

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES FAVORABLES PARA EL  
INCREMENTO DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA DE UNA  
TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO A CONTRAFLUJO  
DE UN FLUIDO ELECTROLÍTICO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

AUTORES

CAROLINA VERTIZ DEL AGUILA  
GISEL MUNAYCO PANTA  
OSCAR PIERO ZEVALLOS MIRANDA

Three handwritten signatures in blue and black ink, corresponding to the authors listed.

ASESOR

Ing. POLICARPO AGATON SUERO IQUIAPAZA

A handwritten signature in black ink, corresponding to the advisor.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Ingeniería y tecnología

Callao, 2022

PERÚ





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
IX CICLO DE TESIS  
JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**ACTA N° 103 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**LIBRO 01 FOLIO N° 104 ACTA N° 103 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

A los 05 días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 10:40 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/bpv-xvfd-mxu>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO profesional de Ingeniero Químico de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

<b>Ing. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO</b>	PRESIDENTE
<b>Ing. ANGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO</b>	SECRETARIO
<b>Ing. RANGEL MORALES FABIO MANUEL</b>	VOCAL
<b>Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON</b>	ASESOR

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los bachilleres **MUNAYCO PANTA GISEL, VERTIZ DEL AGUILA CAROLINA** y **ZEVALLOS MIRANDA OSCAR PIERO** quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada “**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES FAVORABLES PARA EL INCREMENTO DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO A CONTRAFLUJO DE UN FLUIDO ELECTROLÍTICO**”, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid-19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N° 039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado de Sustentación y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por **APROBADO** con la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO** y calificación cuantitativa **DIECISÉIS (16)**, la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por concluida la sustentación a las 11:20 horas del día 05 de noviembre del año en curso.

**Ing. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO**  
**PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. ANGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO**  
**SECRETARIO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. RANGEL MORALES FABIO MANUEL**  
**VOCAL DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON**  
**ASESOR DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA

“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES FAVORABLES PARA EL INCREMENTO DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO A CONTRAFLUJO DE UN FLUIDO ELECTROLÍTICO”

Autores:

Carolina Vertiz Del Aguila / Código ORCID 0000-0002-9107-3461 /

DNI 47473218

Gisel Munayco Panta / Código ORCID 0000-0002-8960-450X /

DNI 72885469

Oscar Piero Zevallos Miranda / Código ORCID 0000-0001-9487-0370 /

DNI 47856434

Asesor:

Policarpo Agaton Suero Iquiapaza / Código ORCID 0000-0002-0172-1841 /

DNI 25634835

Lugar de ejecución: Refinería de zinc

Unidad de análisis: Torre de enfriamiento

Tipo de investigación: Aplicada / Cuantitativa

Tema OCDE: Ingeniería de Procesos

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

### **Miembros del jurado**

Ing. Carrasco Venegas, Luis Américo - Presidente

Ing. Angeles Queirolo, Carlos Ernesto - Secretario

Ing. Rangel Morales, Fabio Manuel - Vocal

Lic. Alvarado Bravo, Nestor Marcial - Suplente

Ing. Suero Iquiapaza, Policarpo Agatón - Asesor

## **DEDICATORIA**

A nuestros padres y hermanos por todo el esfuerzo, sacrificio y aliento constante para conseguir el título profesional.

A nuestros familiares y amigos por apoyarnos y motivarnos en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente a Dios, por inspirarnos y guiarnos a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestra Alma Mater, la Universidad Nacional del Callao, y a nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería Química quienes durante nuestra formación profesional nos han cultivado de valores y han compartido sus conocimientos.

A nuestro asesor Ing. Policarpo Suero Iquiapaza, por el apoyo brindando durante el desarrollo del trabajo de investigación.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	9
1.2 Formulación del problema.....	10
1.2.1 Problema general .....	10
1.2.2 Problemas específicos .....	10
1.3 Objetivos .....	10
1.3.1 Objetivo general .....	10
1.3.2 Objetivos específicos .....	10
1.4 Justificación.....	11
1.5 Delimitantes de la investigación .....	11
1.5.1 Teórico .....	11
1.5.2 Temporal .....	11
1.5.3 Espacial.....	11
II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Antecedentes .....	12
2.1.1 Antecedentes internacionales .....	12
2.1.2 Antecedentes nacionales .....	15
2.2 Bases teóricas.....	17
2.2.1 Torre de enfriamiento .....	17
2.2.2 Principio de operación.....	32
2.2.3 Parámetros de diseño .....	34
2.2.4 Problemas de operación de las torres de enfriamiento .....	37
2.2.5 Operaciones de humidificación .....	41
2.2.6 Balance de materia y energía en una torre de enfriamiento .....	43
2.2.7 Cálculo del gradiente de temperatura .....	48
2.2.8 Cálculo de la eficiencia de una torre de enfriamiento (e).....	48

2.3	Marco conceptual .....	49
2.3.1	Diseño de una torre de enfriamiento .....	49
2.3.2	Característica del fluido de enfriamiento.....	50
2.3.3	Importancia del enfriamiento del electrolito de zinc.....	50
2.3.4	Método de Poppe para torres en contraflujo.....	51
2.3.5	Factores que considerar para un adecuado enfriamiento.....	62
2.4	Definición de términos básicos.....	63
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	64
3.1	Hipótesis.....	64
3.1.1	Operacionalización de variables .....	64
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	66
4.1	Diseño metodológico.....	66
4.2	Método de investigación.....	66
4.3	Población y muestra.....	72
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado .....	72
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	73
4.6	Análisis y procesamiento de datos .....	73
4.7	Aspectos éticos en investigación .....	74
V.	RESULTADOS .....	75
5.1	Resultados descriptivos .....	75
5.2	Resultados inferenciales .....	84
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	90
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	90
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares .....	91
6.3	Responsabilidad ética .....	92
VII.	CONCLUSIONES.....	93
VIII.	RECOMENDACIONES .....	94
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	ANEXOS.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables .....	65
Tabla 2 Diseño experimental .....	69
Tabla 3 Promedio mensual de temperatura de ingreso de fluido electrolítico. ....	78
Tabla 4 Valores promedio de $K_a$ para temperaturas de ingreso típicas.....	79
Tabla 5 Resultados del modelamiento modificando altura y flujo.....	79
Tabla 6 Datos de gradiente de temperatura posterior a la variación de altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito.....	81
Tabla 7 Flujo de ingreso y altura favorable.....	84
Tabla 8 Comparación de gradientes de temperatura experimental y simulación .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Torre de enfriamiento .....	18
Figura 2 Partes de una torre de enfriamiento .....	19
Figura 3 Sistema de distribución de agua a contraflujo .....	20
Figura 4 Toberas de distribución de agua .....	21
Figura 5 Distribución del agua en el relleno.....	22
Figura 6 Relleno por salpicadura de contraflujo.....	22
Figura 7 Relleno por película de contraflujo .....	23
Figura 8 Eliminadores de rocío.....	23
Figura 9 Ventilador tipo axial de ocho aspas .....	24
Figura 10 Torre de enfriamiento de tiro natural.....	26
Figura 11 Esquema de torre atmosférica.....	26
Figura 12 Torre de contraflujo .....	27
Figura 13 Torre de flujo transversal.....	28
Figura 14 Torre de enfriamiento de tiro inducido .....	28
Figura 15 Esquema de una torre de funcionamiento de tiro forzado.....	29
Figura 16 Torre de tiro forzado .....	30
Figura 17 Relación de temperaturas para una torre de refrigeración a contraflujo.....	33
Figura 18 Diagrama psicrométrico y secuencia del aire a través de la torre. ....	34
Figura 19 Variación de la dimensión con el rango .....	35
Figura 20 Psicrómetro .....	36
Figura 21 Rango y aproximación.....	36
Figura 22 Contaminación de estanque de torre de enfriamiento.....	39
Figura 23 Humidificación por saturación no adiabática.....	42
Figura 24 Humidificación por saturación adiabática.....	43
Figura 25 Gasto de masa de un fluido en una sección transversal.....	45
Figura 26 Diagrama de torre de enfriamiento. ....	46

Figura 27 Volumen de control del empaquetamiento de una torre de refrigeración en contraflujo. ....	51
Figura 28 Volumen de control de la interfase del empaquetamiento de una te de refrigeración en contraflujo. ....	52
Figura 29 Volumen de control del empaquetamiento de una torre de refrigeración contraflujo. ....	55
Figura 30 Empaquetamiento en contraflujo dividido en 5 intervalos. ....	59
Figura 31 Gráfica de caja de flujo m <sup>3</sup> /h. ....	75
Figura 32 Gráfica de caja de gradiente de temperatura °C. ....	76
Figura 33 Gráfica de efectos principales para temperatura de salida de electrólito. ....	76
Figura 34 Gráfica de efectos principales para temperatura salida °C. ....	77
Figura 35 Gráfica de efectos principales para temperatura de salida °C. ....	77
Figura 36 Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de ingreso de electrólito. ....	85
Figura 37 Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de salida de electrólito. ....	85
Figura 38 Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de salida de electrólito. ....	86
Figura 39 Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de flujo del electrólito. ....	86
Figura 40 Gráfica de tiempo vs las variables de temperatura de ingreso y salida. ....	87
Figura 41 Superficie de temperatura de salida vs. temperatura de ingreso y Flujo electrolítico. ....	87
Figura 42 Comparación Q experimental y Q teórico. ....	88
Figura 43 Correlación de carga térmica para valores experimentales y teóricos. ....	88
Figura 44 Gráfica de interacción para temperatura de salida, según resultados de modelamiento. ....	89
Figura 45 Gráfica de efectos para temperatura de salida. ....	89

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura del fluido electrolítico en una torre de enfriamiento de una refinería de zinc. Se desarrolló en varias etapas, siendo la primera la caracterización del fluido de ingreso a la torre, seguido del registro de los valores de la temperatura del fluido al ingreso y salida de la torre y el flujo del mismo, con la finalidad de determinar el comportamiento de la transferencia de calor durante un año. Asimismo, se determinó los parámetros que influyen en el gradiente de temperatura tomando como base los registros de los meses de enero a mayo, noviembre y diciembre del año 2021; el registro del gradiente de temperatura fue menor a 6 °C, resultado desfavorable para el proceso. Por otro lado, la problemática relativa a la representación de la transferencia de calor y masa se resolvió mediante la aplicación del método de Poppe, que calcula la transferencia de calor y masa sin llevar a cabo las suposiciones críticas utilizadas por los métodos tradicionales (método de Merkel y método  $\epsilon$ -NTU). Por último, se concluye que, las mejores condiciones de operación se establecieron mediante la aplicación del método de Poppe, donde el incremento de la altura de la torre registró un mínimo de 3 metros y un flujo máximo de 300 m<sup>3</sup>/h, elevándose el gradiente de temperatura un promedio de 6.06 °C a 7.80 °C a lo largo del año.

**PALABRAS CLAVE:** Torre de enfriamiento, método Poppe, fluido electrolítico.

## **ABSTRACT**

The objective of this research was to determine the favorable conditions for the increase in the temperature gradient of the electrolytic fluid in a cooling tower of a zinc refinery. It was developed in several stages, the first being the characterization of the fluid entering the tower, followed by the recording of the temperature values of the fluid at the entrance and exit of the tower and its flow, to determine the behavior of heat transfer for one year. Likewise, the parameters that influence the temperature gradient were determined based on the records of the months of January to May, November and December of the year 2021; the record of the temperature gradient was less than 6 °C, an unfavorable result for the process. On the other hand, the problem related to the representation of heat and mass transfer was resolved by applying Poppe's method, which calculates heat and mass transfer without carrying out the critical assumptions used by traditional methods (method of Merkel and  $\epsilon$ -NTU method). Finally, it is concluded that the best operating conditions were established by applying the Poppe method, where the increase in the height of the tower registered a minimum of 3 meters and a maximum flow of 300 m<sup>3</sup>/h, raising the gradient of temperature an average of 6.06 °C to 7.80 °C throughout the year.

**KEYWORDS:** Cooling tower, Poppe method, electrolytic fluid.

## INTRODUCCIÓN

Generalmente el proceso de zinc electrolítico se basa en un sistema de sulfato que utiliza una solución de sulfato de zinc para la electrólisis, por lo que, en su trabajo explica a detalle el proceso electrolítico de la obtención de zinc, el cual se lleva a cabo en la refinería donde ejecutamos nuestra investigación e involucra las operaciones de tostación, hidrometalurgia (que comprende tres sub etapas que son flotación, lixiviación y purificación), electrodeposición y finalmente fundición del metal (1).

En la actualidad, el área de electrodeposición recibe una solución de sulfato zinc que de ahora en adelante se llamará fluido electrolítico, el cual se enfría en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo previo ingreso a las celdas electrolíticas. Por consiguiente, el objetivo principal es el descenso de temperatura del fluido electrolítico desde 41 °C hasta 34 °C con un flujo de ingreso de aproximadamente 350 m<sup>3</sup> por hora.

La capacidad del proceso de enfriamiento varía en función del clima durante los meses fríos y cálidos del año. Asimismo, se observa que en los meses fríos se logra bajar la temperatura hasta por debajo de lo establecido según, la especificación técnica (31 °C con un margen diferencial de 2 °C), mientras que en los meses cálidos se mantuvo en el límite de lo permitido (34 °C con un margen diferencial de 2 °C), poniendo en riesgo la eficiencia de la deposición de zinc.

Los estudios de la capacidad de transferencia de calor en las torres de enfriamiento son atribuidos a las dimensiones de las torres, los flujos másicos, entre otros factores, de modo que, en el presente trabajo de investigación, se planteó la modificación de algunos parámetros de diseño de la torre de enfriamiento para incrementar la capacidad de enfriamiento en los meses más cálidos.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

El efecto general de un aumento de temperatura desfavorece la deposición del zinc. Por ello, el aumento de temperatura en el área de electrólisis de una refinería de zinc es una variable que debe ser controlada, por este motivo el enfriamiento del fluido electrolítico enriquecido de sulfato de zinc que ingresará al proceso de electrodeposición incluye un sistema de circulación que involucra a tanques de almacenamiento, bombas, torres de enfriamiento y una canaleta por la cual se distribuirá el fluido a las celdas electrolíticas (1).

Ocurre que, de acuerdo con del padrón de proceso de la refinería en estudio, una transferencia de calor que garantice un gradiente de temperatura entre 5 y 7 °C del fluido electrolítico para el diseño de las torres ya existentes, favorecerá el proceso de deposición de zinc.

Por otro lado, el fluido electrolítico registra una temperatura promedio de ingreso a la torre de 41 °C y de salida de 34 °C. Este enfriamiento ocurre por medio de la transferencia de calor entre el aire del medio ambiente y el fluido electrolítico. Entonces, bajo la necesidad de usar el aire en este proceso se evidencia que este cambia en las diferentes estaciones del año, de modo que, que en invierno y otoño tenemos una buena eficiencia de la torre, por ende, una buena transferencia y un gradiente de temperatura mayor o igual a 6 °C. Sin embargo, en verano y primavera la eficiencia de la torre varía, generando una deficiente transferencia de calor y en algunas ocasiones la etapa de electrodeposición sufre alteraciones y contaminación por el desfavorecimiento de la deposición de zinc generando pérdidas de producción.

## **1.2 Formulación del problema**

### ***1.2.1 Problema general***

¿Cómo determinar las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de fluido electrolítico?

### ***1.2.2 Problemas específicos***

¿Cuáles son las condiciones de operación para el enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante todo el año?

¿Cuál es la relación favorable entre la altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito durante la transferencia de calor en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Determinar las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de fluido electrolítico.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Determinar las condiciones de operación para el enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante todo el año.

Determinar la relación favorable entre la altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito durante la transferencia de calor en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

## **1.4 Justificación**

En la presente investigación se realizó la toma de mediciones diarias durante el año 2021 en una de las torres de enfriamiento del área de electrólisis de una refinería de zinc y se observó las condiciones de operación de la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo donde se definió que el flujo, la temperatura de ingreso del fluido electrolítico y la altura de la torre, son parámetros que influyen en la eficiencia energética.

Asimismo, en la evaluación del gradiente de temperatura durante los meses cálidos (enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre del año 2021) se registraron valores menores a 6 °C.

En consecuencia, se realiza un análisis de los parámetros y condiciones de operación en la torre de enfriamiento durante un año para incrementar la gradiente de temperatura del fluido electrolítico en los meses cálidos y mejorar la calidad del proceso de deposición del zinc.

## **1.5 Delimitantes de la investigación**

### ***1.5.1 Teórico***

La presente investigación abarca el análisis de los datos de temperatura de ingreso, salida y flujo del fluido electrolítico en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo para comprender el comportamiento de la operación de transferencia de calor y posteriormente proponer modificaciones de altura de la torre y flujo del fluido electrolítico con la finalidad de mejorar la transferencia de calor utilizando el método de Poppe y herramientas de simulación.

### ***1.5.2 Temporal***

La presente investigación abarca todo el año 2021, en el cual se extrajo la data empleada.

### ***1.5.3 Espacial***

La presente investigación abarca una de las 12 torres de enfriamiento del área de enfriamiento de una refinería de zinc.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

En el trabajo de investigación “Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el área de cogeneración, ingenio Tululá”, se tuvo como objetivo realizar un análisis termodinámico acerca de la forma actual de operación de la torre de enfriamiento del área de Cogeneración, para luego dar una propuesta de mejora de la eficiencia, realizó el estudio y análisis termodinámico de las condiciones de trabajo actuales de una torre de enfriamiento utilizando el programa EPS. Asimismo, se llevó a cabo la instalación de una torre auxiliar que se conectó a la red de enfriamiento de los condensadores utilizados en el área, con la finalidad de encontrar la propuesta de mejora de la eficiencia. Se detalla las características y diseño de la torre auxiliar al igual que la propuesta de instalación. Concluyendo que, del análisis termodinámico realizado a la torre de enfriamiento W400 que actualmente trabaja, está es insuficiente para enfriar el agua que utiliza el condensador del área de Cogeneración. Por ello, la instalación de la torre auxiliar NC8305 dentro de la red de enfriamiento redujo la temperatura de vapor dentro del condensador de 130 °F a 125 °F y la temperatura del agua de 106 °F a 101 °F. De modo que, se evidenció la mejora de la eficiencia de operación de la torre de enfriamiento (2).

En la tesis “Diseño y optimización de una torre de enfriamiento de tiro inducido”, se tuvo el objetivo de comparar la data resultante con datos reales de una torre a nivel industrial para así, establecer el diseño de una torre de enfriamiento a cualquier escala y obtener las condiciones óptimas de operación, procedió a recopilar información teórica sobre transferencia de masa y energía para describir el modelo y funcionamiento de una torre de enfriamiento. Asimismo, se realizó una serie de pruebas con diferentes flujos de aire de entrada al sistema y gastos de alimentación de agua. Concluyendo que, el coeficiente de transferencia de masa no es constante, debido a que depende de las

condiciones de operación con las cuales se está trabajando. Asimismo, señaló que, el flujo de alimentación y la temperatura con parámetros que determinan la condición de operación de la torre de enfriamiento y que pueden afectar la eficiencia de la torre. Por último, concluyó que, a una relación de alimentación de agua que se encuentre entre 0.9 y 1.7 m<sup>3</sup>/h y un diferencial de temperatura grande, la eficiencia de la torre de tiro inducido será de un 35 % (3).

En el trabajo de investigación “Diseño y Construcción de un prototipo de Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido a Contraflujo”, mencionan que, con el objetivo de construir un prototipo de torre de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo, llevaron a cabo la caracterización del proceso de transferencia de calor de la torre en mención, posterior a ello, definieron las características de diseño de la torre a construir, calcularon los costos para la construcción de la torre y establecieron los datos experimentales para evaluar la eficiencia del equipo. Concluyendo que las variables que se consideraron para el diseño arrojaron una altura de 1.70 m, un área de torre 0.36 m<sup>2</sup>, una altura de relleno 0.15 m, un rango de temperatura de calentamiento de 33 °C y de enfriamiento entre 26 °C y 23 °C a través de un intercambiador. Asimismo, se estableció una inversión de \$ 1.735,00 para el diseño y construcción de esta. Por último, determinaron que el prototipo de diseño y construcción de la torre tiene una aplicación en los procesos de producción y mejora la eficiencia (4).

En la tesis “Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de agua por evaporación de tiro inducido”, señalan que, con el objetivo de reutilizar el agua que se consume y aprovechar la energía que se libera durante el proceso de enfriamiento de la misma para el laboratorio de Química Industrial de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, procedieron a diseñar y construir una torre de enfriamiento de tiro inducido, cuyo dimensionamiento consideró cálculos de ingeniería a partir del tratamiento de datos experimentales y variables de proceso obtenidos en los ensayos que se llevaron a cabo en el equipo de enfriamiento existente. Posterior a ello, se realizó la validación de la torre construida, la cual tuvo una

altura de 1.4 m, un volumen de 0.16 m<sup>3</sup> y un depósito de agua con capacidad máxima de 25 L. Concluyendo que, se enfrió agua a una temperatura promedio de 15 °C en un tiempo de 5 min, con una eficiencia del 95 % de modo que, con ello se afirmó el objetivo planteado (5).

En el trabajo de investigación "Process equipment and plant design" mencionan que, con el fin de dar a conocer la importancia de considerar el diseño de una torre de enfriamiento que permita la refrigeración del agua circulante cuando entre en contacto con el aire, describieron los parámetros de diseño, las características, las definiciones y los cálculos de diseño térmico que se rigen en una torre de enfriamiento. Concluyendo que, al considerar los puntos previamente mencionados para el diseño de las torres de enfriamiento se construyen torres con sistemas de enfriamiento circulante, de modo que, desplazan a las torres convencionales de un solo paso. Asimismo, demostró que, este tipo de torres son más beneficiosas para las empresas, visto desde un enfoque económico (6).

En la tesis "Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de tiro forzado para la industria Plastic Metal" se obtuvo el objetivo de diseñar y construir una torre de refrigeración de tiro forzado para la industria Plastic Metal y lograr reducir los tiempos muertos en el proceso de producción, procedió a recopilar datos experimentales y estableció los cálculos matemáticos que permitieron obtener el óptimo funcionamiento, la eficiencia en el diseño y la construcción de la misma. Concluyendo que, al tomar las temperaturas más extremas de trabajo de las inyectoras (45 °C) se estableció que la gradiente de temperatura de enfriamiento del relleno de la torre y del tanque de almacenamiento de agua fue 5 °C y generó un enfriamiento total de 10 °C que determinó el buen funcionamiento del equipo y el retiro de tanques de 600 a 1000 litros que se utilizaban para almacenar el agua de enfriamiento de equipos (7).

En la tesis "Desarrollo de una metodología para el mejoramiento del diseño del aspersor de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo" mencionan

que, con el objetivo de desarrollar una metodología para la mejora del aspersor de la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo, procede a realizar un estudio para estimar el tamaño de gotas de agua generadas por el aspersor de la torre, además de, analizar la dinámica de fluido de las gotas y por último, modelar con ayuda del software CAD y CFD. Concluyendo que, para analizar el diámetro de las gotas de agua se utilizó el software CFD Phoenics en donde se encontró que, para obtener una gradiente de temperatura de 10 °C, el cual es un valor nominal en las torres de enfriamiento, se recomienda utilizar un tamaño de gota de 3 mm y una velocidad de 1.5 m/s, de modo que, se logró mejorar y reducir la pérdida de agua por evaporación y arrastre (8).

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

En la tesis "Rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro forzado en contracorriente", mencionan que, se tuvo el objetivo de evaluar el rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contracorriente, realizaron pruebas experimentales en una torre de tiro inducido a contracorriente con dimensiones de 20 cm x 20 cm x 100 cm en donde trabajaron a diferentes temperaturas y caudales de ingreso de agua a las condiciones ambientales en la provincia de Huancayo. Asimismo, analizaron el desempeño de la torre mediante indicadores de desempeño tales como la eficiencia, el rango, el NTU a 30 °C, 40 °C y 50 °C y las relaciones líquido/gas 0.4807, 0.3356 y 0.1303, respectivamente. Concluyendo que, los indicadores de desempeño mencionados disminuyeron conforme la relación líquido gas se incrementó. Caso contrario, con respecto al rango y la eficiencia de la torre de enfriamiento, los cuales evidenciaron un incremento conforme aumentó la temperatura (9).

En la tesis "Diseño e implementación de una torre de enfriamiento con un relleno alternativo identificando las correlaciones de la tasa global de transferencia de calor y caída de presión" señala que, con el objetivo de demostrar como la variación en el flujo másico del agua por unidad de área genera un cambio en la tasa global de transferencia de masa a través de un

“relleno alternativo” del prototipo de torre de enfriamiento mediante la prueba t-student se muestra que el valor-p del coeficiente de masa de agua es 0,00. Concluyendo que existe evidencia estadística suficiente para inferir que el ‘flujo másico de agua por unidad de área’ genera cambios en la ‘tasa global de transferencia de masa’. Se demostró que a medida que se varió el flujo de agua por unidad de área en rangos de 0.70 hasta 1.33 kg/s.m<sup>2</sup> y el ‘flujo de aire por unidad de área’ en rangos de 0.11 hasta 2.10 kg/s.m<sup>2</sup> se generó un cambio en la ‘tasa global de transferencia de masa’ de 0.103 a 0.913 kg/s.m<sup>3</sup> y utilizando el modelo matemático de Cobb-Douglas (10).

En la tesis “Modelamiento y Simulación de una columna de enfriamiento de tiro forzado, contrastada con curvas experimentales a nivel piloto”, mencionan que, con el objetivo de modelar y simular una torre de enfriamiento y contrastar los resultados con curvas experimentales, proceden a realizar el modelamiento en base al análisis de Jader y Milosavlevic en conjunto. En la experimentación trabajaron con una columna de enfriamiento de 1 m de altura con área transversal de  $3.96 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  y con una razón de flujo de agua y aire igual a 4.94. Los datos experimentales sirvieron para determinar parámetros tales como los coeficientes globales de transferencia y las condiciones iniciales utilizadas en la simulación donde se implementó el lenguaje de programación Matlab 7.6, con la herramienta ODE 45 para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales. Los resultados indican el perfil de temperatura del agua en un punto cualquiera de la columna. Validando experimentalmente el modelo matemático, utilizando medidas de desviación como MEF (eficiencia de modelado), CD (Coeficiente de determinación del modelo) y C (Coeficiente del error) (11).

En el trabajo de investigación “Calidad de los efluentes líquidos, en el proceso de optimización de las torres de enfriamiento de la refinera de zinc, periodo 2013 - 2014” señalan que, con el objetivo de optimizar los sistemas de refrigeración de las torres de enfriamiento N°1 y N°2 y mejorar la calidad de los efluentes líquidos procede, en primera instancia con el acondicionamiento de

líneas con la derivación hacia la planta Ph9, con el propósito de reducir el contenido de zinc y sólidos en suspensión y lograr un nivel de eficiencia. Posterior a ello, realizó el estudio y aplicación de modernas tecnologías en los sistemas de refrigeración y, por último, mejoró el tratamiento químico de las torres de enfriamiento mediante la aplicación de inhibidores. Concluyendo que, con la aplicación de nuevas tecnologías limpias y sostenibles se logró mejorar la calidad del efluente líquido y reducir el uso de agua en un 50.86 %, además de, reportarse una disminución de los ciclos de concentración de 2.37 a 3.03 C.C. Asimismo, se logró disminuir el contenido de zinc a la salida de la torre de 2.52 mg/L a 2.36 mg/L, registrando una reducción de 6.35 % (12).

## **2.2 Bases teóricas**

### ***2.2.1 Torre de enfriamiento***

Se da a conocer a una torre de enfriamiento como una unidad capaz de enfriar agua. También es denominada columna de refrigeración o columna de enfriamiento. Debido a que el agua es el líquido más empleado en las diversas operaciones de enfriamiento como la condensación de vapores, disminución de temperatura de los líquidos que se encuentran a elevadas temperaturas dentro de tanques de almacenamiento, enfriamiento de reactores, disminución de temperatura de los líquidos que circulan por tuberías, entre otros, es de suma importancia poder ser reutilizada con el fin de aprovechar este recurso. Por consiguiente, para su reutilización es vital que pueda generarse la disminución de temperatura, la cual se lleva a cabo en una torre de enfriamiento (9).

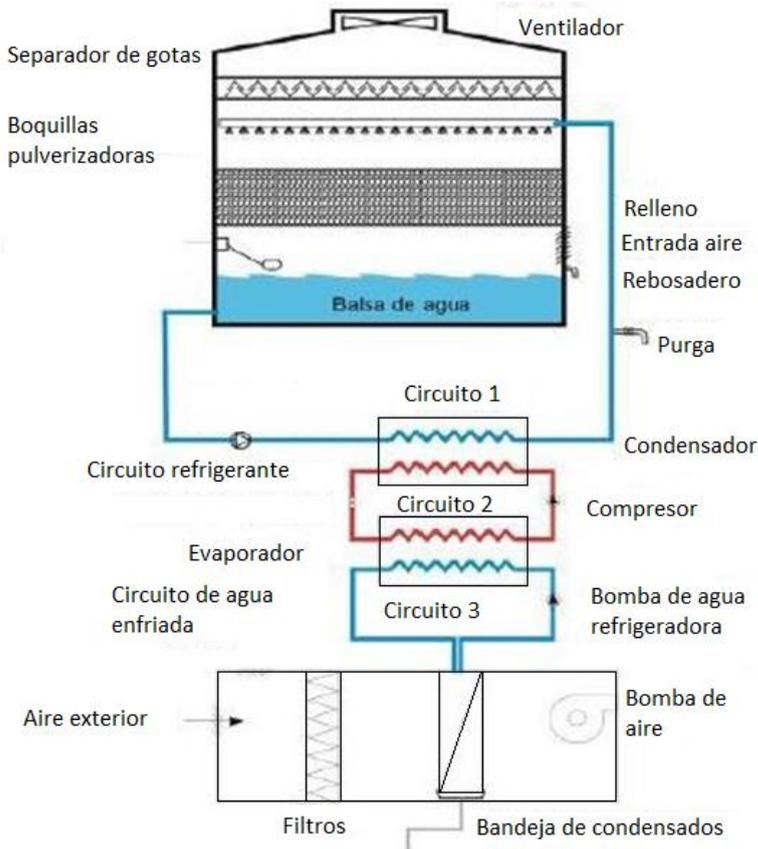
Asimismo, las torres de enfriamiento son consideradas equipos térmicos que, por medio del proceso de evaporación parcial del agua, logran disminuir la temperatura del agua. Asimismo, se define a las torres de enfriamiento como dispositivos semiabiertos que mediante la evaporación en contacto con el aire y el ambiente se logra enfriar el agua (10).

Cabe precisar que estos equipos, como se observa en la figura 1, son columnas de diámetros muy grandes que poseen en algunos casos empaques

los cuales brindan un mejor contacto gas-liquido con una caída de presión baja (9).

### Figura 1

#### Torre de enfriamiento



Fuente: López (2019).

Por otro lado, las torres de enfriamiento son consideradas como equipos mecánicos cuya finalidad es disminuir la temperatura de volúmenes de agua en procesos donde se libera calor y energía (10).

Las condiciones climáticas para la operación, como la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco y altura sobre el nivel del mar son primordiales para poder determinar la cantidad de calor extraído y con ello poder disminuir la temperatura del agua (10).

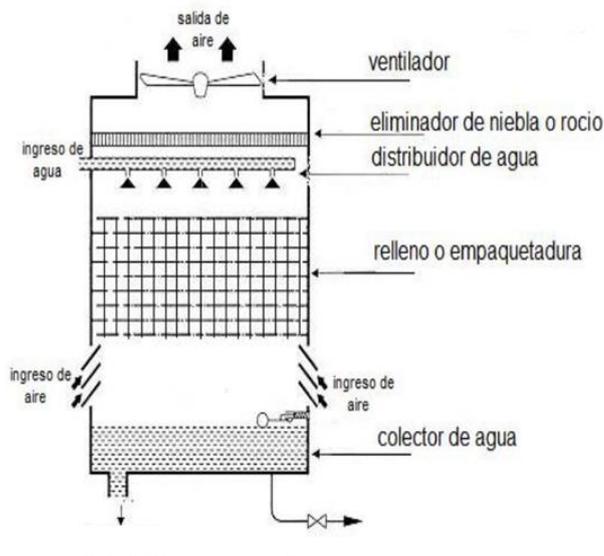
Estos equipos son utilizados dentro de los procesos de refrigeración o en algunos

sistemas de climatización para la producción de frío en diversas edificaciones como hospitales, hoteles o bancos. Además de, industrias que requieren acoplar un sistema de enfriamiento para sus equipos, claro ejemplo de ello, son las centrales termoeléctricas, en donde a través de la instalación de una torre de enfriamiento se disipa el calor residual y se aprovecha el frío generado para ser utilizado en un edificio (10).

**Partes de una torre de enfriamiento.** Las torres de enfriamientos como se observa en la figura 2 se componen de un sistema de distribución de agua, empaquetaduras o relleno, ventiladores, eliminadores de rocío y un colector de agua. Además de, elementos auxiliares encargados de la medición y control de la torre (9).

**Figura 2**

*Partes de una torre de enfriamiento*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

**Sistema de distribución de agua.** Tiene la función de distribuir agua desde la parte superior de la torre de enfriamiento hacia toda el área de sección transversal del relleno. En este sistema, la corriente de agua caliente es atomizada con el objetivo de poder incrementar el área de contacto con el aire (9).

Asimismo, la eficiencia de la torre de enfriamiento se asocia directamente con el diseño del sistema de distribución de agua en la torre de enfriamiento, según la figura 3 (9).

### **Figura 3**

*Sistema de distribución de agua a contraflujo*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

Cabe resaltar que, las torres de enfriamiento de flujo cruzado hacen uso de rellenos o empaquetaduras para que la distribución del agua se lleve a cabo por gravedad, mientras que las torres de enfriamiento con tipo de flujo a contracorriente hacen uso de un sistema de distribución por spray para cubrir todo el relleno. Asimismo, las toberas (ver figura 4, p. 21) son utilizadas como atomizadores en los sistemas de distribución (9).

#### Figura 4

*Toberas de distribución de agua*

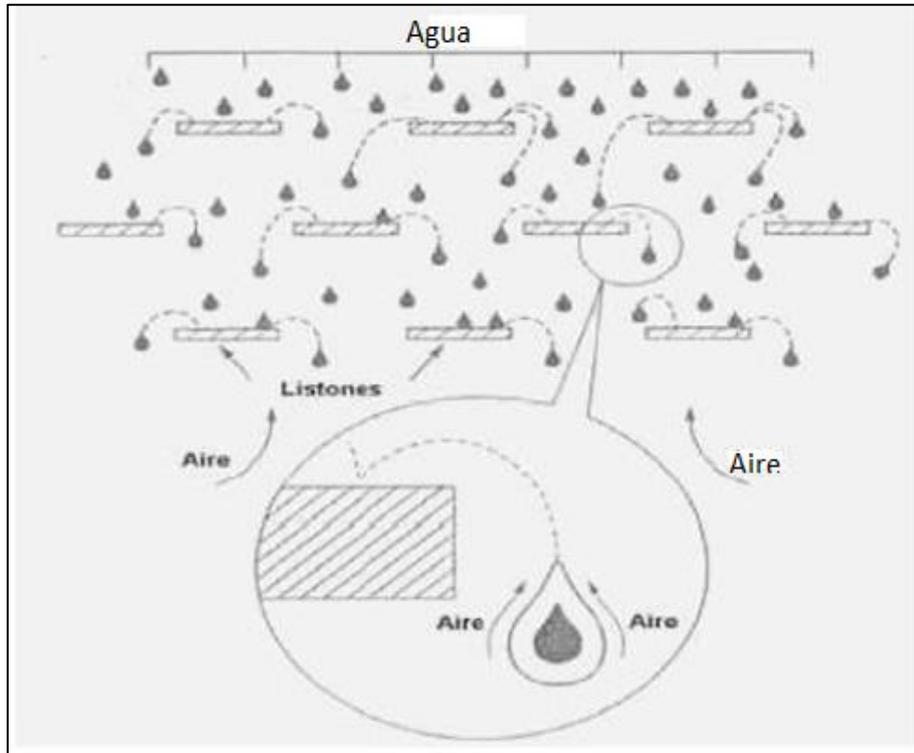


Fuente: Celestino y Fernández (2017).

***Empaquetaduras.*** Estas también son conocidas como relleno, donde el rol principal que cumplen es el de distribuir el agua de manera uniforme y generar un desplazamiento sinuoso, como se observa en la figura 5 (p. 22), el cual pueda propiciar la formación de una película de superficie o reducir el tamaño de las gotas de agua. Por ello, se puede concluir que la función que cumplen las empaquetaduras es la generación de una mayor área de contacto entre el fluido gaseoso y el fluido líquido (agua), asimismo, propiciar poca pérdida de presión del aire. Los rellenos varían desde sólidos como piedras, botellas rotas, trozos de porcelana, hasta formas geométricas complejas con elevados costos. Existen dos tipos de relleno, donde los que son utilizados para el tipo de flujo de tipo cruzado son conocidos como de salpicadura como se ve en la figura 6 (p. 22) y los que son utilizados para el tipo de flujo en contracorriente son conocidos como de película según figura 7 (p. 23) (9).

**Figura 5**

*Distribución del agua en el relleno*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

**Figura 6**

*Relleno por salpicadura de contraflujo*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

## Figura 7

*Relleno por película de contraflujo*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

Cabe resaltar que, cuando el agua se distribuye en todo el relleno como una delgada película, el tipo de relleno que se está utilizando es de película, caso contrario, si el agua que desciende por el relleno salpica y se divide en otras, el tipo de relleno que se utiliza es de salpicadura (9).

***Eliminador de rocío.*** También son conocidos como eliminadores de niebla. Esta parte de la torre de enfriamiento, como se observa en la figura 8, evita que se pierda agua por la parte superior de la torre de enfriamiento, debido al arrastre del aire (9).

## Figura 8

*Eliminadores de rocío*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

**Ventilador.** Como se observa en la figura 9, es el elemento encargado de mantener de manera constante el flujo de aire dentro de la torre de enfriamiento. Con respecto a las torres de enfriamiento de tiro forzado, la posición del ventilador está ubicado en la parte inferior de la torre, caso contrario con respecto a las torres de enfriamiento de tipo inducido donde con frecuencia el ventilador es colocado en la parte superior de la torre (13).

### Figura 9

*Ventilador tipo axial de ocho aspas*



Fuente: Urrutia (2014).

Asimismo, la función principal del ventilador es capturar el aire del medio y posterior a ello, impulsarlo hacia el interior de la torre (9).

**Colector de agua.** Consiste en un recipiente el cual recepciona el agua fría, para luego ser distribuida a los equipos que se requieran, a través del uso de una bomba de agua. Con el fin de que la bomba a utilizar no absorba aire y se pueda realizar su limpieza y mantenimiento con facilidad, es necesario conocer los detalles geométricos y los accesorios que deberán instalarse (9).

**Medidor de caudal.** Tiene como función medir la cantidad de caudal

que ingresa y sale de la torre de enfriamiento en un intervalo de tiempo transcurrido (14).

**Sensores de temperatura.** Son los encargados de medir la temperatura de ingreso y salida del fluido, además, con ellos se verifica el modelo de transición con las gradientes de temperatura de manera que transcurre el tiempo (13).

**Clasificación de las torres de enfriamiento.** Según el flujo de aire podemos tener torres de enfriamiento a contraflujo y flujo cruzado. También según el tiro, existen los de tiro natural, tiro forzado y tiro inducido. En la identificación de un tipo de torre, se adoptan las designaciones de acuerdo con el flujo y también de acuerdo con el tiro (9).

Otra manera de clasificar las torres de enfriamiento es en dos grandes grupos: Torres de enfriamiento de tiro natural y torres de enfriamiento con ventilación mecánica. Esto dependerá de las dimensiones y estructuras según la carga térmica a disipar, el fabricante, los materiales, etc. (10).

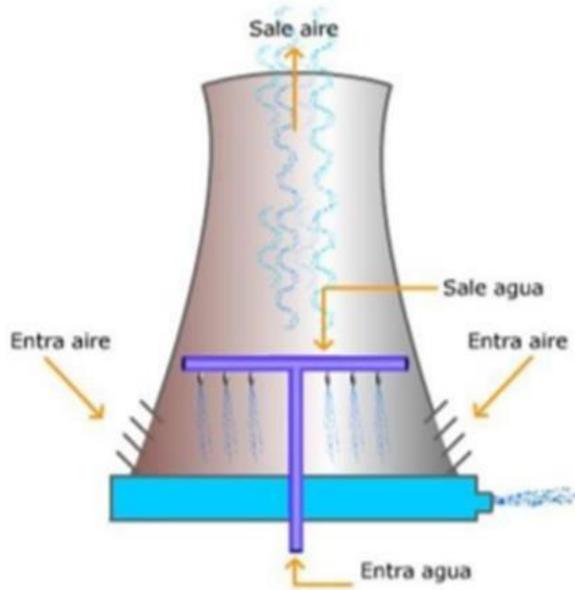
**Torres de enfriamiento de circulación natural.** El flujo del aire se obtiene por diferencia de densidades, entre el aire húmedo del interior de la torre y el más frío del exterior. Para conseguir el tiro deseado se usan chimeneas de gran altura (ver figura 10, p. 26). Este tipo de torres es muy empleado en las centrales térmicas con grandes caudales de agua, mayores a  $13 \text{ m}^3/\text{h}$  (14).

La torre atmosférica como se observa en la figura 11 (p. 26) es de circulación natural, aprovecha las corrientes atmosféricas de aire que penetran a través de los rompe vientos, cambiando la dirección con la estación del año y las condiciones atmosféricas. Esta puede ser la más económica y los costos de energía pueden ser altos. Puesto que las corrientes atmosféricas penetran a

todo el ancho de la torre, esta se hace muy angosta en comparación con otros tipos, y deben ser muy largas para una capacidad igual (9).

**Figura 10**

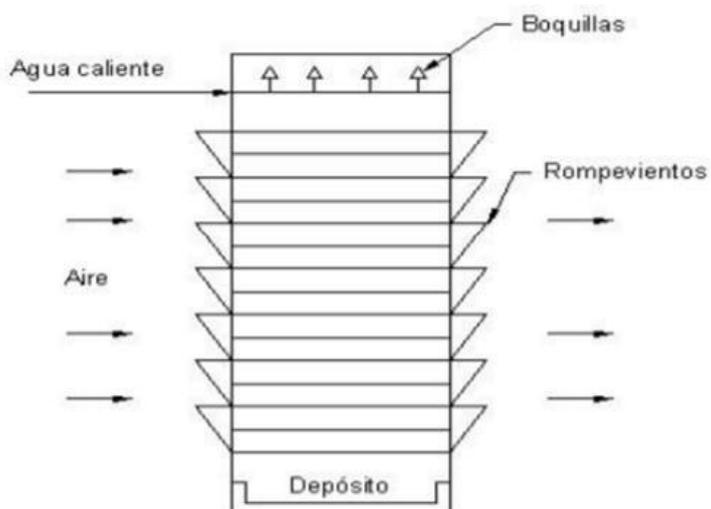
*Torre de enfriamiento de tiro natural*



Fuente: Bustos (2018).

**Figura 11**

*Esquema de torre atmosférica*



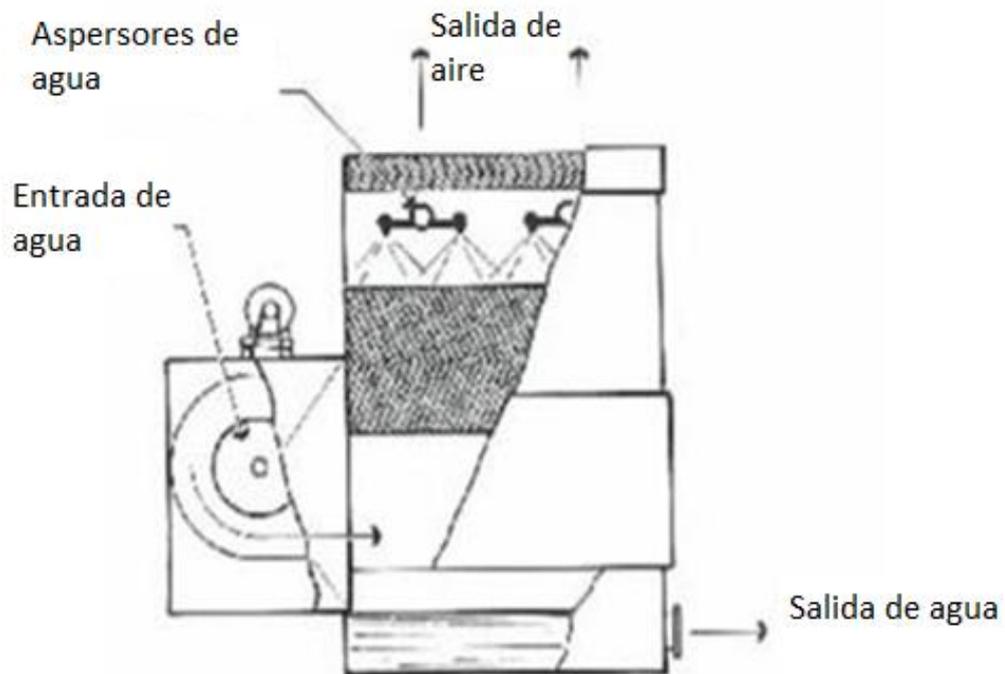
Fuente: Celestino y Fernández (2017).

A continuación, se describirá los dos tipos de torre:

**Torres de tiro inducido.** Empleada con mayor frecuencia en Estados Unidos. Esta clase de torre se subdivide en diseños de contraflujo “contracorriente” (ver figura 12) o flujo transversal “cruzado” (ver figura 13, p. 28), dependiendo de las direcciones relativas de flujo del agua y el aire. Desde el punto de vista termodinámico, la disposición a contraflujo es más eficaz, ya que el aire más frío entra en contacto con el agua más fría, obteniendo de esta manera un potencial máximo de entalpía. La desventaja del tipo de torre a contraflujo es cuando mayores son los intervalos de enfriamiento (15).

**Figura 12**

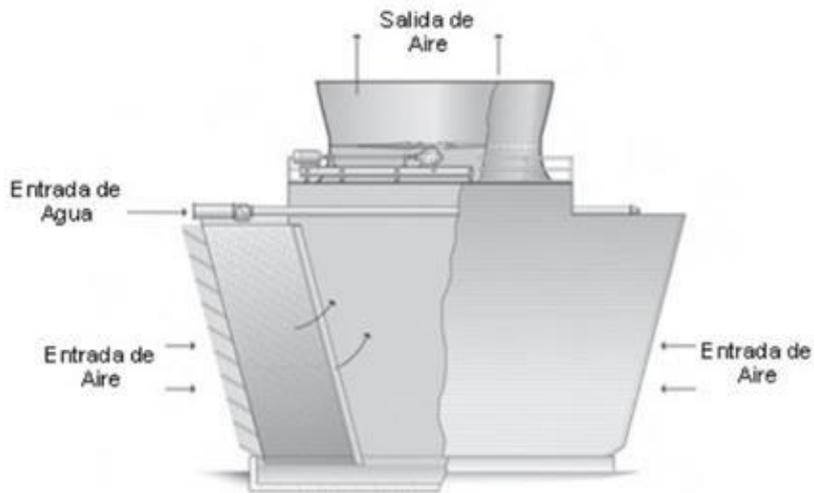
*Torre de contraflujo*



Fuente: Gonzáles (2013).

**Figura 13**

*Torre de flujo transversal*

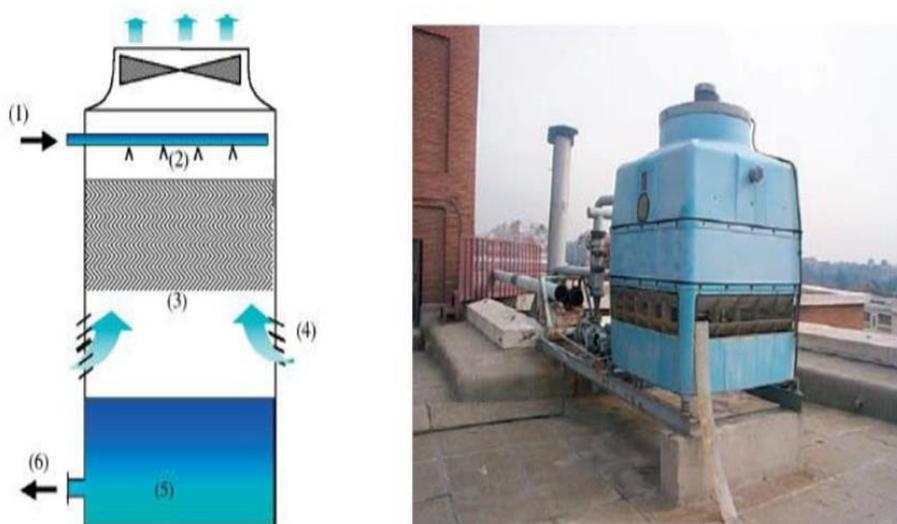


Fuente: Gonzáles (2013).

Como se observa en la figura 14, las torres de enfriamiento de tiro inducido trabajan en depresión, en otras palabras, el ventilador se ubica en la parte superior de la torre y extrae aire del interior, la misma que recircula por medio de orificios ubicados en la parte inferior (10).

**Figura 14**

*Torre de enfriamiento de tiro inducido*



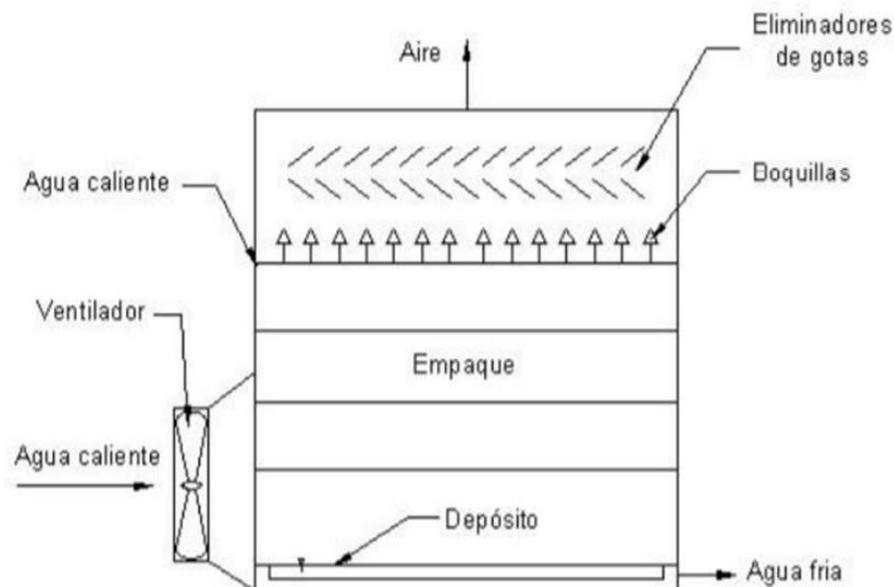
Fuente: López (2019).

Asimismo, el agua de retorno procedente del punto de uso (punto 1) es pulverizada por la parte superior de la torre (punto 2) pasando a través del relleno (punto 3), cuya misión es incrementar el tiempo de retención y por tanto el contacto con el aire ascendente (punto 4) cuya zona de entrada es a través de las aperturas laterales. En el relleno se produce el enfriamiento, quedando el agua refrigerada en la balsa de la torre (punto 5) que se impulsa (punto 6) por medio de equipos de bombeo para reiniciar el ciclo de intercambio de calor en el punto de uso (10).

**Torres de tiro forzado.** El ventilador se encuentra ubicado en la parte inferior como se observa en la figura 15, el aire tiende a ser expulsado por la parte superior. Asimismo, el aire en movimiento es aire frío de mayor densidad, en contraste con la torre de tiro inducido. De modo que, significa que el equipo mecánico tendrá una mayor duración que la de tiro inducido, debido a que el ventilador trabaja con aire frío, no saturado y menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida (9).

**Figura 15**

*Esquema de una torre de funcionamiento de tiro forzado*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

Se observa en la figura 16 un ejemplo real de una torre de tiro forzado.

### **Figura 16**

*Torre de tiro forzado*



Fuente: Gonzáles (2013).

Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, lugar muy adecuado para la inspección, el mantenimiento y la reparación de estos. Además, como el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está ubicado en condiciones corrosivas; sin embargo, dada la escasa velocidad del aire de salida, la torre de tiro forzado está propensa a una excesiva recirculación de vapores húmedos de salida que retornan a las entradas de aire. Debido a que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circundante, existe un decrecimiento en el buen rendimiento, manifestado con un incremento en la temperatura de agua fría saliente (8).

**Importancia de las torres de enfriamiento.** Es de conocimiento que muchas empresas utilizan el agua como un recurso importante dentro de

sus procesos, este consumo de agua varía de acuerdo con el estado del elemento, debido a que puede ser líquido o vapor. Las empresas tienden a utilizar el agua para procesos de calefacción o enfriamiento y luego desechan el agua lo cual genera una pérdida de energía y materia (4).

Por consiguiente, actualmente ante lo señalado, se han diseñado numerosos sistemas de recuperación de agua y energía, estos sistemas son llamados columnas o torres de enfriamiento las cuales permiten en acondicionamiento del agua, además de poner en contacto el agua con el aire por circulación de manera que se favorece el fenómeno de transporte de materia y energía. (4).

Cabe resaltar, la importancia de adquirir en primera instancia equipos de costo inicial y operación bajos para ser utilizados cuando se manejen grandes cantidades de agua y aire para el enfriamiento del agua. Otro factor importante para el diseño y operación de plantas químicas es determinar la temperatura del agua del proceso, de modo que así, se determina las condiciones de operación de equipos como condensadores para procesos de destilación y evaporación. (4).

**Factores que intervienen en el proceso de enfriamiento.** El estudio de estos factores es relevante debido a que influyen en la capacidad de enfriar fluidos que ingresan a una torre. Estos son:

**Carga térmica.** Este factor es determinado de acuerdo con el proceso que se llevará a cabo. El nivel o grado de temperatura de funcionamiento para el proceso, es monitoreado y controlado según el grado de refrigeración que se desea alcanzar. Cabe resaltar que una temperatura baja de operación propicia la aceleración del proceso. Con respecto a la eficiencia para mejorar la calidad o cantidad del producto, se evalúa el tamaño y el costo de refrigeración. Estos parámetros determinarán de forma proporcional la carga de calor (11).

**Temperatura de bulbo húmedo.** Es considerado como un factor que ayuda a controlar la temperatura mínima de agua fría que puede alcanzar el agua cuando es sometido a un proceso de evaporación. Por consiguiente, los niveles de temperatura de funcionamiento en el proceso son determinados por la temperatura de bulbo húmedo de aire que tiende a ingresar a la torre de enfriamiento. Se puede concluir que, la temperatura de bulbo húmedo registrada puede definir el tipo de torre de enfriamiento a utilizar, en otras palabras, la temperatura de bulbo húmedo y la torre requerida se relacionan de manera inversamente proporcional (11).

**Rango, flujo y carga térmica.** Se puede decir que el rango es una función que se relaciona entre la cantidad de agua que puede circular por la torre de enfriamiento y la carga de calor. Por consiguiente, si se incrementa la carga de calor añadido este requerirá un aumento en el tamaño de la torre de enfriamiento por lo tanto el rango aumentará. Caso contrario sucede cuando la temperatura del agua no cambia y el rango se incrementa con más cantidad de agua caliente, esto genera que la fuerza motriz entre la temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa a la torre de enfriamiento, además, se incrementa la temperatura del agua caliente y el calor tiende a ser de alto nivel, resultando más económico el poder disipar el calor (11).

**Efectos de relleno en los medios.** Los medios de relleno o empaque en una torre de enfriamiento son los encargados de generar un mejor contacto durante el intercambio de calor entre el aire y el agua. Además, estos permiten mejorar el tiempo de intercambio de calor y la turbulencia en el agua (11).

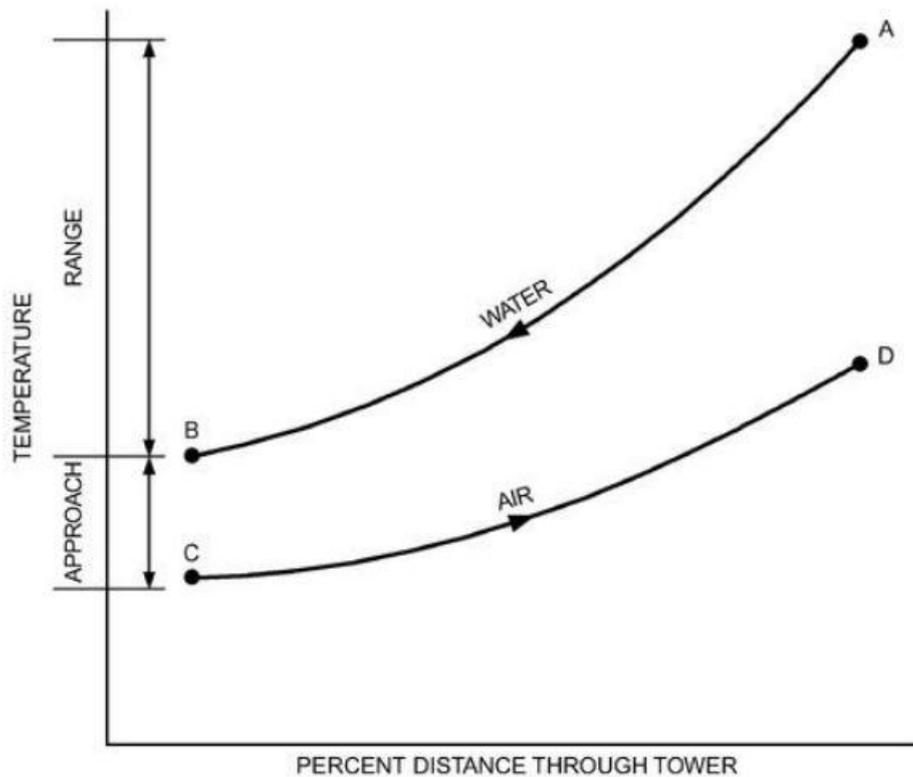
### **2.2.2 Principio de operación**

Según Del Olmo (16). en la figura 17 (p. 33) se observa la relación de temperaturas del aire y del agua a través del empaquetamiento para el caso de

una torre en contraflujo. La temperatura del agua desciende desde A hasta B, mientras que la temperatura de bulbo húmedo del aire aumenta desde C hasta D.

**Figura 17**

*Relación de temperaturas para una torre de refrigeración a contraflujo*



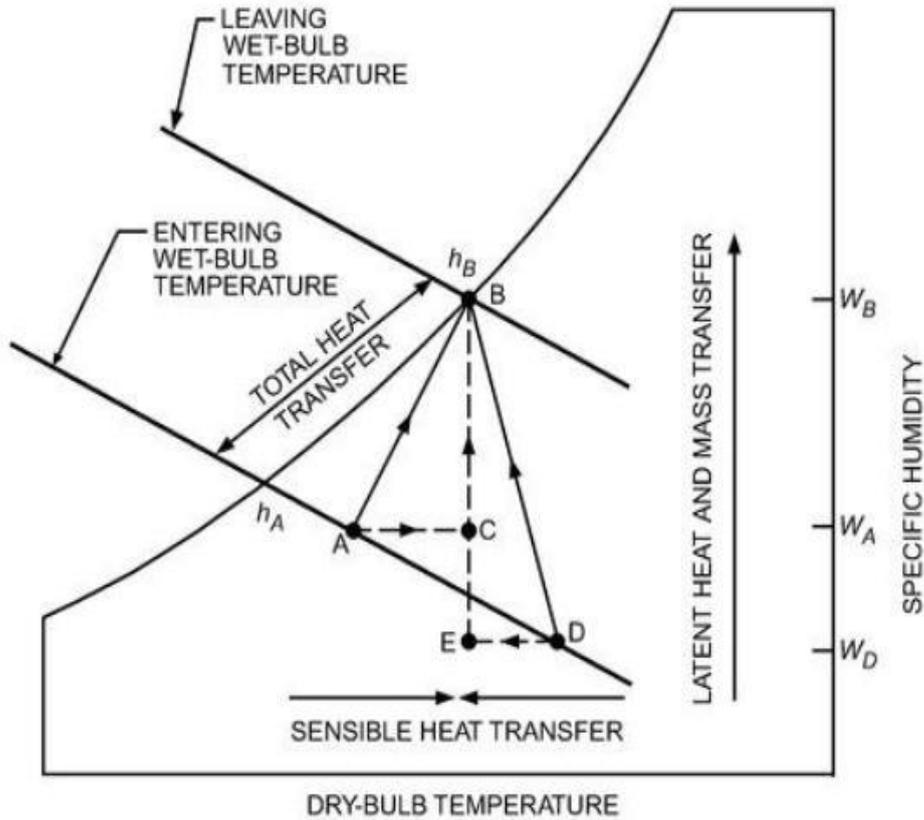
Fuente: Del Olmo (2013).

En el diagrama psicrométrico de la figura 18 (p. 34) podemos observar el principio de operación de una torre húmeda. El aire entra en condiciones ambiente en el punto A, absorbe energía y masa del agua, saliendo saturado del empaquetamiento en el punto B (16).

De modo que, el calentamiento del aire puede dividirse en dos etapas, desde A hasta C representando el calentamiento sensible y desde C a B, el calentamiento latente (16).

**Figura 18**

*Diagrama psicrométrico y secuencia del aire a través de la torre.*



Fuente: Del Olmo (2013).

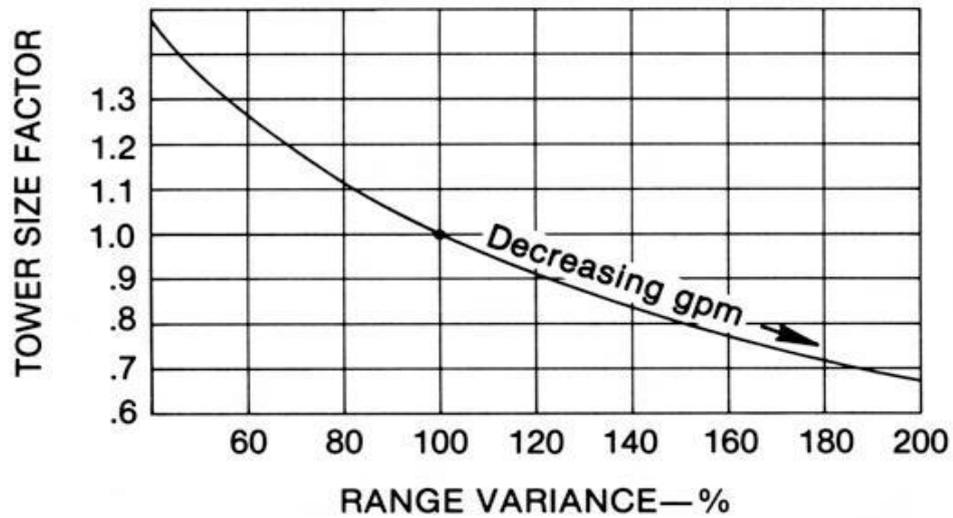
### **2.2.3 Parámetros de diseño**

Los parámetros más importantes a la hora de caracterizar y diseñar la torre son el rango, la carga térmica, la temperatura de bulbo húmedo y la aproximación (16):

**Rango.** Diferencia de temperatura entre la entrada y salida del agua. La dimensión de la torre varía inversamente con el rango (ver figura 19, p. 35). Para una determinada carga térmica, aumentar el rango reduce el caudal de agua de circulación, por lo que es necesaria menor superficie de transferencia de calor, y, por tanto, menor tamaño de la torre (16).

**Figura 19**

*Variación de la dimensión con el rango*



Fuente: Del Olmo (2013).

**Carga térmica.** Se define como la cantidad de calor que la torre tiene que refrigerar, la dimensión y coste son valores proporcionales a este parámetro. La carga térmica se define de la siguiente manera:

$$Q = \dot{m}_w \cdot C_{p_w} \cdot \Delta T_w \quad (1)$$

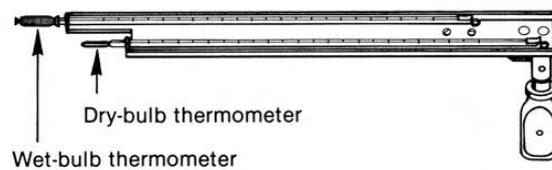
Donde Q es la carga térmica,  $\dot{m}_w$  es el caudal de agua (kg/s),  $C_{p_w}$  es el calor específico del agua (J/kg°C o J/kgK) y  $\Delta T_w$  es el rango (°C o K).  
(16)

**Temperatura de bulbo húmedo ( $T_{wb}$ ).** Es la temperatura del aire medida con un termómetro de bulbo húmedo, como se observa en la figura 20 (p. 36), es un termómetro de mercurio que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua. Al proporcionarle una corriente de aire, el agua se evapora más o menos rápidamente, dependiendo de la humedad relativa del ambiente, enfriándose más cuanto menor sea ésta, debido al calor latente de evaporación del agua. Se emplea para calcular la humedad relativa del aire y la temperatura de rocío, a través de fórmulas matemáticas o gráficos psicométricos,

utilizando como datos la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco (temperatura del aire medida con un termómetro convencional). Ambos termómetros están montados sobre un soporte a distancias estandarizadas, formando el instrumento llamado psicrómetro. Cuando la humedad relativa es del 100 %, la temperatura del bulbo húmedo es igual a la temperatura del bulbo seco (16).

**Figura 20**

*Psicrómetro*

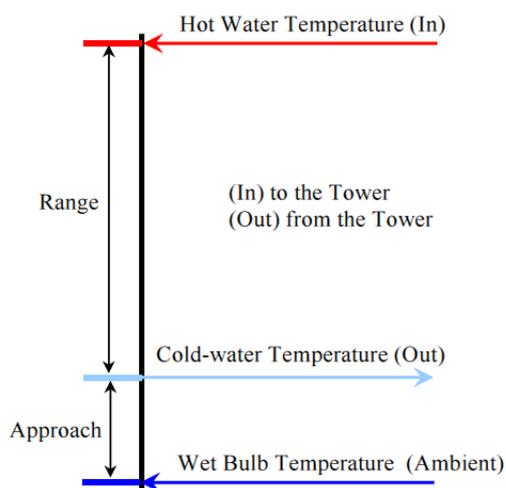


Fuente: Del Olmo (2013).

**Aproximación.** Es la diferencia de temperatura entre la temperatura del agua a la salida y la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada, según la figura 21. Es el factor más importante del performance de la torre (16).

**Figura 21**

*Rango y aproximación*



Fuente: Del Olmo (2013).

#### **2.2.4 Problemas de operación de las torres de enfriamiento**

Con la finalidad de poder prevenir y evitar corrosión de las torres de enfriamiento es vital que muchas empresas puedan realizar el tratamiento químico previo del agua que se ingresará a las torres. Sin embargo, debido a que este proceso de tratamiento es costoso como para desechar el agua, este tiende a ser reciclada (9).

**Agua.** Este elemento es uno de los abundantes en la naturaleza, sin embargo, su disponibilidad para ser utilizado se encuentra en ríos, lagos y aguas subterráneas lo cual representa el 0.62 % de la cantidad de agua total del planeta y es usado para actividades domésticas, agrícolas e industriales. Cabe resaltar que otro problema aparte de la disponibilidad de este recurso es la distribución imparcial en el planeta (9).

Cabe resaltar que, el agua es un recurso vital para los procesos, por ello cumple un rol importante como:

- Materia prima en un proceso industrial.
- Diluyente o como un medio de transporte de otros materiales.
- Medio de transporte térmico el cual puede adicionar o retirar calor.
- Sistema auxiliar (lavado, limpieza general, etc).

Por otro lado, el agua de baja calidad podría generar óxidos, incrustaciones, etc. en los intercambiadores de calor. Por ello es que los requisitos para mantener una calidad de agua buena en los procesos industriales son más estrictos en comparación con la calidad del agua potable, sin embargo, los costos tienden a aumentar. El autor indica también que la eficiencia global de un sistema de enfriamiento, el grado y frecuencia de mantenimiento, así como la vida útil de componentes principales y auxiliares del equipo, están muy relacionados con la calidad del agua de enfriamiento que tiende a circular por el sistema evaporativo (2).

Los tipos de impurezas que podrían presentarse en el agua de alimentación son los siguientes:

***Incrustaciones.*** Estas impurezas tienden a ser bicarbonatos de calcio en agua formadas a temperaturas elevadas. Además, pueden ser el sulfato de calcio o compuestos de magnesio que generan incrustaciones. Las incrustaciones se presentan por la presencia de elevadas temperaturas, variación en el régimen de transferencia de calor, concentración de calcio, magnesio, sulfatos, alcalinidad y pH. Con el fin de medir la tendencia de precipitación del carbonato de calcio en el agua se hace uso del índice de Langelier. Este índice indicará positivo cuando el agua a analizar tiende a depositar incrustaciones, caso contrario sucederá si el índice indica negativo (2).

***Corrosión.*** Este fenómeno es conocido como el ataque destructivo de los metales, el cual puede ser químico o electroquímico. Cuando se está expuesto a un ambiente fuertemente corrosivo o a una temperatura elevada se genera la corrosión química directa, caso contrario sucede con la corrosión de naturaleza electroquímica, estos se generan al sumergir un metal en agua propiciando la corrosión en la atmósfera por película de humedad. La corrosión tiende a estimularse a través de atmósferas húmedas, exposición a volúmenes de gases ácidos en la atmósfera o sales que al disociarse genera una reacción ácida, además del oxígeno disuelto en la película de agua (2).

***Ataque microbiológico.*** Este fenómeno se produce debido a la proliferación de masas de plantas en un periodo corto y que generan algas, lamas, etc. Los microorganismos formados tienden a incrustarse en las superficies difíciles de acceder, por consiguiente, dificulta la limpieza y generan interferencias en la eficiencia o rendimiento de los intercambiadores de calor (2).

**Ensuciamiento.** El ensuciamiento se produce debido a formación de depósitos en la superficie de transferencia de calor, el cual es generado por los sólidos suspendidos, los cuales ingresan a los depósitos, como limo arenoso en el agua de recuperación o partículas que son transportadas por el aire e ingresan a la torre de enfriamiento. Se observa en la figura 22 un ejemplo real de ensuciamiento (2).

### **Figura 22**

*Contaminación de estanque de torre de enfriamiento.*



Fuente: Carías (2010).

**Métodos analíticos para el control de la calidad del agua.** Los siguientes métodos son fundamentales para determinar la calidad del agua y compararlos con valores de especificación estándar requeridos. Estos son:

**Color, olor, sabor y turbidez.** Con respecto a la coloración del agua, esta puede ser real o aparente. Es real cuando la solución está determinada por las sustancias que la componen y es aparente cuando las sustancias contenidas se encuentran suspendidas. Para determinar la coloración del agua se procede a realizar una comparación con soluciones de referencia, como platino – cobalto. Asimismo, el procedimiento a realizar para determinar el olor del agua es mediante la dilución, conforme se va diluyendo el agua este no debe presentar olor alguno. Se recomienda que este procedimiento sea realizado por dos personas distintas con el fin de poder comparar el olor del agua a analizar con la de un agua

desodorizada. Cabe resaltar que, el ensayo aplicado al sabor es a través de la degustación del agua, el cual es viable para agua de tipo potable. Por último, la turbidez del agua puede ser controlada mediante procedimientos para detectar la presencia de sustancias en suspensión. Este es evaluado en aguas contaminadas y residuales y se lleva a cabo en un laboratorio o en el campo (9).

**Materia sólida.** Se señala que la materia sólida presente en el agua se divide en 3 categorías, en donde, la materia decantante se determina mediante el reposo y decantamiento de esta materia contenida en una probeta llena con 1 litro de agua. Con respecto a la segunda categoría, la materia en suspensión puede ser determinado a través de la operación de filtración o centrifugación. Por último, los residuos son determinados por una diferencia de pesos entre el filtro solo y el filtro con residuos, el cual fue previamente filtrado y secado (9).

**pH.** Este parámetro es controlado a través de electrodos de vidrio. Cabe indicar que, estos electrodos son células con un potencial controlado por la actividad del protón a lado de una membrana de vidrio (9).

**Dureza.** La dureza es la sumatoria de acumulaciones de metales catiónicos, sin considerar a los metales alcalinos y al ión hidrógeno. Este fenómeno es suscitado debido a, la presencia de algunos iones como el calcio y el magnesio, y en algunos casos ante la presencia de iones de hierro, aluminio, manganeso y estroncio (9).

**Acidez y alcalinidad.** La acidez del agua está determinada por la existencia de ácidos minerales, ácidos fuertes y bases débiles, además de, anhídrido carbónico libre. Con respecto a la alcalinidad, esta se determina por la existencia de bicarbonatos y carbonatos de hidróxidos (9).

### **2.2.5 Operaciones de humidificación**

La humidificación se presenta cuando deseamos aumentar la cantidad de vapor a un gas, mientras que al querer reducirla la operación se denomina deshumidificación. En el proceso de humidificación, se hace ingresar un gas sobre un líquido el cual tiende a incrementar la cantidad de vapor. Mientras que en la deshumidificación se lleva a cabo una condensación parcial y el vapor condensado es removido. Además, la humidificación como la deshumidificación se llevan a cabo durante el contacto de un gas con un líquido puro y que se evidencia el fenómeno de transferencia de masa interfacial y la transferencia de calor. La finalidad del proceso de humidificación del aire con el vapor de agua es alcanzar la humedad absoluta requerida (10).

Por otro lado, Aguilar (3), señala que la operación de humidificación se describe como el efecto de disminuir la temperatura de un líquido que tiende a entrar en contacto con el aire generándose el fenómeno de evaporación el cual extrae calor del agua y procede a enfriarla. Como resultado de ello, el aire se humedece y se forma una neblina. Asimismo, indica que en esta operación hay transferencia de masa interfacial y transferencia de energía.

Los autores Celestino y Fernández (9), mencionan en su tesis que la operación de humidificación se presenta de dos formas:

**Humidificación por saturación no adiabática.** El procedimiento que se lleva a cabo en este tipo de humidificación es el de ajustar la temperatura del líquido (agua) que se pondrá en contacto con el aire al mismo valor deseado de la humedad absoluta de equilibrio del aire. (9)

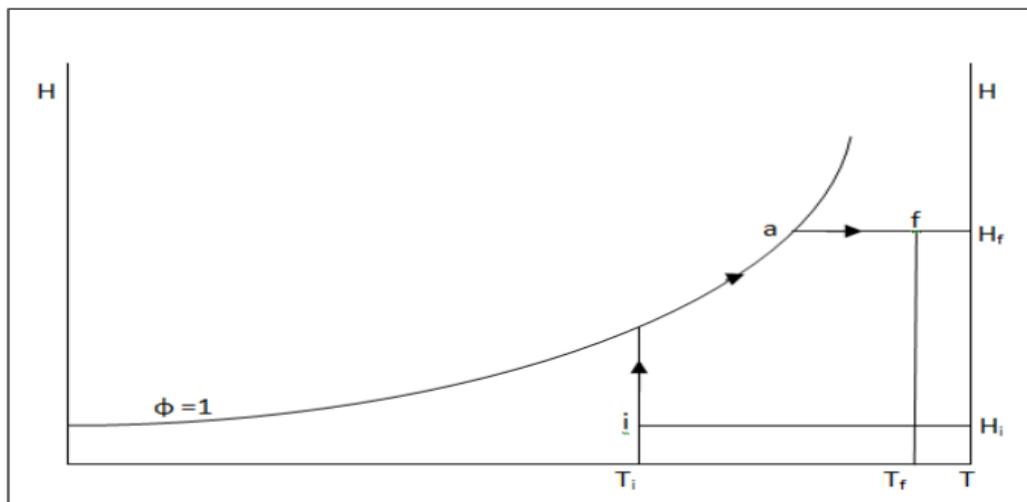
La temperatura del agua tiene que superar la temperatura de saturación adiabática que pasa por la condición inicial  $(T_i, H_i)$  a manera que el líquido (agua) transfiere un poco de calor al aire, el cual puede continuar calentándose hasta llegar a la temperatura de bulbo seco final  $(T_f)$  como se observa en la figura 23 (p. 42). Además, la diferencia de entalpías  $(h_f,$

$h_a$ ) podría generar el calor suplementario (9).

Se evidenciará que el aire se calienta hasta alcanzar la temperatura ( $T_a$ ) debido al contacto directo con el agua caliente y desde ahí se le confina un incremento de humedad desde ( $H_i$ ) hasta ( $H_f$ ). Se puede concluir que la ventaja de ese método es que solo será necesario llevar el control de la temperatura del agua, así como del monitoreo de la humedad (9).

### Figura 23

*Humidificación por saturación no adiabática.*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

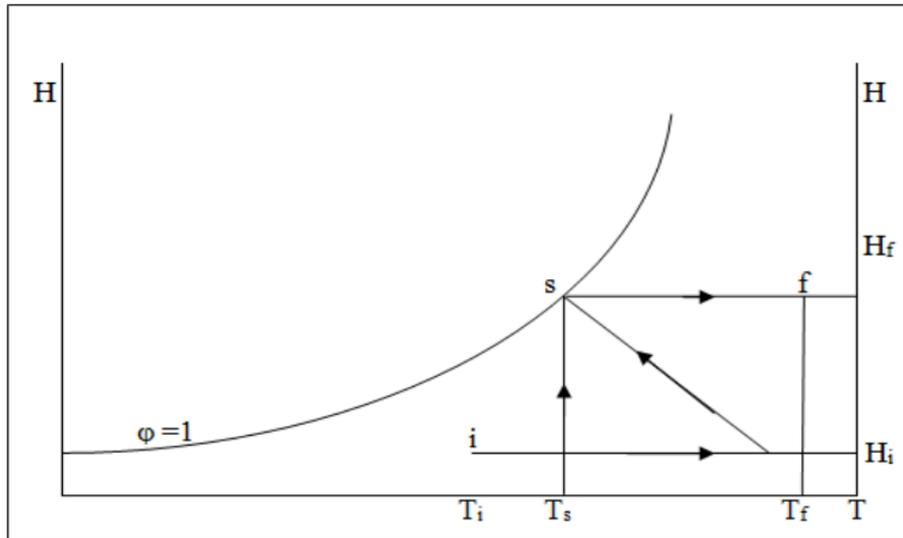
**Humidificación por saturación adiabática.** Los autores indican que en esta operación el agua es calentada hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo, en otras palabras, de saturación adiabática ( $T_s$ ), la cual corresponde a la humedad absoluta final ( $H_f$ ). En la figura 24 (p. 43), se puede visualizar la correspondencia mencionada (9).

Además, el agua es puesta en contacto con el calor y es llevada a la temperatura de saturación adiabática ( $T_s$ ), en donde durante el contacto se evidencia que el aire absorbe humedad y tiende a enfriarse, debido a que su temperatura de bulbo húmedo seco disminuye a ( $T_s$ ). Para terminar el aire es calentado hasta llegar a la temperatura final deseada

( $T_f$ ), como se muestra en la figura 24 (9).

**Figura 24**

*Humidificación por saturación adiabática.*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

### 2.2.6 Balance de materia y energía en una torre de enfriamiento

Según Cengel (17) La termodinámica se basa en el estudio de estados de equilibrio además de, los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro. Para la Primera Ley, se requiere que la razón de la transferencia de un sistema sea igual a la razón de incremento de energía de ese sistema. Con respecto a la Segunda ley, se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente.

Estableciendo ecuaciones desde la primera ley:

$$\left( \text{Energía total de} \right) - \left( \text{Energía total} \right) = \left( \text{Cambio de energía} \right) \quad (2)$$

*entrada al sistema) (sale del sistema) total del sistema*

Considerando realizar un balance de energía se tiene:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sist} \quad (3)$$

$$E_{ent} - E_{sal} = \frac{dE_{sist}}{dt} \quad (4)$$

Asimismo, la energía se define como una propiedad y el valor de esta no cambia siempre y cuando el estado de un sistema tienda a cambiar. Por lo tanto, el cambio de energía de un sistema es cero ( $\Delta E_{\text{sist}} = 0$ ); Por otro lado, si el estado de este sistema no cambia el proceso entonces el proceso es estacionario. En este caso el balance de energía se reduce a un estado estacionario representado por las siguientes ecuaciones:

$$\left( \begin{array}{l} \text{Razón de transferencia de energía} \\ \text{hacia adentro por calor, trabajo y masa} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Razón de transferencia de energía neta} \\ \text{hacia afuera por calor, trabajo y masa} \end{array} \right) \quad (5)$$

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}} \quad (6)$$

Ante ello, en ausencia de efectos significativos eléctricos, magnéticos, de movimiento, gravitatorios y de tensión superficial, en otras palabras, para sistemas simples compatibles estacionarios, el cambio de energía total de un sistema durante un proceso es el cambio de su energía interna, el cual se representa mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta E_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{sistema}} \quad (7)$$

*Transferencia neta de calor + Generación de calor = Cambio de energía térmica del sistema*

$$(Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + E_{\text{generación}} = \Delta E_{\text{térmica sistema}} \quad (8)$$

El balance de energía para sistemas cerrados, es decir, con masa fija se establece de la siguiente manera:

Sistema cerrado estacionario:

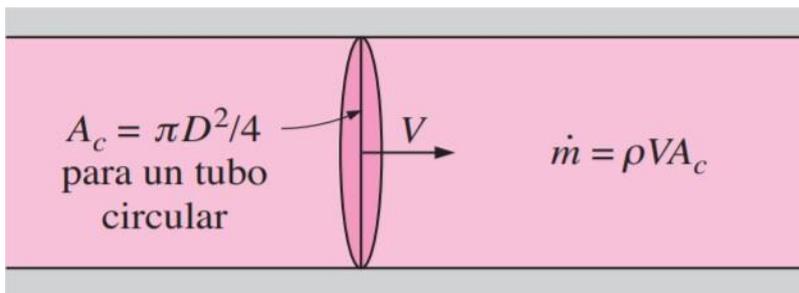
$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta U = m \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (9)$$

Sistema cerrado estacionario, sin trabajo:  $Q = m \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (10)$

Para el balance de energía para sistemas estacionarios se puede considerar el gasto de energía de una masa de un fluido en una sección transversal como se muestra en la figura 25.

**Figura 25**

*Gasto de masa de un fluido en una sección transversal.*



Fuente: Cengel y Ghajar (2011).

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A_c \left( \frac{Kg}{s} \right) \tag{11}$$

$$\dot{V} = V A_c = \frac{\dot{m}}{\rho} \left( \frac{m^3}{s} \right) \tag{12}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \tag{13}$$

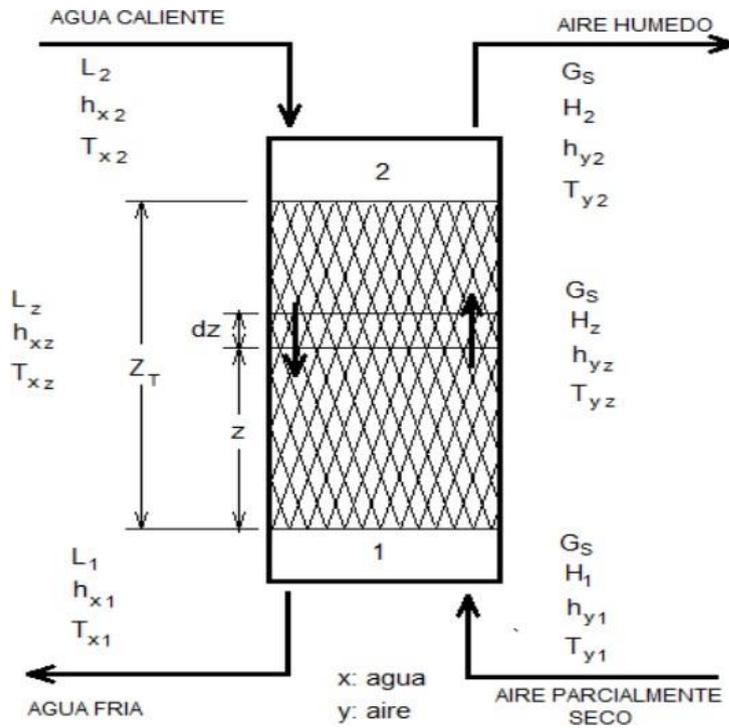
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta h \left( \frac{KJ}{s} \right) \tag{14}$$

$\dot{Q}$ : Razón de transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control.

Se observa en la figura 26 (p. 46), el ingreso de dos corrientes una de agua y otra de aire, el objetivo del enfriamiento es lograr es lograr que la corriente de agua que salga de la torre disminuya su temperatura, en otras palabras, que se encuentre fría.

**Figura 26**

*Diagrama de torre de enfriamiento.*



Fuente: Celestino y Fernández (2017).

Donde,

$(G_x)$ , es el flujo másico por unidad de área de gas seco.

$(L_1)$ , es el flujo másico de agua por unidad de área que sale de la torre.

$(L_2)$ , es el flujo másico de agua por unidad de área que ingresa a la torre.

$(T_{x1})$ , es la temperatura del agua que sale de la torre.

$(T_{x2})$ , es la temperatura del agua que ingresa a la torre.

$(T_{y1})$ , es la temperatura del aire que ingresa a la torre.

$(T_{y2})$ , es la temperatura del aire que sale de la torre.

$(H_1)$ , es la humedad del aire que ingresa a la torre.

$(H_2)$ , es la humedad del aire que sale de la torre.

$(h_{x1})$ , es la entalpía del agua que sale de la torre.

$(h_{x2})$ , es la entalpía del agua que ingresa a la torre.

$(h_{y1})$ , es la entalpía del aire que ingresa a la torre.

$(h_{y2})$ , es la entalpía del aire que sale de la torre.

Además, considerando que la operación de enfriamiento se encuentra en estado estacionario, el balance de materia aplicable para el agua que circula en la torre de enfriamiento será:

$$AL_2 + AG_s H_1 = AL_1 + AG_s H_2 \quad (15)$$

Donde, A es el área de sección transversal de la torre de enfriamiento y tiene un valor constante. De modo que, se genera la siguiente ecuación:

$$L_2 - L_1 = G_s(H_2 - H_1) \quad (16)$$

Del balance de energía aplicable a la torre de enfriamiento, se obtiene lo siguiente:

$$AL_2 h_{x2} + AG_s h_{y1} = AL_1 h_{x1} + AG_s h_{y2} \quad (17)$$

El balance de energía considera que en toda la torre no se pierde ni gana energía. Por ese motivo, eliminado el término constante A y relacionando con la ecuación (16) se determina:

$$L_2 h_{x2} + G_s h_{y1} = [L_2 - G_s(H_2 - H_1)]h_{x1} + G_s h_{y2} \quad (18)$$

Asimismo, tomando en cuenta que la pérdida de calor es ínfima y reemplazando en la ecuación (16) y (18), se determina la ecuación (19) y (20), respectivamente:

$$L_2 = L_1 = L \quad (19)$$

$$L_2(h_{x2} - h_{x1}) = G_s(h_{y2} - h_{y1}) \quad (20)$$

La variación de entalpías se calcula con el calor específico multiplicado por la diferencia de temperaturas. Entonces reemplazando en la ecuación (21) y tomando en cuenta que el balance de calor se lleva a cabo hasta un punto z dentro de la torre de enfriamiento, se establece lo siguiente:

$$H_{GZ} = \frac{LC_{AL}}{G_s} T_{xz} - \frac{LC_{AL}}{G_s} T_{x1} + H_{G1} \quad (21)$$

La ecuación (21) es conocida como la ecuación de la línea de operación de la torre de enfriamiento.

### **2.2.7 Cálculo del gradiente de temperatura**

Según Celestino y Fernández (9), el gradiente de temperatura se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Gradiente de temperatura} = \Delta T \quad (22)$$

$$\text{Gradiente de temperatura} = T_2 - T_1 \quad (23)$$

Donde,

$T_1$ : Es la temperatura de ingreso del fluido hacia la torre de enfriamiento.

$T_2$ : Es la temperatura de salida del fluido desde la torre de enfriamiento.

### **2.2.8 Cálculo de la eficiencia de una torre de enfriamiento (e)**

Según Celestino y Fernandez (9), la eficiencia de una torre de enfriamiento se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$e = \frac{\Delta T}{T_1 - T_{BH}} \quad (24)$$

$$e = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{BH}} \quad (25)$$

Donde,

$e$ : Es la eficiencia de la torre de enfriamiento  $\Delta T$ : Es el salto térmico o rango

$T_1$ : Es la temperatura de ingreso del fluido hacia la torre de enfriamiento

$T_2$ : Es la temperatura de salida del fluido desde la torre de enfriamiento

$T_{BH}$ : Es la temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa hacia la torre de enfriamiento

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1 Diseño de una torre de enfriamiento**

Mendoza y Gallardo (4), indican en su investigación que, para el diseño de una torre de enfriamiento se deberá definir en primer lugar el dimensionamiento del sistema considerando los caudales máximos por unidad de área en base al aire y agua. En nuestro proyecto de tesis se consideró implementar una torre de enfriamiento de 4.500 m x 8.000 m x 7.200 m. Además, precisan que, conociendo el área de la torre de enfriamiento, se podrá determinar el rango de refrigeración, aproximación a la temperatura de bulbo húmedo, caudal de masa de agua, velocidad de aire a través de la torre y la altura de la torre.

Un aspecto importante que mencionan los autores es la selección del ventilador, sin embargo, en nuestro proyecto de tesis hemos considerado un ventilador de tipo axial que no presenta el seal disk que ayuda a eliminar ciertamente el reflujo existente en el disco del ventilador, además de, un stack del ventilador de forma cilíndrica que origina vórtices en la entrada del ventilador y reduce la eficiencia del ventilador (4).

Otro aspecto importante para el diseño de la torre es la selección del reservorio de agua que tenga una capacidad de almacenamiento que esté acorde a la altura promedio de 7.200 m, en donde la caída de presión se pueda medir y evaluar en términos de la velocidad y la altura de la torre.

Por otro lado, la altura de la torre es un punto clave para poder determinar el grado de enfriamiento de la torre. Para nuestro proyecto hemos considerado una altura de 7.200 m (4).

Cabe precisar que otro aspecto importante para el diseño de una torre de enfriamiento es considerar la capacidad de la bomba, pues estas se encargan de la recepción del agua del proceso que alimentará a la torre de enfriamiento. Asimismo, es importante recalcar que, de acuerdo con la cantidad de flujo másico de fluido a impulsar, la selección del equipo de bombeo contará con la información necesaria asociada a la capacidad del reservorio de agua (4).

Por último y más importante, es la selección de las variables. En nuestro proyecto hemos considerado evaluar estas las siguientes variables según la estación. Para la estación de verano, un flujo de electrolito de 380 m<sup>3</sup>/h, un flujo de aire de 108 m<sup>3</sup>/s, un rango de enfriamiento de 7.4 °C, una temperatura de entrada de electrolito de 43.79 °C, una temperatura de bulbo húmedo de 23 °C y una humedad relativa de 78 %.

En el caso del invierno se consideró, un flujo de electrolito de 380 m<sup>3</sup>/h, un flujo de aire de 108 m<sup>3</sup>/s, un rango de enfriamiento de 6.84 °C, una temperatura de entrada de electrolito de 37.7 °C, una temperatura de bulbo húmedo de 17.7 °C y una humedad relativa de 80 %.

### **2.3.2 Característica del fluido de enfriamiento**

El fluido de enfriamiento es un medio necesario para la transferencia de grandes cantidades de calor que se generan en los procesos industriales. Por ello, el fluido a utilizar en nuestro proyecto tiene las siguientes características:

- El tipo de líquido a enfriar es un electrolito.
- El peso específico del electrolito es 1290 kg/m<sup>3</sup>
- El calor específico del electrolito es 3412 kJ/kg
- El flujo del electrolito nominal es 400 m<sup>3</sup>/h
- El flujo del electrolito nominal máximo es 380 m<sup>3</sup>/h

### **2.3.3 Importancia del enfriamiento del electrolito de zinc**

Acuña y Rivas (18), señalan que una solución electrolítica de Zinc que se encuentra a una temperatura de aproximadamente 80 °C y que será enfriada por un proceso de evaporación mediante una torre de enfriamiento permitirá eliminar agua del circuito, además de, precipitar la mayor cantidad de residuos de gypsum (sulfato de calcio hidratado) con la finalidad de poder facilitar la limpieza de las celdas electrolíticas y tuberías del circuito electrolítico.

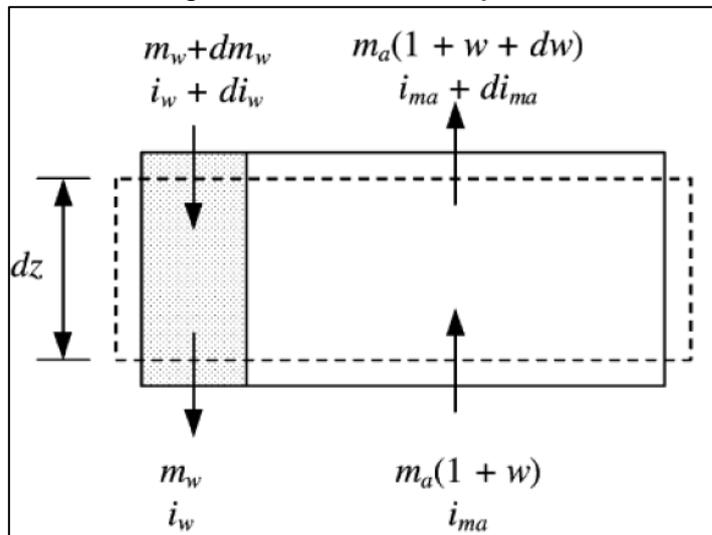
### 2.3.4 Método de Poppe para torres en contraflujo

En otra rama de investigación, en la década de los 70, Poppe and Rögener desarrollan un método, el método de Poppe, que sin llevar a cabo las suposiciones de Merkel ( $Le = 1$ ) caracteriza la transferencia de calor y masa de forma precisa para todo el rango de condiciones. Aunque por su complejidad está menos extendido que el método de Merkel, es el método correcto de resolución de la transferencia en torres de refrigeración húmedas. Se realiza un análisis de las ecuaciones para el caso sub saturado y sobresaturado que se detalla a continuación (16).

Ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor y transferencia de masa para el caso de subsaturado. Según Del Olmo (16), en la figura 27 se aprecia el volumen de control del empaquetamiento de una torre de refrigeración en contraflujo:

**Figura 27**

*Volumen de control del empaquetamiento de una torre de refrigeración en contraflujo.*



Fuente: Del Olmo (2013).

Asimismo, se establece que los balances de masa y energía para el volumen de control son:

$$dm_w = m_a dw \quad (27)$$

$$m_a di_{ma} - m_w di_w - i_w dm_w = 0 \quad (28)$$

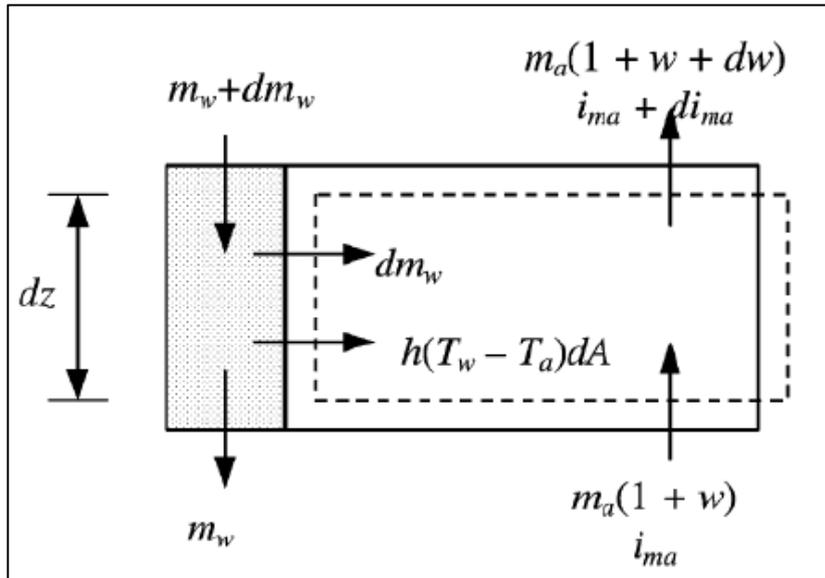
Introduciendo la ecuación (27) y  $di_w = C_{p_w} \cdot dT_w$  en la ecuación (28), se obtiene:

$$dT_w = \frac{m_a}{m_w} \left( \frac{1}{C_{p_w}} di_{ma} - T_w dw \right) \quad (29)$$

Luego, considerando la interfase entre el agua y el aire como se muestra en la figura 28:

**Figura 28**

*Volumen de control de la interfase del empaquetamiento de una torre de refrigeración en contraflujo.*



Fuente: Del Olmo (2013).

Se establece que el balance energético diferenciado entre el intercambio de calor latente y sensible está definido por la ecuación:

$$dQ = dQ_m + dQ_c \quad (30)$$

Asimismo, la transferencia de masa y de calor latente en la interfase se representan mediante las ecuaciones (31) y (32):

$$dm_w = h_d(w_{sw} - w)dA \quad (31)$$

$$dQ_m = i_v dm_w = i_v h_d(w_{sw} - w)dA \quad (32)$$

Donde  $h_d$  es el coeficiente de transferencia de masa ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) y  $W_{SW}$  es la humedad específica del aire saturado a la temperatura del agua ( $\text{kg/kg}$ ).

Por lo que, la entalpía de vapor de agua se define como:

$$i_V = i_{fgwo} + C_{PV}T_W \quad (33)$$

En la ecuación (34) se observa que el intercambio de calor convectivo se expresa en términos de temperatura y puede ser sustituido por entalpías:

$$dQ_C = h(T_W - T_a)dA \quad (34)$$

Donde la entalpía del aire saturado a la temperatura del electrolito ( $\text{J/kg}$ ) es:

$$i_{masw} = C_{pa}T_W + w_{SW}(i_{fgwo} + C_{PV}T_W) \quad (35)$$

Relacionando las ecuaciones (33) y (35) obtenemos:

$$i_{masw} = C_{pa}T_W + wi_V + (w_{SW} - w)i_V \quad (36)$$

Que en conjunto con la expresión de  $i_{ma}$  de la ecuación (37) se establece la ecuación (38):

$$i_{ma} = C_{pa}T_a + w(i_{fgwo} + C_{PV}T_a) \quad (37)$$

$$T_W - T_a = \frac{(i_{masw} - i_{ma}) - (w_{SW} - w)i_V}{C_{pma}} \quad (38)$$

Por otro lado, reemplazando la ecuación (38) en la ecuación (34), y el resultado junto con la ecuación (32) en la ecuación (30), obtenemos:

$$dQ = h_d \left[ \frac{h}{C_{pma}h_d} (i_{masw} - i_{ma}) + \left( 1 - \frac{h}{C_{pma}h_d} \right) i_V (w_{SW} - w) \right] dA \quad (39)$$

Donde aparece el factor de Lewis ( $Le_f = h/C_{pma}h_d$ ), el cual se sustituye por la relación empírica (para el caso subsaturado) propuesta por Bosnjakovic (16)

$$Le_f = 0.865^{0.667} \frac{\left( \frac{w_{SW} + 0.622}{w + 0.622} - 1 \right)}{\left[ \ln \left( \frac{w_{SW} + 0.622}{w + 0.622} \right) \right]} \quad (40)$$

La transferencia de entalpía de la corriente de aire se puede establecer, mediante la ecuación (39), como:

$$di_{ma} = \frac{1}{m_a} dQ = \frac{h_d dA}{m_a} \left[ Le_f (i_{masw} - i_{ma}) + (1 - Le_f) i_V (w_{SW} - w) \right] \quad (41)$$

Por otro lado, para un modelo unidimensional, el área de transferencia es definida como la sección horizontal de contacto:

$$dA = a_{fi}A_{fr}dz \quad (42)$$

Donde la densidad superficial  $a_{fi}$  es la superficie del empaquetamiento por unidad de volumen del empaquetamiento ( $m^{-1}$ ) y  $A_{fr}$  comprende el área frontal de empaquetamiento ( $m^2$ ).

Reemplazando la ecuación (42) en la ecuación (41) obtenemos:

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{m_a} [Le_f(i_{masw} - i_{ma}) + (1 - Le_f)i_v(w_{sw} - w)]$$

Asimismo, reemplazando las ecuaciones (31) y (41) en la ecuación (28), obtenemos el balance energético:

$$m_w di_w = h_d dA [i_{masw} - i_{ma} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ma} - (w_{sw} - w)i_v] - (w_{sw} - w)C_{pw}T_w] \quad (43)$$

Por lo que la ecuación (29), se reescribe como:

$$\frac{dw}{dT_w} = \frac{1}{C_{pw}T_w} \frac{di_{ma}}{dT_w} - \frac{1}{T_w} \frac{m_w}{m_a} \quad (44)$$

$$\frac{dw}{dT_w} = \frac{di_{ma}}{T_w di_w} - \frac{1}{T_w} \frac{m_w}{m_a} \quad (45)$$

Reemplazando las ecuaciones (41) y (44) en la ecuación (45), obtenemos:

$$\frac{dw}{dT_w} = \frac{C_{pw} \frac{m_w}{m_a} (w_{sw} - w)}{i_{masw} - i_{ma} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ma} - (w_{sw} - w)i_v] - (w_{sw} - w)C_{pw}T_w} \quad (46)$$

Sustituyendo la ecuación (46) en la ecuación (45), obtenemos:

$$\frac{di_{ma}}{dT_w} = \frac{m_w C_{pw}}{m_a} \left( 1 + \frac{(w_{sw} - w)C_{pw}T_w}{i_{masw} - i_{ma} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ma} - (w_{sw} - w)i_v] - (w_{sw} - w)C_{pw}T_w} \right) \quad (47)$$

De las ecuaciones (27) y (31), se obtiene:

$$h_d dA = \frac{m_a dw}{w_{sw} - w} \quad (48)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación (48) por  $m_w$ , introduciendo  $\frac{dT_w}{dT_w}$  en el

lado derecho e integrando, obtenemos:

$$\int \frac{h_d}{m_w} dA = \int \frac{m_a}{m_w} \frac{dw/dT_w}{w_{SW} - w} dT_w \quad (49)$$

$$\frac{h_d A}{m_w} = \int \frac{m_a}{m_w} \frac{dw/dT_w}{w_{SW} - w} dT_w \quad (50)$$

$$Me_P = \int \frac{m_a}{m_w} \frac{dw/dT_w}{w_{SW} - w} dT_w \quad (51)$$

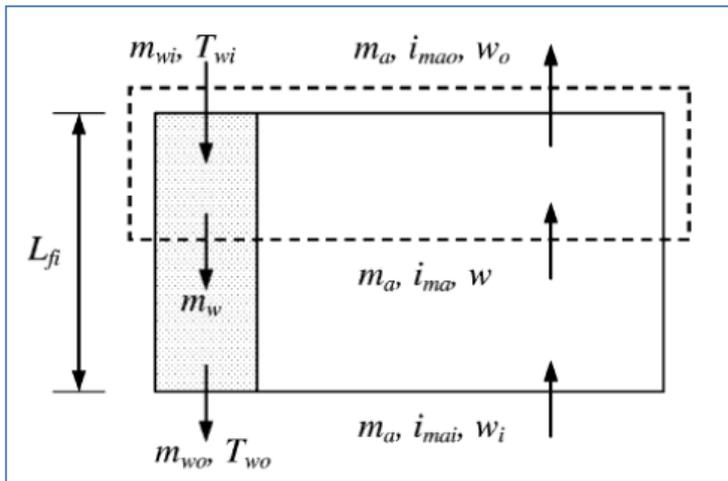
Encontramos el número de Merkel definido según el método de Poppe, al reemplazar la ecuación (46) en la ecuación (51) y obtenemos:

$$\frac{Me_P}{dT_w} = \frac{C_{pw}}{i_{masw} - i_{ma} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ma} - (w_{SW} - w)i_v] - (w_{SW} - w)C_{pw}T_w} \quad (52)$$

Debido a que el caudal de electrólito no es constante, es necesario relacionarlo con el valor de entrada al empaquetamiento. Por ello, utilizando el volumen de control de la figura 29, podemos establecer un balance de masa para obtener las ecuaciones (53) y (54), cerrando el sistema de ecuaciones.

### Figura 29

Volumen de control del empaquetamiento de una torre de refrigeración en contraflujo.



Fuente: Del Olmo (2013).

$$m_{wi} = m_w + m_a(w_0 - w) \quad (53)$$

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{m_{wi}}{m_a} \left( 1 - \frac{m_a}{m_{wi}}(w_0 - w) \right) \quad (54)$$

Mediante las ecuaciones (40), (44), (45) y (54) resolvemos el problema mediante un método iterativo utilizando  $w_0$  como elemento pivote.

Ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor y transferencia de masa para el caso de sobresaturado. Desde que el exceso de vapor del aire es condensado como niebla, la entalpía es expresada como:

$$i_{ss} = C_{pa}T_a + w_{sa}(i_{fgwo} + C_{pv}T_a) + (w - w_{sa})C_{pv}T_a \quad (55)$$

Y el gradiente de masa queda definido por:

$$dm_w = h_d(w_{sw} - w_{sa})dA \quad (56)$$

Asimismo, restando la ecuación (55) a la ecuación (36), obtenemos el gradiente de entalpía, al cual le introducimos la siguiente expresión para obtener el diferencial de temperatura:

$$(w - w_{sa})C_{pw}T_w - (w - w_{sa})C_{pw}T_w + w_{sa}C_{pv}T_w - w_{sa}C_{pv}T_w = 0$$

$$T_w - T_a = \frac{i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w)i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w}{C_{pmas}} \quad (57)$$

$$C_{pmas} = C_{pa} + w_{sa}C_{pv} + (w - w_{sa})C_{pw} \quad (58)$$

De la misma manera que hemos procedido para el caso subsaturado, pero con las ecuaciones (56) y (57), obtenemos el diferencial de entalpía del aire:

$$di_{ma} = \frac{h_d dA}{m_a} [Le_f \{ i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w \} + (w_{sw} - w_{sa})i_v] \quad (59)$$

Asimismo, el factor de Lewis se sustituye por la relación empírica (para el caso sobresaturado) propuesta por Bosnjakovic.

$$Le_f = 0.865^{0.667} \frac{\left( \frac{w_{sw} + 0.622}{w_{sa} + 0.622} - 1 \right)}{\left[ \ln \left( \frac{w_{sw} + 0.622}{w_{sa} + 0.622} \right) \right]} \quad (60)$$

Reemplazando las ecuaciones (56) y (59) en la ecuación (28), obtenemos el balance energético:

$$m_w di_w = m_w c_{pw} dT_w = h_d dA x [Le_f \{i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w\} + (w_{sw} - w_{sa})i_v - (w_{sw} - w_{sa})C_{pw}T_w] \quad (61)$$

Introduciendo la ecuación (62) en el lado derecho de la ecuación (61), obtenemos la ecuación (63)

$$[i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w] - [i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w] = 0 \quad (62)$$

$$m_w di_w = m_w c_{pw} dT_w = h_d dA x [i_{masw} - i_{ss} + (Le_f - 1)(i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w) + (w - w_{sw})C_{pw}T_w] \quad (63)$$

Por otro lado, reemplazando la ecuación (56) en la ecuación (27), obtenemos la ecuación (64):

$$h_d dA = \frac{m_a dw}{(w_{sw} - w_{sa})} \quad (64)$$

Reemplazando la ecuación (64) en la ecuación (63), obtenemos la ecuación (65), que reemplaza en la ecuación (44) da como resultado la ecuación (66).

$$\frac{dw}{dT_w} = \frac{C_{pw} \frac{m_w}{m_a} (w_{sw} - w_{sa})}{i_{masw} - i_{ss} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w] + (w - w_{sw})C_{pw}T_w} \quad (65)$$

$$\frac{di_{am}}{dT_w} = C_{pw} \frac{m_w}{m_a} \left( 1 + \frac{C_{pw} T_w (w_{sw} - w_{sa})}{i_{masw} - i_{ss} + (Le_f - 1)[i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})C_{pw}T_w] + (w - w_{sw})C_{pw}T_w} \right) \quad (66)$$

Añadimos  $\frac{dT_w}{dT_w}$  en el lado derecho de la ecuación (64), dividimos por  $m_w$  en ambos lados e integramos, obteniendo la ecuación integral de Merkel para el método de Poppe:

$$\int \frac{h_d}{m_w} dA = \int \frac{m_a}{m_w} \frac{dw/dT_w}{w_{sw} - w_{sa}} dT_w \quad (67)$$

$$M_{ep} = \frac{h_d A}{m_w} = \int \frac{m_a}{m_w} \frac{dw/dT_w}{w_{sw} - w_{sa}} dT_w \quad (68)$$

Reemplazando la ecuación (65) en la (68) obtenemos la variación de  $M_{ep}$  con respecto a la temperatura del agua.

$$\frac{dM_{ep}}{dT_w} = \frac{c_{pw}}{i_{masw} - i_{ss} + (L_{ef} - 1)[i_{masw} - i_{ss} - (w_{sw} - w_{sa})i_v + (w - w_{sa})c_{pw}T_w] + (w - w_{sw})c_{pw}T_w}$$

Por último, con las ecuaciones (54), (60), (65) y (66) resolvemos el problema mediante un método iterativo como en el caso anterior.

Método de resolución elegido para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el intercambio de calor y masa de una torre de enfriamiento en contraflujo son Runge Kutta de cuarto orden, con la humedad especificada de salida del aire ( $w_o$ ) como pivote.

El sistema de ecuaciones para el caso subsaturado está compuesto por las ecuaciones (46), (47) y (52), mientras que para el caso sobresaturado se rigen por las ecuaciones (65), (66) y (69). Vamos a explicar el método utilizando la entalpía del aire sin saturar ( $i_{ma}$ ), sin embargo, podría sustituirse por la entalpía del aire sobresaturado ( $i_{ss}$ ) en el caso de aire sobresaturado.

Primer paso:

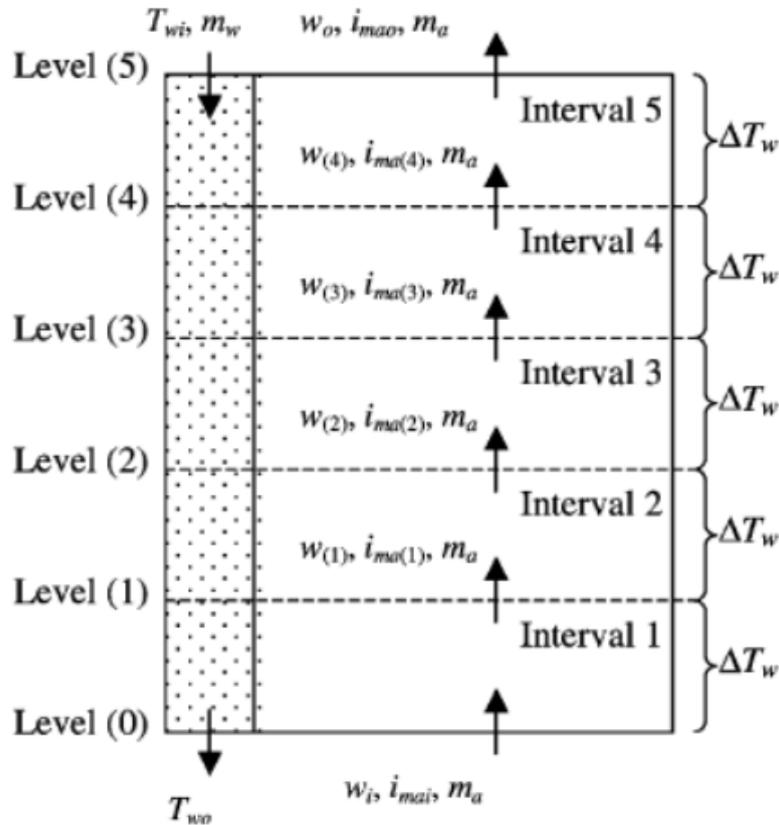
Dividir el empaquetamiento en un número de intervalos con igual salto de temperatura del electrolito, como muestra la figura 30 (p. 59).

En la figura 30 (p. 59) podemos observar el empaquetamiento dividido en cinco intervalos de igual salto térmico. De modo que  $\Delta T_w$  se define como:

$$\Delta T_w = \frac{T_{wi} - T_{wo}}{(Number\ of\ intervals)} \quad (70)$$

**Figura 30**

*Empaquetamiento en contraflujo dividido en 5 intervalos.*



Fuente: Del Olmo (2013).

Segundo paso:

El segundo paso plantea suponer un valor de la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento ( $w_o$ ) para iniciar el bucle.

Tercer paso:

El aire, usualmente subsaturado, ingresa a la torre en el nivel cero con  $w_{(i)}$ ,  $i_{ma(i)}$  y  $m_{a(i)}$  conocidos. Asimismo, los parámetros del aire para el nivel 1 (ver nivel en la figura 30) son calculados mediante el método Runge Kutta para subsaturado o sobresaturado, comprobando previamente el estado del aire.

Por otro lado, la comprobación del estado del aire se basa en determinar la temperatura de bulbo húmedo  $T_{wb(i)}$  con los valores previamente calculados y

posterior a ello compararla con  $T_{a(i)}$ . Si  $T_{a(i)} > T_{wb(i)}$ , se utilizan las fórmulas para subsaturado, si  $T_{a(i)} < T_{wb(i)}$ , lo cual es imposible, se define  $T_{wb(i)} = T_{a(i)}$ , y se emplean las ecuaciones para sobresaturado.

Cuarto paso:

Las ecuaciones (46), (47) y (52), establecidas para el caso subsaturado y las ecuaciones (65), (66) y (69), establecidas para el caso sobresaturado, pueden establecerse, respectivamente como:

$$\frac{dw}{dT_w} = f(w, i_{ma}, T_w) \quad (71)$$

$$\frac{di_{ma}}{dT_w} = g(w, i_{ma}, T_w) \quad (72)$$

$$\frac{dM_{ep}}{dT_w} = h(w, i_{ma}, T_w) \quad (73)$$

Se observa que en la figura 30 (p. 59), el empaquetamiento está dividido en varios intervalos con el mismo salto de temperatura del electrolito, por lo que la representación de la figura no corresponde con un criterio de longitud, siendo solo una representación imaginaria para orientar el procedimiento y nomenclatura. Por ello, los valores iniciales de  $w$ ,  $i_{ma(i)}$  y  $T_w$  son requeridos en un nivel particular (n) para calcular las variables en el siguiente nivel (n+1), utilizando las ecuaciones (74), (75) y (76).

$$w_{(n+1)} = w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,1)} + 2j_{(n+1,2)} + 2j_{(n+1,3)} + j_{(n+1,4)}}{6} \quad (74)$$

$$i_{ma(n+1)} = i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,1)} + 2k_{(n+1,2)} + 2k_{(n+1,3)} + k_{(n+1,4)}}{6} \quad (75)$$

$$M_{ep(n+1)} = M_{ep(n)} + \frac{l_{(n+1,1)} + 2l_{(n+1,2)} + 2l_{(n+1,3)} + l_{(n+1,4)}}{6} \quad (76)$$

Donde:

$$j_{(n+1,1)} = \Delta T_w \cdot f(T_w(n), i_{ma(n)}, w_{(n)}) \quad (77)$$

$$k_{(n+1,1)} = \Delta T_w \cdot g(T_{w(n)}, i_{ma(n)}, w_{(n)}) \quad (78)$$

$$l_{(n+1,1)} = \Delta T_w \cdot h(T_{w(n)}, i_{ma(n)}, w_{(n)}) \quad (79)$$

$$j_{(n+1,2)} = \Delta T_w \cdot f\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,1)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,1)}}{2}\right) \quad (80)$$

$$k_{(n+1,2)} = \Delta T_w \cdot g\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,1)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,1)}}{2}\right) \quad (81)$$

$$l_{(n+1,2)} = \Delta T_w \cdot h\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,1)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,1)}}{2}\right) \quad (82)$$

$$j_{(n+1,3)} = \Delta T_w \cdot f\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,2)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,2)}}{2}\right) \quad (83)$$

$$k_{(n+1,3)} = \Delta T_w \cdot g\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,2)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,2)}}{2}\right) \quad (84)$$

$$l_{(n+1,3)} = \Delta T_w \cdot h\left(T_{w(n)} + \frac{\Delta T_w}{2}, i_{ma(n)} + \frac{k_{(n+1,2)}}{2}, w_{(n)} + \frac{j_{(n+1,2)}}{2}\right) \quad (85)$$

$$j_{(n+1,4)} = \Delta T_w \cdot f\left(T_{w(n)} + \Delta T_w, i_{ma(n)} + k_{(n+1,3)}, w_{(n)} + j_{(n+1,3)}\right) \quad (86)$$

$$k_{(n+1,4)} = \Delta T_w \cdot g\left(T_{w(n)} + \Delta T_w, i_{ma(n)} + k_{(n+1,3)}, w_{(n)} + j_{(n+1,3)}\right) \quad (87)$$

$$l_{(n+1,4)} = \Delta T_w \cdot h\left(T_{w(n)} + \Delta T_w, i_{ma(n)} + k_{(n+1,3)}, w_{(n)} + j_{(n+1,3)}\right) \quad (88)$$

Las cuatro variables del método de Runge Kutta de cuarto orden son  $T_w, w, i_{ss}$  o  $i_{ma}$  y  $M_{ep}$ , las cuales aparecen en lado izquierdo de los sistemas de ecuaciones correspondientes a cada caso. Las ecuaciones (75), (76) y (77) son únicamente función de  $w, i_{ss}$  o  $i_{ma}$  y  $T_w$ , las demás variables son función de estas variables.

Las ecuaciones (77), (78) y (79) no son función directa de  $M_{ep}$  porque  $\frac{dM_{ep}}{dT_w}$  es función de  $\frac{dw}{dT_w}$ , como podemos observar en la ecuación (68). Por otro lado, las ecuaciones (46) y (47) para el caso subsaturado o (65) y (66) para el caso sobresaturado, se pueden resolver sin la ecuación (52) y (69) respectivamente.

**Ecuación de Merkel.** Según Del Olmo (16) se define como:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h' - h} \quad (89)$$

Donde:

K: coeficiente de transferencia de masa  $\left(\frac{lb\ agua}{hft^2}\right)$

a: área de contacto  $\left(\frac{ft^2}{ft^3}\right)$

V: volumen de enfriamiento activo  $\left(\frac{ft^3}{ft^3}\right)$

L: caudal de electrolito  $\left(\frac{lb\ agua}{hft^2}\right)$

T1 y T2: Temperatura del electrolito de entrada y salida ( $^{\circ}C$ )

Según Del Olmo (16), el lado derecho de la ecuación está definido en función de las propiedades del fluido y es independiente de las dimensiones de la torre. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el potencial impulsor es la entalpía.

Usualmente, la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura más baja a la que se puede enfriar el fluido líquido. En la práctica, la temperatura del líquido frío se aproxima, pero no iguala la temperatura de bulbo húmedo del aire en una torre de enfriamiento. Por ello, la magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre.

### **2.3.5 Factores que considerar para un adecuado enfriamiento**

De acuerdo con Del Olmo (16), la proliferación de hongos, bacterias, algas e incluso protozoos pueden crecer en las soluciones de agua y reducir la eficiencia durante la transferencia de calor en una torre de enfriamiento. Por ello, para evitar el ensuciamiento biológico se deberá erradicar las fugas de fluidos de procesos, controlar el air, en otras palabras, filtrar o separar para eliminar sólidos suspendidos. Asimismo, se controlarán adicionando cloro en la solución electrolítica en circulación, el cual actuará como un biocida y la dosificación no debe superar 1 ppm de cloro residual. A continuación, se

muestra el Sistema de control para una torre de refrigeración.

## **2.4 Definición de términos básicos**

**Aspersión:** Según Chávez y Alban (19) la distribución eficiente y uniforme del agua caliente circulante en la torre de enfriamiento continúa siendo la meta del diseñador de la torre. El aspersor juega un rol importante en la obtención de este objetivo por ser el elemento final en el sistema de distribución de agua.

**Eliminadores de gotas:** Según Flores (20) se utilizan para capturar el rocío y gotas de agua que escapan de la torre de enfriamiento o condensador evaporativo a causa del arrastre del viento generado por el ventilador evitando la pérdida de agua excesiva y corrosión oxidativa de infraestructura cercana al equipo.

**Electrodeposición:** Como indica Imaz (21) la electrodeposición de metales se puede definir como un proceso en el que se ha de pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito que contiene primordialmente los iones metálicos que se van a depositar en la superficie de uno de los electrodos (cátodo).

**Fluido electrolítico:** Es una solución electrolítica que contiene en su mayoría zinc en su forma iónica, este fluido tiende a enfriarse (intercambio de calor) a través de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

**Torre de enfriamiento:** Según Aguilar (3) una torre de enfriamiento es una estructura o equipo que tiene como objeto el enfriamiento evaporativo del agua, el cual se lleva a cabo a través de un proceso de intercambio de calor latente resultante de la evaporación del agua (evaporación controlada por el contacto directo del agua con el aire frío), y parte por transferencia de calor sensible. Se clasifica en torres de tipo atmosférica, de circulación natural y de tiro mecánico.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis

##### Hipótesis general

Las condiciones favorables para incrementar el gradiente de temperatura se establecen mediante la variación de la altura de la torre en un rango de 2 a 4 metros y un rango de flujo de ingreso del fluido electrolítico de 300 a 400 m<sup>3</sup>/h a la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

##### Hipótesis específicas

Las condiciones de operación que influyen en el gradiente de temperatura son la altura de la torre, el flujo y la temperatura de ingreso del fluido electrolítico.

El incremento de la altura de la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo a un mínimo de 3 metros y un flujo máximo de 300 m<sup>3</sup>/h establecen la relación favorable.

#### 3.1.1 Operacionalización de variables

##### Variable dependiente

Y = Gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

##### Variables independientes

X1 = Condiciones de operación de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante el año.

X2 = Condiciones de operación favorables de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

**Tabla 1***Operacionalización de variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE VARIABLES	DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICES / ÍTEMS	MÉTODO Y TÉCNICA
Variable dependiente						
Y = Gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	La gradiente de temperatura es la diferencia entre la temperatura de ingreso y la temperatura de salida de un fluido electrolítico.	Es el cálculo de la gradiente de temperatura.	Gradiente de temperatura.	Temperatura	°C	Cálculo matemático
Variables independientes						
X1 = Condiciones de operación de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante el año.	Condiciones de operación del proceso de enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante el año.	Medición del flujo electrolítico y altura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante el año.	Flujo del electrolito	Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /h	Medición con flujómetro
			Altura	m	m	Dimensión de diseño
X2 = Condiciones de operación favorables de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	Condiciones de operación favorables del proceso de enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	Medición del flujo electrolítico y altura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	Flujo	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	Medición con flujómetro
			Altura	m	m	Dimensión de diseño

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1 Diseño metodológico

La presente investigación por su naturaleza es aplicada. Por el enfoque es cuantitativo debido a que las variables en estudio son medibles y calculadas a través de ecuaciones de transferencia de calor y termodinámica. En función al nivel de investigación es explicativa y el diseño de la misma es documental.

### 4.2 Método de investigación

#### **Etapas 1 – Recolección de datos de temperatura de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico correspondiente al año 2021**

Se realizó la toma de las temperaturas de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico en la torre de enfriamiento a lo largo del año 2021 mostrados en el anexo 5 (p. 108), con la finalidad de llevar a cabo el análisis de la transferencia de calor de la torre de enfriamiento.

#### **Etapas 2 – Depuración de datos atípicos de temperaturas de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico.**

Se analizó los datos del anexo 5 (p. 108) mediante el uso de gráficos de cajas para determinar todos los puntos atípicos que no serán considerados debido que no son datos representativos para el cálculo de la transferencia de calor en estudio. Por lo tanto, los datos que serán considerados (sin datos atípicos) son los que se utilizarán para los siguientes cálculos en adelante.

Además, se analizó la influencia de la temperatura de ingreso del fluido electrolítico, el flujo del fluido electrolítico al ingreso y la gradiente de temperatura con respecto a la temperatura de salida del fluido electrolítico utilizando graficas de efectos principales.

#### **Etapas 3 – Cálculo de la carga térmica**

Con los datos del anexo 5 (p. 108) sin considerar los datos atípicos se realizó el cálculo de la carga térmica experimental mediante la aplicación de la ecuación (10) y el cálculo de la carga térmica teórica utilizando la ecuación (13) previo

cálculo de las entalpías de entrada y salida del fluido electrolítico mediante el método de Poppe programado en el software Matlab.

#### **Etapa 4 – Determinación los coeficientes globales de transferencia de masa**

Se calculó los coeficientes de transferencia característicos ( $K_a$ ) utilizando la ecuación (89), previo cálculo del número de Merkel asociado a cada valor del anexo 5 (p. 108) sin considerar los datos atípicos, haciendo uso método de Poppe mediante la codificación de una función en Matlab que se muestra a continuación:

```
[Tao, Twbo, Wo, mwo, Isso, Imao, Mepo, HRo, Q]=Contraflujo(Twi, Two, mwi, Pa, Tai, mai, Twbi, d, Wo)
```

##### Entradas

- $T_{wi}$  es la temperatura del electrolito a la entrada del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{wo}$  es la temperatura del electrolito a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $m_{wi}$  es el caudal del electrolito a la entrada del empaquetamiento en kg/s
- $P_a$  es la presión atmosférica en Pa 101325
- $T_{ai}$  es la temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $m_{ai}$  es el caudal de aire seco a la entrada del empaquetamiento en kg/s
- $T_{wbi}$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $d$  es el número de intervalos + 1 o número de puntos.
- $W_o$  es la estimación de la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco

##### Salidas

- $T_{ao}$  es la temperatura de bulbo seco del aire a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{wbo}$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$

- $W_o$  es la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco
- $m_{wo}$  es el caudal de electrolito a la salida del empaquetamiento en kg/s
- $I_{sso}$  e  $I_{mao}$  son las entalpías del aire a la salida del empaquetamiento en J/kg de aire seco
- $Mepo$  es el número de Merkel acorde al método de Poppe
- $H_{Ro}$  es la humedad relativa del aire a la salida del empaquetamiento en %
- $Q$  es la carga térmica en W

Con los valores de los coeficientes  $K_a$  obtenidos en la etapa 4, se obtuvo un valor de coeficiente  $K_a$  promedio característico para las diferentes temperaturas típicas de ingreso del fluido electrolítico a la torre observadas durante la operación.

#### **Etap 5 – Determinación de las condiciones favorables de operación.**

Se calculó nuevos valores de números de Merkel usando la ecuación (89) a partir de los coeficientes  $K_a$  promedios y las nuevas condiciones de alturas de la torre, flujos y temperaturas de ingreso del fluido electrolítico mencionadas en la tabla 2.

A continuación, en la tabla 2 (p. 69) se muestra el diseño experimental:

Factores: 3  
 Réplicas: 1  
 Corridas base: 80  
 Total de corridas: 80  
 Bloques base: 1  
 Total de bloques: 1  
 Número de niveles: 4; 4

**Tabla 2***Diseño experimental*

<b>Número de corrida</b>	<b>Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Altura de la torre (m)</b>	<b>Gradiente de temperatura</b>
1	42	300	9	y1
2	42	325	9	y2
3	42	350	9	y3
4	42	400	9	y4
5	42	300	10	y5
6	42	325	10	y6
7	42	350	10	y7
8	42	400	10	y8
9	42	300	11	y9
10	42	325	11	y10
11	42	350	11	y11
12	42	400	11	y12
13	42	300	12	y13
14	42	325	12	y14
15	42	350	12	y15
16	42	400	12	y16
17	41	300	9	y17
18	41	325	9	y18
19	41	350	9	y19
20	41	400	9	y20
21	41	300	10	y21
22	41	325	10	y22
23	41	350	10	y23
24	41	400	10	y24
25	41	300	11	y25
26	41	325	11	y26
27	41	350	11	y27
28	41	400	11	y28
29	41	300	12	y29
30	41	325	12	y30
31	41	350	12	y31
32	41	400	12	y32
33	40	300	9	y33
34	40	325	9	y34
35	40	350	9	y35
36	40	400	9	y36
37	40	300	10	y37
38	40	325	10	y38

**Tabla 2 (continuación)***Diseño experimental*

<b>Número de corrida</b>	<b>Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Altura de la torre (m)</b>	<b>Gradiente de temperatura</b>
39	40	350	10	y39
40	40	400	10	y40
41	40	300	11	y41
42	40	325	11	y42
43	40	350	11	y43
44	40	400	11	y44
45	40	300	12	y45
46	40	325	12	y46
47	40	350	12	y47
48	40	400	12	y48
49	39	300	9	y49
50	39	325	9	y50
51	39	350	9	y51
52	39	400	9	y52
53	39	300	10	y53
54	39	325	10	y54
55	39	350	10	y55
56	39	400	10	y56
57	39	300	11	y57
58	39	325	11	y58
59	39	350	11	y59
60	39	400	11	y60
61	39	300	12	y61
62	39	325	12	y62
63	39	350	12	y63
64	39	400	12	y64
65	38	300	9	y65
66	38	325	9	y66
67	38	350	9	y67
68	38	400	9	y68
69	38	300	10	y69
70	38	325	10	y70
71	38	350	10	y71
72	38	400	10	y72
73	38	300	11	y73
74	38	325	11	y74
75	38	350	11	y75

**Tabla 2 (continuación)**

*Diseño experimental*

Número de corrida	Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)	Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m <sup>3</sup> /h)	Altura de la torre (m)	Gradiente de temperatura
76	38	400	11	y76
77	38	300	12	y77
78	38	325	12	y78
79	38	350	12	y79
80	38	400	12	y80

Con los nuevos valores de número de Merkel se empleó el método de Poppe aplicando iteraciones hasta obtener la temperatura de salida del fluido electrolítico deseado y se calculó el gradiente de temperatura en función a los diferentes flujos y alturas trabajados propuestos en la tabla 2 y así determinar las condiciones más favorables.

A continuación, se detalla la codificación usada en matlab para calcular los valores respuesta de temperatura de salida mediante la función PerformanceContraflujo:

```
[Tao, Twbo, Wo, mwo, Two, Isso, Imao, HRo, Q]=PerformancePunto  
Contraflujo (Twi, mwi, Pa, Tai, mai, Twbi, d, Mepoe, Wo)
```

#### Entradas

- Twi es la temperatura del electrólito a la entrada del empaquetamiento en °C
- mwi es el caudal de electrólito a la entrada del empaquetamiento en kg/s
- Pa es la presión atmosférica en Pascal
- Tai es la temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del empaquetamiento en °C
- mai es el caudal de aire seco a la entrada del empaquetamiento en kg/s
- Twbi es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del empaquetamiento en °C
- d es el número de intervalos + 1 o número de puntos.
- Wo es la estimación de la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco

- Mepoe es el número de Merkel según el método de Poppe

#### Salidas

- $T_{ao}$  es la temperatura de bulbo seco del aire a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{wbo}$  es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $W_o$  es la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en  $\text{kg}/\text{kg}$  aire seco
- $m_{wo}$  es el caudal de electrólito a la salida del empaquetamiento en  $\text{kg}/\text{s}$
- $T_{wo}$  es la temperatura del electrólito a la salida del empaquetamiento en  $^{\circ}\text{C}$
- $I_{so}$  e  $I_{ma}$  son las entalpías del aire a la salida del empaquetamiento en  $\text{J}/\text{kg}$  de aire seco
- $H_{Ro}$  es la humedad relativa del aire a la salida del empaquetamiento en %
- $Q$  es la carga térmica en  $W$

### **4.3 Población y muestra**

#### Población

En este caso no es aplicable.

#### Muestra

Se elige un solo equipo, que en este caso pertenece al área de electrólisis, siendo una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de 8.75 m de altura, un área transversal de  $36 \text{ m}^2$  sin relleno y con un sistema de aspersion en la parte superior y el ventilador ubicado en la parte lateral frontal inferior.

### **4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado**

El lugar de estudio fue en una refinería de zinc ubicada en la provincia de Lima, Perú, durante el año 2021 – 2022.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información**

**Medición de flujo del electrolito.** Se utilizó método de medición con flujómetro ultrasónico portátil. Las características generales son:

El medidor de flujo ultrasónico tiene una precisión de  $\pm 1\%$  de lectura o 0.03 m/s (0.1 pies / s), lo que sea mayor, repetibilidad y linealidad de  $\pm 0.25\%$ . Trabaja con líquidos limpios en tuberías llenas con menos del 2% de sólidos o burbujas de gas a velocidades de flujo de  $\pm 0.02$  a 12 m/s ( $\pm 0.07$  a 39 pies/s). Este tipo de medidor de caudales de fluidos no generan obstrucciones al flujo, tampoco generan pérdidas de carga, por ello son adecuados para ser instalados en grandes tuberías de suministro de agua (22).

**Medición de temperatura.** Existen diferentes tipos de pirómetro, los más conocidos son el pirómetro óptico, el pirómetro de radiación y el pirómetro infrarrojo. Este último, es el más utilizado, debido a que se caracteriza por ser un sensor de alta precisión durante el registro de amplios rangos de temperatura. Otra ventaja de este tipo de pirómetro es que su costo no es muy elevado y permite medir la temperatura de fluidos u objetos inaccesibles o que se encuentren en movimiento (24). Por lo cual se empleó el termómetro digital infrarrojo tipo pistola con un rango de medición  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ , marca FLUKE modelo 561.

#### **4.6 Análisis y procesamiento de datos**

Para el análisis y procesamiento de los datos tomados se utilizó:

Minitab 19:

- Análisis de puntos atípicos mediante gráfico de cajas
- Análisis de efectos principales
- Resumen general de estadística descriptiva
- Gráfica de series
- Gráfica de superficies
- Gráfica de correlación de Pearson
- Gráfica de interacción
- Prueba de normalidad

Microsoft Excel:

- Ordenamiento de datos

Matlab:

- Programación de funciones para resolución de ecuaciones diferenciales

#### **4.7 Aspectos éticos en investigación**

Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes. Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis; de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 210-2017-CU. Este trabajo cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en los ítems mencionados.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

#### **Etaapa 1 – Recolección de data de temperatura de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico correspondiente al año 2021**

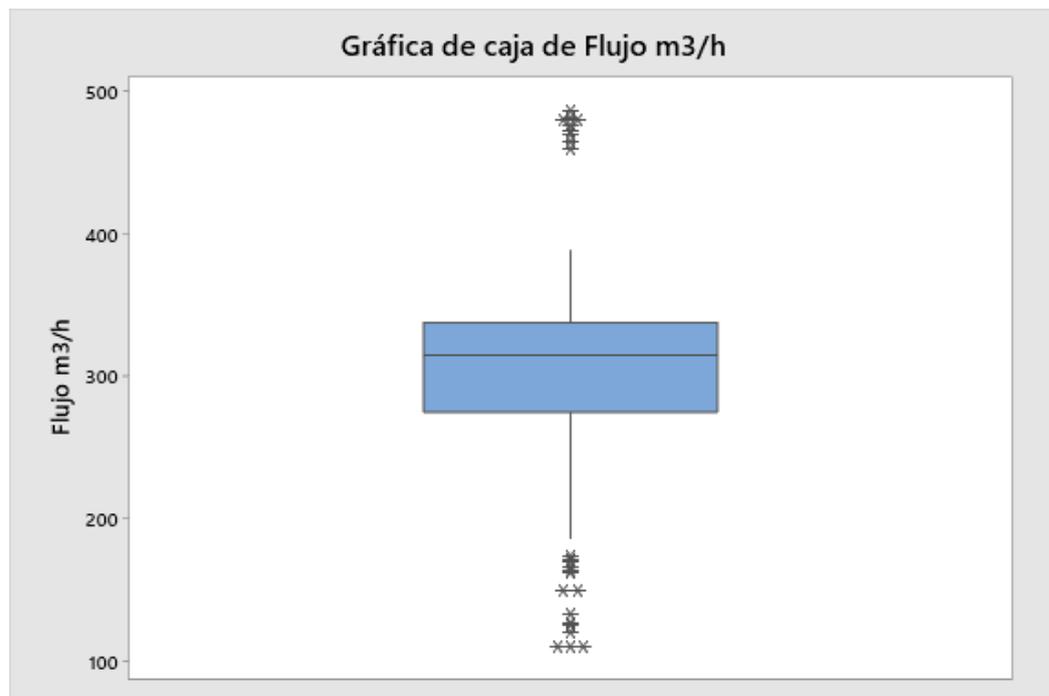
Se registraron lo datos que se encuentran en el anexo 5 (p. 108) y adicional la información de las características fisicoquímicas del electrolito que se encuentran en el anexo 7 (p. 125).

#### **Etaapa 2 – Depuración de datos atípicos de temperaturas de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico.**

Previo al análisis de las condiciones de operación se eliminó los puntos atípicos que arrojó el programa Minitab, a través de la gráfica de cajas mostrado en las figuras 31 y 32 (p. 76), los cuales coinciden con los días de parada de planta y problemas de procesos, dando como resultado una nueva base datos ubicado en el anexo 6 (p. 117) los cuales serán utilizados en la simulación.

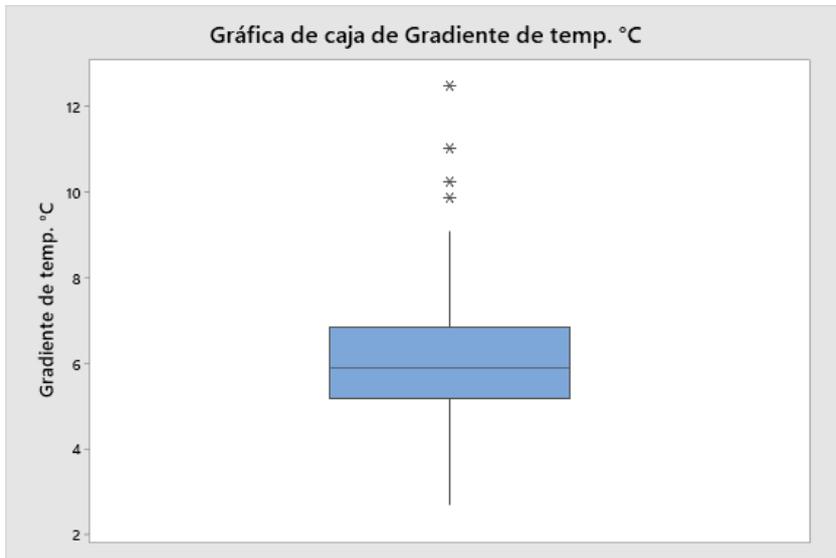
#### **Figura 31**

*Gráfica de caja de flujo m<sup>3</sup>/h.*



**Figura 32**

*Gráfica de caja de gradiente de temperatura °C.*

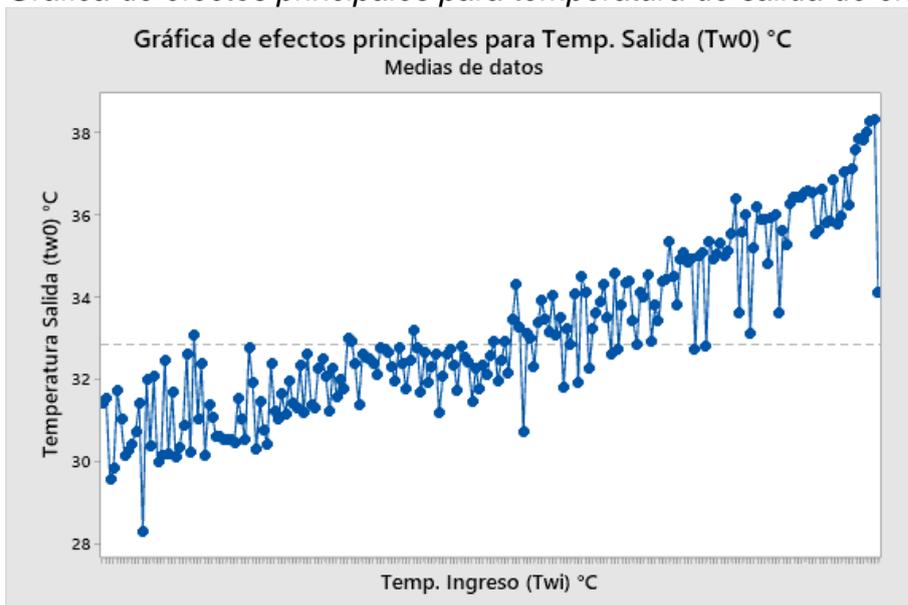


Adicionalmente se calculó el gradiente de temperatura según la ecuación 23, mostrándose los resultados en el anexo 6 (p. 117).

Por último, en las figuras 33, 34 (p. 77) y 35 (p. 77) se muestra la influencia de la temperatura de ingreso del fluido electrolítico, el flujo del fluido electrolítico al ingreso y la gradiente de temperatura con respecto a la temperatura de salida del fluido electrolítico.

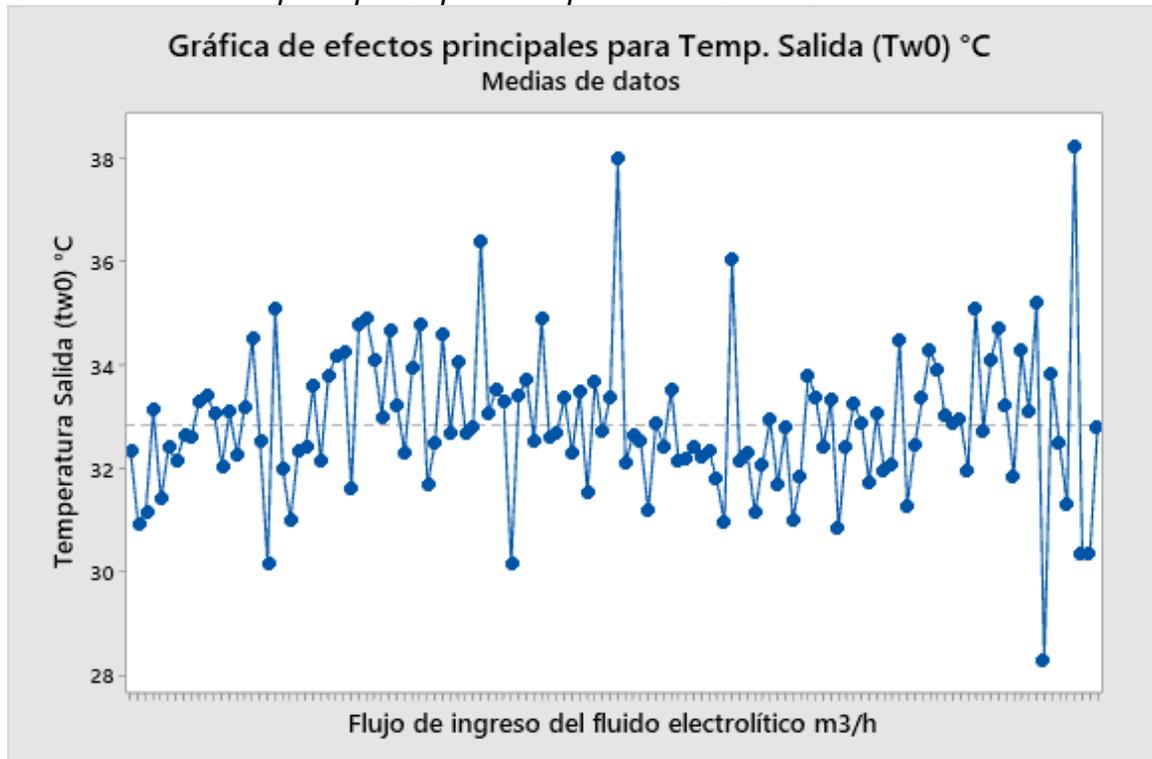
**Figura 33**

*Gráfica de efectos principales para temperatura de salida de electrólito.*



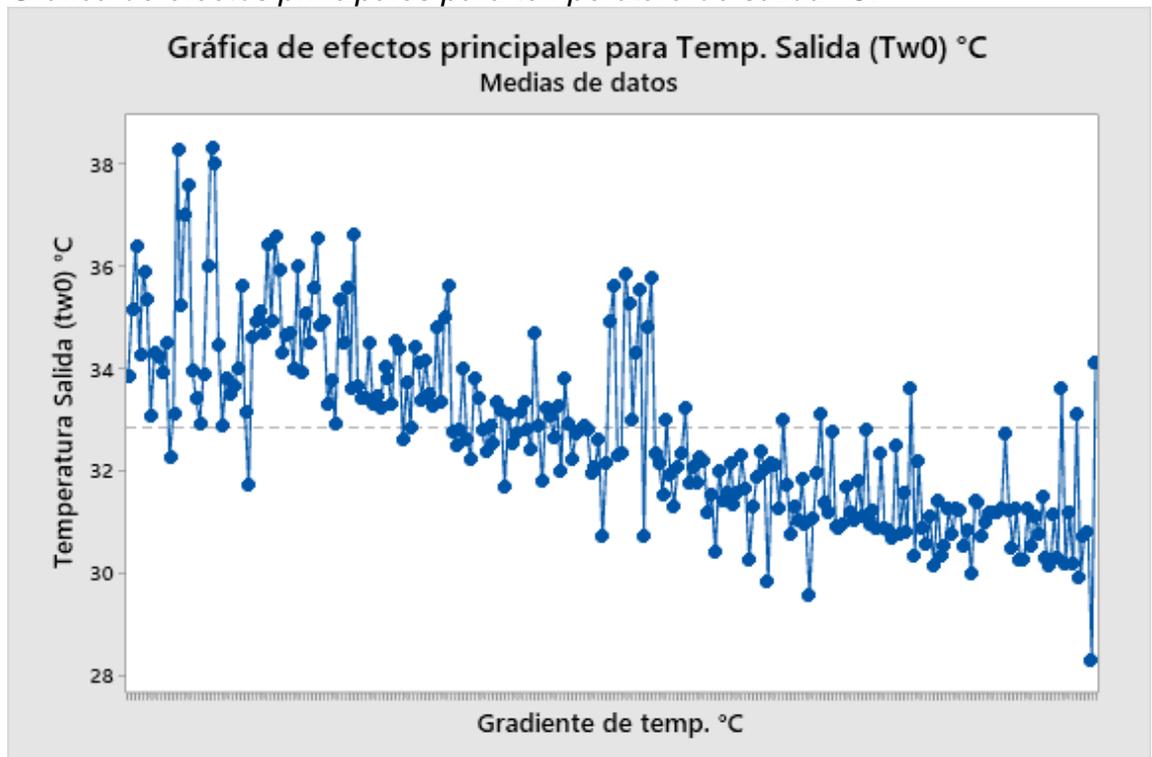
**Figura 34**

*Gráfica de efectos principales para temperatura salida °C.*



**Figura 35**

*Gráfica de efectos principales para temperatura de salida °C.*



Posteriormente se calculó el promedio de las variables que influyen en el proceso de enfriamiento del fluido electrolítico para cada mes del año 2021 los cuales se muestran en la tabla 3 .

**Tabla 3**

*Promedio mensual de temperatura de ingreso, salida y gradiente de temperatura.*

Meses	Promedio de Temperatura ingreso (Twi) °C	Promedio de Temperatura salida (Tw0) °C	Promedio de Gradiente de temperatura °C
Enero	41.30	35.87	5.43
Febrero	40.49	34.69	5.80
Marzo	39.75	34.37	5.38
Abril	38.44	32.47	5.97
Mayo	38.48	33.08	5.40
Junio	38.37	32.10	6.26
Julio	38.28	30.97	7.31
Agosto	38.04	31.02	7.02
Setiembre	37.76	31.24	6.52
Octubre	38.74	32.36	6.37
Noviembre	37.90	32.04	5.85
Diciembre	38.83	33.42	5.42
Promedio anual	38.89	32.84	6.05

### **Etapas 3 – Cálculo de la carga térmica**

Con los datos de anexo 6 (p. 117) se calculó la carga térmica experimental utilizando la ecuación (10) y la carga térmica teórica utilizando la ecuación (13), todo ello previo al cálculo de las entalpías de entrada y salida del fluido electrolítico mediante el método de Poppe programado en el software (ver anexo 8, p. 126).

### **Etapas 4 – Determinación los coeficientes globales de transferencia de masa**

En el anexo 9 (p. 134) se muestran los resultados de los números de Merkel y Ka para todo el año 2021 y se determina un promedio de Ka por temperatura de ingreso el cual se muestra en la tabla 4 (p. 79).

**Tabla 4**

*Valores promedio de Ka para temperaturas de ingreso típicas.*

Temperatura de ingreso °C	Ka promedio
42	0.44
41	0.45
40	0.46
39	0.56
38	0.67

### **Eta**pa 5 – Determinación de las condiciones favorables de operación.

Con los valores de los números de Merkel propuestos y las temperaturas de ingreso promedio del fluido electrolítico, se emplea el método de Poppe aplicando iteraciones hasta obtener la temperatura de salida del fluido electrolítico deseado y realizar el cálculo del gradiente de temperatura en función a los diferentes flujos y alturas trabajados propuestos en la tabla 2 (p. 69) y así determinar las condiciones más favorables.

**Tabla 5**

*Resultados del modelamiento modificando altura y flujo.*

Tao	Twbo	Wo	mwo	Two (temperatura de salida)	lso	lmao	HRO	Q
32.1	31.1	0.0283	104.7	35.8	1.05E+05	1.05E+05	91.5	2.89E+06
32.1	31.2	0.0285	113.7	36.2	1.05E+05	1.05E+05	91.8	2.96E+06
32.2	31.2	0.0286	122.5	36.5	1.06E+05	1.06E+05	91.9	3.00E+06
32.3	31.4	0.0289	140.0	37.1	1.06E+05	1.06E+05	92.1	3.08E+06
32.4	31.5	0.0292	104.7	35.2	1.07E+05	1.07E+05	92.7	3.19E+06
32.5	31.7	0.0294	113.6	35.6	1.08E+05	1.08E+05	92.9	3.26E+06
32.5	31.7	0.0296	122.4	35.9	1.09E+05	1.09E+05	93.1	3.32E+06
32.6	31.9	0.0299	139.9	36.5	1.09E+05	1.09E+05	93.4	3.43E+06
32.6	31.9	0.0299	104.5	34.6	1.10E+05	1.10E+05	93.6	3.44E+06
32.7	32.1	0.0302	113.5	35.0	1.10E+05	1.10E+05	93.9	3.54E+06
32.8	32.2	0.0304	122.3	35.4	1.11E+05	1.11E+05	94.1	3.62E+06
33.0	32.4	0.0308	139.8	36.0	1.12E+05	1.12E+05	94.4	3.73E+06
32.9	32.3	0.0307	104.5	34.1	1.12E+05	1.12E+05	94.6	3.70E+06
33.0	32.5	0.0309	113.4	34.5	1.13E+05	1.13E+05	94.7	3.79E+06
33.1	32.6	0.0312	122.1	34.9	1.13E+05	1.13E+05	95.0	3.89E+06
33.3	32.8	0.0316	139.7	35.6	1.14E+05	1.14E+05	95.3	4.01E+06
31.9	30.5	0.0273	104.7	35.1	1.02E+05	1.02E+05	88.9	2.77E+06

**Tabla 5 (continuación)**

*Resultados del modelamiento modificando altura y flujo.*

<b>Tao</b>	<b>Twbo</b>	<b>Wo</b>	<b>mwo</b>	<b>Two</b> (temperatura de salida)	<b>Isso</b>	<b>lmao</b>	<b>HRo</b>	<b>Q</b>
32.0	30.6	0.0274	113.7	35.4	1.03E+05	1.03E+05	89.1	2.83E+06
32.0	30.7	0.0275	122.4	35.8	1.03E+05	1.03E+05	89.2	2.86E+06
32.1	30.8	0.0278	140.1	36.3	1.04E+05	1.04E+05	89.5	2.96E+06
32.2	31.0	0.0281	104.8	34.5	1.04E+05	1.04E+05	90.2	3.05E+06
32.3	31.1	0.0283	113.6	34.9	1.05E+05	1.05E+05	90.4	3.11E+06
32.4	31.2	0.0285	122.4	35.2	1.06E+05	1.06E+05	90.6	3.18E+06
32.5	31.3	0.0287	140.0	35.8	1.06E+05	1.06E+05	90.8	3.27E+06
32.4	31.4	0.0289	104.7	33.9	1.07E+05	1.07E+05	91.3	3.31E+06
32.5	31.5	0.0291	113.5	34.3	1.07E+05	1.07E+05	91.5	3.38E+06
32.6	31.6	0.0293	122.3	34.7	1.08E+05	1.08E+05	91.7	3.45E+06
32.8	31.8	0.0296	139.8	35.3	1.09E+05	1.09E+05	92.0	3.57E+06
32.7	31.8	0.0295	104.6	33.4	1.09E+05	1.09E+05	92.3	3.54E+06
32.8	31.9	0.0298	113.5	33.8	1.09E+05	1.09E+05	92.6	3.63E+06
32.8	32.0	0.0300	122.1	34.2	1.10E+05	1.10E+05	92.7	3.69E+06
33.0	32.3	0.0305	139.8	34.8	1.11E+05	1.11E+05	93.1	3.85E+06
31.2	28.9	0.0242	104.8	33.9	9.34E+04	9.34E+04	82.3	2.86E+06
31.3	29.0	0.0244	113.7	34.2	9.39E+04	9.39E+04	82.6	2.93E+06
31.3	29.0	0.0245	122.5	34.6	9.43E+04	9.43E+04	82.7	2.97E+06
31.4	29.2	0.0247	140.0	35.1	9.50E+04	9.50E+04	83.0	3.05E+06
31.5	29.4	0.0251	104.6	33.2	9.59E+04	9.59E+04	84.1	3.16E+06
31.6	29.5	0.0253	113.5	33.6	9.65E+04	9.65E+04	84.3	3.23E+06
31.6	29.6	0.0255	122.4	34.0	9.70E+04	9.70E+04	84.5	3.29E+06
31.8	29.8	0.0257	139.9	34.6	9.79E+04	9.79E+04	84.9	3.39E+06
31.7	29.8	0.0259	104.6	32.7	9.81E+04	9.81E+04	85.6	3.42E+06
31.8	30.0	0.0261	113.5	33.1	9.89E+04	9.89E+04	85.9	3.51E+06
31.9	30.1	0.0263	122.2	33.4	9.96E+04	9.96E+04	86.2	3.58E+06
32.0	30.3	0.0267	139.8	34.1	1.01E+05	1.01E+05	86.5	3.70E+06
31.9	30.3	0.0266	104.4	32.1	1.00E+05	1.00E+05	87.1	3.67E+06
32.0	30.4	0.0269	113.4	32.6	1.01E+05	1.01E+05	87.3	3.76E+06
32.1	30.5	0.0271	122.1	33.0	1.02E+05	1.02E+05	87.5	3.83E+06
32.3	30.8	0.0275	139.6	33.6	1.03E+05	1.03E+05	87.9	3.97E+06
31.2	28.6	0.0236	104.7	32.3	9.19E+04	9.19E+04	80.5	3.14E+06
31.3	28.7	0.0238	113.6	32.7	9.25E+04	9.25E+04	80.7	3.20E+06
31.4	28.8	0.0240	122.4	33.0	9.30E+04	9.30E+04	80.9	3.26E+06
31.5	29.0	0.0242	139.9	33.6	9.38E+04	9.38E+04	81.2	3.35E+06
31.4	29.1	0.0246	104.6	31.6	9.45E+04	9.45E+04	82.6	3.44E+06
31.5	29.3	0.0248	113.5	32.0	9.53E+04	9.53E+04	82.9	3.53E+06
31.6	29.4	0.0250	122.2	32.4	9.57E+04	9.57E+04	83.0	3.58E+06
31.8	29.6	0.0253	139.8	33.1	9.67E+04	9.67E+04	83.3	3.69E+06
31.6	29.6	0.0254	104.5	31.0	9.69E+04	9.69E+04	84.5	3.71E+06
31.7	29.8	0.0257	113.4	31.5	9.76E+04	9.76E+04	84.7	3.80E+06

**Tabla 5 (continuación)***Resultados del modelamiento modificando altura y flujo.*

Tao	Twbo	Wo	mwo	Two (temperatura de salida)	Isso	lmao	HRO	Q
31.8	29.9	0.0259	122.1	31.9	9.83E+04	9.83E+04	84.9	3.88E+06
32.0	30.1	0.0263	139.6	32.5	9.96E+04	9.96E+04	85.3	4.03E+06
31.8	30.0	0.0261	104.4	30.5	9.88E+04	9.88E+04	86.1	3.94E+06
31.9	30.2	0.0264	113.3	31.0	9.98E+04	9.98E+04	86.3	4.05E+06
32.0	30.3	0.0267	122.0	31.4	1.01E+05	1.01E+05	86.6	4.15E+06
32.2	30.6	0.0271	139.6	32.1	1.02E+05	1.02E+05	87.0	4.31E+06
30.9	28.4	0.0234	104.6	30.9	9.09E+04	9.09E+04	81.3	3.32E+06
31.0	28.5	0.0236	113.5	31.3	9.16E+04	9.16E+04	81.6	3.40E+06
31.1	28.7	0.0238	122.3	31.6	9.22E+04	9.22E+04	81.8	3.47E+06
31.2	28.8	0.0241	139.9	32.3	9.30E+04	9.30E+04	82.1	3.57E+06
31.1	29.0	0.0244	104.5	30.2	9.37E+04	9.37E+04	83.7	3.64E+06
31.2	29.1	0.0246	113.4	30.6	9.44E+04	9.44E+04	83.9	3.72E+06
31.3	29.2	0.0248	122.2	31.0	9.50E+04	9.50E+04	84.1	3.79E+06
31.5	29.5	0.0252	139.7	31.7	9.62E+04	9.62E+04	84.5	3.93E+06
31.2	29.4	0.0252	104.4	29.6	9.58E+04	9.58E+04	85.6	3.89E+06
31.4	29.6	0.0255	113.3	30.1	9.67E+04	9.67E+04	85.9	4.00E+06
31.5	29.7	0.0257	122.0	30.5	9.75E+04	9.75E+04	86.1	4.09E+06
31.7	30.0	0.0261	139.6	31.2	9.89E+04	9.89E+04	86.5	4.24E+06
31.3	29.8	0.0259	104.3	29.1	9.78E+04	9.78E+04	87.4	4.12E+06
31.5	30.0	0.0262	113.2	29.6	9.89E+04	9.89E+04	87.7	4.24E+06
31.7	30.2	0.0265	122.0	30.0	9.98E+04	9.98E+04	88.0	4.36E+06
31.9	30.5	0.0270	139.5	30.7	1.01E+05	1.01E+05	88.2	4.52E+06

**Tabla 6***Datos de gradiente de temperatura posterior a la variación de altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito.*

Temp. Ingreso (Twi) °C	Two (temperatura de salida)	Gradiente de temperatura °C
42	35.45	6.55
42	35.80	6.20
42	36.40	5.60
42	36.90	5.10
42	34.80	7.20
42	35.15	6.85
42	35.80	6.20
42	36.35	5.65

**Tabla 6 (continuación)**

*Datos de gradiente de temperatura posterior a la variación de altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito.*

<b>Temp. Ingreso (Twi) °C</b>	<b>Two (temperatura de salida)</b>	<b>Gradiente de temperatura °C</b>
42	34.20	7.80
42	34.60	7.40
42	35.30	6.70
42	35.85	6.15
42	33.70	8.30
42	34.10	7.90
42	34.80	7.20
42	35.40	6.60
41	35.50	5.50
41	35.80	5.20
41	36.35	4.65
41	36.75	4.25
41	34.90	6.10
41	35.25	5.75
41	35.80	5.20
41	36.25	4.75
41	34.40	6.60
41	34.75	6.25
41	35.35	5.65
41	35.85	5.15
41	33.90	7.10
41	34.30	6.70
41	34.90	6.10
41	35.45	5.55
40	34.65	5.35
40	34.95	5.05
40	35.45	4.55
40	35.90	4.10
40	34.05	5.95
40	34.40	5.60
40	34.95	5.05
40	35.40	4.60
40	33.50	6.50
40	33.85	6.15
40	34.45	5.55
40	34.95	5.05

**Tabla 6 (continuación)**

*Datos de gradiente de temperatura posterior a la variación de altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito.*

<b>Temp. Ingreso (Twi) °C</b>	<b>Two (temperatura de salida)</b>	<b>Gradiente de temperatura °C</b>
40	33.00	7.00
40	33.40	6.60
40	34.05	5.95
40	34.55	5.45
39	33.40	5.60
39	33.70	5.30
39	34.25	4.75
39	34.70	4.30
39	32.80	6.20
39	33.15	5.85
39	33.75	5.25
39	34.20	4.80
39	32.25	6.75
39	32.60	6.40
39	33.25	5.75
39	33.75	5.25
39	31.75	7.25
39	32.15	6.85
39	32.80	6.20
39	33.35	5.65
38	31.35	6.65
38	31.70	6.30
38	32.35	5.65
38	32.85	5.15
38	30.75	7.25
38	31.10	6.90
38	31.75	6.25
38	32.30	5.70
38	30.15	7.85
38	30.55	7.45
38	31.25	6.75
38	31.85	6.15
38	29.65	8.35
38	30.10	7.90
38	30.80	7.20
38	31.40	6.60

**Tabla 7***Flujo de ingreso y altura favorable*

Número de corrida	Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)	Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m <sup>3</sup> /h)	Altura de la torre (m)	Two (temperatura de salida)	Gradiente de temperatura °C
13	42	300	12	33.70	8.30
29	41	300	12	33.90	7.10
45	40	300	12	33.00	7.00
61	39	300	12	31.75	7.25
77	38	300	12	29.65	8.35

**Tabla 8**

Comparación de gradientes de temperatura experimental y simulación

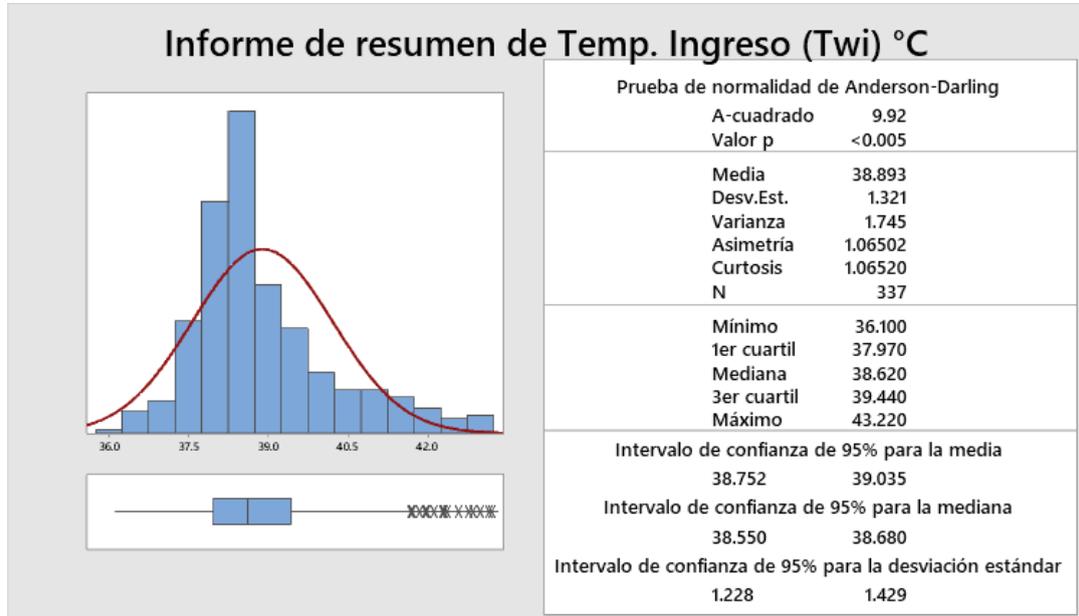
Meses	Promedio de Temperatura ingreso (Twi) °C	Promedio de gradiente 2021	Promedio gradiente simulación	Incremento
Enero	41.30	5.43	7.45	2.02
Febrero	40.49	5.80	7.05	1.25
Marzo	39.75	5.38	7.06	1.68
Abril	38.44	5.97	7.86	1.89
Mayo	38.48	5.40	7.82	2.42
Junio	38.37	6.26	7.94	1.68
Julio	38.28	7.31	8.04	0.73
Agosto	38.04	7.02	8.30	1.28
Setiembre	37.76	6.52	8.61	2.09
Octubre	38.74	6.37	7.53	1.16
Noviembre	37.90	5.85	8.46	2.61
Diciembre	38.83	5.42	7.43	2.02
<b>Total general</b>	<b>38.86</b>	<b>6.06</b>	<b>7.80</b>	<b>1.73</b>

## 5.2 Resultados inferenciales

Se analizó el comportamiento anual y mensual de la temperatura de ingreso del fluido electrolítico, la temperatura de salida del fluido electrolítico, la gradiente de temperatura y el flujo mediante la estadística descriptiva mostrada en las figuras 36 (p. 85), 37 (p. 85), 38 (p. 86) y 39 (p. 86).

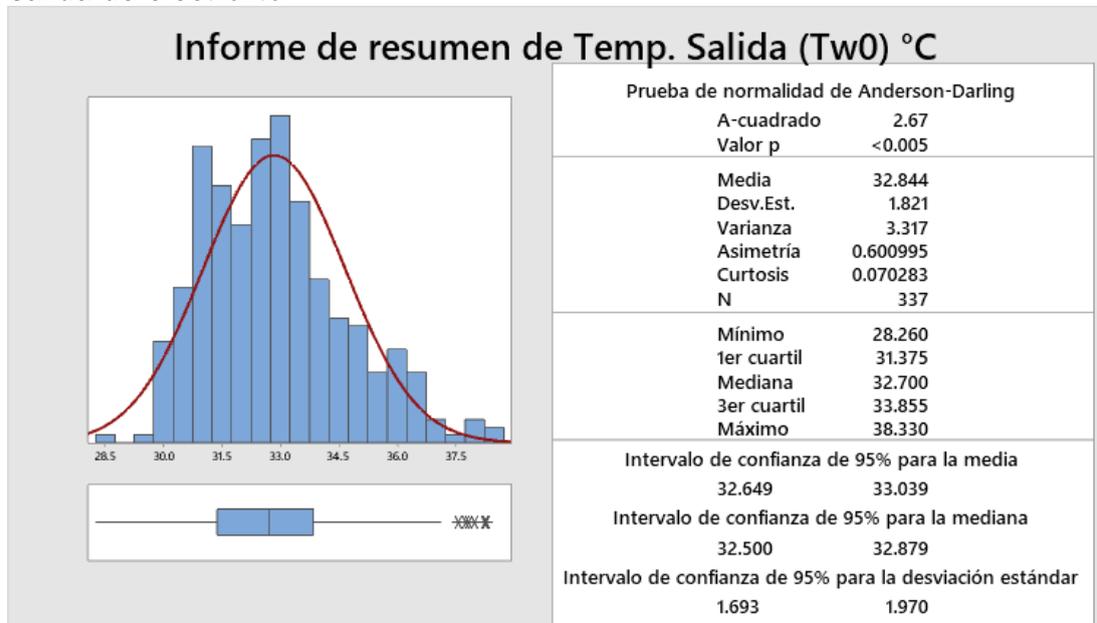
**Figura 36**

*Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de ingreso de electrólito.*



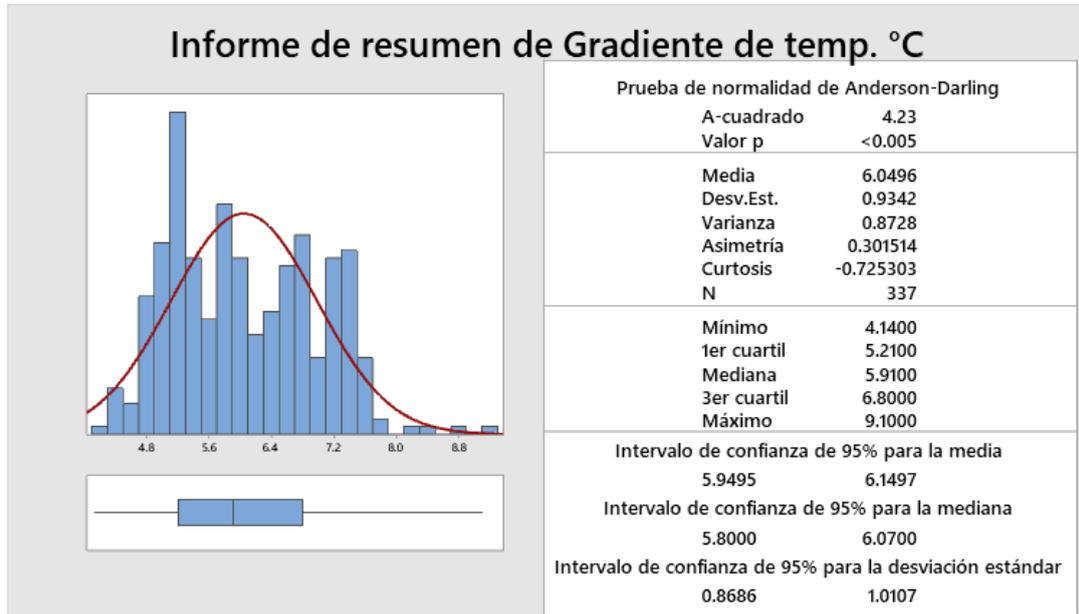
**Figura 37**

*Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de salida de electrólito.*



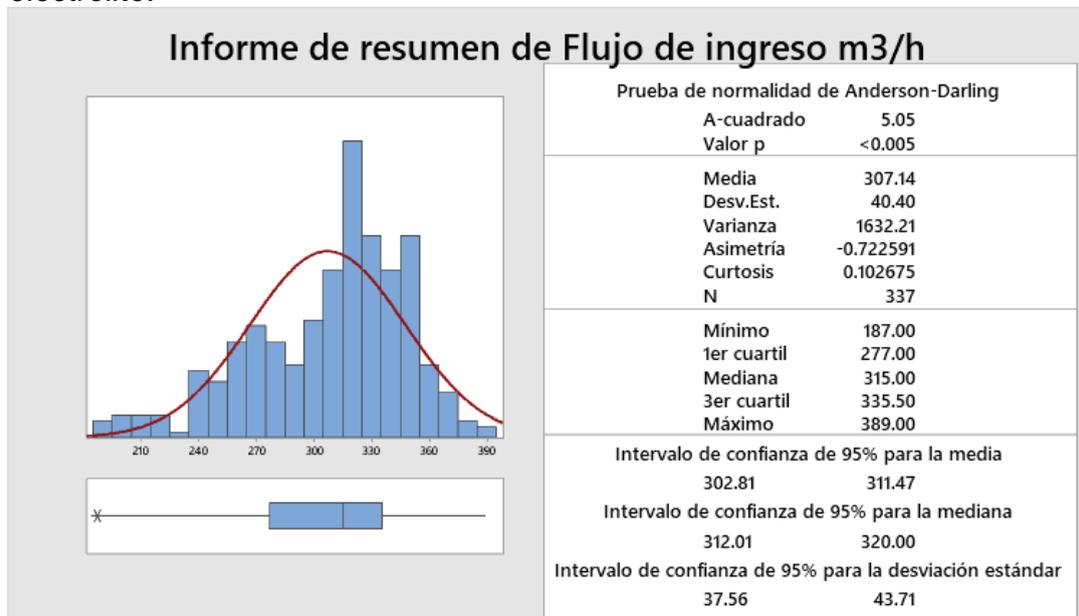
**Figura 38**

*Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de temperatura de salida de electrólito.*



**Figura 39**

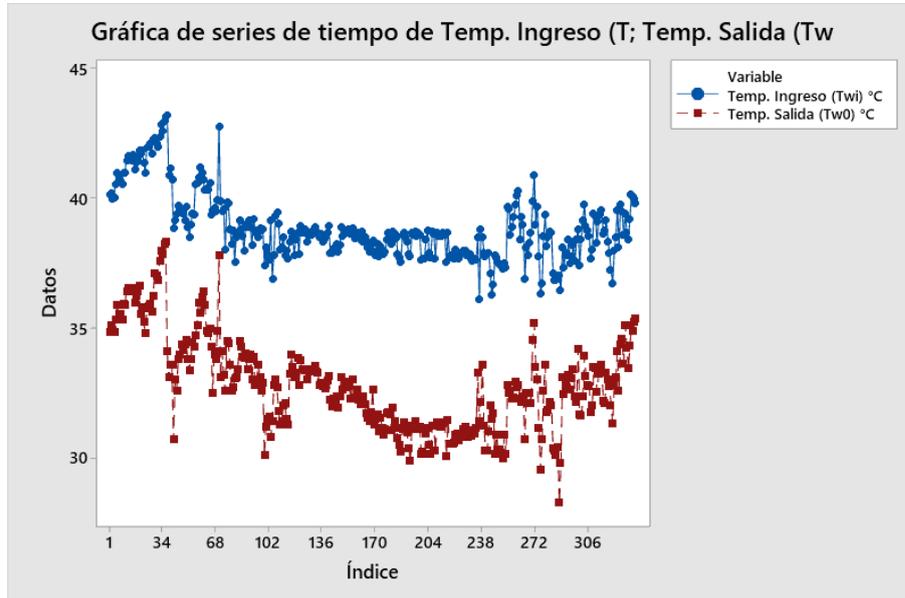
*Informe resumen de estadística descriptiva para la variable de flujo del electrólito.*



La figura 40 (p. 87) detalla el comportamiento de la temperatura de ingreso y salida durante las diferentes estaciones del año 2021 de los datos del anexo 6 (p. 117).

## Figura 40

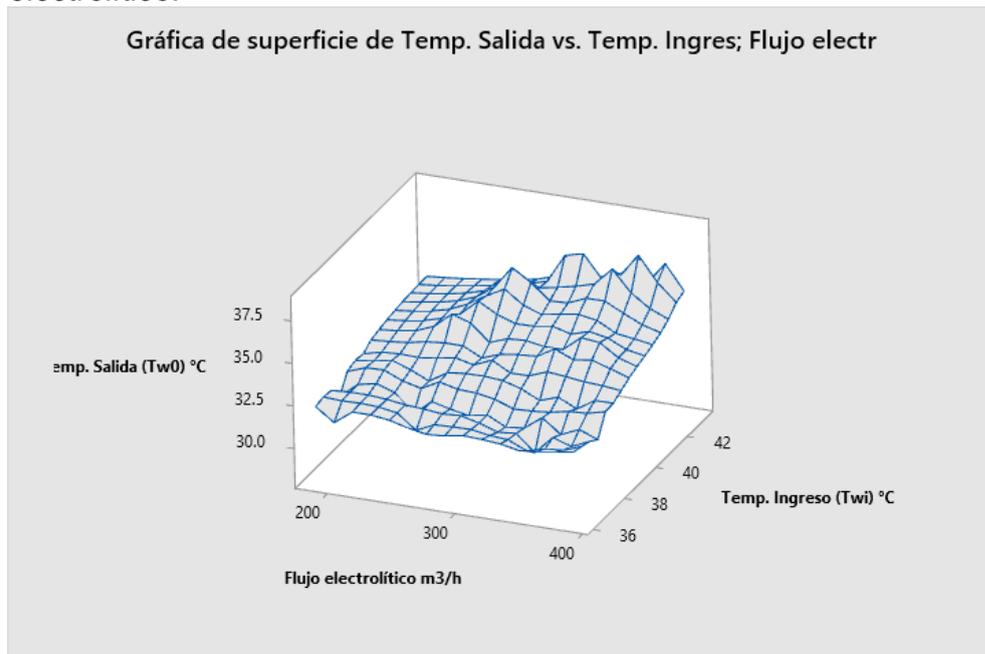
Gráfica de tiempo vs las variables de temperatura de ingreso y salida.



Posteriormente se realiza una gráfica de superficie para la temperatura de salida (Tw0) vs temperatura de ingreso del electrolito (Twi); flujo electrolítico de ingreso en m<sup>3</sup>/h la cual se presenta en la figura 41.

## Figura 41

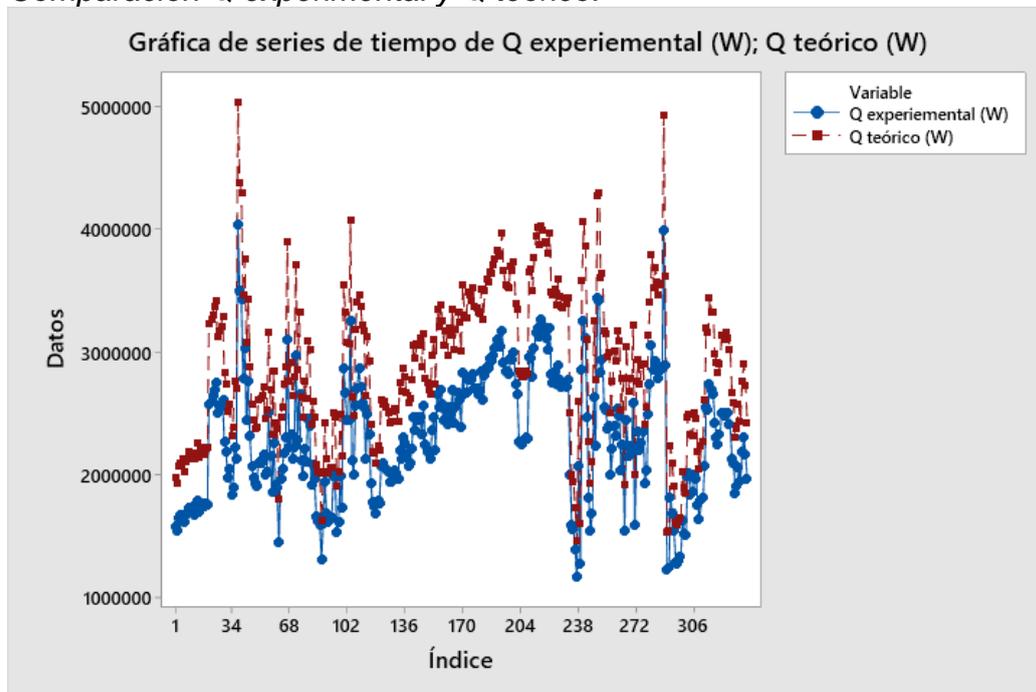
Superficie de temperatura de salida vs. temperatura de ingreso y Flujo electrolítico.



Se realiza una comparación y una correlación de los resultados mencionados en el anexo 8 (p. 126) los cual se representa en la figura 42 y 43 respectivamente.

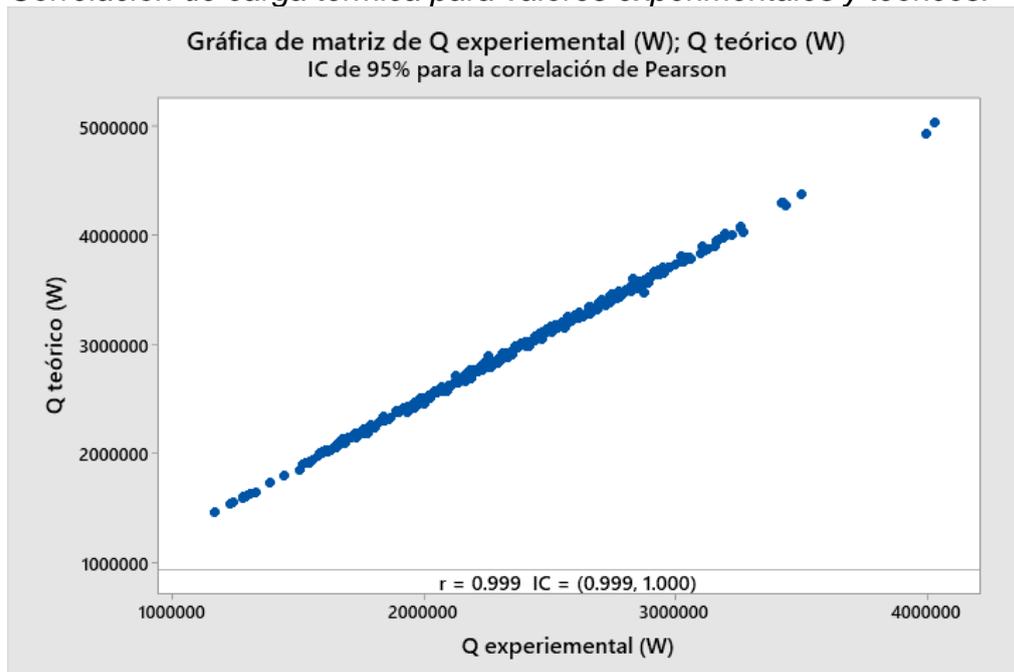
**Figura 42**

*Comparación Q experimental y Q teórico.*



**Figura 43**

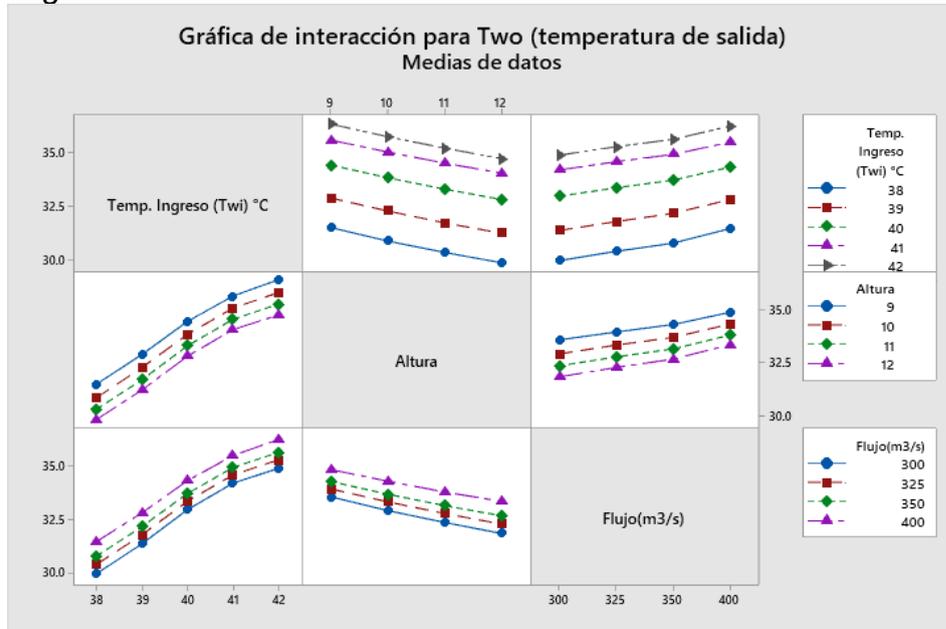
*Correlación de carga térmica para valores experimentales y teóricos.*



Posteriormente se realiza el análisis de interacciones y de efectos principales con resultados en la tabla 5 los cuales se muestra en las figuras 44 y 45.

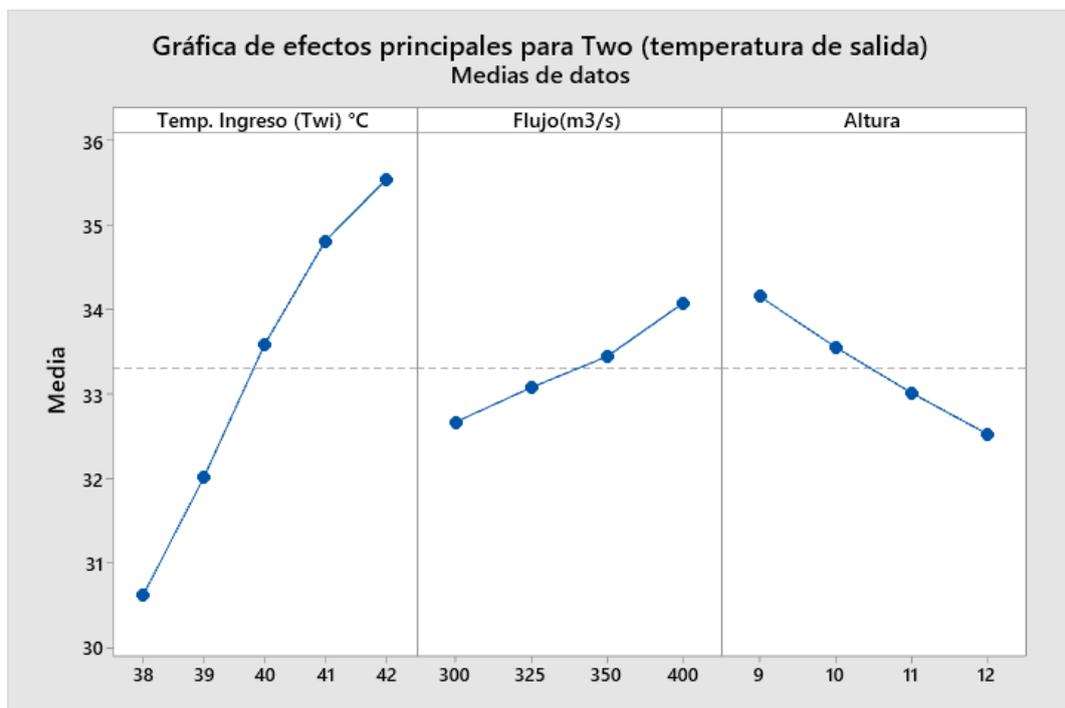
**Figura 44**

*Gráfica de interacción para temperatura de salida, según resultados de modelamiento.*



**Figura 45**

*Gráfica de efectos para temperatura de salida.*



## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### Hipótesis general

Las condiciones favorables para incrementar el gradiente de temperatura se establecen mediante la variación de la altura de la torre en un rango de 2 a 4 metros y un rango de flujo de ingreso del fluido electrolítico de 300 a 400 m<sup>3</sup>/h a la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.

De la tabla 3 (p. 78) se observó que en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre la gradiente de temperatura es menor a 6 °C por ende se evidenció deficiencia en la transferencia de calor en dichos meses.

En la figura 40 (p. 87) se observa un aumento de temperatura de salida en los meses cálidos y un descenso de la temperatura de salida en los meses fríos lo que sustenta la afirmación sobre deficiencia en la operación de enfriamiento en la torre.

Se observa en la figura 41 (p. 87) que un incremento en la temperatura de ingreso se produce una mayor temperatura de salida como es de esperarse a pesar de las condiciones variables como el flujo electrolítico a lo largo de todo el año, y a la vez para el caso del flujo electrolítico a mayores flujos le corresponde también mayores temperaturas de salida debido a la capacidad de la torre.

De las figuras 36 (p. 85), 37 (p. 85), 38 (p. 86) y 39 (p. 86) se observó que aplicando la prueba de normalidad de Anderson – Darling, el valor de p es menor a 0.005 en todas las variables por lo que se concluye que los datos no siguen una distribución normal siendo no paramétricos.

En la figura 43 (p. 88) se observó una clara relación de los valores de Q experimental y Q teórico obtenidos mediante el método de Poppe para los valores experimentales que a la vez demuestra un valor de índice de correlación de  $r=0.999$ .

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 8 (p. 84) se evidenció un

incremento de 1.73 °C del gradiente de temperatura con un flujo de ingreso del electrolito de 300 m<sup>3</sup>/h y una altura de la torre 12 m, garantizando una temperatura de salida menor a 36 °C como se evidencia en la figura 45 (p. 89) que favorece a la estabilidad del proceso y la electrodeposición del zinc.

#### Hipótesis específicas

Las condiciones de operación que influyen en el gradiente de temperatura son la altura de la torre, el flujo y la temperatura de ingreso del fluido electrolítico. De la evaluación de la influencia de parámetros que se encuentran en la figura 45 (p. 89) se observó que la temperatura de salida del fluido electrolítico es influenciada por menores temperaturas de ingreso del fluido electrolítico, valores más bajos de flujo del fluido electrolítico y mayores alturas de la torre.

El incremento de la altura de la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo a un mínimo de 3 metros y un flujo máximo de 300 m<sup>3</sup>/h establecen la relación favorable.

Con respecto a la tabla 7 (p. 84), se dedujo que con una altura de 12 m de la torre de enfriamiento y un flujo de 300 m<sup>3</sup>/h, se consigue el incremento de gradiente deseado que garantiza estabilidad del proceso y no afecta a la productividad de este.

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

De acuerdo a Calderón y López (11), en la tesis “Modelamiento y Simulación de una columna de enfriamiento de tiro forzado, contrastada con curvas experimentales a nivel piloto”, concluye que para llevar a cabo el diseño de y construcción de una torre de enfriamiento es prescindible hacer uso de herramientas matemáticas que puedan ayudar a predecir las condiciones adecuadas de diseño, lo que permitirá disminuir los costos y que para la resolución de ecuaciones diferenciales obtenidas de la aplicación de modelos matemáticos es de gran apoyo el uso del programa Matlab.

En nuestra tesis se reafirma la importancia del uso de las herramientas digitales como el Matlab para la resolución del método de Poppe para el cálculo

de las variables de importancia en la transferencia de calor en una torre de enfriamiento, principalmente la del número de Merkel y la temperatura de salida del fluido líquido que se esté trabajando.

Aguilar (3), en su tesis “Diseño y optimización de una torre de enfriamiento de tiro inducido”, Realizó una serie de pruebas con diferentes flujos de aire de entrada al sistema y gastos de alimentación de agua. Concluyendo que, el coeficiente de transferencia de masa no es constante, debido a que depende de las condiciones de operación con las cuales se está trabajando. Asimismo, señaló que, el flujo de alimentación y la temperatura son parámetros que determinan la condición de operación de la torre de enfriamiento y que pueden afectar la eficiencia de la torre.

De acuerdo con los resultados de nuestra investigación se realizaron diferentes pruebas variando los flujos de ingreso del electrolito ya que de acuerdo con las condiciones y el tipo de torre no se puede variar los flujos de ingreso de aire. Adicionalmente se observó que los coeficientes de transferencia de calor no se mantienen constantes ya que dependen de las mismas condiciones de operación a lo largo de todo el año. Y para concluir se identificó que tanto la temperatura de ingreso del fluido líquido, el flujo del electrolito y la altura de la torre son variables que influyen en el performance de la torre.

### **6.3 Responsabilidad ética**

Los autores de la presente investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la investigación de la Universidad Nacional del Callao a través de la Resolución del Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

## VII. CONCLUSIONES

Se determinó que las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de fluido electrolítico son 12 m de altura de la torre y 300 m<sup>3</sup>/h de flujo de ingreso del electrolito, obteniéndose un incremento de 1.73 °C (ver tabla 8).

Se determinó en la evaluación que los parámetros que influyen sobre el incremento de gradiente de temperatura son: temperaturas bajas de ingreso, valores bajos de flujo y mayores alturas (ver figura 45).

Se determinó que a una altura de 12 m de la torre de enfriamiento y un flujo de 300 m<sup>3</sup>/h, se consigue un incremento de gradiente deseado que garantiza estabilidad del proceso (ver tabla 7).

## **VIII.RECOMENDACIONES**

Considerar la toma de humedad a la salida del aire de la torre para evaluar la pérdida de masa del fluido electrolítico.

Realizar corridas a escala laboratorio aplicando las condiciones encontradas en el método teórico de Poppe aplicado en esta investigación.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RODERICK, S. *The extractive metallurgy of zinc*. Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2005.
- (2) CARÍAS, A. *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el área de cogeneración, ingenio Tzulá*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010.
- (3) AGUILAR, H. *Diseño y optimización de una torre de enfriamiento de tiro inducido*. Ciudad de México: Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, Instituto Politécnico Nacional. 2017.
- (4) MENDOZA, J. Y GALLARDO, A. *Diseño y construcción de un prototipo de torre de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana. 2016.
- (5) PORTERO, Y VALAREZO, S. *Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de agua por evaporación de tiro inducido*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2012.
- (6) SUBHABRATA Y GARDI. *Process equipment and plant design*. Amsterdam: Elsevier. 2020. ISBN: 978-0-12-814885-3. Disponible en: [https://books.google.com.pe/books?id=kCToDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Process+equipment+and+plant+design.&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Process%20equipment%20and%20plant%20design.&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=kCToDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Process+equipment+and+plant+design.&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Process%20equipment%20and%20plant%20design.&f=false).
- (7) APAZA, J. *Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de tiro forzado para la industria Plastic Metal*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés. 2014.
- (8) GONZÁLES, O. *Desarrollo de una metodología para el mejoramiento del diseño del aspersor de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2018.
- (9) CELESTINO PORRAS, S. Y FERNANDEZ PAUCAR, H. *Rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro forzado en contracorriente*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. 2017.
- (10) LÓPEZ, A. *Diseño e implementación de una torre de enfriamiento con un relleno alternativo identificando las correlaciones de la tasa global de transferencia de calor y caída de presión*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2019.
- (11) CALDERÓN, S. Y MEZA, F. *Modelamiento y simulación de una columna*

*de enfriamiento de tiro forzado, contrastada con curvas experimentales a nivel piloto.* Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química. 2016.

(12) SILVA, W. Y ARAMBURÚ, V. *Calidad de los efluentes líquidos, en el proceso de optimización de las torres de enfriamiento de la refinería de zinc de Cajamarquilla, período 2013 a 2014.* Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2015.

(13) URRUTIA, F. *Evaluación de la eficiencia de la torre de enfriamiento de la planta de coque, compañía siderúrgica Huachipato.* Concepción: Universidad del Bio-Bio. 2014.

(14) BUSTOS, L. *Propuesta de torre de enfriamiento para una termoeléctrica.* Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. 2018.

(15) GONZÁLEZ, J. *Evaluación térmica de las torres de enfriamiento de la refinería el Palito - PDVSA.* Valencia: Universidad de Carabobo. 2013.

(16) DEL OLMO, V. *Diseño y simulación de torres de refrigeración húmedas.* Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2013.

(17) CENGEL, A. Y GHAJAR, J. *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones.* 4ta edición. México: Mc Graw Hill. ISBN: 978-0-07-339812-9. 2011.

(18) ACUÑA, A Y RIVAS, Y. *Evaluación de la precipitación de la impureza (Cobalto) en una solución de sulfato de zinc empleando polvo de zinc.* Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería Química. 2018.

(19) CHAVEZ, F. Y ALBAN, E. *Diseño teórico y selección general de torres de enfriamiento de tiro mecánico.* Colombia. 1995.

(20) FLORES, E. *Diseño e implementación de un sistema de enfriamiento para molinos de bolas.* Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 2016.

(21) IMAZ, N. *Aplicación de técnicas de electrodeposición mediante pulsos de corriente para la obtención de recubrimientos metálicos.* Barcelona: Universidad de Barcelona. 2013.

(22) GARCÍA, L. *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado.* Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.

(23) METTLER TOLEDO. [Consulta: 8 de febrero de 2022]. Disponible en: [https://www.mt.com/int/es/home/applications/Application\\_Browse\\_Labor](https://www.mt.com/int/es/home/applications/Application_Browse_Labor)

atory\_Analytics/Density/density-measurement.html.

(24) MUNIVE, J. *Trabajo de investigación acerca de sistemas de inyección zamak en cámara caliente para la manufactura a alta presión de piezas de reguladores de flujo de gas a 300 gr de masa para una producción de 1200 unidades por jornada laboral*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. 2020.

(25) CASTILLO, O. et al. *Modelación y simulación de procesos de transferencia de masa en ingeniería química*. El Salvador: Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 2019.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

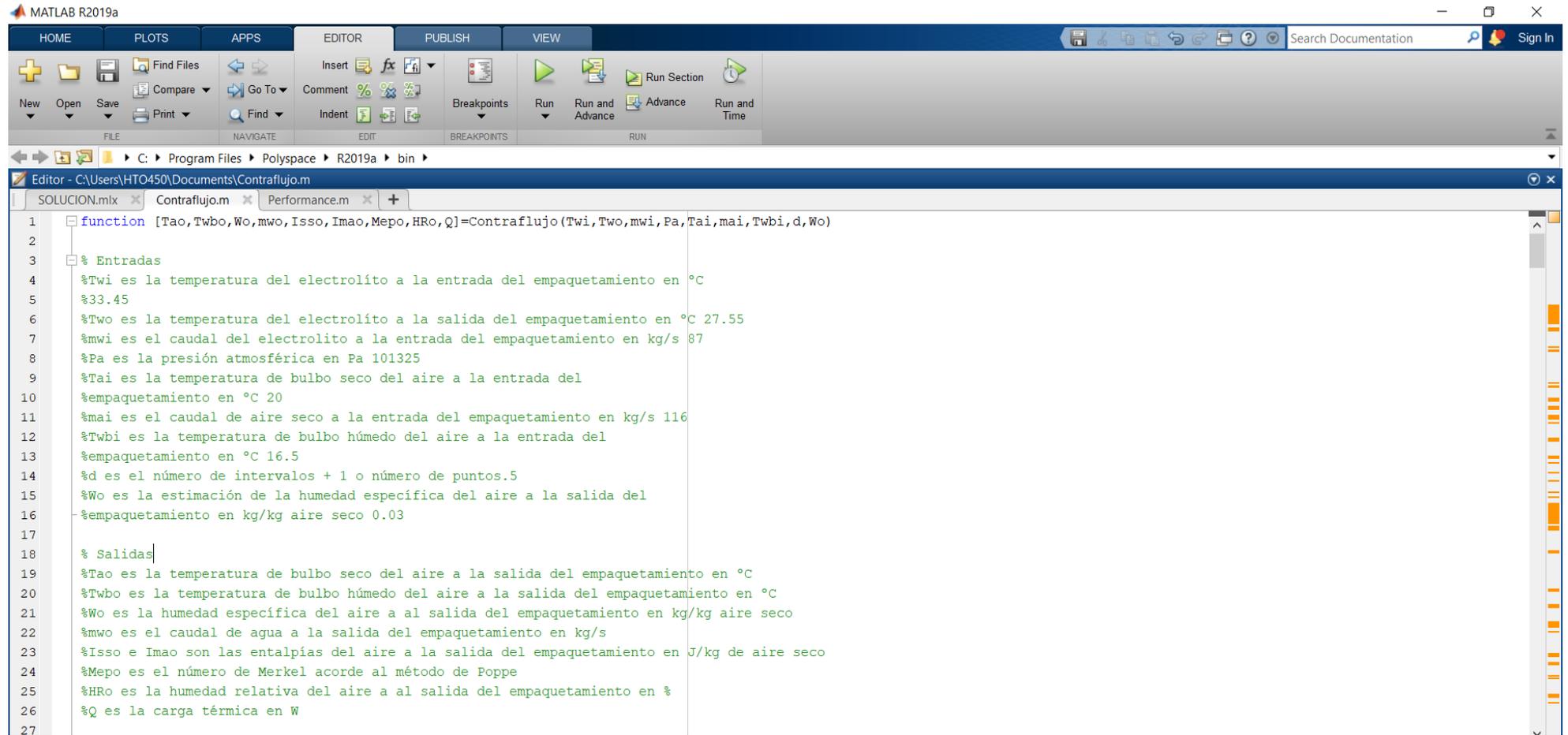
### Matriz de consistencia

“Determinación de las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de un fluido electrolítico”

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores
<b>General</b>					
¿Cómo determinar las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de fluido electrolítico?	Determinar las condiciones favorables para el incremento del gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo de fluido electrolítico.	Las condiciones favorables para incrementar el gradiente de temperatura se establecen mediante la variación de la altura de la torre en un rango de 2 a 4 metros y un rango de flujo de ingreso del fluido electrolítico de 300 a 400 m <sup>3</sup> /h a la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	<b>Dependiente</b> Y = Gradiente de temperatura de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo	<b>Magnitud</b> Gradiente de temperatura	Unidad °C
<b>Específicos</b>					
¿Cuáles son las condiciones de operación para el enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante todo el año?	Determinar las condiciones de operación para el enfriamiento de un fluido electrolítico de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante todo el año.	Las condiciones de operación que influyen en el gradiente de temperatura son la altura de la torre, el flujo y la temperatura de ingreso del fluido electrolítico.	<b>Independiente</b> X2 = Condiciones de operación de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo durante el año.	<b>Magnitud</b> Flujo  Altura	Unidad m <sup>3</sup> /h  m
¿Cuál es la relación favorable entre la altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito durante la transferencia de calor en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo?	Determinar la relación favorable entre la altura de la torre y el flujo de ingreso del electrolito durante la transferencia de calor en una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	El incremento de la altura de la torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo a un mínimo de 3 metros y un flujo máximo de 300 m <sup>3</sup> /h establecen la relación favorable.	X3 = Condiciones de operación favorables de una torre de enfriamiento de tiro forzado a contraflujo.	Flujo  Altura	Medición con flujómetro  Dimensión de diseño

## ANEXO 2

### Codificación en matlab contraflujo.m



The image shows the MATLAB R2019a editor interface. The title bar indicates the file path: C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin. The editor window displays the code for 'Contraflujo.m'. The code is a function that takes several input parameters and returns a vector of output parameters. The code is as follows:

```
1 function [Tao, Twbo, Wo, mwo, Isso, Imao, Mepo, HRo, Q]=Contraflujo(Twi, Two, mwi, Pa, Tai, mai, Twbi, d, Wo)
2
3 % Entradas
4 %Twi es la temperatura del electrolito a la entrada del empaquetamiento en °C
5 %33.45
6 %Two es la temperatura del electrolito a la salida del empaquetamiento en °C 27.55
7 %mwi es el caudal del electrolito a la entrada del empaquetamiento en kg/s 87
8 %Pa es la presión atmosférica en Pa 101325
9 %Tai es la temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del
10 %empaquetamiento en °C 20
11 %mai es el caudal de aire seco a la entrada del empaquetamiento en kg/s 116
12 %Twbi es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del
13 %empaquetamiento en °C 16.5
14 %d es el número de intervalos + 1 o número de puntos.5
15 %Wo es la estimación de la humedad específica del aire a la salida del
16 %empaquetamiento en kg/kg aire seco 0.03
17
18 % Salidas
19 %Tao es la temperatura de bulbo seco del aire a la salida del empaquetamiento en °C
20 %Twbo es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del empaquetamiento en °C
21 %Wo es la humedad específica del aire a al salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco
22 %mwo es el caudal de agua a la salida del empaquetamiento en kg/s
23 %Isso e Imao son las entalpías del aire a la salida del empaquetamiento en J/kg de aire seco
24 %Mepo es el número de Merkel acorde al método de Poppe
25 %HRo es la humedad relativa del aire a al salida del empaquetamiento en %
26 %Q es la carga térmica en W
27
```

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

Insert Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run Section Advance Run and Time

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Editor - C:\Users\HTO450\Documents\Contraflujo.m

SOLUCION.mlx Contraflujo.m Performance.m

```

27
28
29 %Valores iniciales:
30
31 VarTw=(Twi-Two)/(d-1); %Variación de temperatura del agua en cada intervalo
32 Ifgwo=3.4831814*10^6-(5.8627703*10^3)*273.15+12.139568*273.15^2-(1.40290431*10^(-2))*273.15^3; %Calor latente del agua en J/kg
33 W(d)=Wo; %Estimación de la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento para empezar el bucle en kg/kg aire seco
34 Wo=0; %Inicio del bucle
35 counter=0;%Contador de iteraciones sobre W(d)
36
37 while Wo~=W(d) %Bucle principal de resolución realimentado por el valor de humedad específica de salida
38
39 Wo=W(d);%Realimentación de humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento
40 counter=counter+1;%Actualización del valor del contador de iteraciones
41
42 %Inicialización de valores en el nivel 0 (entrada del intervalo 1)
43 Mep(1)=0;
44 Tw(1)=Two+273.15;
45 Twb(1)=Twbi+273.15;
46 Ta(1)=Tai+273.15;
47 ma(1)=mai;
48 z(1)=10.79586*(1-273.16/Twb(1))+5.02808*log10(273.16/Twb(1))+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Twb(1)/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Twb(1))))-1)+2.786118312
49 Pvw(1)=10^z(1);
50 W(1)=((2501.6-2.3263*(Twb(1)-273.15))/(2501.6+1.8577*(Ta(1)-273.15)-4.184*(Twb(1)-273.15)))*(0.62509*Pvw(1)/(Pa-1.005*Pvw(1)))-(1.00416*(Ta(1)-Twb(1)))/(2501.6+1.8577*(Ta(1)-27
51 mw(1)=mwi-mai*(W(d)-W(1));
52
53 for i=2:d %Cálculo de la transferneccia punto a punto

```

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

Find Files Compare Go To Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time

FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Editor - C:\Users\HTO450\Documents\Contraflujo.m

SOLUCION.mlx Contraflujo.m Performance.m

```

54
55 - if (Twb(i-1)<Ta(i-1)) %Caso subsaturado
56
57     %Cálculo de los valores necesarios del intervalo i-1 y paso 1 del método Runge Kutta
58
59     zsw(i-1)=10.79586*(1-273.16/Tw(i-1))+5.02808*log10(273.16/Tw(i-1))+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Tw(i-1)/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Tw(i-1)))-1)+2.78
60     Psw(i-1)=10^zsw(i-1);
61     Wsw(i-1)=(0.62509*Psw(i-1))/(Pa-1.005*Psw(i-1));
62     zsa(i-1)=10.79586*(1-273.16/Ta(i-1))+5.02808*log10(273.16/Ta(i-1))+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Ta(i-1)/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Ta(i-1)))-1)+2.78
63     Psa(i-1)=10^zsa(i-1);
64     Wsa(i-1)=(0.62509*Psa(i-1))/(Pa-1.005*Psa(i-1));
65     Lef(i-1)=(0.865^(0.667))*((Wsw(i-1)+0.622)/(W(i-1)+0.622)-1)/(log((Wsw(i-1)+0.622)/(W(i-1)+0.622)));
66     Cpv(i-1)=1.3605*10^3+(2.313334)*(Ta(i-1)+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^5+(5.91332*10^(-13))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^6;
67     Cpa(i-1)=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Ta(i-1)+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^3;
68     Cpvw(i-1)=1.3605*10^3+(2.313334)*(Tw(i-1)+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^5+(5.91332*10^(-13))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^6;
69     Cpaw(i-1)=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Tw(i-1)+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^3;
70     Iv(i-1)=Ifgwo+Cpvw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15);
71     Ima(i-1)=Cpa(i-1)*(Ta(i-1)-273.15)+W(i-1)*(Ifgwo+Cpv(i-1)*(Ta(i-1)-273.15));
72     Imasw(i-1)=Cpaw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15)+Wsw(i-1)*(Ifgwo+Cpvw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15));
73     Cpw(i-1)=8.15599*10^3-2.80627*10*((Tw(i-1)+273.15)/2)+(5.11283*10^(-2))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^2-(2.17582*10^(-13))*((Tw(i-1)+273.15)/2)^6;
74
75     %Cálculo de los gradientes del intervalo i-1 y paso 1 del método Runge Kutta
76
77     Sw(i-1,1)=(mw(i-1)/ma(i-1)*Cpw(i-1)*(Wsw(i-1)-W(i-1)))/(Imasw(i-1)-Ima(i-1)+(Lef(i-1)-1)*(Imasw(i-1)-Ima(i-1)-(Wsw(i-1)-W(i-1))*Iv(i-1))-(Wsw(i-1)-W(i-1))*Cpw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15
78     Sima(i-1,1)=(mw(i-1)/ma(i-1)*Cpw(i-1))*(1+((Wsw(i-1)-W(i-1))*Cpw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15))/(Imasw(i-1)-Ima(i-1)+(Lef(i-1)-1)*(Imasw(i-1)-Ima(i-1)-(Wsw(i-1)-W(i-1))*Iv(i-1))-(Wsw(i-1)
79     SMep(i-1,1)=Cpw(i-1)/(Imasw(i-1)-Ima(i-1)+(Lef(i-1)-1)*(Imasw(i-1)-Ima(i-1)-(Wsw(i-1)-W(i-1))*Iv(i-1))-(Wsw(i-1)-W(i-1))*Cpw(i-1)*(Tw(i-1)-273.15));
80

```

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

Find Files Compare Go To Find Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time

FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Editor - C:\Users\HTO450\Documents\Contraflujo.m

SOLUCION.mlx Contraflujo.m Performance.m

```

81 - for g=2:3 % Cálculo del intervalo i-1 y paso g del método Runge kutta
82
83     %Cálculo de los valores necesarios del intervalo i-1 y paso g del método Runge Kutta
84     Twq=Tw(i-1)+VarTw/2;
85     Imaq=Ima(i-1)+Sima(i-1,g-1)*VarTw/2;
86     Wq=W(i-1)+Sw(i-1,g-1)*VarTw/2;
87     zswq=10.79586*(1-273.16/Twq)+5.02808*log10(273.16/Twq)+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Twq/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Twq))-1)+2.786118312;
88     Pswq=10^zswq;
89     Wswq=(0.62509*Pswq)/(Pa-1.005*Pswq);
90     zsaq=10.79586*(1-273.16/Ta(i-1))+5.02808*log10(273.16/Ta(i-1))+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Ta(i-1)/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Ta(i-1)))-1)+2.786118
91     Psaq=10^zsaq;
92     Wsaq=(0.62509*Psaq)/(Pa-1.005*Psaq);
93     Lefq=(0.865^(0.667))*(Wswq+0.622)/(Wq+0.622-1)/(log((Wswq+0.622)/(Wq+0.622)));
94     Cpvq=1.3605*10^3+(2.313334)*(Ta(i-1)+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*(Ta(i-1)+273.15)/2^5+(5.91332*10^(-13))*(((Ta(i-1)+273.15)/2)^6);
95     Cpaq=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Ta(i-1)+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*(((Ta(i-1)+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*(((Ta(i-1)+273.15)/2)^3);
96     Cpvwq=1.3605*10^3+(2.313334)*(Twq+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*(Twq+273.15)/2^5+(5.91332*10^(-13))*(((Twq+273.15)/2)^6);
97     Cpawq=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Twq+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*(((Twq+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*(((Twq+273.15)/2)^3);
98     Ivq=Ifgwo+Cpvwq*(Twq-273.15);
99     Imaswq=Cpawq*(Twq-273.15)+Wswq*(Ifgwo+Cpvwq*(Twq-273.15));
100    Cpqw=8.15599*10^3-2.80627*10*(Twq+273.15)/2+(5.11283*10^(-2))*((Twq+273.15)/2)^2-(2.17582*10^(-13))*((Twq+273.15)/2)^6;
101    mwq=mwi-mai*(W(d)-Wq);
102
103    %Cálculo de los gradientes del intervalo i-1 y paso g del método Runge Kutta
104    Sw(i-1,g)=(mwq/ma(i-1)*Cpwq*(Wswq-Wq))/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));
105    Sima(i-1,g)=(mwq/ma(i-1)*Cpwq*(1+((Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15))/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15))));
106    SMep(i-1,g)=Cpwq/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));
107

```

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

Find Files Compare Go To Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time

FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Editor - C:\Users\HTO450\Documents\Contraflujo.m

SOLUCION.mlx Contraflujo.m Performance.m

```

107 -
108 - end %Fin del bucle de la línea 77
109 -
110 - %Cálculo de los valores necesarios del intervalo i-1 y paso 4 del método Runge Kutta
111 -
112 - Twq=Tw(i-1)+VarTw;
113 - Imaq=Ima(i-1)+Sima(i-1,3)*VarTw;
114 - Wq=W(i-1)+Sw(i-1,3)*VarTw;
115 - zswq=10.79586*(1-273.16/Twq)+5.02808*log10(273.16/Twq)+(1.50474*10^(-4))*(1-10^(-8.29692*(Twq/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Twq))-1)+2.786118312;
116 - Pswq=10^zswq;
117 - Wswq=(0.62509*Pswq)/(Pa-1.005*Pswq);
118 - zsaq=10.79586*(1-273.16/Ta(i-1))+5.02808*log10(273.16/Ta(i-1))+1.50474*10^(-4)*(1-10^(-8.29692*(Ta(i-1)/273.16-1)))+(4.2873*10^(-4))*(10^(4.76955*(1-273.16/Ta(i-1)))-1)+2.786118
119 - Psaq=10^zsaq;
120 - Wsaq=(0.62509*Psaq)/(Pa-1.005*Psaq);
121 - Lefq=(0.865^(0.667))*(Wswq+0.622)/(Wq+0.622)-1/(log((Wswq+0.622)/(Wq+0.622)));
122 - Cpvq=1.3605*10^3+(2.313334)*(Ta(i-1)+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^5+(5.91332*10^(-13))*(((Ta(i-1)+273.15)/2)^6);
123 - Cpqaq=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Ta(i-1)+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*((Ta(i-1)+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*(((Ta(i-1)+273.15)/2)^3);
124 - Cpvwq=1.3605*10^3+(2.313334)*(Twq+273.15)/2-(2.46784*(10^(-10)))*((Twq+273.15)/2)^5+(5.91332*10^(-13))*(((Twq+273.15)/2)^6);
125 - Cpawq=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*(Twq+273.15)/2+(7.083814*10^(-4))*((Twq+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*(((Twq+273.15)/2)^3);
126 - Ivq=Ifgwo+Cpvwq*(Twq-273.15);
127 - Imaswq=Cpawq*(Twq-273.15)+Wswq*(Ifgwo+Cpvwq*(Twq-273.15));
128 - Cpqw=8.15599*10^3-2.80627*10*(Twq+273.15)/2+(5.11283*10^(-2))*((Twq+273.15)/2)^2-(2.17582*10^(-13))*((Twq+273.15)/2)^6;
129 - mwq=mwi-mai*(W(d)-Wq);
130 -
131 - %Cálculo de los gradientes del intervalo i-1 y paso 4 del método Runge Kutta
132 - Sw(i-1,4)=(mwq/ma(i-1)*Cpwq*(Wswq-Wq))/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));
133 - Sima(i-1,4)=(mwq/ma(i-1)*Cpwq)*(1+(Wswq-Wq)*Cpw(i-1)*(Twq-273.15))/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));
134 - SMeq(i-1,4)=Cpwq/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));

```

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

Find Files Compare Go To Find Comment Indent Breakpoints Run Run and Advance Run and Time

FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS RUN

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Editor - C:\Users\HTO450\Documents\Contraflujo.m

SOLUCION.mlx Contraflujo.m Performance.m

```

134 - SMep(i-1,4)=Cpwq/(Imaswq-Imaq+(Lefq-1)*(Imaswq-Imaq-(Wswq-Wq)*Ivq)-(Wswq-Wq)*Cpwq*(Twq-273.15));
135
136 %Cálculo de los factores de variación.
137 - for e=1:4
138 -     j(i,e)=VarTw*Sw(i-1,e);
139 -     k(i,e)=VarTw*Sima(i-1,e);
140 -     l(i,e)=VarTw*SMep(i-1,e);
141 - end
142
143 %Cálculos de las variables en el intervalo i
144 - W(i)=W(i-1)+(j(i,1)+2*j(i,2)+2*j(i,3)+j(i,4))/6;
145 - Ima(i)=Ima(i-1)+(k(i,1)+2*k(i,2)+2*k(i,3)+k(i,4))/6;
146 - Mep(i)=Mep(i-1)+(l(i,1)+2*l(i,2)+2*l(i,3)+l(i,4))/6;
147 - Siss(i-1,1:4)=0;
148 - Tw(i)=Tw(i-1)+VarTw;
149
150 %Inicialización para el bucle de cálculo de temperatura del agua en i
151 - Ta(i)=Ta(i-1);
152 - X3=0;
153
154 %Bucle de cálculo de temperatura del agua en i para el intervalo i subsaturado
155 - while abs(Ta(i)-X3)>0.0001
156 -     Ta(i)=X3;
157 -     Cpa(i)=1.045356*10^3-(3.161783*10^(-1))*((Ta(i)+273.15)/2)+(7.083814*10^(-4))*((Ta(i)+273.15)/2)^2-(2.705209*10^(-7))*((Ta(i)+273.15)/2)^3;
158 -     Cpv(i)=1.3605*10^3+(2.313334)*((Ta(i)+273.15)/2)-(2.46784*10^(-10))*((Ta(i)+273.15)/2)^5+(5.91332*10^(-13))*((Ta(i)+273.15)/2)^6;
159 -     X3=273.15+(Ima(i)-W(i)*Ifgwo)/(Cpa(i)+Cpv(i)*W(i));
160 - end

```

### ANEXO 3

#### Performance.m

The image shows the MATLAB R2019a editor interface. The title bar indicates the file path: C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin. The editor window displays the following MATLAB code for the function Performance.m:

```
1 function [Tao,Twbo,Wo,mwo,Two,Isso,Imao,HRo,Q]=Performance(Twi,mwi,Pa,Tai,mai,Twbi,d,Mepoe,Wo)
2
3 % Entradas
4 %Twi es la temperatura del agua a la entrada del empaquetamiento en °C
5 %mwi es el caudal de agua a la entrada del empaquetamiento en kg/s
6 %Pa es la presión atmosférica en Pa
7 %Tai es la temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del empaquetamiento en °C
8 %mai es el caudal de aire seco a la entrada del empaquetamiento en kg/s
9 %Twbi es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del empaquetamiento en °C
10 %d es el número de intervalos + 1 o número de puntos.
11 %Wo es la estimación de la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco
12 %Mepoe es el número de Merkel según el método de Poppe
13
14 % Salidas
15 %Tao es la temperatura de bulbo seco del aire a la salida del empaquetamiento en °C
16 %Twbo es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del empaquetamiento en °C
17 %Wo es la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco
18 %mwo es el caudal de agua a la salida del empaquetamiento en kg/s
19 %Two es la temperatura del agua a la salida del empaquetamiento en °C
20 %Isso e Ima son las entalpías del aire a la salida del empaquetamiento en J/kg de aire seco
21 %HRo es la humedad relativa del aire a la salida del empaquetamiento en %
22 %Q es la carga térmica en W
23
24
25 Mepo(d)=0;%Iniciación del bucle que pivota sobre Two hasta igualar el valor de Merkel.
26 Two=39; %Iniciación de la variable pivote
27
28 while Mepoe-Mepo(d)>0.0001 %Bucle para llegar al número de Merkel definido pivotando sobre Two
```

The Command Window at the bottom shows the MATLAB prompt: `>>`

```

16 %Twbo es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la salida del empaquetamiento en °C
17 %Wo es la humedad específica del aire a la salida del empaquetamiento en kg/kg aire seco
18 %mwo es el caudal de agua a la salida del empaquetamiento en kg/s
19 %Two es la temperatura del agua a la salida del empaquetamiento en °C
20 %Isso e Ima son las entalpías del aire a la salida del empaquetamiento en J/kg de aire seco
21 %HRo es la humedad relativa del aire a la salida del empaquetamiento en %
22 %Q es la carga térmica en W
23
24
25 Mepo(d)=0;%Inicialización del bucle que pivota sobre Two hasta igualar el valor de Merkel.
26 Two=39; %Inicialización de la variable pivote
27
28 while Mepoe-Mepo(d)>0.0001 %Bucle para llegar al número de Merkel definido pivotando sobre Two
29
30     if abs(Mepo(d)-Mepoe)>0.5
31         Two=Two-1
32     elseif abs(Mepo(d)-Mepoe)>0.25
33         Two=Two-0.5
34     elseif abs(Mepo(d)-Mepoe)>0.1
35         Two=Two-0.1
36     else
37         Two=Two-0.05
38     end
39
40     [Tao,Twbo,Wo,mwo,Isso,Imao,Mepo,HRo,Q]=DemandaContraflujo(Twi,Two,mwi,Pa,Tai,mai,Twbi,d,Wo);
41
42     Mepo(d)=Mepo;
43 end %Fin bucle empezado en línea 28

```

## ANEXO 4

### Solución.mlx

MATLAB R2019a

HOME PLOTS APPS LIVE EDITOR INSERT VIEW

Find Files Compare Go To Find Text Code Refactor Section Break Run Section Run and Advance Run Step Stop

C:\Program Files\Polyspace\R2019a\bin

Live Editor - C:\Users\HTO450\Documents\SOLUCION.mlx

SOLUCION.mlx x Contraflujo.m x Performance.m x +

```
1 % Para el funcionamiento del livescript "SOLUCION.mlx" se requiere en el workspace:
2 % DemandaContraflujo.m -> Funcion base para la evaluacion
3 % M -> Matriz de parametros de evaluacion ordenados según [Twi,Two,mwi,Pa,Tai,mai,Twbi,d,Wo]
4
5 % Lectura de datos
6 [a,b]=size (M); % Halla las dimensiones de la matriz de parámetros
7 R=ones(a,b); % Crea una matriz de unos para almacenar los resultados
8
9 % Bucle de solución
10 for j=1:a
11     j % Indicador de avance
12     p=M(j,:); % Llamada al elemento j
13     [q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9]=Performance(p(1),p(2),p(3),p(4),p(5),p(6),p(7),p(8),p(9)); % Evaluacion de DemandaContraflujo
14     R(j,:)= [q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9]; % Almacenamiento de resultados
15
16 % Exportación de resultados a excel
17 headers = ["Tao","Twbo","Wo","mwo","Two","Isso","Imao","Hro","Q"];
18 K=cat(1,headers,R);
19 xlsxwrite('RESULTADOS_FINAL.xlsx',K); % Cambiar el nombre RESULTADOS_FINAL.xlsx por el que se desee
20
21 % Eliminación de archivos innecesarios
22 clear a b headers j K p q1 q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8 q9
```

Two = 38  
Two = 37  
Two = 36  
Two = 35  
Two = 34  
Two = 33.5000  
Two = 33  
Two = 32.5000  
Two = 32  
Two = 31.9000  
Two = 31.8000  
Two = 31.7000  
Two = 31.6000  
Two = 31.5000  
Two = 31.4000  
Two = 31.3000  
Two = 31.2000  
Two = 31.1000  
Two = 31.0000  
Two = 30.9500  
Two = 30.9000  
Two = 30.8500  
Two = 30.8000  
Two = 30.7500  
Two = 30.7000  
Two = 30.6500  
Two = 30.6000  
Two = 30.5500  
Two = 30.5000  
Two = 30.4500  
j = 2  
Two = 38  
Two = 37  
Two = 36  
Two = 35  
Two = 34.5000  
Two = 34

## ANEXO 5

*Data de temperatura de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico en el año 2021*

<b>Fecha de toma de medición</b>	<b>Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Temperatura de salida del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m<sup>3</sup>/h)</b>
1/01/2021	40.16	34.87	240
2/01/2021	40.22	35.09	243
3/01/2021	39.99	34.92	262
4/01/2021	40.01	34.84	260
5/01/2021	40.55	35.34	258
6/01/2021	40.98	35.88	255
7/01/2021	40.78	35.56	260
8/01/2021	40.69	35.54	263
9/01/2021	40.57	35.32	265
10/01/2021	41.01	35.92	270
11/01/2021	40.99	35.88	275
12/01/2021	41.45	36.43	269
13/01/2021	41.64	36.56	280
14/01/2021	41.59	36.54	285
15/01/2021	41.48	36.42	270
16/01/2021	41.69	36.53	275
17/01/2021	41.11	35.99	277
18/01/2021	41.40	36.26	273
19/01/2021	41.52	36.42	278
20/01/2021	41.86	36.62	270
21/01/2021	41.72	35.53	335
22/01/2021	41.87	35.80	345
23/01/2021	41.38	35.25	348
24/01/2021	41.00	34.80	350
25/01/2021	42.01	35.77	355
26/01/2021	41.98	35.86	330
27/01/2021	42.13	35.96	335
28/01/2021	41.73	35.63	338
29/01/2021	42.31	36.24	347
30/01/2021	42.33	37.12	350
31/01/2021	42.14	37.04	345
1/02/2021	41.99	36.84	310
2/02/2021	42.37	37.59	344
3/02/2021	42.87	38.00	303
4/02/2021	42.61	37.84	319
5/02/2021	43.01	38.26	376

6/02/2021	43.17	38.33	354
7/02/2021	42.96	33.10	366
8/02/2021	43.22	34.12	357
9/02/2021	41.92	30.90	363
10/02/2021	42.17	31.93	369
11/02/2021	40.89	33.10	362
12/02/2021	41.16	33.60	365
13/02/2021	40.72	33.60	315
14/02/2021	38.84	30.70	300
15/02/2021	39.16	33.00	320
16/02/2021	39.43	32.60	325
17/02/2021	39.71	33.79	315
18/02/2021	39.64	34.00	296
19/02/2021	39.53	34.38	309
20/02/2021	39.44	34.15	294
21/02/2021	39.15	34.35	320
22/02/2021	39.67	34.55	330
23/02/2021	38.91	33.81	331
24/02/2021	38.49	33.38	335
25/02/2021	35.41	30.64	150
26/02/2021	38.99	33.81	336
27/02/2021	39.44	34.45	323
28/02/2021	39.37	34.27	319
1/03/2021	40.55	34.70	345
2/03/2021	40.61	35.10	315
3/03/2021	40.83	36.00	311
4/03/2021	41.19	35.60	326
5/03/2021	40.97	36.20	324
6/03/2021	40.71	36.40	354
7/03/2021	40.32	35.90	263
8/03/2021	40.39	34.90	289
9/03/2021	40.32	34.80	299
10/03/2021	40.58	35.00	314
11/03/2021	39.39	34.30	364
12/03/2021	39.55	32.50	355
13/03/2021	39.63	34.10	323
14/03/2021	39.49	33.80	329
15/03/2021	39.94	34.90	341
16/03/2021	40.79	28.30	356
17/03/2021	42.79	37.80	359
18/03/2021	39.90	33.10	352
19/03/2021	39.50	34.10	341
20/03/2021	39.60	33.20	335
21/03/2021	38.01	32.60	315

22/03/2021	39.84	34.50	300
23/03/2021	39.81	34.40	330
24/03/2021	38.83	33.60	325
25/03/2021	38.25	32.60	350
26/03/2021	38.75	32.70	320
27/03/2021	37.56	33.08	345
28/03/2021	38.51	33.10	310
29/03/2021	38.66	33.40	300
30/03/2021	39.18	34.50	285
31/03/2021	38.82	34.30	290
1/04/2021	38.56	33.90	275
2/04/2021	37.99	33.85	255
3/04/2021	38.97	34.02	260
4/04/2021	38.89	33.40	284
5/04/2021	39.15	33.80	254
6/04/2021	38.91	34.00	265
7/04/2021	38.21	33.00	255
8/04/2021	39.22	33.90	250
9/04/2021	38.76	32.80	269
10/04/2021	38.62	32.80	275
11/04/2021	38.51	33.60	251
12/04/2021	38.86	33.10	225
13/04/2021	38.77	32.60	259
14/04/2021	38.83	32.90	235
15/04/2021	37.44	30.10	315
16/04/2021	38.12	31.20	311
17/04/2021	37.85	31.50	310
18/04/2021	37.65	31.60	325
19/04/2021	39.16	30.80	314
20/04/2021	36.91	31.40	309
21/04/2021	37.82	32.80	320
22/04/2021	39.33	33.00	326
23/04/2021	39.45	32.70	323
24/04/2021	39.03	31.80	320
25/04/2021	38.04	31.30	325
26/04/2021	38.13	31.40	310
27/04/2021	38.51	32.00	315
28/04/2021	37.83	32.10	300
29/04/2021	37.99	31.50	310
30/04/2021	37.66	31.30	295
1/05/2021	38.33	33.23	305
2/05/2021	38.74	33.96	299
3/05/2021	38.51	33.52	281
4/05/2021	37.83	33.10	287
5/05/2021	38.42	33.30	282
6/05/2021	38.67	33.86	295

7/05/2021	37.85	32.80	330
8/05/2021	38.94	33.75	325
9/05/2021	38.67	33.41	316
10/05/2021	38.73	33.40	310
11/05/2021	38.81	33.36	299
12/05/2021	38.32	33.00	294
13/05/2021	38.59	33.38	301
14/05/2021	38.62	33.31	306
15/05/2021	38.61	33.41	315
16/05/2021	38.77	33.38	301
17/05/2021	38.89	33.55	296
18/05/2021	38.74	33.34	328
19/05/2021	38.65	33.29	320
20/05/2021	38.51	32.79	324
21/05/2021	38.62	32.88	317
22/05/2021	38.34	32.75	312
23/05/2021	38.43	32.80	297
24/05/2021	38.50	32.69	291
25/05/2021	38.66	32.96	313
26/05/2021	38.94	33.17	345
27/05/2021	37.91	32.22	334
28/05/2021	37.88	31.97	336
29/05/2021	38.06	32.27	340
30/05/2021	38.17	32.23	335
31/05/2021	38.23	32.36	320
1/06/2021	37.93	31.95	345
2/06/2021	38.22	32.39	310
3/06/2021	38.89	33.12	306
4/06/2021	38.54	32.65	299
5/06/2021	38.72	32.92	296
6/06/2021	38.67	32.72	320
7/06/2021	38.81	32.74	328
8/06/2021	38.73	32.82	300
9/06/2021	38.65	32.30	337
10/06/2021	38.87	33.00	350
11/06/2021	38.59	32.34	347
12/06/2021	38.45	32.34	339
13/06/2021	38.55	32.65	334
14/06/2021	38.69	32.24	315
15/06/2021	38.43	32.07	305
16/06/2021	38.71	32.32	322
17/06/2021	38.35	32.38	337
18/06/2021	38.49	32.07	338
19/06/2021	38.32	31.70	295
20/06/2021	38.11	31.54	312
21/06/2021	37.94	31.42	330

22/06/2021	38.19	31.75	327
23/06/2021	38.36	32.63	335
24/06/2021	37.95	31.28	342
25/06/2021	37.83	31.51	338
26/06/2021	38.24	31.66	326
27/06/2021	37.76	31.01	331
28/06/2021	38.15	31.56	339
29/06/2021	38.03	31.17	325
30/06/2021	37.85	30.88	326
1/07/2021	37.92	31.12	320
2/07/2021	38.44	31.73	324
3/07/2021	38.67	31.78	311
4/07/2021	38.53	31.68	315
5/07/2021	38.24	31.08	320
6/07/2021	38.73	31.94	310
7/07/2021	38.62	31.42	314
8/07/2021	38.45	31.17	318
9/07/2021	37.86	30.76	325
10/07/2021	37.72	30.49	328
11/07/2021	37.54	30.24	323
12/07/2021	38.61	31.12	320
13/07/2021	38.70	31.38	333
14/07/2021	38.51	31.25	344
15/07/2021	38.33	30.97	335
16/07/2021	37.87	30.38	327
17/07/2021	37.76	29.90	325
18/07/2021	38.67	31.24	316
19/07/2021	38.59	31.11	306
20/07/2021	38.74	31.42	313
21/07/2021	38.55	31.17	308
22/07/2021	38.66	31.12	315
23/07/2021	38.58	31.19	320
24/07/2021	37.64	30.14	322
25/07/2021	37.69	30.25	297
26/07/2021	37.66	30.14	285
27/07/2021	38.42	30.94	245
28/07/2021	38.75	31.16	240
29/07/2021	37.91	30.49	244
30/07/2021	37.73	30.16	241
31/07/2021	38.72	31.25	248
1/08/2021	38.64	31.25	250
2/08/2021	37.70	30.26	320
3/08/2021	38.67	31.37	325
4/08/2021	38.56	31.28	310
5/08/2021	38.62	31.21	330
6/08/2021	38.56	31.18	345

7/08/2021	38.66	31.32	351
8/08/2021	38.59	31.35	348
9/08/2021	37.54	30.06	352
10/08/2021	38.68	31.45	359
11/08/2021	37.72	30.56	355
12/08/2021	37.81	30.52	344
13/08/2021	37.75	30.53	337
14/08/2021	37.70	30.60	362
15/08/2021	38.03	30.88	318
16/08/2021	37.85	30.94	320
17/08/2021	37.69	30.65	325
18/08/2021	37.80	30.95	322
19/08/2021	37.91	30.80	328
20/08/2021	37.99	31.09	324
21/08/2021	38.00	31.18	320
22/08/2021	37.83	30.87	315
23/08/2021	37.80	30.82	318
24/08/2021	37.85	31.07	323
25/08/2021	37.70	30.86	327
26/08/2021	34.00	29.60	110
27/08/2021	35.90	31.60	126
28/08/2021	37.60	31.02	245
29/08/2021	37.69	30.93	190
30/08/2021	37.65	31.16	193
31/08/2021	38.50	33.30	215
1/09/2021	36.10	31.40	200
2/09/2021	38.80	32.14	250
3/09/2021	38.50	33.60	210
4/09/2021	37.89	31.22	345
5/09/2021	37.77	30.27	350
6/09/2021	37.84	30.30	333
7/09/2021	37.90	31.03	290
8/09/2021	37.10	32.00	287
9/09/2021	36.30	31.50	259
10/09/2021	36.70	31.70	271
11/09/2021	37.80	30.15	277
12/09/2021	37.73	30.89	263
13/09/2021	36.20	30.50	470
14/09/2021	37.70	31.00	482
15/09/2021	37.51	30.07	473
16/09/2021	37.63	30.38	480
17/09/2021	37.67	30.26	477
18/09/2021	37.55	30.72	460
19/09/2021	37.48	30.30	465
20/09/2021	37.43	30.23	480
21/09/2021	37.59	30.31	487

22/09/2021	37.54	30.33	384
23/09/2021	37.48	30.34	386
24/09/2021	37.42	30.18	315
25/09/2021	37.30	29.98	323
26/09/2021	37.49	30.87	310
27/09/2021	37.32	30.14	283
28/09/2021	39.70	32.80	277
29/09/2021	39.60	32.50	272
30/09/2021	38.60	32.60	269
1/10/2021	38.88	32.29	270
2/10/2021	39.30	32.33	277
3/10/2021	39.75	32.92	273
4/10/2021	40.10	32.70	276
5/10/2021	40.30	32.80	266
6/10/2021	38.40	32.30	268
7/10/2021	39.30	32.16	253
8/10/2021	38.94	31.74	170
9/10/2021	38.99	32.35	187
10/10/2021	39.00	35.95	110
11/10/2021	38.90	34.12	120
12/10/2021	37.70	34.99	166
13/10/2021	40.00	31.20	133
14/10/2021	36.90	30.70	317
15/10/2021	38.10	32.50	321
16/10/2021	37.80	32.10	304
17/10/2021	38.30	32.50	310
18/10/2021	38.70	32.10	315
19/10/2021	39.90	34.53	238
20/10/2021	40.90	35.20	311
21/10/2021	39.00	33.50	344
22/10/2021	39.70	33.00	264
23/10/2021	37.77	31.17	275
24/10/2021	36.33	29.56	280
25/10/2021	36.71	30.70	259
26/10/2021	38.57	32.60	274
27/10/2021	39.36	33.60	348
28/10/2021	38.17	31.76	344
29/10/2021	38.49	31.86	371
30/10/2021	38.73	32.15	350
31/10/2021	38.66	32.01	355
1/11/2021	37.11	30.36	345
2/11/2021	36.87	30.26	340
3/11/2021	36.84	30.11	344
4/11/2021	36.89	30.39	354
5/11/2021	37.01	28.26	368
6/11/2021	36.45	29.80	350

7/11/2021	37.11	33.47	110
8/11/2021	36.85	33.61	127
9/11/2021	37.56	33.11	164
10/11/2021	38.13	33.13	198
11/11/2021	37.35	32.45	204
12/11/2021	37.91	32.96	294
13/11/2021	37.82	32.71	266
14/11/2021	38.44	33.19	237
15/11/2021	37.51	32.61	212
16/11/2021	37.77	33.07	219
17/11/2021	38.22	33.43	218
18/11/2021	37.61	32.36	204
19/11/2021	37.13	33.86	171
20/11/2021	37.52	33.64	163
21/11/2021	38.16	33.71	174
22/11/2021	37.96	33.01	150
23/11/2021	38.44	32.14	208
24/11/2021	38.81	34.21	266
25/11/2021	37.43	31.66	210
26/11/2021	38.42	31.62	235
27/11/2021	39.14	32.39	240
28/11/2021	39.75	33.94	255
29/11/2021	38.95	33.15	258
30/11/2021	38.77	32.80	270
1/12/2021	38.56	32.77	274
2/12/2021	37.66	31.78	240
3/12/2021	38.03	32.04	220
4/12/2021	39.41	33.50	244
5/12/2021	39.33	33.44	248
6/12/2021	38.28	32.53	290
7/12/2021	39.10	33.22	350
8/12/2021	39.37	33.46	345
9/12/2021	39.55	33.58	370
10/12/2021	38.64	32.18	335
11/12/2021	38.76	32.09	321
12/12/2021	39.14	33.27	332
13/12/2021	38.35	33.02	349
14/12/2021	37.88	32.74	352
15/12/2021	37.24	32.04	360
16/12/2021	36.71	31.32	375
17/12/2021	37.99	32.81	389
18/12/2021	38.51	33.12	371
19/12/2021	39.55	34.10	370
20/12/2021	38.11	32.58	365
21/12/2021	39.77	34.39	360
22/12/2021	39.50	34.61	351

23/12/2021	38.61	33.65	340
24/12/2021	39.44	35.13	345
25/12/2021	38.66	34.26	348
26/12/2021	38.43	33.44	332
27/12/2021	39.22	34.33	320
28/12/2021	40.16	35.11	348
29/12/2021	40.08	34.91	359
30/12/2021	39.99	35.23	366
31/12/2021	39.83	35.36	354

---

## ANEXO 6

*Data de temperatura de ingreso, salida y flujo de ingreso del fluido electrolítico en el año 2021 sin datos atípicos*

<b>Fecha de toma de medición</b>	<b>Temperatura de ingreso del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Temperatura de salida del fluido electrolítico (°C)</b>	<b>Flujo del fluido electrolítico al ingreso (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Gradiente de temperatura (°C)</b>
1/01/2021	40.2	34.9	240	5.29
2/01/2021	40.2	35.1	243	5.13
3/01/2021	40.0	34.9	262	5.07
4/01/2021	40.0	34.8	260	5.17
5/01/2021	40.6	35.3	258	5.21
6/01/2021	41.0	35.9	255	5.10
7/01/2021	40.8	35.6	260	5.22
8/01/2021	40.7	35.5	263	5.15
9/01/2021	40.6	35.3	265	5.25
10/01/2021	41.0	35.9	270	5.09
11/01/2021	41.0	35.9	275	5.11
12/01/2021	41.5	36.4	269	5.02
13/01/2021	41.6	36.6	280	5.08
14/01/2021	41.6	36.5	285	5.05
15/01/2021	41.5	36.4	270	5.06
16/01/2021	41.7	36.5	275	5.16
17/01/2021	41.1	36.0	277	5.12
18/01/2021	41.4	36.3	273	5.14
19/01/2021	41.5	36.4	278	5.10
20/01/2021	41.9	36.6	270	5.24
21/01/2021	41.7	35.5	335	6.19
22/01/2021	41.9	35.8	345	6.07
23/01/2021	41.4	35.3	348	6.13
24/01/2021	41.0	34.8	350	6.20
25/01/2021	42.0	35.8	355	6.24
26/01/2021	42.0	35.9	330	6.12
27/01/2021	42.1	36.0	335	6.17
28/01/2021	41.7	35.6	338	6.10
29/01/2021	42.3	36.2	347	6.07
30/01/2021	42.3	37.1	350	5.21
31/01/2021	42.1	37.0	345	5.10
1/02/2021	42.0	36.8	310	5.15
2/02/2021	42.4	37.6	344	4.78
3/02/2021	42.9	38.0	303	4.87
4/02/2021	42.6	37.8	319	4.77
5/02/2021	43.0	38.3	376	4.75

6/02/2021	43.2	38.3	354	4.84
8/02/2021	43.2	34.1	357	9.10
11/02/2021	40.9	33.1	362	7.79
12/02/2021	41.2	33.6	365	7.56
13/02/2021	40.7	33.6	315	7.12
14/02/2021	38.8	30.7	300	8.14
15/02/2021	39.2	33.0	320	6.16
16/02/2021	39.4	32.6	325	6.83
17/02/2021	39.7	33.8	315	5.92
18/02/2021	39.6	34.0	296	5.64
19/02/2021	39.5	34.4	309	5.15
20/02/2021	39.4	34.2	294	5.29
21/02/2021	39.2	34.4	320	4.80
22/02/2021	39.7	34.6	330	5.12
23/02/2021	38.9	33.8	331	5.10
24/02/2021	38.5	33.4	335	5.11
26/02/2021	39.0	33.8	336	5.18
27/02/2021	39.4	34.5	323	4.99
28/02/2021	39.4	34.3	319	5.10
1/03/2021	40.6	34.7	345	5.85
2/03/2021	40.6	35.1	315	5.51
3/03/2021	40.8	36.0	311	4.83
4/03/2021	41.2	35.6	326	5.59
5/03/2021	41.0	36.2	324	4.77
6/03/2021	40.7	36.4	354	4.31
7/03/2021	40.3	35.9	263	4.42
8/03/2021	40.4	34.9	289	5.49
9/03/2021	40.3	34.8	299	5.52
10/03/2021	40.6	35.0	314	5.58
11/03/2021	39.4	34.3	364	5.09
12/03/2021	39.6	32.5	355	7.05
13/03/2021	39.6	34.1	323	5.53
14/03/2021	39.5	33.8	329	5.69
15/03/2021	39.9	34.9	341	5.04
17/03/2021	42.8	37.8	359	4.99
18/03/2021	39.9	33.1	352	6.80
19/03/2021	39.5	34.1	341	5.40
20/03/2021	39.6	33.2	335	6.40
21/03/2021	38.0	32.6	315	5.41
22/03/2021	39.8	34.5	300	5.34
23/03/2021	39.8	34.4	330	5.41
24/03/2021	38.8	33.6	325	5.23
25/03/2021	38.3	32.6	350	5.65
26/03/2021	38.8	32.7	320	6.05

27/03/2021	37.6	33.1	345	4.48
28/03/2021	38.5	33.1	310	5.41
29/03/2021	38.7	33.4	300	5.26
30/03/2021	39.2	34.5	285	4.68
31/03/2021	38.8	34.3	290	4.52
1/04/2021	38.6	33.9	275	4.66
2/04/2021	38.0	33.9	255	4.14
3/04/2021	39.0	34.0	260	4.95
4/04/2021	38.9	33.4	284	5.49
5/04/2021	39.2	33.8	254	5.35
6/04/2021	38.9	34.0	265	4.91
7/04/2021	38.2	33.0	255	5.21
8/04/2021	39.2	33.9	250	5.32
9/04/2021	38.8	32.8	269	5.96
10/04/2021	38.6	32.8	275	5.82
11/04/2021	38.5	33.6	251	4.91
12/04/2021	38.9	33.1	225	5.76
13/04/2021	38.8	32.6	259	6.17
14/04/2021	38.8	32.9	235	5.93
15/04/2021	37.4	30.1	315	7.34
16/04/2021	38.1	31.2	311	6.92
17/04/2021	37.9	31.5	310	6.35
18/04/2021	37.7	31.6	325	6.05
19/04/2021	39.2	30.8	314	8.36
20/04/2021	36.9	31.4	309	5.51
21/04/2021	37.8	32.8	320	5.02
22/04/2021	39.3	33.0	326	6.33
23/04/2021	39.5	32.7	323	6.75
24/04/2021	39.0	31.8	320	7.23
25/04/2021	38.0	31.3	325	6.74
26/04/2021	38.1	31.4	310	6.73
27/04/2021	38.5	32.0	315	6.51
28/04/2021	37.8	32.1	300	5.73
29/04/2021	38.0	31.5	310	6.49
30/04/2021	37.7	31.3	295	6.36
1/05/2021	38.3	33.2	305	5.10
2/05/2021	38.7	34.0	299	4.78
3/05/2021	38.5	33.5	281	4.99
4/05/2021	37.8	33.1	287	4.73
5/05/2021	38.4	33.3	282	5.12
6/05/2021	38.7	33.9	295	4.81
7/05/2021	37.9	32.8	330	5.05
8/05/2021	38.9	33.8	325	5.19
9/05/2021	38.7	33.4	316	5.26

10/05/2021	38.7	33.4	310	5.33
11/05/2021	38.8	33.4	299	5.45
12/05/2021	38.3	33.0	294	5.32
13/05/2021	38.6	33.4	301	5.21
14/05/2021	38.6	33.3	306	5.31
15/05/2021	38.6	33.4	315	5.20
16/05/2021	38.8	33.4	301	5.39
17/05/2021	38.9	33.6	296	5.34
18/05/2021	38.7	33.3	328	5.40
19/05/2021	38.7	33.3	320	5.36
20/05/2021	38.5	32.8	324	5.72
21/05/2021	38.6	32.9	317	5.74
22/05/2021	38.3	32.8	312	5.59
23/05/2021	38.4	32.8	297	5.63
24/05/2021	38.5	32.7	291	5.81
25/05/2021	38.7	33.0	313	5.70
26/05/2021	38.9	33.2	345	5.77
27/05/2021	37.9	32.2	334	5.69
28/05/2021	37.9	32.0	336	5.91
29/05/2021	38.1	32.3	340	5.79
30/05/2021	38.2	32.2	335	5.94
31/05/2021	38.2	32.4	320	5.87
1/06/2021	37.9	32.0	345	5.98
2/06/2021	38.2	32.4	310	5.83
3/06/2021	38.9	33.1	306	5.77
4/06/2021	38.5	32.7	299	5.89
5/06/2021	38.7	32.9	296	5.80
6/06/2021	38.7	32.7	320	5.95
7/06/2021	38.8	32.7	328	6.07
8/06/2021	38.7	32.8	300	5.91
9/06/2021	38.7	32.3	337	6.35
10/06/2021	38.9	33.0	350	5.87
11/06/2021	38.6	32.3	347	6.25
12/06/2021	38.5	32.3	339	6.11
13/06/2021	38.6	32.7	334	5.90
14/06/2021	38.7	32.2	315	6.45
15/06/2021	38.4	32.1	305	6.36
16/06/2021	38.7	32.3	322	6.39
17/06/2021	38.4	32.4	337	5.97
18/06/2021	38.5	32.1	338	6.42
19/06/2021	38.3	31.7	295	6.62
20/06/2021	38.1	31.5	312	6.57
21/06/2021	37.9	31.4	330	6.52
22/06/2021	38.2	31.8	327	6.44

23/06/2021	38.4	32.6	335	5.73
24/06/2021	38.0	31.3	342	6.67
25/06/2021	37.8	31.5	338	6.32
26/06/2021	38.2	31.7	326	6.58
27/06/2021	37.8	31.0	331	6.75
28/06/2021	38.2	31.6	339	6.59
29/06/2021	38.0	31.2	325	6.86
30/06/2021	37.9	30.9	326	6.97
1/07/2021	37.9	31.1	320	6.80
2/07/2021	38.4	31.7	324	6.71
3/07/2021	38.7	31.8	311	6.89
4/07/2021	38.5	31.7	315	6.85
5/07/2021	38.2	31.1	320	7.16
6/07/2021	38.7	31.9	310	6.79
7/07/2021	38.6	31.4	314	7.20
8/07/2021	38.5	31.2	318	7.28
9/07/2021	37.9	30.8	325	7.10
10/07/2021	37.7	30.5	328	7.23
11/07/2021	37.5	30.2	323	7.30
12/07/2021	38.6	31.1	320	7.49
13/07/2021	38.7	31.4	333	7.32
14/07/2021	38.5	31.3	344	7.26
15/07/2021	38.3	31.0	335	7.36
16/07/2021	37.9	30.4	327	7.49
17/07/2021	37.8	29.9	325	7.86
18/07/2021	38.7	31.2	316	7.43
19/07/2021	38.6	31.1	306	7.48
20/07/2021	38.7	31.4	313	7.32
21/07/2021	38.6	31.2	308	7.38
22/07/2021	38.7	31.1	315	7.54
23/07/2021	38.6	31.2	320	7.39
24/07/2021	37.6	30.1	322	7.50
25/07/2021	37.7	30.3	297	7.44
26/07/2021	37.7	30.1	285	7.52
27/07/2021	38.4	30.9	245	7.48
28/07/2021	38.8	31.2	240	7.59
29/07/2021	37.9	30.5	244	7.42
30/07/2021	37.7	30.2	241	7.57
31/07/2021	38.7	31.3	248	7.47
1/08/2021	38.6	31.3	250	7.39
2/08/2021	37.7	30.3	320	7.44
3/08/2021	38.7	31.4	325	7.30
4/08/2021	38.6	31.3	310	7.28
5/08/2021	38.6	31.2	330	7.41

6/08/2021	38.6	31.2	345	7.38
7/08/2021	38.7	31.3	351	7.34
8/08/2021	38.6	31.4	348	7.24
9/08/2021	37.5	30.1	352	7.48
10/08/2021	38.7	31.5	359	7.23
11/08/2021	37.7	30.6	355	7.16
12/08/2021	37.8	30.5	344	7.29
13/08/2021	37.8	30.5	337	7.22
14/08/2021	37.7	30.6	362	7.10
15/08/2021	38.0	30.9	318	7.15
16/08/2021	37.9	30.9	320	6.91
17/08/2021	37.7	30.7	325	7.04
18/08/2021	37.8	31.0	322	6.85
19/08/2021	37.9	30.8	328	7.11
20/08/2021	38.0	31.1	324	6.90
21/08/2021	38.0	31.2	320	6.82
22/08/2021	37.8	30.9	315	6.96
23/08/2021	37.8	30.8	318	6.98
24/08/2021	37.9	31.1	323	6.78
25/08/2021	37.7	30.9	327	6.84
28/08/2021	37.6	31.0	245	6.58
29/08/2021	37.7	30.9	190	6.76
30/08/2021	37.7	31.2	193	6.49
31/08/2021	38.5	33.3	215	5.20
1/09/2021	36.1	31.4	200	4.70
2/09/2021	38.8	32.1	250	6.66
3/09/2021	38.5	33.6	210	4.90
4/09/2021	37.9	31.2	345	6.67
5/09/2021	37.8	30.3	350	7.50
6/09/2021	37.8	30.3	333	7.54
7/09/2021	37.9	31.0	290	6.87
8/09/2021	37.1	32.0	287	5.10
9/09/2021	36.3	31.5	259	4.80
10/09/2021	36.7	31.7	271	5.00
11/09/2021	37.8	30.2	277	7.65
12/09/2021	37.7	30.9	263	6.84
22/09/2021	37.5	30.3	384	7.21
23/09/2021	37.5	30.3	386	7.14
24/09/2021	37.4	30.2	315	7.24
25/09/2021	37.3	30.0	323	7.32
26/09/2021	37.5	30.9	310	6.62
27/09/2021	37.3	30.1	283	7.18
28/09/2021	39.7	32.8	277	6.90
29/09/2021	39.6	32.5	272	7.10

30/09/2021	38.6	32.6	269	6.00
1/10/2021	38.9	32.3	270	6.59
2/10/2021	39.3	32.3	277	6.97
3/10/2021	39.8	32.9	273	6.83
4/10/2021	40.1	32.7	276	7.40
5/10/2021	40.3	32.8	266	7.50
6/10/2021	38.4	32.3	268	6.10
7/10/2021	39.3	32.2	253	7.14
9/10/2021	39.0	32.4	187	6.64
14/10/2021	36.9	30.7	317	6.20
15/10/2021	38.1	32.5	321	5.60
16/10/2021	37.8	32.1	304	5.70
17/10/2021	38.3	32.5	310	5.80
18/10/2021	38.7	32.1	315	6.60
19/10/2021	39.9	34.5	238	5.37
20/10/2021	40.9	35.2	311	5.70
21/10/2021	39.0	33.5	344	5.50
22/10/2021	39.7	33.0	264	6.70
23/10/2021	37.8	31.2	275	6.60
24/10/2021	36.3	29.6	280	6.77
25/10/2021	36.7	30.7	259	6.01
26/10/2021	38.6	32.6	274	5.97
27/10/2021	39.4	33.6	348	5.76
28/10/2021	38.2	31.8	344	6.41
29/10/2021	38.5	31.9	371	6.63
30/10/2021	38.7	32.2	350	6.58
31/10/2021	38.7	32.0	355	6.65
1/11/2021	37.1	30.4	345	6.75
2/11/2021	36.9	30.3	340	6.61
3/11/2021	36.8	30.1	344	6.73
4/11/2021	36.9	30.4	354	6.50
5/11/2021	37.0	28.3	368	8.75
6/11/2021	36.5	29.8	350	6.65
10/11/2021	38.1	33.1	198	5.00
11/11/2021	37.4	32.5	204	4.90
12/11/2021	37.9	33.0	294	4.95
13/11/2021	37.8	32.7	266	5.11
14/11/2021	38.4	33.2	237	5.25
15/11/2021	37.5	32.6	212	4.90
16/11/2021	37.8	33.1	219	4.70
17/11/2021	38.2	33.4	218	4.79
18/11/2021	37.6	32.4	204	5.25
23/11/2021	38.4	32.1	208	6.30
24/11/2021	38.8	34.2	266	4.60

25/11/2021	37.4	31.7	210	5.77
26/11/2021	38.4	31.6	235	6.80
27/11/2021	39.1	32.4	240	6.75
28/11/2021	39.8	33.9	255	5.81
29/11/2021	39.0	33.2	258	5.80
30/11/2021	38.8	32.8	270	5.97
1/12/2021	38.6	32.8	274	5.79
2/12/2021	37.7	31.8	240	5.88
3/12/2021	38.0	32.0	220	5.99
4/12/2021	39.4	33.5	244	5.91
5/12/2021	39.3	33.4	248	5.89
6/12/2021	38.3	32.5	290	5.75
7/12/2021	39.1	33.2	350	5.88
8/12/2021	39.4	33.5	345	5.91
9/12/2021	39.6	33.6	370	5.97
10/12/2021	38.6	32.2	335	6.46
11/12/2021	38.8	32.1	321	6.67
12/12/2021	39.1	33.3	332	5.87
13/12/2021	38.4	33.0	349	5.33
14/12/2021	37.9	32.7	352	5.14
15/12/2021	37.2	32.0	360	5.20
16/12/2021	36.7	31.3	375	5.39
17/12/2021	38.0	32.8	389	5.18
18/12/2021	38.5	33.1	371	5.39
19/12/2021	39.6	34.1	370	5.45
20/12/2021	38.1	32.6	365	5.53
21/12/2021	39.8	34.4	360	5.38
22/12/2021	39.5	34.6	351	4.89
23/12/2021	38.6	33.7	340	4.96
24/12/2021	39.4	35.1	345	4.31
25/12/2021	38.7	34.3	348	4.40
26/12/2021	38.4	33.4	332	4.99
27/12/2021	39.2	34.3	320	4.89
28/12/2021	40.2	35.1	348	5.05
29/12/2021	40.1	34.9	359	5.17
30/12/2021	40.0	35.2	366	4.76
31/12/2021	39.8	35.4	354	4.47

---

## ANEXO 7

### *Características fisicoquímicas del electrolito*

<b>Características fisicoquímicas</b>	<b>Valor promedio</b>	<b>Rango de especificación</b>
Acidez	185	180 g/L – 200 g/L
Densidad	1280	1270 g/L - 1290 g/L
Flujo del electrolito nominal	350	----
Flujo del electrolito máximo	420	----

<b>Impurezas</b>	<b>Valor promedio</b>	<b>Rango de especificación</b>
Cobalto (Co)	0.09	≤ 0.25 mg/L
Antimonio (Sb)	0.01	≤ 0.03 mg/L
Fierro (Fe)	2.1	≤ 5.0 mg/L
Cadmio (Cd)	0.25	≤ 1.0 mg/L
Cobre (Cu)	0.12	≤ 0.2 mg/L

## ANEXO 8

### *Carga térmica experimental y teórica*

<b>Q experimental (W)</b>	<b>Q teórico (W)</b>
1577872	1977500
1549275	1925800
1650875	2075800
1670586	2100200
1670561	2125600
1616275	2024600
1686743	2102400
1683325	2127400
1729060	2184000
1707995	2143800
1746460	2182000
1678267	2136200
1767774	2181000
1788715	2262600
1697928	2145200
1763548	2226600
1762604	2198100
1743937	2167500
1762057	2208300
1758329	2229900
2577154	3230400
2602632	3273700
2651214	3301100
2696899	3372100
2753074	3423100
2509981	3131600
2568828	3180500
2562427	3205600
2617720	3294300
2266265	2837200
2186725	2741700
1984147	2513800
2043579	2577800
1833904	2318500
1891098	2389500
2219660	2759600
2129382	2709900
4037519	5042700
3504701	4379100
3429412	4306400

2787376	3470600
3034944	3757000
2449828	3077900
2758729	3427600
2317593	2885200
2074798	2574100
1977747	2449000
1932894	2375000
1908957	2387500
2099853	2615800
2097989	2622300
2127506	2652400
2163087	2712600
2003125	2459100
2021929	2527300
2508303	3165200
2157084	2694800
1866863	2325000
2264824	2841800
1920739	2423100
1896206	2372700
1444718	1802800
1971856	2473400
2051234	2558000
2177554	2736000
2302630	2885200
3110445	3906700
2219896	2759300
2326554	2913700
2135944	2652100
2226384	2801500
2974792	3714600
2288512	2861400
2664586	3327900
2117936	2638000
1990983	2471100
2218790	2769600
2112468	2625700
2457658	3095100
2406082	3028100
1920888	2409900
2084318	2599100
1961155	2467900
1657661	2081800

---

1629076	2028500
1592662	2008700
1312035	1626000
1599497	2020300
1937741	2426300
1688855	2131300
1617083	2018800
1651136	2059700
1652938	2059400
1992524	2505000
1989119	2475100
1531652	1909900
1610683	2026800
1986049	2492400
1731919	2152100
2873503	3556300
2674678	3323300
2446473	3075400
2443677	3073800
3262428	4083000
2115997	2633600
1996451	2483900
2564639	3187700
2709638	3406300
2875367	3472800
2722377	3374500
2592876	3219000
2548570	3173700
2136392	2651100
2500411	3123400
2331761	2925800
1933192	2416800
1776250	2186000
1742657	2183000
1687128	2094700
1794420	2235100
1763486	2202600
2071144	2613200
2096311	2578000
2065750	2603100
2053496	2554100
2025222	2509400
1943855	2419900
1948988	2432600

---

2019393	2521100
2035724	2544900
2016324	2526100
1964436	2437900
2201266	2751700
2131669	2685100
2303276	2867600
2261394	2805200
2167561	2665400
2078116	2583200
2101232	2621500
2217299	2770400
2474001	3054600
2361912	2953400
2467924	3074400
2446597	3059000
2473069	3119200
2334496	2880800
2564043	3155800
2246132	2790100
2194331	2756700
2188726	2691600
2133657	2664200
2366312	2979600
2474386	3104300
2203503	2746100
2659553	3345300
2553355	3206200
2695346	3390000
2574221	3260000
2449083	3057100
2525081	3174300
2410804	2979500
2557182	3196200
2500398	3136800
2696850	3352900
2427085	3018300
2547563	3191500
2674032	3322600
2617210	3245000
2385637	3015200
2835025	3550800
2654843	3298400
2665928	3283800

---

2776750	3486100
2776452	3467200
2770846	3424200
2823939	3532800
2704356	3368700
2701920	3362500
2663082	3323800
2681675	3317100
2847528	3517000
2615992	3267100
2809746	3501300
2877157	3593900
2867786	3571900
2947251	3652500
2930423	3644500
2978769	3714800
3029426	3764400
3103845	3835600
3064274	3785100
3043929	3794100
3174760	3969700
2917970	3669100
2844645	3553600
2847478	3537000
2824958	3529400
2951800	3704200
2938999	3665700
3001388	3733800
2746214	3399700
2663592	3347600
2277575	2842700
2263904	2824700
2250084	2794000
2267347	2794700
2302381	2841700
2296093	2825500
2958884	3661900
2948568	3674700
2804775	3504500
3039045	3779300
3164320	3951300
3201903	4020000
3131286	3880300
3272271	4027300

---

3225802	4000900
3158976	3897600
3116671	3885200
3023932	3805200
3194272	3975400
2825779	3494300
2748103	3466600
2843551	3521000
2741268	3389000
2898334	3602800
2778428	3460300
2712310	3368900
2724738	3362700
2758592	3444700
2721681	3398300
2779770	3442200
2003535	2501900
1596266	1998700
1556707	1942700
1389462	1734500
1168242	1459200
2069280	2599200
1278852	1600400
2859894	3582600
3262378	4064800
3120474	3867400
2476052	3100700
1819102	2270700
1545062	1929400
1684009	2102400
2633578	3258400
2235717	2771900
3440895	4281600
3425236	4303700
2834354	3607100
2938452	3648100
2550496	3171600
2525317	3153300
2375384	2967300
2400116	2999000
2005896	2506200
2211333	2765800
2399482	3007000
2317332	2923700

---

2538317	3170400
2479407	3094800
2031747	2535100
2245038	2787400
1543173	1915800
2442620	3042900
2234077	2788700
2153542	2686800
2234574	2791200
2583803	3223500
1588387	2000200
2203131	2759500
2351398	2940700
2198284	2745100
2255701	2896100
2355872	2902400
1934547	2407700
2032965	2552500
2491189	3137000
2740447	3414600
3056979	3797000
2862193	3529400
2933965	3687100
2894195	3571100
2793093	3465500
2877256	3561100
2859707	3555700
4001850	4931500
2892642	3621400
1230383	1536200
1242314	1549600
1808662	2233100
1689303	2101500
1546367	1910900
1291032	1610000
1279225	1596900
1297768	1623000
1331050	1644200
1628579	2029600
1520703	1899200
1505914	1853100
1986012	2472600
2013353	2491600
1841286	2336000

---

1859742	2319900
2003287	2511900
1971669	2465000
1753854	2193700
1637776	2044400
1792183	2234500
1815398	2270600
2072387	2606800
2557704	3203900
2534029	3158300
2745245	3444500
2689567	3321900
2660945	3330000
2422039	2986800
2311839	2922400
2248593	2838300
2326542	2899900
2512031	3134400
2504288	3135700
2485236	3107900
2506128	3159600
2508551	3112700
2407076	3020200
2133148	2672300
2095876	2585300
1847997	2307000
1902992	2379500
2058940	2575400
1944750	2436100
2184116	2760600
2306694	2901100
2165175	2732000
1966599	2423600

---

## ANEXO 9

*Número de Merkel por día y Ka (coeficiente de transferencia)*

<b>Mepo (número de Merkel)</b>	<b>Ka</b>
0.4123	0.3594
0.3900	0.3442
0.4041	0.3846
0.4157	0.3926
0.3957	0.3708
0.3555	0.3293
0.3756	0.3547
0.3809	0.3639
0.3972	0.3823
0.3581	0.3512
0.3589	0.3585
0.3373	0.3296
0.3257	0.3312
0.3359	0.3477
0.3375	0.3310
0.3399	0.3395
0.3550	0.3572
0.3419	0.3390
0.3387	0.3420
0.3407	0.3341
0.4593	0.5589
0.4388	0.5499
0.4688	0.5926
0.5088	0.6468
0.4475	0.5770
0.4296	0.5149
0.4255	0.5177
0.4481	0.5501
0.4181	0.5270
0.3282	0.4172
0.3257	0.4081
0.3051	0.3435
0.2653	0.3315
0.2557	0.2814
0.2576	0.2985
0.2454	0.3351
0.2528	0.3251
0.6817	0.8840
0.6944	0.9130
0.6359	0.8430

0.5778	0.6611
0.9753	1.0627
0.5629	0.6543
0.6458	0.7623
0.4831	0.5527
0.4453	0.4788
0.3939	0.4421
0.4072	0.4348
0.3758	0.4368
0.3887	0.4659
0.4306	0.5177
0.4554	0.5541
0.4392	0.5360
0.3785	0.4441
0.4010	0.4646
0.4393	0.5505
0.3982	0.4556
0.3179	0.3591
0.3833	0.4539
0.3126	0.3679
0.2805	0.3607
0.2920	0.2789
0.4022	0.4222
0.4094	0.4446
0.4091	0.4666
0.4241	0.5607
0.7242	0.9338
0.4536	0.5322
0.4887	0.5840
0.3809	0.4718
0.2767	0.3608
0.6366	0.8139
0.4516	0.5593
0.5883	0.7158
0.5484	0.6274
0.4119	0.4488
0.4313	0.5170
0.4630	0.5466
0.5903	0.7504
0.6009	0.6984
0.4432	0.5554
0.5078	0.5718
0.4760	0.5187
0.3685	0.3815

---

0.3648	0.3843
0.3407	0.3403
0.2994	0.2773
0.3530	0.3334
0.4154	0.4285
0.3844	0.3546
0.3477	0.3347
0.4082	0.3781
0.3734	0.3391
0.4756	0.4647
0.4640	0.4635
0.3612	0.3293
0.4347	0.3553
0.4974	0.4679
0.4538	0.3873
0.8415	0.9628
0.6788	0.7668
0.6111	0.6881
0.5859	0.6916
0.8443	0.9629
0.5441	0.6107
0.4195	0.4876
0.5023	0.5948
0.5549	0.6510
0.6206	0.7213
0.6616	0.7810
0.6438	0.7249
0.5810	0.6647
0.5074	0.5529
0.6191	0.6971
0.6204	0.6648
0.3374	0.3738
0.2892	0.3141
0.3183	0.3249
0.3141	0.3274
0.3305	0.3385
0.2971	0.3183
0.3557	0.4264
0.3210	0.3789
0.3442	0.3951
0.3432	0.3864
0.3471	0.3770
0.3543	0.3783
0.3359	0.3672

---

0.3459	0.3845
0.3382	0.3869
0.3474	0.3798
0.3342	0.3593
0.3556	0.4236
0.3542	0.4117
0.3919	0.4612
0.3864	0.4449
0.3772	0.4275
0.3802	0.4101
0.3949	0.4174
0.3816	0.4338
0.3804	0.4767
0.4198	0.5093
0.4430	0.5406
0.4234	0.5229
0.4398	0.5351
0.4140	0.4812
0.4592	0.5754
0.4236	0.4770
0.3925	0.4362
0.4076	0.4427
0.3985	0.4284
0.4250	0.4940
0.4333	0.5162
0.4096	0.4463
0.4747	0.5811
0.4127	0.5247
0.4713	0.5940
0.4623	0.5692
0.4222	0.5122
0.4795	0.5486
0.4688	0.5193
0.4701	0.5498
0.4436	0.5430
0.4857	0.5963
0.5066	0.5428
0.5245	0.5944
0.5305	0.6359
0.4988	0.5924
0.4206	0.5118
0.5563	0.6910
0.5131	0.6299
0.5109	0.6050

---

0.5791	0.6962
0.5287	0.6510
0.5628	0.6644
0.5985	0.7087
1.0170	1.1821
0.8934	1.0514
0.8831	0.9976
0.8943	1.0232
1.0508	1.2214
0.8562	0.9641
0.9900	1.1291
1.0476	1.2100
1.1306	1.3346
1.2307	1.4662
1.3281	1.5581
1.0945	1.2721
1.0251	1.2399
1.0513	1.3136
1.1197	1.3624
1.2976	1.5412
1.5257	1.8010
1.0659	1.2234
1.0740	1.1937
0.9988	1.1355
1.0444	1.1684
1.0974	1.2556
1.0611	1.2333
1.3873	1.6225
1.2553	1.3542
1.3166	1.3629
1.0340	0.9201
0.9783	0.8528
1.1123	0.9858
1.1939	1.0451
0.9511	0.8567
0.5296	0.4809
0.6327	0.7354
0.5535	0.6534
0.5533	0.6230
0.5747	0.6889
0.5817	0.7289
0.5778	0.7366
0.5566	0.7035
0.6671	0.8529

---

0.5550	0.7237
0.6068	0.7824
0.6234	0.7789
0.6196	0.7584
0.6105	0.8027
0.5686	0.6568
0.5626	0.6539
0.5780	0.6823
0.5433	0.6354
0.5797	0.6906
0.5448	0.6411
0.5304	0.6165
0.5535	0.6333
0.5682	0.6563
0.5375	0.6306
0.5517	0.6553
0.5015	0.4463
0.5007	0.3455
0.4690	0.3288
0.3202	0.2501
0.3676	0.2670
0.4737	0.4301
0.3062	0.2336
0.5601	0.7019
0.6938	0.8820
0.6827	0.8257
0.5636	0.5937
0.3871	0.4035
0.3818	0.3592
0.3897	0.3836
0.6641	0.6682
0.5520	0.5273
0.6919	0.9650
0.6933	0.9720
0.6896	0.7890
0.6868	0.8058
0.5577	0.6280
0.6466	0.6646
0.4591	0.4619
0.4834	0.4776
0.4144	0.4049
0.4775	0.4683
0.5037	0.5068
0.4656	0.4617

---

0.5048	0.5061
0.5015	0.4845
0.4462	0.4343
0.5069	0.4658
0.4489	0.3049
0.5638	0.6492
0.4183	0.4877
0.4398	0.4856
0.4287	0.4827
0.5029	0.5754
0.3170	0.2740
0.3210	0.3626
0.3744	0.4678
0.4472	0.4288
0.5691	0.5684
0.6734	0.6849
0.5251	0.4940
0.4275	0.4255
0.3893	0.4921
0.5175	0.6466
0.5360	0.7223
0.5028	0.6392
0.5303	0.6838
0.6198	0.7767
0.6168	0.7617
0.6438	0.8044
0.6082	0.7820
1.0767	1.4392
0.6737	0.8565
0.3260	0.2345
0.3411	0.2527
0.3381	0.3610
0.3564	0.3443
0.3399	0.2926
0.3389	0.2610
0.3119	0.2481
0.3083	0.2441
0.3626	0.2687
0.4399	0.3323
0.2803	0.2708
0.4227	0.3224
0.5020	0.4285
0.4573	0.3986
0.3569	0.3306

---

0.3773	0.3536
0.4071	0.3992
0.4165	0.4145
0.4626	0.4033
0.4531	0.3621
0.3862	0.3423
0.3910	0.3522
0.4344	0.4576
0.4229	0.5376
0.4081	0.5114
0.4157	0.5587
0.5040	0.6133
0.5252	0.6124
0.4077	0.4916
0.3992	0.5060
0.3998	0.5112
0.4360	0.5701
0.4973	0.6774
0.4037	0.5704
0.3997	0.5386
0.3644	0.4897
0.4288	0.5685
0.3456	0.4519
0.3088	0.3937
0.3373	0.4165
0.2601	0.3259
0.2882	0.3643
0.3533	0.4260
0.3141	0.3651
0.3043	0.3846
0.3174	0.4139
0.2873	0.3819
0.2589	0.3329

---

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<i>A</i>	Área en $m^2$
<i>a</i>	Superficie por unidad de volumen $m^2$
<i>B</i>	Caudal de purga en $\frac{kg}{s}$
<i>C</i>	Capacidad calorífica en $\frac{W}{K}$ , constante o capacidad de la torre en $\frac{kg}{s}$
<i>C<sub>p</sub></i>	Calor específico a presión constante en $\frac{J}{kgK}$
<i>e</i> o $\epsilon$	Efectividad
<i>E</i>	Caudal de evaporación en $\frac{kg}{s}$
<i>G</i> o <i>L</i>	Velocidad másica en $\frac{kg}{m^2s}$
<i>g</i>	Aceleración de la gravedad
<i>h</i>	Coefficiente de transferencia de calor en $\frac{W}{m^2K}$ o entalpía $\frac{J}{kg}$
<i>h<sub>D</sub></i>	Coefficiente de transferencia de masa en $\frac{kg}{m^2s}$
<i>i</i>	Entalpía en $\frac{J}{kg}$
<i>i<sub>fg</sub></i>	Calor latente en $\frac{J}{kg}$
<i>k</i>	Coefficiente de perdidas
<i>L</i>	Longitud en <i>m</i> o caudal de fugas en $\frac{kg}{s}$
<i>L<sub>ef</sub></i>	Factor de Lewis
<i>m</i> o $\dot{m}$	Caudal másico en $\frac{kg}{s}$
<i>Me</i>	Merkel
<i>NTU</i>	Unidades de transferencia de calor
<i>P</i>	Presión en Pa o $\frac{N}{m^2}$
<i>Q</i> o <i>q</i>	Carga térmica en <i>W</i>
<i>T</i>	Temperatura en °C o <i>K</i>
<i>v</i>	Velocidad en $\frac{m}{s}$
<i>w</i>	Humedad específica en $\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ aire seco}}$

$\rho$  Densidad en  $\frac{kg}{m^3}$

## **SUBÍNDICES**

*a* Aire seco  
*av* Aire húmedo  
*c* Sensible  
*fi o f* Empaquetamiento  
*i* Inicial o entrada  
*m* Medio o latente  
*p* Poppe  
*s* Saturado  
*sa* Saturado a la temperatura del aire  
*ss* Sobresaturado  
*sw* Saturado a la temperatura del agua  
*v* Vapor  
*wb* Bulbo húmedo  
*w* Agua