre se ejecutó el mantenimiento reemplazando y mejorando las partes de la misma. Se identificó la ubicación de instrumentos para la recolección de variables de entrada y salida. En las pruebas realizadas se tomó datos en diferentes condiciones ambientales en las que existió variación de temperatura y humedad corroborando la incidencia del entorno en el sistema. Se calculó la energía trasferida en el condensador de la planta de vapor con la finalidad de conocer la energía que debe ser disipada, con la información obtenida se realizó el balance de masa en donde se encontró el flujo másico de reposición y se llevó a cabo el balance de energía en el cual se constató que la energía que cede el agua es igual a la energía que absorbe el aire. Finalmente se evidenció la intervención realizada comparando la eficiencia inicial y final. Una vez habilitada la torre de enfriamiento servirá como herramienta de apoyo para la consolidación de conocimiento en el campo de energías, este equipo complementará el funcionamiento de otros sistemas que serán utilizados en las prácticas de laboratorio.

### **Palabras clave**

- **TORRE DE ENFRIAMIENTO**
- **BALANCE**
- **ENERGÍA**
- **FLUJO MÁSIKO**
- **MANTENIMIENTO**

### **Abstract**

In this project the mass and energy balance of the cooling tower of the Energy Conversion Laboratory of the University of the Armed Forces – ESPE is detailed. Firstly, the initial state was analyzed, the components and the equipment operation principle was characterized. With the purpose of increase the tower useful life the maintenance was executed replacing and improving parts of it. Instruments' location was identified so as to input and output variables was gathered. In the Tests performed the data was taken with different ambient conditions in which there was variation in temperature and humidity, corroborating the environment incidence on system. Transferred energy in steam plant condenser was calculated for purposes of knowing the energy to be dissipated, with the obtained information the mass balance was realized in which makeup mass flow was found and energy balance was carried out in which energy given off by water equals energy absorbed by air was confirmed. Finally, intervention performed was proved comparing initial and final performance. Once enabled cooling tower will serve like support tool for energy field knowledge consolidation, this equipment will complement the operation other systems that will be used in the laboratory practices.

### **Keywords**

- **COOLING TOWER**
- **BALANCE**
- **ENERGY**
- **MASS FLOW**
- **MAINTENANCE**

## Capítulo I: Introducción

### Antecedentes

Desde la creación de las torres de enfriamiento en el siglo XIX, han sido diseñadas para utilizarse en sistemas térmicos que elevan su temperatura y es necesario su enfriamiento como una turbina de vapor, siendo la torre una parte fundamental en estos sistemas, la cual funciona en base al principio de disipación de calor, se han implementado en industrias de todo tipo, además es utilizado para explicar a los futuros profesionales su operación en universidades de todas partes del mundo.

En la industria los sistemas de enfriamiento de agua son muy utilizados ya que es necesario reducir la temperatura del agua que actúa como refrigerante en sistemas térmicos, el fluido puede ser utilizado una sola vez o reutilizado dentro del sistema, tomando como ejemplo, un sistema que utiliza una torre de enfriamiento empieza con el calentamiento de agua en un caldero seguido de la utilización de la energía del agua sobrecalentada en una turbina, al salir el vapor transfiere energía al agua del condensador y el fluido llega a la torre de enfriamiento donde se pulveriza en una película que se traslada de arriba hacia abajo, mientras una corriente de aire natural o inducida recorre el interior de la torre, dando como resultado la transferencia de calor.

Por el uso necesario de la torre en el sector industrial la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica – DECEM tiene un sistema térmico recientemente puesto a punto que posee una torre de enfriamiento que necesita ser intervenida, además de su puesta en marcha el presente proyecto busca colocar instrumentación necesaria para realizar el balance de masa y energía en la torre de enfriamiento.

### Planteamiento del problema

La torre de enfriamiento de tiro inducido del Laboratorio de Conversión de Energía no se encuentra en su máxima capacidad operativa ya que se ha deteriorado con el tiempo y su vida útil se ha reducido por lo que es necesario la evaluación de sus componentes. El equipo es el encargado de enfriar el fluido caliente procedente del condensador de la turbina de vapor, debido a esto es importante su recuperación para que pueda ser utilizada por los estudiantes durante su formación profesional.

El equipo no tiene instrumentación que permite la obtención de parámetros como caudal, temperatura y flujo de aire, necesarios para realizar el balance energético que determina las condiciones operativas del sistema de enfriamiento.

## **Justificación**

### ***Justificación Técnica***

Existen diversos factores que han provocado el deterioro de la torre de enfriamiento y en consecuencia no es posible su funcionamiento pleno. La adquisición de un nuevo equipo que cumpla con los requerimientos del laboratorio representa una inversión considerable para la Universidad, por lo cual es importante rehabilitar el equipo actual y colocar instrumentación adecuada para la realización de prácticas por parte de los estudiantes.

La torre de enfriamiento es un equipo de gran importancia en el laboratorio de conversión de la energía, específicamente en la planta de vapor, ya que es el encargado de reducir la temperatura del agua del condensador. Por su reducido desempeño no puede cumplir de manera correcta su función complementaria al sistema de la planta de vapor, además en el momento de su instalación la tecnología de la época no facilitaba la medición de parámetros para realizar el balance de masa y energía.

### ***Justificación académica***

El área de conocimiento de energías es fundamental en la formación de ingenieros mecánicos en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica -DECEM por lo tanto el laboratorio de conversión de la energía posee equipos para el aprendizaje de estudiantes y su desarrollo a través de la ejecución de prácticas de laboratorio que fomentan la aplicación de conocimientos adquiridos en las aulas de clase en diversas asignaturas como termodinámica, termodinámica aplicada y transferencia de calor.

En los laboratorios de conversión de la energía la torre de enfriamiento permite identificar de manera directa el proceso de enfriamiento evaporativo utilizado en diferentes sistemas térmicos, facilitando que los estudiantes realicen balances energéticos y análisis de transferencia de calor mediante la adquisición de datos para su posterior interpretación.

***Justificación económica***

En el mercado interno ecuatoriano no existe disponibilidad de torres de enfriamiento ni de sus principales componentes por este motivo si la universidad decidiera comprar este sistema estaría obligada a la importación de países como Estados Unidos o China, los costos de la torre asimismo como sus aranceles son elevados en comparación a la restauración de los componentes desgastados.

**Objetivos*****Objetivo General***

- Realizar el balance de energía y masa de la torre de enfriamiento de tiro inducido del laboratorio de conversión de energía

***Objetivo Específicos***

- Ejecutar el mantenimiento completo con el fin de rehabilitar el motor – ventilador, tuberías, empaquetaduras (relleno) y cuerpo de la torre de enfriamiento.
- Instalar la instrumentación idónea que permita adquirir datos precisos de las variables que inciden en el balance de masa y energía como temperaturas y caudales.
- Interpretar los datos obtenidos experimentalmente para determinar las condiciones de funcionamiento de la torre de enfriamiento.

**Meta**

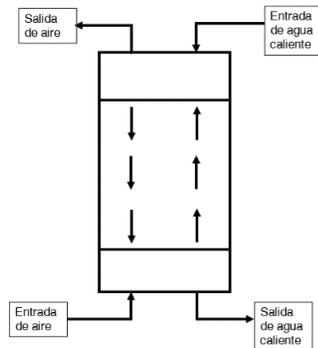
Facilitar el desarrollo de futuras prácticas de laboratorio relacionadas al balance de masa y energía de la torre de enfriamiento de tiro inducido, mediante la ejecución del mantenimiento y colocación de instrumentación adecuada para una lectura precisa de datos.

## Capítulo II: Marco teórico

### Termodinámica de la Torre de enfriamiento

**Figura 1**

*Diagrama de flujo de la torre de enfriamiento*



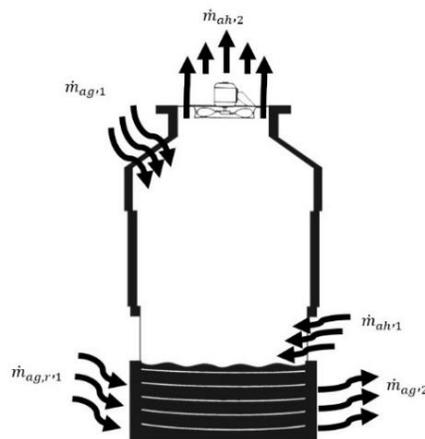
*Nota.* El esquema muestra la interacción de los fluidos que intervienen en el intercambio de calor con su respectiva dirección.

### **Balance de masa**

El concepto de equilibrio másico tiene su fundamento en la cantidad de entrada y salida de masa en un sistema cerrado en donde dicha variación es cero debido a que existe un equilibrio en el flujo másico, este principio es aplicado en la torre de enfriamiento. (Reyes, 2011)

**Figura 2**

*Diagrama de flujo másico de la Torre de Enfriamiento*



Los elementos de análisis en el flujo másico de la torre de enfriamiento son el agua y el aire, específicamente el aire húmedo (aire atmosférico) que está compuesto por flujo de aire seco y flujo de vapor de agua.

Según Cengel y Boles (2009) se recomienda trabajar con el flujo de aire seco ya que permanece relativamente constante en el rango de temperaturas de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  generado un error menor de 0.2 por ciento, sin embargo, el flujo de vapor de agua varía por la evaporación (p. 738).

**Tabla 1**

*Variación del Cp con respecto a la temperatura del aire seco*

| Aire Seco                |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| T ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Cp (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ ) |
| -10                      | 10.038                         |
| 0                        | 10.041                         |
| 10                       | 10.045                         |
| 20                       | 10.049                         |
| 30                       | 10.054                         |
| 40                       | 10.059                         |
| 50                       | 10.065                         |

*Nota. Tomado de Termodinámica (p.738), por Y. Cengel y M. Boles, 2009 McGraw-Hill Education*

$$\dot{m}_{as,1} = \dot{m}_{as,2} = \dot{m}_{as} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ah} = \dot{m}_{as} + \dot{m}_v \quad (2)$$

En el balance másico del agua de la torre de enfriamiento tiene como entradas el flujo másico de agua, flujo másico de agua de reposición y el flujo másico de vapor de agua, de igual forma el sistema tiene como salidas el flujo masico de agua y el flujo másico de vapor del agua que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{ag,1} - \dot{m}_{ag,2} = \dot{m}_{v,2} - \dot{m}_{v,1} = \dot{m}_{ag,r,1} \quad (3)$$

El vapor de agua se comporta de manera independiente al aire que lo contiene, por este motivo el aire húmedo se trabaja como una mezcla de gases ideales cuya presión es la suma de la presión parcial del vapor de agua y del aire seco (Cengel & Boles, 2009).

$$P_{ah} = P_{as} + P_v \quad (4)$$

### **Balance de energía**

Se basa en la primera ley de la termodinámica que expresa la conservación de energía total que entra y sale de un sistema es igual a la transformación de masa, trabajo y energía, esto se puede visualizar en una torre de enfriamiento

Tomando un análisis teórico en donde la torre de enfriamiento es un sistema cerrado en el cual no se percibe intercambio de calor y trabajo del sistema con el entorno y las energías mecánicas como la cinética y potencial son despreciables.

Balance para el aire seco

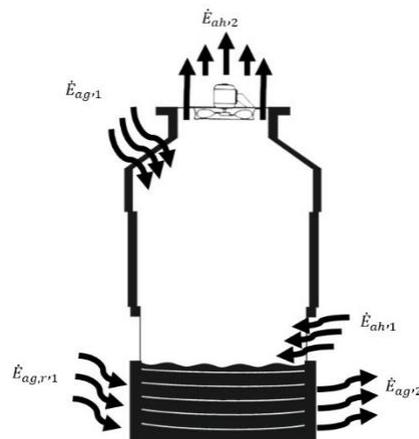
$$\dot{m}_{as,1} h_{as,1} = \dot{m}_{as,2} h_{as,2} \quad (5)$$

Balance para el agua

$$\dot{m}_{ag,1} h_{ag,1} - \dot{m}_{ag,2} h_{ag,2} = \dot{m}_{v,2} h_{v,2} - \dot{m}_{v,1} h_{v,1} \quad (6)$$

### **Figura 3**

*Diagrama de flujo de energía de la Torre de Enfriamiento*



### **Balance de entropía**

La segunda ley de la termodinámica establece que la entropía en un sistema irreversible o real puede generarse y a su vez no puede destruirse, es decir es imposible que un proceso de un ciclo termodinámico tome calor de un depósito y genere una cantidad neta de trabajo (Faires & Simmang, 1983).

Esta ley aplicada a la torre de enfriamiento, así como a todos los sistemas reales determina que la eficiencia no puede ser del 100 por ciento ya que el fluido de trabajo intercambia calor con el ambiente.

En un proceso termodinámico el cambio de la entropía es igual a la entropía de entrada menos la entropía de salida más la entropía generada en un volumen de control, expresado de la siguiente manera.

$$\dot{S}_1 - \dot{S}_2 + \dot{S}_g = \Delta S \quad (7)$$

Balance de aire seco, en función de las entalpías específicas:

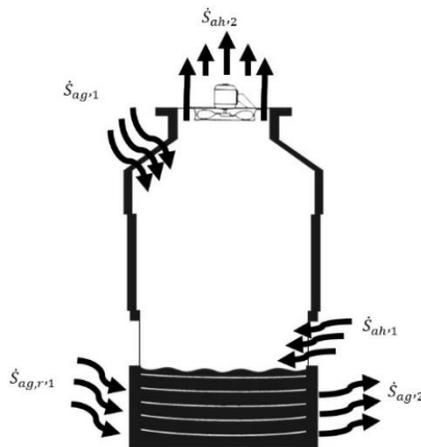
$$\dot{m}_{as,1} S_{as,1} = \dot{m}_{as,2} S_{as,s} \quad (8)$$

Balance para el agua, en función de las entalpías específicas:

$$\dot{m}_{ag,1} S_{ag,1} - \dot{m}_{ag,2} S_{ag,2} = \dot{m}_{v,2} S_{v,2} - \dot{m}_{v,1} S_{v,1} \quad (9)$$

### **Figura 4**

*Diagrama de flujo de entropía de la Torre de Enfriamiento*



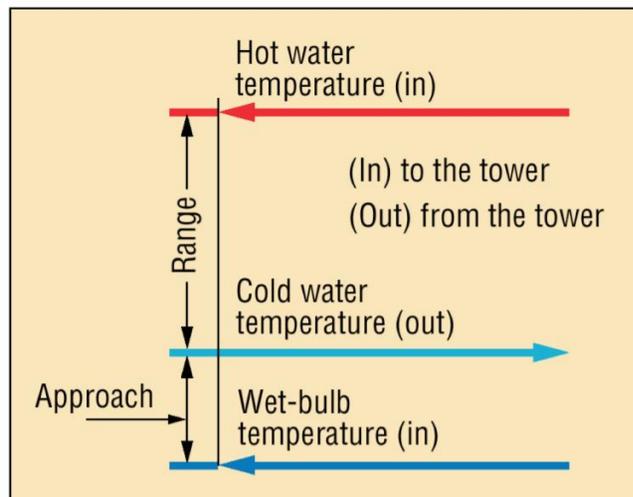
### **Eficiencia térmica**

En consecuencia, la eficiencia energética de un sistema térmico es la relación que existe entre la energía de entrada y la energía utilizada en el ciclo termodinámico, este principio aplicado en la torre de enfriamiento se puede observar, ya que la energía de entrada es la del fluido caliente, la misma que intercambia calor con el aire atmosférico (Reyes, 2011). Además, representa la máxima transferencia de calor, se expresa de manera general:

$$\eta_t = \frac{\text{Energía transferida}}{\text{Energía disponible}} \quad (10)$$

**Figura 5**

*Rango y aproximación de la torre de enfriamiento*



*Nota. Tomado de Cooling Tower (p.139), por C. De Souza, 2019*

La eficiencia energética de la torre de enfriamiento se define como la variación de temperatura del agua que se desea enfriar sobre la variación de transferencia de calor posible, expresada de la siguiente forma:

$$\eta_t = \frac{\text{Rango}}{\text{Rango} + \text{Aproximación}}$$

$$\eta_t = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{ag,s} + T_{ag,s} - T_{bh}}$$

$$\eta_t = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{bh}} \quad (11)$$

### ***Vapor Flash***

Se entiende como la porción del fluido que se vaporiza cuando existe una disminución de presión, ya que en este proceso su entalpia permanece constante provocando que las moléculas de agua en un entorno con menor presión se disipen en forma de rocío (Compañía Especialista en Vapor, s.f.).

En la torre este fenómeno ocurre en la descarga del fluido caliente por aspersor en donde se observa la disminución de presión, es decir la tubería de agua caliente tiene una presión mayor que la atmosférica por el funcionamiento de la bomba induciendo indirectamente la generación de vapor flash.

### ***Humedad Específica***

Según Cuevas (2017) Se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua y la cantidad de aire seco en un espacio determinado. La humedad específica aumenta a medida que el porcentaje de vapor de agua crece hasta llegar al punto de saturación del aire, el vapor de agua excedente se condensará (p.170). Se observa este fenómeno en la torre de enfriamiento cuando existe una saturación de vapor de agua en las paredes provocando la condensación en las mismas.

### ***Humedad Relativa***

Es la relación entre la cantidad de humedad que contiene el aire atmosférico y la humedad máxima que se puede acumular en el aire a una temperatura semejante (Cuevas, 2017). Existe variación de la humedad relativa a causa de la temperatura del aire, es decir entre mayor temperatura el aire tiene, mayor capacidad de contener humedad, asimismo a menor temperatura el aire disminuye su capacidad de almacenar humedad en las mismas condiciones de estado.

En las torres de enfriamiento es necesario que la humedad relativa sea baja formando un ambiente seco, para emplear el principio de enfriamiento evaporativo que busca vaporizar una porción del agua utilizando el calor latente de los alrededores consiguiendo disminuir la temperatura de la otra.

### ***Temperatura de Punto de Rocío***

Según Morán y Shapiro (2004), se conoce a esta temperatura como el punto en donde se satura el porcentaje de humedad máximo en un volumen de aire produciendo que cualquier excedente de vapor de agua se condense formando rocío, este punto varía de acuerdo a la temperatura del aire (pp. 657-658).

Este punto es importante en la torre de enfriamiento ya que nos da un valor referencial en donde el vapor de agua se empezaría a condensar influyendo en el funcionamiento.

### ***Temperatura de saturación adiabática***

Para encontrar esta temperatura se debe idear un sistema con una longitud considerable aislada en donde el agua tenga una gran superficie de contacto con el aire, al fluir el aire sobre el agua una porción de esta se evapora mezclándose con el aire aumentando su porcentaje de humedad y disminuyendo su temperatura, este proceso de saturación adiabática concluye con una temperatura final denominada temperatura de saturación adiabática (Cengel & Boles, 2009).

### ***Temperatura de bulbo húmedo***

Para encontrar la humedad absoluta y relativa se ha optado por utilizar la temperatura de bulbo húmedo que consiste en tomar la lectura de un termómetro con un algodón humedecido completamente saturado de agua por el cual recorre un flujo de aire no saturado el mismo que retira una porción de agua de esta mecha húmeda evaporándola obteniendo como resultado una disminución de la lectura de la temperatura en el termómetro, esta diferencia de temperatura que existe se considera la fuerza que impulsa la transferencia de calor entre aire y agua (Rodríguez, 1990).

Para el balance de energía y masa de la torre de enfriamiento necesitamos la humedad relativa, en la antigüedad se la encontraba utilizando la temperatura de bulbo húmedo, pero en la actualidad existen medios tecnológicos que nos permiten obtener esta información con un higrómetro de manera directa.

En ingeniería la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de saturación adiabática no son iguales sin embargo en mezclas de aire y vapor de agua a presión atmosférica son aproximadamente iguales.

### ***Carta psicrométrica aplicada a la torre de enfriamiento***

La carta psicrométrica está formada por una serie de datos determinados a lo largo de varias experimentaciones y cálculos matemáticos a una misma presión atmosférica que permiten en una configuración aire agua la obtención de valores de humedad relativa y específica, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, entalpia de bulbo húmedo, temperatura de punto de rocío, entre otras.

Para conocer la información complementaria de un estado a una presión específica se necesitan dos propiedades intensivas que a su vez facilitan la identificación del resto de propiedades.

Por motivo de facilidad y exactitud en el balance de energía y masa se ha optado por reducir cálculos y utilizar datos encontrados en la carta psicrométrica con el fin de reducir errores, una vez se recolecte la información de la instrumentación instalada en la torre de enfriamiento se procederá a generar datos adicionales utilizando el diagrama psicrométrico.

En la experimentación se utiliza un higrómetro para obtener la temperatura y la humedad relativa de un entorno aire agua, una vez adquiridos estos datos serán la base para encontrar otras propiedades usando la carta psicrométrica que nos servirán para cálculos posteriores.

Tomando como ejemplo un ambiente en donde la temperatura del bulbo seco (temperatura del termómetro) es de 20 °C y la humedad relativa que marca el higrómetro es 50%, con estos valores ingresamos a la carta psicrométrica. El ejemplo de aplicación se encuentra en el Anexo 1.

### **Torre de enfriamiento**

En la antigüedad se utilizaban dos tipos de estanques para el enfriamiento de agua a nivel industrial, el estanque rociado basa su principio en esparcir al aire una película de agua que cae directamente a un reservorio reduciendo su temperatura, sin embargo, este sistema es ineficiente al igual que el estanque de enfriamiento que básicamente es colocar agua en una superficie enorme formando un depósito, provocando una pobre transferencia con su entorno, si lo comparamos con las torres de enfriamiento en la actualidad, de 20 a 30 veces el área de estos sistemas equivalen al área de transferencia empleado en el enfriamiento evaporativo.

La torre de enfriamiento conocida también como torre de enfriamiento húmedo funciona en base al principio de enfriamiento evaporativo en donde el aire fluye desde la base de la torre hacia la parte más alta, al mismo tiempo un flujo de agua caliente proveniente del intercambiador de calor es dosificado por una tubería que se encuentra en la parte alta rociando agua mediante un aspersor, logrando que este intercambio entre el agua y el aire sea utilizado para disipar calor (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

La finalidad de rociar el agua es aumentar el contacto con el aire produciendo que una porción de agua se vaporice debido a que el fluido cede calor latente en consecuencia se disminuye la temperatura del agua, incrementado la temperatura y humedad del aire circundante (Faires & Simmang, 1983).

Para aumentar el área y el tiempo de contacto se emplea relleno (empaquetadura) en la parte central de la torre aumentando la eficiencia de la misma. Es importante considerar pérdidas de masa de agua en el sistema por este motivo es imprescindible su reposición en el reservorio.

### **Figura 6**

*Torre de enfriamiento*



Una de los principales beneficios por el cual se han utilizado las torres de enfriamiento es el ahorro de agua por medio de la recirculación del fluido, en este proceso se pierde agua a causa de vaporización, otra de las ventajas de su aplicación es el bajo consumo de los equipos eléctricos empleados en su funcionamiento. Este sistema al contrario del enfriamiento solo por

aire tiene menor incidencia acústica en el área de trabajo por esta razón se ha implementado tanto en la industria como en la educación.

### ***Clasificación de torres de enfriamiento según el suministro de aire***

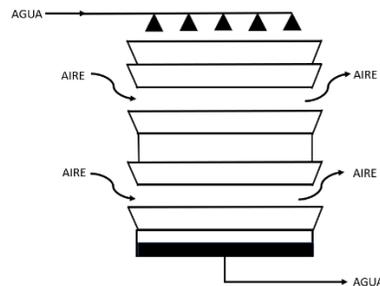
La característica que permite diferenciar cada una de las torres de enfriamiento es la manera en la que se direcciona el aire a través del sistema térmico.

#### **Torres de circulación natural**

***Atmosférica.*** Su nombre se debe a su dependencia directa del aire atmosférico que circula de forma horizontal desde el entorno hacia la torre mediante secciones abiertas al costado de la misma con el fin de aprovechar el flujo cruzado del aire con el agua, por ende no requiere ningún equipo extra como ventiladores pero sus limitaciones son que la velocidad del aire debe tener un rango de 7 km/hora a 10.5 km/hora y se necesita gran energía para activar la bomba que debe distribuir el agua en una área de contacto grande (Orosco, 2003).

### **Figura 7**

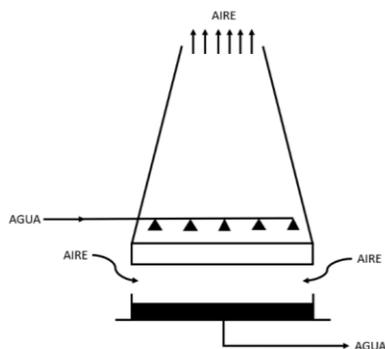
*Torre de enfriamiento atmosférica*



***Tiro natural.*** Su funcionamiento se basa en el principio llamado empuje de Arquímedes que explica como un fluido que está a distintas temperaturas origina una variación de densidades ocasionando que el aire caliente sea impulsado hacia arriba, un factor fundamental en este principio es la temperatura del entorno es decir en un día caluroso disminuye la eficiencia del sistema ya que la variación de temperaturas es menor (Vite, 2012). Otro factor importante es la velocidad de circulación del aire en este sistema es baja por este motivo se utilizan torres de tamaño considerable, por lo general se emplea para enfriar grandes cantidades de agua.

### **Figura 8**

### Torre de enfriamiento de tiro natural

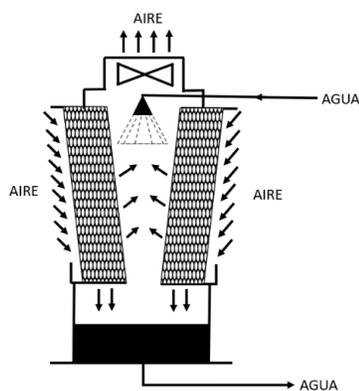


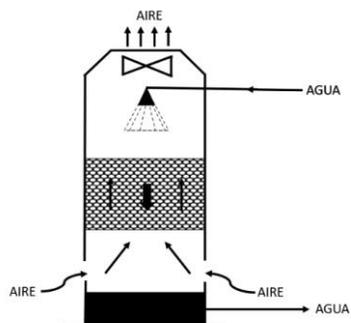
**Torres de tiro mecánico.** Se denominan torres de tiro mecánico aquellas en donde circulan aire forzado dentro de la torre usando equipos adicionales como sopladores o extractores, operando independientemente del flujo del aire circundante del entorno. Se clasifican en:

**Tiro inducido.** Se designa torres de tiro inducido aquellas que poseen un extractor (ventilador) de alta velocidad en la parte más alta de la torre de enfriamiento facilitando el traslado del aire desde la parte inferior a la superior de la torre, una de sus limitaciones es la presencia de una pérdida de presión en el ventilador, lo que exige mayor energía y utilizar velocidades más altas para mantener el arrastre de agua a través del aire. Según la dirección del flujo entre el agua y el aire se clasifican en: tiro inducido en contracorriente y tiro inducido en flujo cruzado.

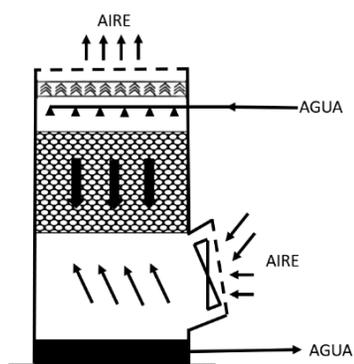
### Figura 9

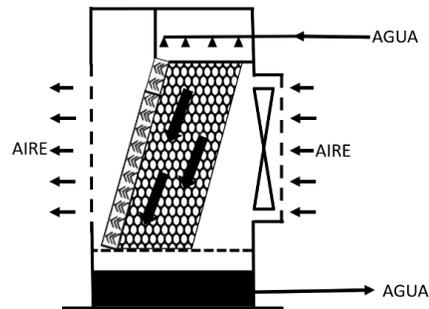
*Tiro inducido a flujo cruzado.*



**Figura 10***Tiro inducido a contracorriente*

**Tiro forzado.** Según Orosco (2003) su nombre se debe a que el aire ingresa forzado a través de una rendija lateral de forma circular en donde se encuentra un soplador que impulsa el aire hacia la parte superior de la torre, se considera de aire pobre ya que existe un cambio brusco en la dirección del aire de 90 grados, una de sus limitaciones es la baja velocidad de salida y se mantiene una porción de vapor de agua recirculando el sistema, se clasifican en: tiro forzado en contracorriente y tiro forzado cruzado.

**Figura 11***Tiro forzado en contracorriente*

**Figura 12***Tiro forzado cruzado***Tipos de empaquetadura**

El diseño de la empaquetadura (relleno) sirve para aumentar el tiempo de transferencia de calor entre el agua y el aire con el fin de mejorar la superficie de contacto en el sistema acelerando la disipación de calor, una de las características principales del relleno es la fácil instalación y un costo reducido logrando una excelente distribución del fluido a medida que circula por la empaquetadura resistiendo a la corrosión, por lo general se fabrican con forma triangular o rectangular para reducir la caída de presión.

Los rellenos se fabrican comúnmente en forma de bloques de PVC (cloruro de polivinilo), CPVC (policloruro de vinilo clorado) y PP (polipropileno), este material es auto extingible y resistente a la radiación UV, asimismo se puede aplicar en agua limpia o sucia a diferentes temperaturas.

Empaquetadura de película o laminar. Se caracteriza por distribuir el agua de manera proporcionada con el fin de cubrir una máxima superficie aumentando la vaporización, es decir formando una lámina de agua adherida a una superficie del relleno en donde la tensión superficial imposibilita que el fluido se desprenda y sea arrastrado por la corriente de aire ya que si esto pasara la eficiencia se reduciría, son utilizados por tener mayor capacidad por unidad de superficie.

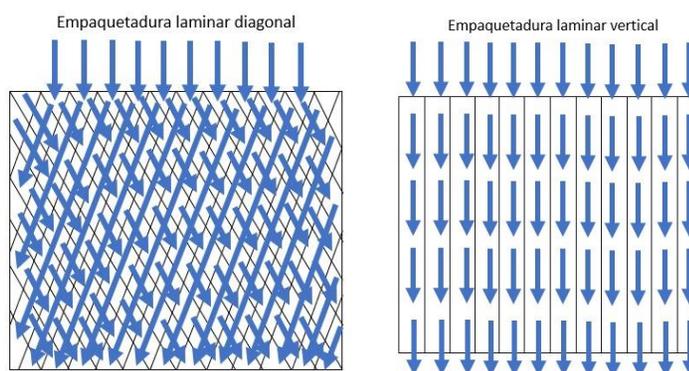
Sus principales ventajas son: la gran capacidad de transferencia que existe entre el aire y el agua debido a un mayor tiempo de contacto entre ellos, por lo tanto, en dos torres con la misma condición de diseño este tipo de relleno podrá albergar mayor volumen de agua y por

ende sería más económico. Puede trabajar a velocidades de aire muy elevadas por la ausencia de la formación de gotas en el relleno en consecuencia se reduce la altura del mismo.

Sus principales limitaciones son: la acumulación de sedimentos atascados entre las láminas que forman el relleno, para solucionar este defecto se opta por aumentar la frecuencia del mantenimiento. Cualquier modificación que exista en los caudales de aire o agua, así como la distribución del fluido afecta de forma directa el funcionamiento de este tipo de rellenos.

**Figura 13**

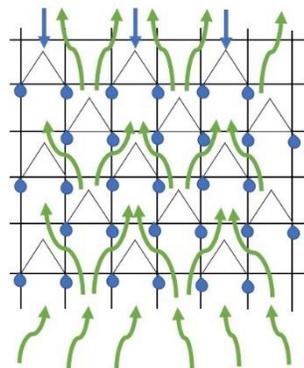
*Empaquetadura de película o laminar*



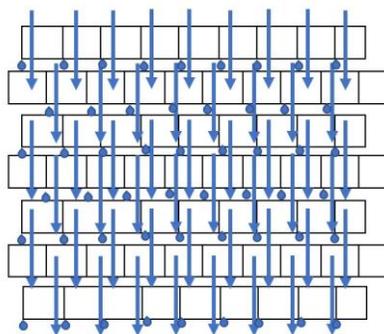
Empaquetadura por goteo o salpicadura. Es tipo de relleno se caracteriza por basar su funcionamiento en la caída de agua por una serie de niveles colocados uno tras otro formando rejillas, al caer el agua se fracciona simultáneamente en gotas más pequeñas aumentando el área de intercambio de calor, una porción del agua se desliza por los lados de la torre hasta llegar al extremo inferior del relleno, en este punto el fluido es turbulento y se esparce, es un proceso cíclico que sucede entre niveles.

Sus ventajas son: generan una caída de presión menor, no se observa la acumulación de suciedad o algún tipo de residuo en el relleno, se utilizan para aplicaciones con gran variación de temperatura.

Sus desventajas son: la caída del agua arrastrada por la gravedad es considerable por este motivo se usa separadores de gotas para aumentar el rendimiento, el intercambio de calor por volumen de área de contacto es bajo por lo tanto para solucionar este problema se incrementa la altura del relleno conservando el área transversal.

**Figura 14***Empaquetadura por goteo o salpicadura*

Empaquetadura combinada. Se conocen como rellenos mixtos a la mezcla del principio de goteo y flujo laminar, es decir el fluido es dividido en varias gotas cuando choca con la rejilla, en ese mismo instante se forma una capa de agua que cae por el área interna de las rejillas aumentando tanto la pulverización como la formación de película.

**Figura 15***Empaquetadura combinada***Separador de gotas**

El arrastre de vapor de agua por el flujo de aire inducido produce que minúsculas gotas se dirijan al exterior de la torre, con el fin de evitar la reducción de agua en el sistema se dirige al aire por medio de canales, al redireccionar el aire por un cambio de sección brusco ocurre la separación y condensación del agua en la superficie de los canales.

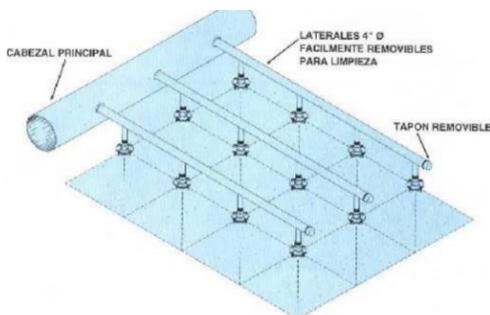
**Figura 16***Separador de gotas*

*Nota.* Tomado de *Torraval Cooling*. (2017)

### **Sistema de distribución de agua**

Rociadores. La principal característica de las boquillas es abastecer el fluido con una forma de spray que puede ser a presión en las torres de contraflujo o de chorro para las torres de flujo cruzado, una vez que el agua atraviesa la boquilla se subdivide en pequeñas gotas con el fin de aumentar la superficie que existe entre el agua y el aire por lo tanto mejora la transferencia de calor como la eficiencia de la torre.

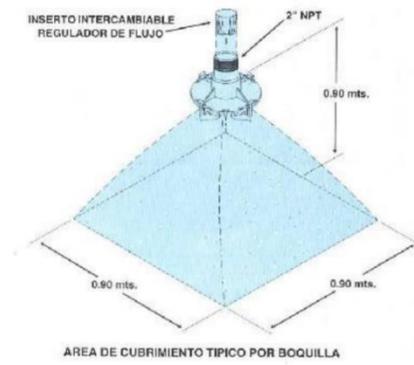
Se puede encontrar dos tipos de sistemas de aspersión del agua, en el primero se colocan aspersores pequeños en hileras para alcanzar el área de chorro requerida y el segundo ubica una boquilla de aspersión general en el centro de la torre.

**Figura 17***Aspersión en hilera*

*Nota.* Tomado de *Diseño operacional de una torre de enfriamiento adiabático de agua de tiro mecánico inducido contracorriente a escala de laboratorio* (p.51), por J. Restrepo, 2011, Universidad Industrial de Santander.

### Figura 18

*Única boquilla de aspersión*



*Nota.* Tomado de *Diseño operacional de una torre de enfriamiento adiabático de agua de tiro mecánico inducido contracorriente a escala de laboratorio* (p.51), por J. Restrepo, 2011, Universidad Industrial de Santander.

### **Ventilador**

En estas máquinas existe una interrelación directa entre un motor eléctrico y la correcta inclinación de los alabes que dirigen el fluido de trabajo para varias aplicaciones, se dividen en dos tipos que se diferencian por la manera en que el aire se impulsa en estos sistemas.

Los ventiladores axiales son aquellos que direccionan el aire por una trayectoria paralela al eje del ventilador con la característica de desplazar significativas porciones de aire con baja presión.

**Figura 19**

*Ventilador axial*



*Nota. Tomado de Airtecnicos. (2020)*

Los ventiladores centrífugos (radiales) direccionan el flujo de aire de salida por una trayectoria radial al eje de rotación, se subdividen en dos grupos de acuerdo a la dirección en la que se colocan sus álabes con disposición hacia delante y hacia atrás.

**Figura 20**

*Ventilador centrifugo*



*Nota. Tomado de Airtecnicos. (2020)*

### ***Generalidades de Bombas***

El fenómeno físico que sustenta el funcionamiento de las bombas es la propulsión de un fluido mediante la transferencia de energía mecánica al agua, se realiza por medio de la entrada de potencia rotativa (motor eléctrico) conectado a un rodete que tiene contacto con el agua aumentando su energía.

**Figura 21**

*Bomba centrífuga*



*Nota.* Tomado de Moby. (2021).

Debido a que se la bomba cede energía al fluido es posible efectuar el balance energético de la misma considerando la entra y salida del agua, la energía en la descarga es igual a la energía de succión sumada a la energía mecánica impulsada al rodete mediante un motor eléctrico.

Tomando en cuenta que todo sistema tiene pérdidas, las principales causas de la disminución de la energía son el cambio de energía eléctrica a mecánica del motor hacia el rodete y la transmisión de energía cinética del rodete hacia el fluido por este motivo se define la eficiencia de la bomba como la cantidad de potencia que se puede entregar al fluido.

### Capítulo III: Determinación del estado inicial y actual

Estado inicial

Figura 22

*Componentes del sistema de enfriamiento*

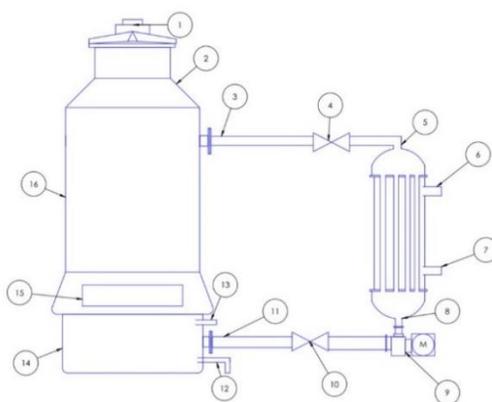


Tabla 2

*Numeración de los componentes de la torre de enfriamiento*

| ITEM | Componente                         |
|------|------------------------------------|
| 1    | Motor - Ventilador                 |
| 2    | Tapa superior                      |
| 3    | Entrada de agua caliente           |
| 4    | Válvula de regulación              |
| 5    | Salida del agua del Condensador    |
| 6    | Entrada de vapor de la turbina     |
| 7    | Salida del condensado              |
| 8    | Entrada de agua del Condensador    |
| 9    | Bomba                              |
| 10   | Válvula de regulación              |
| 11   | Salida de agua fría                |
| 12   | Purga                              |
| 13   | Ingreso de agua de reposición      |
| 14   | Reservorio                         |
| 15   | Ranuras de entrada de aire         |
| 16   | Cuerpo de la Torre de enfriamiento |

**Carcasa****Figura 23**

*Carcasa torre de enfriamiento*



La carcasa de la torre es el soporte estructural de los elementos que intervienen en la transferencia de calor, debido a que se encuentra en la intemperie la fibra de vidrio presenta fisuras, socavados y desgaste en uniones, además la conexión entre el cuerpo y la parte superior de la torre es deficiente, el espacio por el cual ingresa aire no presenta una protección que evite el ingreso de desperdicios.

**Figura 24**

*Parte superior Torre de Enfriamiento*



**Figura 25**

*Interior de la Torre de Enfriamiento*



La zona que aloja el relleno y donde ocurre el intercambio de calor se encontraba con desgaste en las paredes laterales y en la base. En el reservorio se acumuló agua durante mucho tiempo produciendo moho y algas.

***Motor – Ventilador***

**Figura 26**

*Ventilador*



**Figura 27***Sujeción de álabes***Figura 28***Apoyos del ventilador***Figura 29***Álabes del ventilador*

El ventilador encargado de expulsar el aire de la torre presentaba pernos, arandelas y tuercas oxidadas, además desgaste en la pintura de los alabes, falta de lubricación en la conexión con el eje. Por la falta de ajuste los seis alabes no se encontraban en posición uniforme, es decir el ángulo de ataque no era el mismo.

**Tabla 3**

*Descripción del motor*

| <b>Motor Trifásico</b> |           |                    |               |
|------------------------|-----------|--------------------|---------------|
| <b>Marca:</b>          | Baldor    | <b>Potencia:</b>   | 2 HP          |
| <b>Serie:</b>          | M3558T    | <b>Voltaje:</b>    | 208-230/460 V |
| <b>Frame:</b>          | 145T      | <b>Amperaje:</b>   | 6.5-6.2/3.1   |
| <b>Especificación:</b> | 35A01-872 | <b>RPM:</b>        | 1725          |
| <b>IP:</b>             | 55        | <b>Frecuencia:</b> | 60 Hz         |

El motor trifásico que impulsa el ventilador presenta desgaste en componentes internos como rodamientos y tapas, ya que se encontraba sin ninguna protección contra el agua y el sol se observó deterioro, oxido y daños en la pintura.

### ***Empaquetadura***

**Figura 30**

*Empaquetadura Interna*



En la parte interna de la torre de enfriamiento se encontraban tres niveles de empaquetaduras de 90 cm de altura, en algunas unidades se observó desgaste en los bordes y

suciedad en el interior en especial el relleno colocado en la parte superior ya que el agua que sale del aspersor golpea directamente en esta zona.

### **Figura 31**

*Limpieza de empaquetadura*



### **Figura 32**

*Empaquetadura desgastada*



Una vez extraído el relleno se comprobó el buen estado de algunas unidades por lo que serán utilizadas en la torre mientras que la empaquetadura con daño considerable se reemplazó.

***Tuberías de la Torre de Enfriamiento***

**Figura 33**

*Sistema de Tuberías*

**Figura 34**

*Tubería de agua fría y drenaje*



Este sistema este compuesto de dos líneas de tuberías, la primera transporta agua caliente a través de una tubería OD 60.32 mm SCH 80 que se observa en la figura 35 conectada a la parte superior de la torre, la segunda transporta el agua fría desde la torre hacia la bomba mediante una tubería OD 88.90 SCH 80 ubicada en la parte inferior de la torre, para el drenaje se emplean tuberías OD 42.2 mm SCH 80, toda la red de tuberías así como las conexiones presentaban desgaste en la pintura ya que se encuentra en la intemperie.

**Figura 35**

*Brida de tubería de agua caliente*

**Figura 36**

*Empaque brida de agua caliente*



En la conexión de la tubería de agua caliente y la torre se encontró una fuga y exceso de pegamento, de igual forma la brida presentaba pernos, rodela y tuercas oxidadas. El empaque entre las bridas de la figura 36 no sellaba la junta por la colocación incorrecta de pegamento y de sellante térmico.

**Estado actual**

***Reparación estructural***

**Figura 37**

*Carcasa restaurada*



Una vez detectados los problemas se procedió a rellenar agujeros presentes en la superficie exterior de la torre utilizando masilla epóxica (especificaciones Anexo 2) en los casos leves y se empleó fibra de vidrio y resina (especificaciones Anexo 2) para secciones con daños críticos en las ranuras de entrada de aire.

**Figura 38**

*Colocación de fibra de vidrio y resina*





Después de la reparación de la carcasa, se lijó la superficie interna como externa para generar la rugosidad adecuada para proceder con la aplicación de la primera capa de pintura fondo (especificaciones Anexo 3) que tiene un tiempo estimado de secado de dos a cuatro horas. En la parte exterior se aplicó dos capas de pintura anticorrosiva blanco mate (especificaciones Anexo 3).

### **Figura 39**

*Aplicación de pintura (fondo)*



La parte superior de la torre que es la salida del aire y sostiene el motor - ventilador presenta incrustaciones, fisuras y se observa oxidación, además la pintura se encuentra deteriorada y sucia.

**Figura 40***Restauración de la campana*

Al igual que el cuerpo de la carcasa se colocó masilla epóxica tanto en fisuras como en orificios en toda la campana asimismo se utilizó el procedimiento y pintura antes mencionada.

**Figura 41***Pintura interior*

En la parte interior se empleó una pintura gris mate (especificaciones Anexo 3) en base poliuretano con el fin de resistir el desgaste provocado por el agua y agentes bacterianos.

Además, se cambiaron pernos oxidados o deteriorados por nuevos pernos M6x20mm INOX para mejorar la calidad de las conexiones.

**Figura 42**

*Conexiones emperradas internas*



**Recuperación Motor – Ventilador**

**Figura 43**

*Ventilador y sus partes restauradas*



Al encontrar oxido en la parte interna del ventilador y en la conexión chaveta – chavetero se sumergió en antioxidante (especificación Anexo 4) de acuerdo a la recomendación del fabricante, luego de su limpieza y secado se pintó los elementos del ventilador con pintura de aluminio resistente al calor (especificación Anexo 4).

**Figura 44***Placa de motor***Figura 45***Reparación y restauración de componentes del motor*

Para el mantenimiento de los componentes del motor se realizó el desmontaje del estator para lavarlo en seco y barnizarlo, además se reemplazaron los rodamientos 6203 y 6205 (especificación Anexo 5), finalmente se montaron los elementos, se aplicó pintura exterior y se realizaron pruebas de funcionamiento.

### ***Sustitución de empaquetadura deteriorada***

**Figura 46**

*Empaquetadura deteriorada*



Se reemplazo el tercer nivel del relleno por un nuevo fabricado con una matriz de tol tomando como referencia la forma de la empaquetadura dañada, el proceso de fabricación consiste en la comprar y corte del material PVC rígido en secciones rectangulares de 15cm x 40cm, después del corte se procede a calentar la plancha mientras se prensa la matriz manteniendo el calor hasta lograr deformarla.

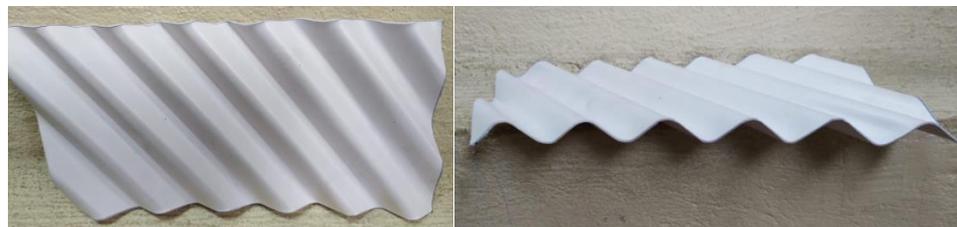
**Figura 47**

*Matriz de tol para la fabricación*



**Figura 48**

*Sección rectangular termoformada*



Es necesario formar hexaedros irregulares de dimensión 120cm x15cm x 15cm uniendo varias secciones rectangulares previamente termoformadas con pegamento, la dirección de las ondulaciones debe ser intercalada con el fin de funcionar de forma óptima. El plano detallado se encuentra en el Anexo 6.

**Figura 49**

*Construcción de bloques de empaquetadura*



**Fabricación de separador de gotas**

Debido a que el ventilador arrastra agua en exceso generando pérdidas en el sistema, se implementó un separador de gotas reduciendo las pérdidas másicas de agua lo que permite utilizar un anemómetro para medir el caudal de viento en la salida de aire. En el mercado ecuatoriano no es factible adquirir el eliminador de gotas por su excesivo costo de importación, por tal motivo se diseñó y fabricó este elemento basado en las características de la torre de enfriamiento.

**Figura 50**

*Separador de gotas fabricado*



### **Fabricación**

Para las láminas del separador de gotas se utilizó galvalume de espesor 0.3 mm, ya que presentan una geometría que permite cambiar la dirección del flujo de aire, se modificó la plancha realizando un doblado en la parte superior de 70° para aumentar el área de contacto.

Con el fin de separar las láminas a una distancia constante se colocó seis varillas roscadas de acero galvanizado transversales ajustadas con pernos y rodajas en sus extremos, entre láminas se instaló bocines de caucho de 3 cm, las dimensiones de la estructura ensamblada son 115 cm x 115 cm x 18 cm. El plano detallado se encuentra en el Anexo 6.

### ***Mantenimiento del sistema de tuberías***

#### **Figura 51**

*Sistema de tuberías restaurado*



Con el fin de eliminar residuos de pintura antigua se lijo las tuberías y se revisó conexiones y el estado de sus componentes, se procedió a pintar de color azul tomando en cuenta el fluido que circula.

**Figura 52***Reemplazo de brida*

Se reemplazó la brida de PVC (especificación Anexo 7), el empaque y los pernos de la conexión, se utilizó sellante térmico rojo (especificación Anexo 7) y pagamentos de PVC (especificación Anexo 7).

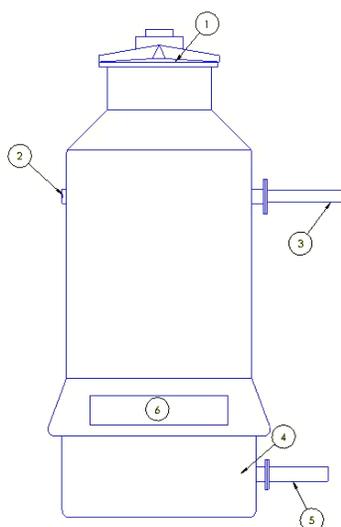
## Capítulo IV: Instrumentación

### Descripción de instrumentación implementada

La torre de enfriamiento no cuenta con ningún tipo de instrumentación para la medición de variables utilizadas para el balance de masa y energía, por este motivo se instalaron dispositivos necesarios para obtener datos de temperatura y caudal en puntos específicos para una correcta recolección de información, en la figura 53 se observa la ubicación de los dispositivos.

**Figura 53**

*Ubicación de los dispositivos en la torre de enfriamiento*



| Nº | Variable a medir                                |
|----|-------------------------------------------------|
| 1  | Temperatura de Bulbo Seco del aire de salida    |
|    | Temperatura de Bulbo Húmedo del aire de salida  |
|    | Humedad Relativa del aire de salida             |
|    | Velocidad del aire de salida                    |
| 2  | Temperatura del agua de entrada                 |
| 3  | Caudal del agua de entrada                      |
| 4  | Temperatura del agua de salida                  |
| 5  | Caudal del agua de salida                       |
| 6  | Temperatura de Bulbo Seco del aire de entrada   |
|    | Temperatura de Bulbo Húmedo del aire de entrada |
|    | Humedad Relativa del aire de entrada            |
|    | Velocidad del aire de entrada                   |

*Nota.* En estas zonas se obtiene información de las variables en el balance de masa y energía.

### **Caudalímetro ultrasónico TUF 2000B**

**Figura 54**

*Ultrasonic flow meter*



*Nota.* Tomado de *Eccentric-Energy* (2018).

Debido a que el mercado de flujómetros en el país es limitado se decidió adquirir este instrumento mediante la importación desde China, tomando como principales características el fácil montaje, costo razonable, medición no invasiva (ultrasónica) y lectura digital directa. En base a estos parámetros se decidió comprar el flujómetro TUF 2000B que cumple los requerimientos.

Para una correcta medición de datos se emplean dos transductores fijados en la tubería, el proceso de instalación se implementó de acuerdo al manual del fabricante que se encuentra en el Anexo 8.

Los parámetros básicos que necesita el equipo son: diámetros exterior e interior, espesor, material de la tubería, método de lectura de los transductores y fluido de circulación. Una vez colocado los parámetros el dispositivo muestra la distancia entre transductores finalizando la instalación.

### **Figura 55**

*Transductores Ultrasónicos TS-2*



*Nota.* Medición directa de flujo ultrasónico. Tomado de *Eccentric-Energy* (2018).

El rango de medición de tuberías de este tipo de transductores TS-2 es DN25-DN100, trabajando en un intervalo de temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $90^{\circ}\text{C}$ , para su anclaje es necesario abrazaderas y gel de acople ultrasónico.

**Anemómetro HP-846A**

Se utilizó un anemómetro con extensión de hélices portable con el fin de recolectar información en una posición cómoda, es necesario la utilización de este instrumento para obtener el caudal de salida del ventilador de la torre de enfriamiento, además este dispositivo está equipado con un sensor de temperatura

**Figura 56**

*Medidor de flujo de aire*



*Nota. Tomado de Amazon. (2020).*

**Termómetro digital****Figura 57**

*Termómetro digital con sonda de temperatura y pantalla LCD*



*Nota. Tomado de Mercadolibre. (2021)*

Es necesario utilizar la sonda de temperatura para la obtención de temperaturas de entrada y salida del agua, las mismas que se colocaron directamente a la tubería tomando en cuenta que la precisión del instrumento es  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

Además, el mismo sensor se utilizó para la obtención de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo de entrada y salida del aire, las sondas se instalaron en un soporte. Para obtener la temperatura de bulbo húmedo se ubicó un paño empapado rodeando la sonda.

**Tabla 4**

*Especificación sonda de temperatura*

| <b>Característica</b>                           | <b>Unidades</b>   |
|-------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Rango de temperatura</b>                     | -50 °C ~ + 110 °C |
| <b>Resolución de la pantalla de temperatura</b> | 0,1 °C            |
| <b>Precisión de la medición de temperatura</b>  | 1 °C              |

***Termohigrómetro digital***

**Figura 58** *Termohigrómetro digital*



*Nota.* Tomado de *Mercadolibre.* (2021).

Con el fin de comparar los datos del balance energético se implementó higrómetros termómetros en la entrada y salida del flujo de aire, la temperatura medida en el higrómetro es la de bulbo seco.

**Tabla 5***Especificación Termohigrómetro*

| <b>Característica</b>                        | <b>Unidades</b>      |
|----------------------------------------------|----------------------|
| <b>Rango de temperatura:</b>                 | -50 °C ~ 70 °C       |
| <b>Rango de humedad de medición:</b>         | 10% RH ~ 99% RH      |
| <b>Precisión de humedad:</b>                 | 5%                   |
| <b>Resolución de la pantalla de humedad:</b> | 1% de HR             |
| <b>Exactitud de la temperatura:</b>          | 1 ° C                |
| <b>Voltaje de funcionamiento:</b>            | 1.5V o baterías LR44 |

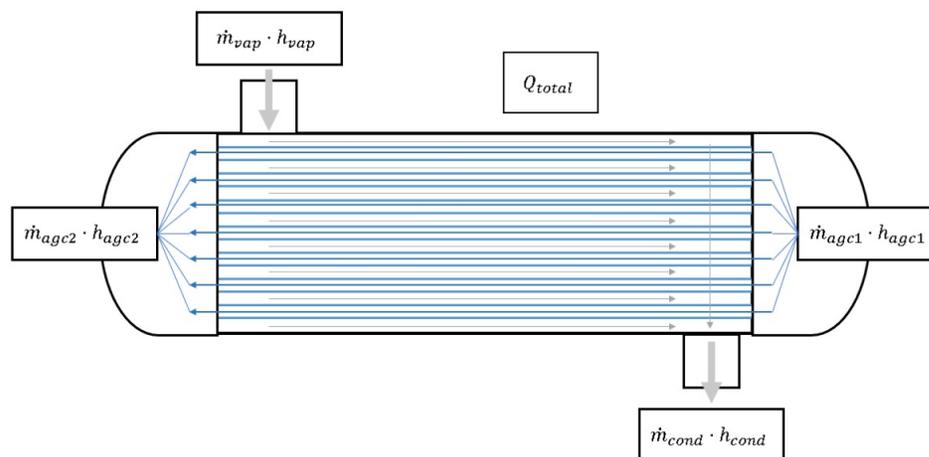
## Capítulo V: Balance másico y energético

### Balance energético del condensador

Para determinar el Calor total ( $Q_{total}$ ) que debe ser disipado por la torre de enfriamiento se realizó en balance energético del intercambiador de calor (condensador).

**Figura 59**

*Diagrama del balance energético del condensador*



Ecuación para el balance de energía del condensador.

$$Q_{transferencia} = \dot{E}_{ag2} - \dot{E}_{ag1}$$

$$Q_{transferencia} = \dot{m}_{agc2} \cdot h_{agc2} - \dot{m}_{agc1} \cdot h_{agc1} \quad (12)$$

Donde:

$\dot{m}_{agc1}$  : Flujo másico del agua de entrada

$h_{agc1}$  : Entalpía de agua de entrada

$\dot{m}_{agc2}$ : Flujo másico del agua de salida

$h_{agc2}$ : Entalpía de agua de salida

Fujo másico del agua de entrada al condensador.

$$\dot{m}_{agc1} = Q_{agc1} \cdot \rho_{agc1}$$

El caudal de entrada de agua al condensador.

$$\dot{m}_{agc1} = 17.723 \frac{m^3}{hr} \cdot \frac{1}{3600} \frac{hr}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_{agc1} = 4.923 \frac{kg}{s}$$

Temperatura de entrada del agua al condensador.

$$T_{agc1} = 17.9^\circ C$$

Entalpía de entrada del agua al condensador.

## Figura 60

### Propiedades del agua saturada

#### TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

| Temp.,<br>$T$ °C | Pres.<br>sat.,<br>$P_{sat}$ kPa | Volumen específico,<br>$m^3/kg$ |                         | Energía interna,<br>$kJ/kg$ |                    |                         | Entalpía,<br>$kJ/kg$    |                    |                         | Entropía,<br>$kJ/kg \cdot K$ |                    |                         |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|
|                  |                                 | Líqu.<br>sat.,<br>$v_f$         | Vapor<br>sat.,<br>$v_g$ | Líqu.<br>sat.,<br>$u_f$     | Evap.,<br>$u_{fg}$ | Vapor<br>sat.,<br>$u_g$ | Líqu.<br>sat.,<br>$h_f$ | Evap.,<br>$h_{fg}$ | Vapor<br>sat.,<br>$h_g$ | Líqu.<br>sat.,<br>$s_f$      | Evap.,<br>$s_{fg}$ | Vapor<br>sat.,<br>$s_g$ |
| 0.01             | 0.6117                          | 0.001000                        | 206.00                  | 0.000                       | 2374.9             | 2374.9                  | 0.001                   | 2500.9             | 2500.9                  | 0.0000                       | 9.1556             | 9.1556                  |
| 5                | 0.8725                          | 0.001000                        | 147.03                  | 21.019                      | 2360.8             | 2381.8                  | 21.020                  | 2489.1             | 2510.1                  | 0.0763                       | 8.9487             | 9.0249                  |
| 10               | 1.2281                          | 0.001000                        | 106.32                  | 42.020                      | 2346.6             | 2388.7                  | 42.022                  | 2477.2             | 2519.2                  | 0.1511                       | 8.7488             | 8.8999                  |
| 15               | 1.7057                          | 0.001001                        | 77.885                  | 62.980                      | 2332.5             | 2395.5                  | 62.982                  | 2465.4             | 2528.3                  | 0.2245                       | 8.5559             | 8.7803                  |
| 20               | 2.3392                          | 0.001002                        | 57.762                  | 83.913                      | 2318.4             | 2402.3                  | 83.915                  | 2453.5             | 2537.4                  | 0.2965                       | 8.3696             | 8.6661                  |
| 25               | 3.1698                          | 0.001003                        | 43.340                  | 104.83                      | 2304.3             | 2409.1                  | 104.83                  | 2441.7             | 2546.5                  | 0.3672                       | 8.1895             | 8.5567                  |
| 30               | 4.2469                          | 0.001004                        | 32.879                  | 125.73                      | 2290.2             | 2415.9                  | 125.74                  | 2429.8             | 2555.6                  | 0.4368                       | 8.0152             | 8.4520                  |
| 35               | 5.6291                          | 0.001006                        | 25.205                  | 146.63                      | 2276.0             | 2422.7                  | 146.64                  | 2417.9             | 2564.6                  | 0.5051                       | 7.8466             | 8.3517                  |
| 40               | 7.3851                          | 0.001008                        | 19.515                  | 167.53                      | 2261.9             | 2429.4                  | 167.53                  | 2406.0             | 2573.5                  | 0.5724                       | 7.6832             | 8.2556                  |
| 45               | 9.5953                          | 0.001010                        | 15.251                  | 188.43                      | 2247.7             | 2436.1                  | 188.44                  | 2394.0             | 2582.4                  | 0.6386                       | 7.5247             | 8.1633                  |

Nota. Tomado de *Termodinámica (p.914)*, por Y. Cengel y M. Boles, 2011, McGrawHill Education.

Según la tabla A-4 de Cengel la entalpía es:

Interpolación entre 20°C y 15°C.

$$h_{agc1} = 62.980 + \frac{(83.913 - 62.980)}{(20 - 15)} * (17.9 - 15) \frac{kJ}{kg}$$

Entalpía de agua de entrada.

$$h_{agc1} = 75.121 \frac{kJ}{kg}$$

Fujo másico del agua de salida del condensador.

Se asume que el flujo másico permanece contante a través del condensador.

$$\dot{m}_{agc2} = \dot{m}_{agc1}$$

$$\dot{m}_{agc2} = 4.923 \frac{kg}{s}$$

Temperatura del agua de salida del condensador.

$$T_{agc2} = 23.9^{\circ}C$$

Según la tabla A-4 de Cengel la entalpía es:

Interpolación entre 20°C y 25°C.

$$h_{agc2} = 83.915 + \frac{(104.83 - 83.915)}{(25 - 20)} * (23.9 - 20) \frac{kJ}{kg}$$

Entalpía del agua de salida del condensador.

$$h_{agc2} = 100.228 \frac{kJ}{kg}$$

Calor total transferido del vapor hacia el agua.

Simplificando y reemplazando valores en la ecuación 12.

$$Q_{transferencia} = 4.923 \frac{kg}{s} \cdot \left( 100.228 \frac{kJ}{kg} - 75.121 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$Q_{transferencia} = 123.602 \frac{kJ}{s} = 123.602 kW = 12.6 BHP$$

Energía trasferida en el condensador

Basado en el Coeficiente global de transferencia de Calor (U) calculado y detallado en el trabajo de titulación "Evaluación energético y técnico – mecánica de la turbina de vapor Coppus RL del Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE" realizado por André Cobo y David Espinosa.

$$U = 1.046 \frac{KW}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

Área de transferencia

$$A_o = \pi \cdot D_e \cdot L_c \cdot N$$

Donde:

$D_e$ : Diámetro exterior de tubo (condensador)

$L_c$ : Longitud de tubo (condensador)

$N$ : Número de tubos

Remplazando en la ecuación

$$D_e = 0.0187 \text{ m}$$

$$L_c = 2.04 \text{ m}$$

$$N = 21 \text{ tubos}$$

$$A_o = \pi \cdot 0.0187 \text{ m} \cdot 2.04 \text{ m} \cdot 21 \text{ tubos}$$

$$A_o = 2.516 \text{ m}^2$$

LMTD: Diferencia de temperatura media logarítmica para flujo cruzado

$$LMTD = \frac{(T_{vap} - T_{agc2}) - (T_{cond} - T_{agc1})}{\ln\left(\frac{(T_{vap} - T_{agc2})}{(T_{cond} - T_{agc1})}\right)} \quad (13)$$

Temperaturas obtenidas en el trabajo de titulación "Evaluación energético y técnico – mecánica de la turbina de vapor Coppus RL del Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE" realizado por André Cobo y David Espinosa.

$$T_{vap} = 90.5 \text{ }^\circ C$$

$$T_{cond} = 52.8 \text{ }^\circ C$$

$$T_{agc1} = 18.8 \text{ }^\circ C$$

$$T_{agc2} = 21.9 \text{ }^\circ C$$

Remplazando en la ecuación 13

$$LMTD = \frac{(90.5\text{ }^{\circ}\text{C} - 21.9\text{ }^{\circ}\text{C}) - (52.8\text{ }^{\circ}\text{C} - 18.8\text{ }^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{(90.5\text{ }^{\circ}\text{C} - 21.9\text{ }^{\circ}\text{C})}{(52.8\text{ }^{\circ}\text{C} - 18.8\text{ }^{\circ}\text{C})}\right)}$$

$$LMTD = 49.293\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Energía trasferida del vapor hacia el agua

$$Q_{transferencia,v} = U \cdot A_o \cdot LMTD \quad (14)$$

Remplazando en la ecuación 14

$$Q_{transferencia,v} = 1.046 \frac{kW}{m^2 \cdot ^{\circ}K} \cdot 2.516 m^2 \cdot 49.293\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{transferencia,v} = 129.764 \frac{kJ}{s}$$

### Obtención de datos

Una vez colocados los instrumentos en lugares específicos en la torre de enfriamiento se procede a recolectar datos necesarios para el balance de masa y energía, las variables a medir se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 6**

*Variables de medición*

| Variable                                                    | Nomenclatura           |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|
| RPM Turbina                                                 | RPM                    |
| Caudal de entrada de agua                                   | $Q_{ag1}$              |
| Caudal de salida de agua                                    | $Q_{ag2}$              |
| Temperatura de entrada de agua                              | $T_{ag1}$              |
| Temperatura de salida de agua                               | $T_{ag2}$              |
| Velocidad de entrada del aire                               | $V_{as1}$              |
| Velocidad de salida del aire                                | $V_{as2}$              |
| Temperatura de entrada del aire (bulbo seco y bulbo húmedo) | $T_{bs1}$<br>$T_{bh1}$ |
| Temperatura de salida del aire (bulbo seco y bulbo húmedo)  | $T_{bs2}$<br>$T_{bh2}$ |
| Humedad relativa de entrada (higrómetro)                    | $\phi_1$               |
| Humedad relativa de salida (higrómetro)                     | $\phi_2$               |

## Cálculos

Es indispensable para la recolección de datos utilizar una tabla que nos ayude a organizar la información. Con el fin de explicar el balance del estado inicial de la torre de enfriamiento se usaron datos que se tomaron a las 13:00 horas. Intervalo de medición 8 minutos.

**Tabla 7**

*Tabulación de datos iniciales*

| <i>RPM</i>                     | $Q_{ag1}$                     | $Q_{ag2}$                     | $T_{ag1}$ | $T_{ag2}$ | $V_{as1}$                  | $V_{as2}$                  | $T_{bs1}$ | $T_{bh1}$ | $T_{bs2}$ | $T_{bh2}$ | $\phi_1$ | $\phi_2$ |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| $\left[\frac{rev}{min}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | [°C]      | [°C]      | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [%]      | [%]      |
| 2485                           | 17,658                        | 17,695                        | 22,5      | 18,4      | 10,102                     | 24,115                     | 19.9      | 13.1      | 21.2      | 16.8      | 52       | 69       |
| 2512                           | 17,452                        | 17,689                        | 23,1      | 18,8      | 10,135                     | 24,098                     | 21.1      | 13.4      | 21.5      | 17.2      | 50       | 72       |
| 2502                           | 17,957                        | 17,712                        | 22,8      | 18,6      | 10,095                     | 24,118                     | 20.7      | 13.5      | 20.9      | 17.1      | 53       | 73       |
| 2495                           | 17,569                        | 17,725                        | 23        | 18,3      | 10,099                     | 24,096                     | 20.9      | 13.4      | 20.8      | 16.9      | 54       | 69       |
| 2466                           | 17,979                        | 17,774                        | 23,1      | 18,4      | 10,194                     | 24,078                     | 19.9      | 13.1      | 21.1      | 16.5      | 56       | 72       |

**Tabla 8**

*Promedio de datos iniciales*

| <i>RPM</i>                     | $Q_{ag1}$                     | $Q_{ag2}$                     | $T_{ag1}$ | $T_{ag2}$ | $V_{as1}$                  | $V_{as2}$                  | $T_{bs1}$ | $T_{bh1}$ | $T_{bs2}$ | $T_{bh2}$ | $\phi_1$ | $\phi_2$ |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| $\left[\frac{rev}{min}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | [°C]      | [°C]      | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [%]      | [%]      |
| 2492                           | 17.723                        | 17.719                        | 22.9      | 18.5      | 10.125                     | 24.101                     | 20.5      | 13.3      | 21.1      | 16.9      | 53       | 71       |

Flujo másico de agua de entrada, mediante el caudalímetro ultrasónico se obtuvo el flujo volumétrico en la tubería de entrada y salida.

$$\dot{m}_{ag1} = Q_{ag1} \cdot \rho_{ag} = 17.723 \frac{m^3}{hr} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1 hr}{3600 s}$$

$$\dot{m}_{ag1} = 4.923 \frac{kg}{s}$$

Flujo másico de agua de salida.

$$\dot{m}_{ag2} = Q_{ag2} \cdot \rho_{ag} = 17.719 \frac{m^3}{hr} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1 hr}{3600 s}$$

$$\dot{m}_{ag2} = 4.921 \frac{kg}{s}$$

Se asume.

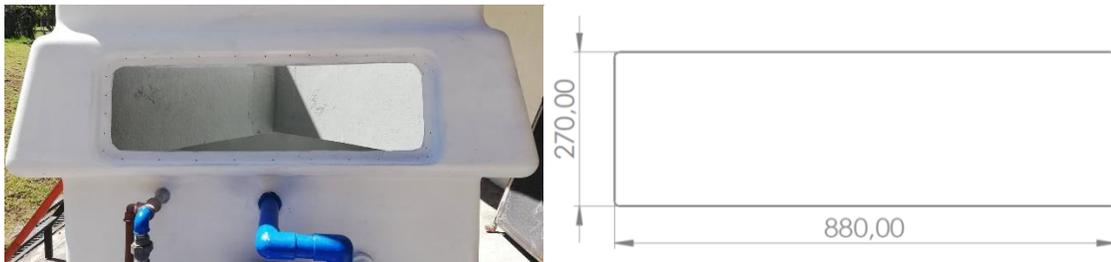
$$\dot{m}_{ag1} \approx \dot{m}_{ag2} = \dot{m}_{ag}$$

$$\dot{m}_{ag} = 4.923 \frac{kg}{s}$$

El flujo másico de entrada de aire se determinó con la velocidad de ingreso del aire y con el área de las 4 ranuras.

**Figura 61**

Área de caudal de aire de entrada



Área de ingreso de aire.

$$A_{as1} = 4 * L * A = 4 \cdot 0.88m \cdot 0.27m = 0.95 m^2$$

Caudal de aire de entrada.

$$Q_{as1} = A_{as1} \cdot V_{as1}$$

$$Q_{as1} = 0.95 m^2 \cdot 10.125 \frac{m}{s} = 9.623 \frac{m^3}{s}$$

Flujo másico de aire de entrada.

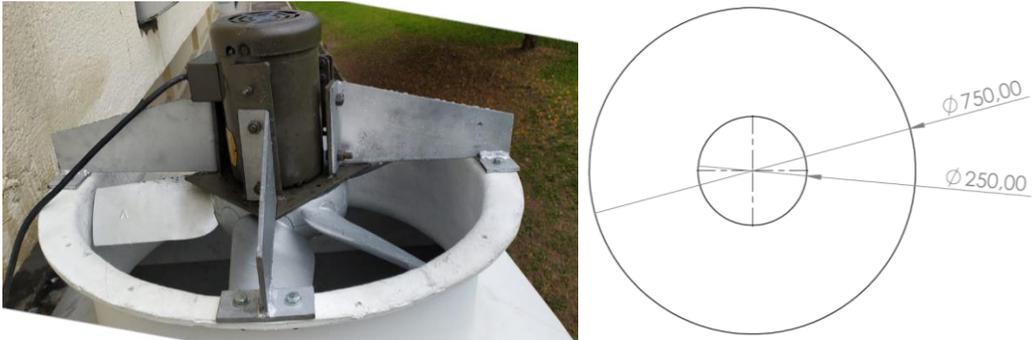
$$\dot{m}_{as1} = Q_{as1} \cdot \rho_{as1} = 9.623 \frac{m^3}{s} \cdot 0.82 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_{as1} = 7.89 \frac{kg}{s}$$

El flujo de salida del aire se determinó con la velocidad de salida del aire y el área de circulación del fluido.

**Figura 62**

Área de caudal de aire de salida



Área de salida de aire.

$$A_{as2} = \frac{\pi}{4} * (d_1^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4} (0.75^2 - 0.25^2) = 0.39 \text{ m}^2$$

Área de salida de aire.

$$Q_{as2} = A_{as2} \cdot V_{as2}$$

$$Q_{as2} = 0.29 \text{ m}^2 \cdot 24.101 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9.464 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Flujo másico de aire de salida.

$$\dot{m}_{as2} = Q_{as2} \cdot \rho_{as} = 9.464 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 0.83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\dot{m}_{as2} = 7.86 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se asume.

$$\dot{m}_{as1} \approx \dot{m}_{as2} = \dot{m}_{as}$$

$$\dot{m}_{as} = 7.86 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Temperatura del agua de entrada.

$$T_{ag1} = 22.9^{\circ}C$$

Según la tabla A-4 de Cengel la entalpía es:

Interpolación entre 20°C y 25°C.

$$h_{ag1} = 83.915 + \frac{(104.83 - 83.915)}{(25 - 20)} \cdot (22.9 - 20) \frac{kJ}{kg}$$

Entalpía de agua de entrada.

$$h_{ag1} = 96.046 \frac{kJ}{kg}$$

Temperatura del agua de salida es:

$$T_{ag2} = 18.5^{\circ}C$$

Según la tabla A-4 de Cengel la entalpía es:

Interpolación entre 15°C y 20°C.

$$h_{ag2} = 62.982 + \frac{(83.915 - 62.982)}{(20 - 15)} \cdot (18.5 - 15) \frac{kJ}{kg}$$

Entalpía de agua de salida.

$$h_{ag2} = 77.635 \frac{kJ}{kg}$$

Temperatura del aire de entrada

$$T_{bs1} = 20.5^{\circ}C$$

Humedad relativa de entrada.

$$\phi_1 = 53\%$$

Tomando la carta psicrométrica a la altura de Sangolquí, se obtuvieron los siguientes parámetros.

Altura de Sangolquí: 2500 msnm.

Temperatura de bulbo húmedo calculada.

$$T_{bh1} = 13.9^{\circ}C$$

Temperatura de bulbo húmedo real.

$$T_{bh1} = 13.3^{\circ}C$$

Humedad específica.

$$\omega_1 = 10.8 \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}} = 0.0108 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}}$$

Entalpía de aire de entrada.

$$h_{as1} = 58.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Temperatura del aire de salida.

$$T_{bs2} = 21.1^{\circ}C$$

Humedad relativa de salida.

$$\phi_2 = 71\%$$

Tomando la carta psicrométrica a la altura de Sangolquí, se obtuvieron los siguientes parámetros.

Altura de Sangolquí: 2500 msnm

Temperatura de bulbo húmedo calculada.

$$T_{bh2} = 17.2^{\circ}C$$

Temperatura de bulbo húmedo real.

$$T_{bh2} = 16.9^{\circ}C$$

Humedad específica.

$$\omega_2 = 15.2 \frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}} = 0.0152 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg aire seco}}$$

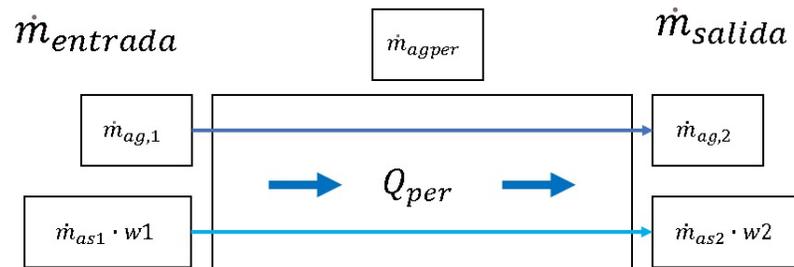
Entalpía de aire de salida.

$$h_{as2} = 59.7 \frac{kJ}{kg}$$

**Balace de masa de agua inicial**

**Figura 63**

Diagrama del balance másico del agua



$$\dot{m}_{agper} = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida}$$

Donde:

$\dot{m}_{entrada}$  : Flujo másico de entrada

$\dot{m}_{salida}$  : Flujo másico de salida

$\dot{m}_{agper}$  : Flujo másico perdido

Despejando.

$$\dot{m}_{agper} = \dot{m}_{as} \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$$\dot{m}_{agper} = 7.86 \frac{kg}{s} \cdot \left( 0.0152 \frac{kg \text{ H2O}}{kg \text{ aire seco}} - 0.0108 \frac{kg \text{ H2O}}{kg \text{ aire seco}} \right)$$

Flujo másico de reposición de agua.

$$\dot{m}_r = \dot{m}_{agper} = 0.0346 \frac{kg}{s}$$

Comprobación experimental.

Para corroborar el flujo másico de reposición se midió el nivel del reservorio antes y después del funcionamiento de la torre de enfriamiento en un lapso de 40 minutos y se obtuvieron los siguientes datos.

Antes de la puesta en marcha se tomó la altura del nivel del agua.

$$Altura_1 = 0.365 \text{ m}$$

Dimensiones del reservorio.

$$Largo = 1.2 \text{ m}$$

$$Ancho = 1.2 \text{ m}$$

Volumen inicial.

$$v_1 = Largo \cdot Ancho \cdot Altura_1$$

$$v_1 = 1.2 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} \cdot 0.365 \text{ m} = 0.526 \text{ m}^3$$

Masa inicial.

$$m_1 = 0.526 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 526 \text{ kg}$$

Después de 40 minutos de funcionamiento se tomó la altura final.

$$Altura_2 = 0.302 \text{ m}$$

Volumen final.

$$v_2 = Largo \cdot Ancho \cdot Altura_2$$

$$v_2 = 1.2 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} \cdot 0.302 \text{ m} = 0.435 \text{ m}^3$$

Masa final.

$$m_2 = 0.435 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 435 \text{ kg}$$

Flujo másico perdido

$$\dot{m}_{rexp} = \frac{(m_1 - m_2)}{\text{tiempo}} = \frac{(526 \text{ kg} - 435 \text{ kg})}{2400 \text{ s}} = 0.0378 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Comparación de flujo másico perdido.

$$\dot{m}_r \approx \dot{m}_{r_{exp}}$$

$$0.0346 \frac{kg}{s} \approx 0.0378 \frac{kg}{s}$$

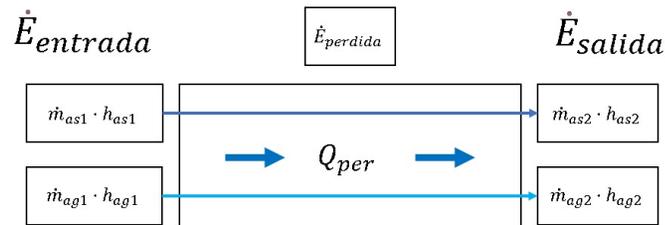
Se observa que los valores son similares.

### **Balance de energía inicial**

La energía que pierde el agua es igual a la energía ganada por el aire, al finalizar la transferencia la energía que se encuentra en aire es disipada al ambiente.

**Figura 64**

*Diagrama del balance de energía*



Ecuación general de balance de energía.

$$\dot{E}_{agua} = \dot{E}_{aire}$$

Energía del agua.

$$\dot{E}_{agua} = \dot{E}_{agentrada} - \dot{E}_{agsalida}$$

$$\dot{E}_{agua} = \dot{m}_{ag1} \cdot h_{ag1} - \dot{m}_{ag2} \cdot h_{ag2}$$

Donde:

$\dot{m}_{ag1}$  : Flujo másico de agua de entrada

$h_{ag1}$  : Entalpía de agua de entrada

$\dot{m}_{ag2}$  : Flujo másico de agua de salida

$h_{ag2}$  : Entalpía de agua de salida

Simplificando.

$$\begin{aligned}\dot{E}_{agua} &= \dot{m}_{ag} \cdot (h_{ag1} - h_{ag2}) \\ \dot{E}_{agua} &= 4.923 \frac{kg}{s} \cdot \left( 96.046 \frac{kJ}{kg} - 77.635 \frac{kJ}{kg} \right) \\ \dot{E}_{agua} &= 90.636 \frac{kJ}{s}\end{aligned}$$

Esta energía se puede calcular utilizando la siguiente formula.

$$\begin{aligned}\dot{E}_{agua} &= \dot{m}_{ag} \cdot C_p \cdot (T_{ag1} - T_{ag2}) \\ \dot{E}_{agua} &= 4.923 \frac{kg}{s} \cdot 4.182 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \cdot (22.9^{\circ}C - 18.5^{\circ}C) \\ \dot{E}_{agua} &= 90.588 \frac{kJ}{s}\end{aligned}$$

Se obtiene

$$90.636 \frac{kJ}{s} \approx 90.588 \frac{kJ}{s}$$

Energía del aire

$$\begin{aligned}\dot{E}_{aire} &= \dot{E}_{assalida} - \dot{E}_{asentrada} \\ \dot{E}_{aire} &= \dot{m}_{as2} \cdot h_{as2} - \dot{m}_{as1} \cdot h_{as1}\end{aligned}$$

Donde:

$\dot{m}_{as1}$  : Flujo másico de aire de entrada

$h_{as1}$  : Entalpía de aire de entrada

$\dot{m}_{as2}$  : Flujo másico de aire de salida

$h_{as2}$  : Entalpía de aire de salida

Simplificando.

$$\dot{E}_{aire} = \dot{m}_{as} \cdot (h_{as2} - h_{as1})$$

$$\dot{E}_{aire} = 7.86 \frac{kg}{s} \cdot \left( 59.7 \frac{kJ}{kg} - 48.1 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{E}_{aire} = 91.176 \frac{kJ}{s}$$

Energía transferida.

$$\dot{E}_{agua} = \dot{E}_{aire}$$

$$\dot{E}_{transferida} = 90.588 \frac{kJ}{s} \approx 91.176 \frac{kJ}{s}$$

### **Eficiencia inicial**

Eficiencia térmica real.

$$\eta_{t1} = \frac{T_{ag1} - T_{ag2}}{T_{ag1} - T_{bh1(real)}}$$

$$\eta_{t1} = \frac{22.9C - 18.5C}{22.9C - 13.3C}$$

$$\eta_{t1} = 45.83\%$$

Eficiencia térmica ideal.

$$\eta_{t2} = \frac{T_{ag1} - T_{ag2}}{T_{ag1} - T_{bh1(calculada)}}$$

$$\eta_{t2} = \frac{22.9 - 18.5C}{22.9C - 13.9C}$$

$$\eta_{t2} = 48.89\%$$

Eficiencia tomando en cuenta la energía transferida al agua en el condensador.

Utilizando la energía que absorbe el aire

$$\eta_{t3} = \frac{\dot{E}_{aire}}{Q_{transferencia}}$$

$$\eta_{t3} = \frac{91.176 \frac{kJ}{s}}{123.602 \frac{kJ}{s}}$$

$$\eta_{t3} = 73.76 \%$$

Utilizando la energía que cede el agua

$$\eta_{t4} = \frac{\dot{E}_{agua}}{Q_{transferencia}}$$

$$\eta_{t4} = \frac{90.636 \frac{kJ}{s}}{123.602 \frac{kJ}{s}}$$

$$\eta_{t4} = 73.33 \%$$

## Resultados

Tabla 9

Resultados iniciales

| $\dot{m}_r$                 | $\dot{m}_{rexp}$            | $\dot{E}_{transferida}$     |                  | <b>Eficiencia Térmica</b> |             |             |             |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                             |                             | $\dot{E}_{agua}$            | $\dot{E}_{aire}$ | $\eta_{t1}$               | $\eta_{t2}$ | $\eta_{t3}$ | $\eta_{t4}$ |
| $\left[\frac{kg}{s}\right]$ | $\left[\frac{kg}{s}\right]$ | $\left[\frac{kJ}{s}\right]$ |                  | [%]                       |             |             |             |
| 0.0346                      | 0.0378                      | 90.636                      | 91.176           | 45.83                     | 48.89       | 73.76       | 73.33       |

**Tabla 10**

Tabulación de datos finales

| <i>RPM</i>                     | $Q_{ag}$                      | $T_{ag1}$ | $T_{ag2}$ | $V_{as1}$                  | $V_{as2}$                  | $T_{bs1}$ | $T_{bh1}$ | $T_{bs2}$ | $T_{bh2}$ | $\phi_1$ | $\phi_2$ |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| $\left[\frac{rev}{min}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | [°C]      | [°C]      | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [%]      | [%]      |
| 2479                           | 17,702                        | 22,9      | 18,1      | 8,378                      | 20,195                     | 21,1      | 13,1      | 22,4      | 17,4      | 46       | 67       |
| 2501                           | 17,735                        | 22,6      | 17,7      | 8,396                      | 20,208                     | 20,8      | 12,9      | 22,5      | 17,6      | 49       | 65       |
| 2488                           | 17,715                        | 22,8      | 18,2      | 8,381                      | 20,215                     | 21,2      | 13        | 22,2      | 17,5      | 47       | 66       |
| 2494                           | 17,726                        | 22,4      | 17,9      | 8,394                      | 20,198                     | 21        | 13,2      | 22        | 17,4      | 46       | 64       |
| 2463                           | 17,717                        | 23,3      | 18,1      | 8,396                      | 20,189                     | 20,9      | 13,3      | 23,4      | 17,6      | 47       | 68       |

**Tabla 11**

Promedio de datos finales

| <i>RPM</i>                     | $Q_{ag}$                      | $T_{ag1}$ | $T_{ag2}$ | $V_{as1}$                  | $V_{as2}$                  | $T_{bs1}$ | $T_{bh1}$ | $T_{bs2}$ | $T_{bh2}$ | $\phi_1$ | $\phi_2$ |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| $\left[\frac{rev}{min}\right]$ | $\left[\frac{m^3}{hr}\right]$ | [°C]      | [°C]      | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | $\left[\frac{m}{s}\right]$ | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [°C]      | [%]      | [%]      |
| 2512                           | 17.723                        | 22.8      | 18        | 8.389                      | 20.201                     | 21        | 13.1      | 22.5      | 17.5      | 47       | 66       |

**Tabla 12**

Resultados finales

| $\dot{m}_r$                 | $\dot{m}_{rexp}$            | $\dot{E}_{disipada}$        |                  | <i>Eficiencia Térmica</i> |             |             |             |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                             |                             | $\dot{E}_{agua}$            | $\dot{E}_{aire}$ | $\eta_{t1}$               | $\eta_{t2}$ | $\eta_{t3}$ | $\eta_{t4}$ |
| $\left[\frac{kg}{s}\right]$ | $\left[\frac{kg}{s}\right]$ | $\left[\frac{kJ}{s}\right]$ |                  | [%]                       |             |             |             |
| 0.0367                      | 0.0402                      | 98.860                      | 101.398          | 49.48                     | 51.06       | 80.01       | 82.03       |

### Análisis de resultados

Al finalizar las pruebas de funcionamiento de la torre de enfriamiento, se tabuló los datos en el estado inicial y final con el fin de analizar la información para comparar los cambios obtenidos.

**Tabla 13**

*Comparación del estado inicial y final del flujo másico de reposición*

| Parámetros                                                  | Estado inicial        | Estado final          | Incremento            |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Flujo másico de reposición<br>$\dot{m}_r$                   | $0.0346 \frac{kg}{s}$ | $0.0367 \frac{kg}{s}$ | $0.0021 \frac{kg}{s}$ |
| Flujo másico de reposición experimental<br>$\dot{m}_{rexp}$ | $0.0378 \frac{kg}{s}$ | $0.0402 \frac{kg}{s}$ | $0.0024 \frac{kg}{s}$ |

En la torre de enfriamiento el flujo másico de reposición se define como la cantidad de agua perdida en un tiempo determinado producto del arrastre del agua en el aire, la misma que debe ser renovada evitando que el reservorio de agua reduzca su volumen a un nivel crítico. Una consecuencia de llegar al nivel crítico es la reducción del flujo másico de salida ya que existe una deficiencia en la succión.

Según el balance másico calculado se evidenció un incremento del flujo másico de reposición entre el estado inicial y final de  $0.0021 \frac{kg}{s}$ , que fue corroborado mediante un método experimental obteniendo  $0.0024 \frac{kg}{s}$  de incremento, la razón de este incremento se debe a que existe mayor cantidad de vapor de agua en la salida de la torre generando un aumento en la transferencia de calor entre el agua y el aire.

Tabla 14

*Comparación del estado inicial y final de la energía transferida*

| Parámetros                      | Estado inicial        | Estado final           | Incremento            |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>Energía transferida</b>      |                       |                        |                       |
| agua<br>$\dot{E}_{\text{agua}}$ | $90.636 \frac{kJ}{s}$ | $98.860 \frac{kJ}{s}$  | $8.224 \frac{kJ}{s}$  |
| <b>Energía transferida</b>      |                       |                        |                       |
| aire<br>$\dot{E}_{\text{aire}}$ | $91.176 \frac{kJ}{s}$ | $101.398 \frac{kJ}{s}$ | $10.222 \frac{kJ}{s}$ |

Es importante la energía transferida porque permite identificar la cantidad de energía que la torre de enfriamiento disipa en un periodo de tiempo, se evidenció que existió un incremento en la transferencia de energía del agua entre el estado inicial y final de  $8.224 \frac{kJ}{s}$ , este valor se corroboró al obtener la energía transferida del aire de  $10.222 \frac{kJ}{s}$ , los dos valores son similares debido a que el agua cede energía mientras el aire la absorbe. La energía disipada de la torre se relaciona directamente con la energía transferida del vapor al agua en el condensador.

Tabla 15

*Comparación del estado inicial y final de la eficiencia térmica basada en la humedad relativa*

| Parámetros              | Estado inicial | Estado final | Incremento |
|-------------------------|----------------|--------------|------------|
| <b>Eficiencia real</b>  |                |              |            |
| $\eta_{t1}$             | 45.83 %        | 49.48 %      | 3.65 %     |
| <b>Eficiencia ideal</b> |                |              |            |
| $\eta_{t2}$             | 48.89 %        | 51.06 %      | 2.17 %     |

La eficiencia térmica real e ideal se calculan utilizando la ecuación 11, que depende de las condiciones ambientales como temperaturas de bulbo seco y húmedo y la humedad relativa, es decir que la eficiencia fluctúa durante el día, ya que los datos obtenidos fueron de 53% y 47%

de humedad relativa en el estado inicial y final respectivamente, se observa que al reducir la temperatura de bulbo húmedo la eficiencia baja.

Por este motivo existió un incremento de 3.65 % en la eficiencia real y de 2.17 % en la eficiencia ideal, la diferencia entre los valores se debe a que la eficiencia real se calculó con la temperatura de bulbo húmedo tomada directamente con el instrumento mientras la eficiencia ideal utiliza la temperatura de bulbo húmedo determinada en la carta psicrométrica ingresando los parámetros de bulbo seco y humedad relativa.

**Tabla 16**

*Variación de eficiencia térmica con respecto a la humedad relativa*

| <b>Hora</b>  | <b><math>T_{ag1}</math></b> | <b><math>T_{ag2}</math></b> | <b><math>\phi_1</math></b> | <b><math>T_{bs1}</math></b> | <b><math>T_{bh1}</math></b> | <b><math>\eta_{t1}</math></b> |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <b>[hr]</b>  | <b>[°C]</b>                 | <b>[°C]</b>                 | <b>[%]</b>                 | <b>[°C]</b>                 | <b>[°C]</b>                 | <b>[%]</b>                    |
| <b>13:30</b> | 22,8                        | 18                          | 33                         | 24,6                        | 13,5                        | 51,61                         |
| <b>12:30</b> | 22,7                        | 17,8                        | 36                         | 22,5                        | 12,6                        | 48,51                         |
| <b>11:30</b> | 22,9                        | 18,2                        | 39                         | 22,1                        | 12,8                        | 46,53                         |
| <b>10:45</b> | 22,8                        | 18,1                        | 42                         | 21,1                        | 12,6                        | 46,08                         |
| <b>10:15</b> | 22,6                        | 17,9                        | 47                         | 21                          | 13,4                        | 51,09                         |
| <b>10:30</b> | 22,7                        | 18,2                        | 50                         | 19,5                        | 12,6                        | 44,55                         |
| <b>9:15</b>  | 22,9                        | 18                          | 53                         | 19,6                        | 13,2                        | 50,52                         |
| <b>8:45</b>  | 22,8                        | 17,9                        | 56                         | 18,2                        | 12,5                        | 47,57                         |

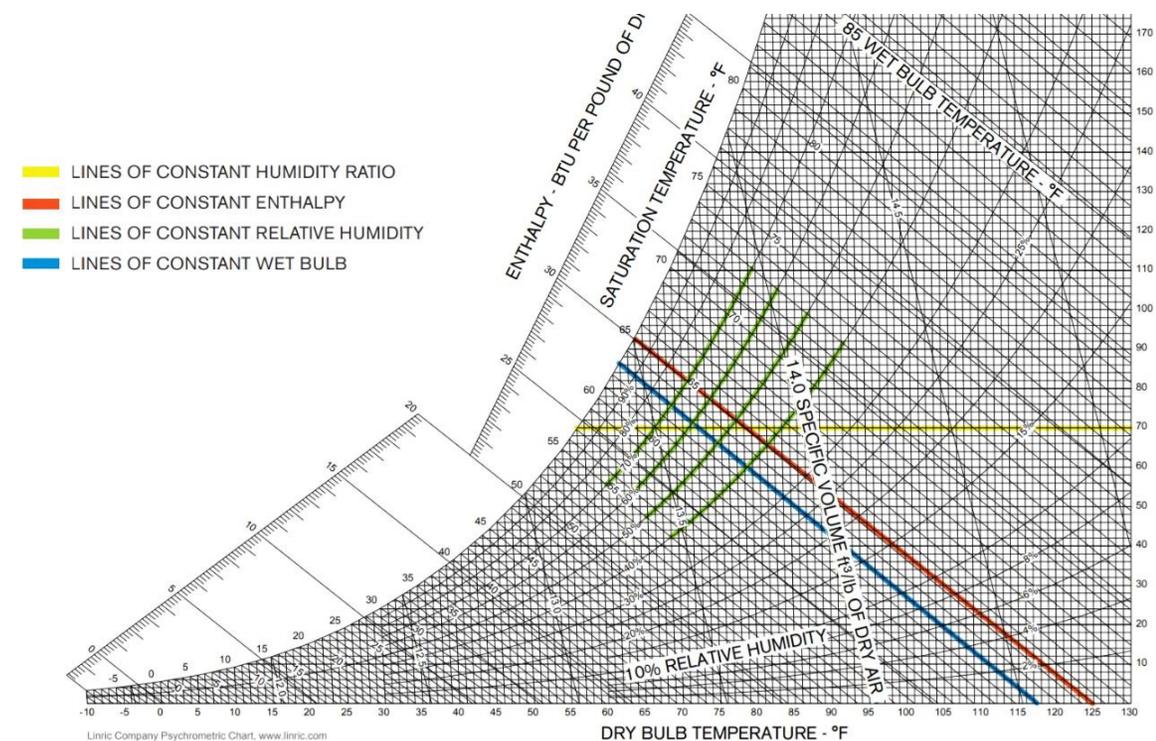
*Nota.* Durante el día se observa que la variación de humedad relativa en Sangolquí influye mínimamente en la eficiencia de la torre de enfriamiento.

Los datos obtenidos se obtuvieron a diferentes horas del día para conocer la incidencia de las condiciones ambientales en el funcionamiento de la torre.

En un sistema ideal la temperatura de bulbo húmedo se mantiene constante mientras la humedad relativa y temperatura de bulbo seco fluctúan. Como la eficiencia depende de la temperatura de bulbo húmedo, esta no cambiaría.

**Figura 65**

*Explicación de la variación de la entalpía en la carta psicrométrica*



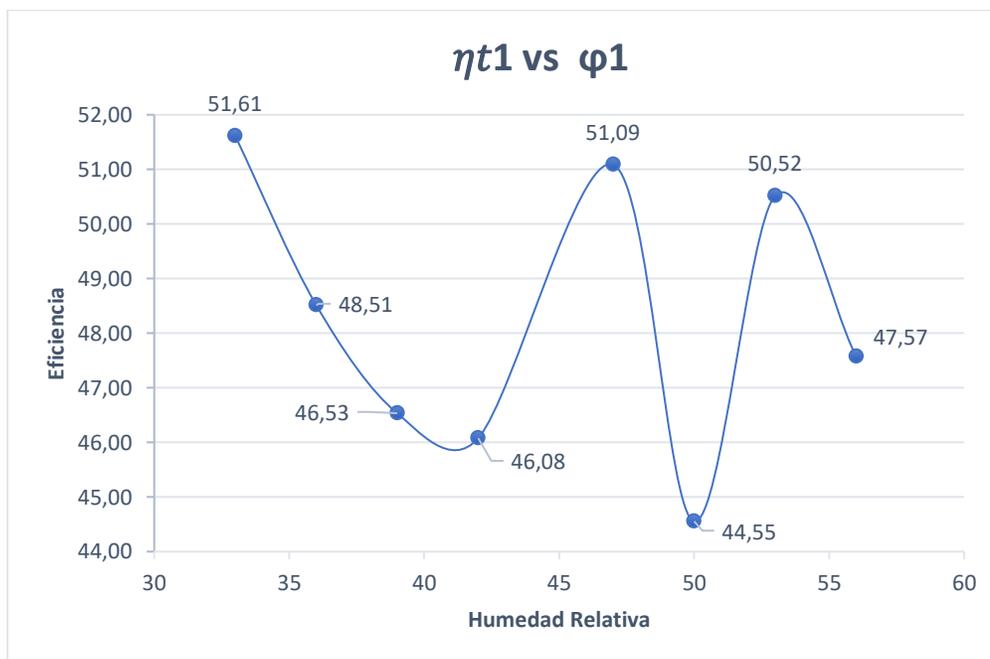
*Nota.* El grafico representa la mínima variación de entalpía que existe al mantener la temperatura de bulbo húmedo constante. Tomado de *Cooling Tower Performance vs. Relative Humidity (p.1)*, por MARLEY, 2018, SPX COOLING TECHNOLOGIES, INC.

La línea amarilla representa la variación de humedad relativa, la línea roja representa la entalpía constante, la línea verde representa las humedades relativas y la línea azul representa la temperatura de bulbo húmedo constante.

Según SPX COOLING TECHNOLOGIES, INC. (2018) a medida que la humedad relativa cambia a lo largo de línea constante de bulbo húmedo, la entalpía se mantiene casi constante. Esta relación se muestra en la Figura 65. Por lo tanto, los cambios en la humedad a lo largo de una temperatura constante de bulbo húmedo resultarán en casi ningún cambio en el rendimiento general de la torre.

Figura 66

Gráfica de la variación de eficiencia térmica con respecto a la humedad relativa



Nota. Se observa que, al variar la humedad relativa la eficiencia oscila entre 44.55% y 51.61%.

Tabla 17

Comparación del estado inicial y final de la eficiencia térmica basada en la energía transferida en la torre de enfriamiento

| Parámetros                                  | Estado inicial | Estado final | Incremento |
|---------------------------------------------|----------------|--------------|------------|
| <b>Eficiencia (Energía absorbe el aire)</b> |                |              |            |
| $\eta_{t3}$                                 | 73.76 %        | 80.01 %      | 6.25 %     |
| <b>Eficiencia (Energía cede el agua)</b>    |                |              |            |
| $\eta_{t4}$                                 | 73.33 %        | 82.03 %      | 8.70 %     |

La eficiencia térmica basada en la energía transferida es la relación que existe entre la energía transferida al agua en el condensador y la energía que cede el agua tanto como la que

absorbe el aire en la torre de enfriamiento. El incremento de 8.70 % y 6.25 % en la eficiencia se debe al mantenimiento y correctivos aplicados en los componentes del sistema generando mayor transferencia aire - agua en el estado final.

**Tabla 18**

*Comparación del estado inicial y final de la velocidad de aire de entrada y salida*

| Parámetros                                       | Estado inicial       | Estado final         | Decremento          |
|--------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| <b>Velocidad de entrada de aire</b><br>$V_{as1}$ | $10.125 \frac{m}{s}$ | $8.389 \frac{m}{s}$  | $1.736 \frac{m}{s}$ |
| <b>Velocidad de salida de aire</b><br>$V_{as2}$  | $24.101 \frac{m}{s}$ | $20.210 \frac{m}{s}$ | $3.891 \frac{m}{s}$ |

La disminución de la velocidad del aire tanto en la entrada como en la salida de la torre se debe a la colocación del separador de gotas, la función de este componente es impedir la salida excesiva de vapor de agua por arrastre del aire.

Se redujo en  $1.736 \frac{m}{s}$  la velocidad de entrada de aire por las rejillas a los costados de la torre así mismo la velocidad de salida disminuyó en  $3.891 \frac{m}{s}$ .

## Capítulo VI: Análisis económico

A continuación, se puntualiza la inversión realizada en el desarrollo del proyecto en los siguientes aspectos: costos de recuperación y puesta a punto, costos de implementación de instrumentación, costos de mano de obra y costos de insumos.

La información se detalla en las siguientes tablas:

### Costos directos

**Tabla 19**

#### *Costos de recuperación y puesta a punto*

| No. | Descripción                                    | Cantidad | Valor unitario    | Valor total     |
|-----|------------------------------------------------|----------|-------------------|-----------------|
| 1   | Resinas y pinturas para reparación superficial | 1        | \$92,79           | \$92,79         |
| 2   | Fabricación de empaquetadura                   | 1        | \$151,82          | \$151,82        |
| 3   | Reparación de motor                            | 1        | \$177,40          | \$177,40        |
| 4   | Fabricación de separador de gotas              | 1        | \$66,32           | \$66,32         |
| 5   | Restauración de tuberías                       | 1        | \$51,75           | \$51,75         |
| 6   | Reemplazo de elementos de conexión             | 1        | \$23,58           | \$23,58         |
| 7   | Fabricación de rejillas                        | 1        | \$36,92           | \$36,92         |
|     |                                                |          | <b>Subtotal 1</b> | <b>\$600,58</b> |

**Tabla 20**

#### *Costos de implementación de instrumentación*

| No. | Descripción                   | Cantidad | Valor unitario | Valor total |
|-----|-------------------------------|----------|----------------|-------------|
| 1   | Flujómetro Ultrasónico        | 1        | \$475,20       | \$475,20    |
| 2   | Anemómetro                    | 1        | \$86,40        | \$86,40     |
| 3   | Gel electro conductor (Galón) | 1        | \$13,50        | \$13,50     |
| 4   | Cable calibre 16 (c/metro)    | 24       | \$0,30         | \$7,20      |
| 5   | Caja Metálica (30cm x 40cm)   | 1        | \$25,00        | \$25,00     |
| 6   | Bocines de caucho             | 3        | \$0,50         | \$1,50      |
| 7   | Termómetro - Higrómetro       | 2        | \$4,50         | \$9,00      |
| 8   | Sonda térmica                 | 4        | \$3,50         | \$14,00     |
| 9   | Soportes                      | 2        | \$0,93         | \$1,86      |

| No. | Descripción    | Cantidad | Valor unitario    | Valor total |
|-----|----------------|----------|-------------------|-------------|
| 10  | Socket 4 polos | 4        | \$2,25            | \$9,00      |
|     |                |          | <b>Subtotal 2</b> | \$642,66    |

**Tabla 21**

*Remuneración a docente (tutor)*

| Nombre                 | Cargo | Tiempo (Horas) | Valor (Hora)      | Valor Total |
|------------------------|-------|----------------|-------------------|-------------|
| Ing. Roberto Gutiérrez | Tutor | 85             | \$20,00           | \$1.700,00  |
|                        |       |                | <b>Subtotal 3</b> | \$1.700,00  |

**Tabla 22**

*Remuneración a estudiantes responsables del proyecto*

| Nombre                       | Cargo                    | Tiempo (hora) | Valor (hora)      | Valor total |
|------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>Sr. Coloma Luis</b>       | Responsable del Proyecto | 200           | \$2,50            | \$500,00    |
| <b>Sr. Vásconez Jhonatan</b> | Responsable del Proyecto | 200           | \$2,50            | \$500,00    |
|                              |                          |               | <b>Subtotal 4</b> | \$1.000,00  |

**Costo neto**

**Tabla 23**

*Costo neto del proyecto*

| Descripción       | Valor      |
|-------------------|------------|
| <b>Subtotal 1</b> | \$600,58   |
| <b>Subtotal 2</b> | \$642,66   |
| <b>Total</b>      | \$1.243,24 |

**Costos indirectos****Tabla 24***Costos Indirectos*

| <b>Nº</b> | <b>Descripción</b> | <b>Costo Total</b> |
|-----------|--------------------|--------------------|
| <b>1</b>  | Insumos de oficina | 20                 |
| <b>2</b>  | Energía Eléctrica  | 25                 |
| <b>3</b>  | Agua Potable       | 20                 |
| <b>4</b>  | Transporte         | 280                |
| <b>5</b>  | Combustible Diésel | 50                 |
|           | <b>Subtotal 5</b>  | 395                |

**Costos Totales****Tabla 25***Costo total de proyecto*

| <b>Descripción</b> | <b>Valor</b> |
|--------------------|--------------|
| <b>Subtotal 1</b>  | \$600,58     |
| <b>Subtotal 2</b>  | \$642,66     |
| <b>Subtotal 3</b>  | \$1.700,00   |
| <b>Subtotal 4</b>  | \$1.000,00   |
| <b>Subtotal 5</b>  | \$395,00     |
| <b>Total</b>       | \$4.338,24   |

## Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

- Realizando el balance de masa se determinó que el flujo másico de reposición es  $0.0367 \frac{kg}{s}$ , este valor se corroboró mediante la medición experimental del nivel de agua del reservorio antes y después de las pruebas realizadas, dando como resultado  $0.0402 \frac{kg}{s}$ . Estos valores son importantes por que indican la cantidad de agua expulsada del sistema.
- Como resultado del balance energético en la torre de enfriamiento, la energía cedida por el agua es  $98.860 \frac{kJ}{s}$  mientras la energía absorbida por el aire es  $101.398 \frac{kJ}{s}$ . Tomando en cuenta que en un sistema ideal las dos energías se consideran iguales, la diferencia se debe a la obtención de datos experimentales.
- Debido a la intervención de la torre de enfriamiento se incrementó la eficiencia de la energía que cede el agua en 8.70 %, de igual manera aumento la eficiencia de la energía que absorbe el aire en 6.25 %. Se obtuvo estas eficiencias tomando como referencia la energía que necesita disipar la planta de vapor mediante el condensador.
- Al finalizar el mantenimiento y modificaciones en la torre de enfriamiento se prolongó la vida útil del equipo mejorando las condiciones operativas, además se facilitó la recolección de datos con el fin de realizar el balance másico y energético.
- En el entorno la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa varían a lo largo del día, lo que generó un cambio mínimo en la temperatura de bulbo húmedo y en el rendimiento de la torre de enfriamiento.

### Recomendaciones

- Con la finalidad de evitar daños en el sistema de circulación de agua y en el condensador, se debe limpiar el reservorio de agua de la torre de enfriamiento ya que se encuentra a la intemperie y esta propenso a ensuciarse con facilidad.
- Para una recolección de datos confiables es necesario ubicar correctamente los instrumentos de medición tomando en cuenta lo indicado en la Figura 53.
- Al encender la planta de vapor y el sistema de enfriamiento se debe esperar de 35 a 45 minutos para su estabilización, es decir para alcanzar el equilibrio térmico de todos los componentes.
- Antes de encender la bomba de agua se debe llenar el reservorio y purgar el sistema con el fin de eliminar el aire en las tuberías de circulación de agua.
- Una vez terminada la práctica de laboratorio se debe evacuar completamente el agua del reservorio para evitar la proliferación de microorganismos y bacterias que afecten la estructura de la torre.

## Referencias

- PINTURAS CONDOR. (s.f.). Obtenido de [https://www.academia.edu/17326717/PROCESOS\\_PINTURAS\\_CONDOR](https://www.academia.edu/17326717/PROCESOS_PINTURAS_CONDOR)
- Abro. (2020). *Cellux.co*. Obtenido de <http://cellux.co/wp-content/uploads/2019/06/3.-FICHA-TECNICA-SILICONA-11-AB-30-ROJA.pdf>
- Acuaticos. (2021). *Mercadolibre*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431539360-termometro-digital-lcd-sonda-frigorifico-congelador-\\_JM#position=29&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=efe15c95-ea6a-4bd0-9a00-31ffc1eb8dd7](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431539360-termometro-digital-lcd-sonda-frigorifico-congelador-_JM#position=29&search_layout=stack&type=item&tracking_id=efe15c95-ea6a-4bd0-9a00-31ffc1eb8dd7)
- Airtecnicos. (2020). *Airtecnicos*. Obtenido de <https://www.airtecnicos.com/es/productos/ventilador-axial-eq-dq>
- Anónimo. (s.f.). *Aula Virtual Proyecto fin de carrera Ingeniería Química*. Obtenido de <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/BMyBE.html>
- BTMETER. (2020). *Amazon*. Obtenido de [https://www.amazon.com/-/es/BTMETER-BT-846A-anem%C3%B3metro-velocidad-Temperatura/dp/B07PVM88GJ/ref=sr\\_1\\_14?\\_\\_mk\\_es\\_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=anemometer&qid=1627001253&sr=8-14](https://www.amazon.com/-/es/BTMETER-BT-846A-anem%C3%B3metro-velocidad-Temperatura/dp/B07PVM88GJ/ref=sr_1_14?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=anemometer&qid=1627001253&sr=8-14)
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. México D.F.: McGraw-Hill Education.
- Cimpa s.a.s. (2016). *Studylib.es*. Obtenido de <https://studylib.es/doc/6157303/ficha-t%C3%A9cnica-resina-poliester>
- Cobo, A., & Espinosa, D. (2020). *Evaluación energética y técnico - mecánica de la turbina de vapor coppus RL del laboratorio de conversión de energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE*. Sangolqui: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Compañía Especialista en Vapor. (s.f.). *TLV*. Obtenido de <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/flash-steam.html>
- Cuevas, R. (2017). *Academia*. Obtenido de [https://www.academia.edu/18725402/humedad\\_especifica\\_y\\_relativa\\_del\\_aire](https://www.academia.edu/18725402/humedad_especifica_y_relativa_del_aire)

- Eccentric-energy. (2018). *Eccentric-energy*. Obtenido de [https://www.eccentric-energy.com/attachments/brochure\\_ultrasonic\\_flow\\_meter.pdf](https://www.eccentric-energy.com/attachments/brochure_ultrasonic_flow_meter.pdf)
- Faires, V., & Simmang, C. (1983). *Termodinámica*. México: Hispano Americana.
- Georg Fischer. (2020). *Gfps.com*. Obtenido de <https://www.gfps.com/es-mx/products-solutions/fittings/flange-connections.html>
- Importadora Atenea. (2021). *Mercadolibre*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431887086-termohigrometro-digital-sonda-termo-higrometro-termometro-\\_JM#position=40&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=75c549e4-ea34-40e6-a5f4-f6196e2b121a](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-431887086-termohigrometro-digital-sonda-termo-higrometro-termometro-_JM#position=40&search_layout=stack&type=item&tracking_id=75c549e4-ea34-40e6-a5f4-f6196e2b121a)
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1996). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall Hispanoamérica S.A.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Idae*. Obtenido de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Torres\\_refrigeracion\\_GT4\\_07\\_05eca613.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf)
- MARLEY. (2018). *spxcooling.com*. Obtenido de <https://spxcooling.com/wp-content/uploads/TR-020.pdf>
- MASILLA PLAST MUSTANG. (s.f.). *Nivallferreteria*. Obtenido de <https://nivallferreteria.com/product/masilla-plast-mustang-litro/>
- Moby. (2021). *Moby*. Obtenido de <https://moby.com.ar/productos/bomba-centrifuga-bc-motorarg/>
- Morán, M., & Shapiro, H. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.
- Orosco, J. (2003). *Uso de la programación para dimensionar una torre de enfriamiento de agua*. Hermosillo: Universidad de Sonora. Obtenido de <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=677>
- Pintulac. (s.f.). Obtenido de <https://www.pintulac.com.ec/>

- Plastigama. (2020). *Plastigama.com*. Obtenido de [https://plastigama.com/wp-content/uploads/2018/09/Tuberi%CC%81as-y-accesorios-de-PVC-y-PE- BD-uso-agri%CC% 81cola.pdf](https://plastigama.com/wp-content/uploads/2018/09/Tuberi%CC%81as-y-accesorios-de-PVC-y-PE-BD-uso-agri%CC%81cola.pdf)
- Restrepo, J. (2011). *Diseño operacional de una torre de enfriamiento adiabático de agua de tiro mecánico inducido contracorriente a escala de laboratorio*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Reyes, A. (2011). *Evaluación Exergética de una torre de enfriamiento de una central termoeléctrica de ciclo híbrido de 550 MW*. Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de <https://1library.co/document/dzxn5loq-evaluacion-exergetica-torre-enfriamiento-central-termoelectrica-ciclo-hibrido.html>
- Rodriguez, J. (1990). *Introducción a la termodinámica*. México: Universidad Tecnológica Nacional.
- Sherwin Williams. (2016). *IMPRIMACIÓN METÁLICA UNIVERSAL*. Obtenido de <https://www.sherwin-williams.com.ec/wp-content/uploads/2018/08/tds-domino-universal-metal-primer.pdf>
- SKF. (2021). *Skf.com*. Obtenido de <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6203>
- SKF. (2021). *Skf.com*. Obtenido de <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6205>
- Villa, S. (2008). *Determinación de correlaciones para tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vite, L. (2012). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>
- Wesco. (s.f.). *Stop Anticorrosivo*. Obtenido de <https://static1.squarespace.com/static/605230986f1c9c1648f1bc0a/t/608a0fa20db9960adc7d1b7b/1619660707455/Ficha+T%C3%A9ctop+Anticorrosivo>

Wesco. (2020). *Squarespace.com*. Obtenido de

<https://static1.squarespace.com/static/605230986f1c9c1648f1bc0a/t/6088d9ff014d430c7ab26b0b/1619581439740/Ficha+Timerp%C3%A9+Poliure+Water+>

## Anexos