

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN  
PARA LA INDUSTRIA PLÁSTICA EN LA PRODUCCIÓN DE PREFORMA**

**JUANA VALENTINA PINEDA VARGAS**

**ANDRES FELIPE GUTIERREZ BABATIVA**

**Proyecto integral de grado para optar al título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS**  
**Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**JUAN CAMILO CELY GARZÓN**  
**Ingeniero Químico**

**Orientador**

**OSCAR LIBARDO LOMBANA CHARFUELAN**  
**Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**  
**FACULTAD DE INGENIERIAS**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**BOGOTA D.C**  
**2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Nombre  
Firma del Director

---

Nombre  
Firma del Presidente Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

Bogotá, D.C. Julio de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## DEDICATORIA

A Azucena Babativa, mi mamá, por su amor, paciencia y esfuerzo incondicional.

A Juana Pineda, por ser una excelente compañera, pero sobre todo una gran amiga.

### **Andres Felipe Gutierrez Babativa**

A María Teresa Vargas y Daladier Pineda por ser unos padres que me han brindado apoyo y compañía fundamental.

A Andrés Gutierrez por ser un increíble amigo y compañero de trabajo de grado.

### **Juana Valentina Pineda Vargas**

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a mi Familia por todo el apoyo brindado a lo largo de este camino académico y personal, a mis padres por siempre depositar su sabiduría y confianza en las decisiones tomadas a lo largo de estos 22 años, a mis amigos por siempre estar y ofrecerme su compañía y apoyo incondicional, aportando momentos inolvidables, extensas horas de risas y además depositando su granito de arena para que todos cumpliéramos la meta del pregrado, a mi compañero de proyecto de grado Andres Gutierrez quien desde el momento uno dentro de la empresa se convirtió en un amigo incondicional, y con quién se logró sobrellevar el proyecto hasta el final, a pesar de las trashedas y momentos críticos.

También quiero agradecerle a mi hermana Mónica Pineda y cuñado Miguel Chitiva por ser tan generosos y transmitirnos parte de su conocimiento y acompañarnos en todo este proceso del desarrollo del modelo, ya que fueron una guía fundamental junto con los asesores Juan Carlos Jiménez y Luis Figueroa quienes nos brindaron lineamientos en el dimensionamiento bajo su experiencia de más de 10 años en el mercado y al profesor Roberto Moreno por permitirnos usar su aporte bibliográfico en el capítulo financiero. Para finalizar agradezco a nuestro director y codirector Claudio Moreno y Juan Camilo Cely por el apoyo en la realización de este trabajo y a todos los profesores de la Fundación Universidad América.

### **Juana Valentina Pineda Vargas**

Quiero agradecer a mi Familia por su apoyo incondicional y confianza en todo momento, mis amigos por compartir momentos inolvidables en esta etapa de mi vida, compañeros que estuvieron como apoyo en momentos inesperados y a mi compañera Juana Pineda por haber sido una gran compañera en los momentos buenos y caóticos, siendo también una gran amiga.

Especialmente quiero agradecerles a Mónica Pineda y Miguel Chitiva, sin ellos no hubiera sido posible el desarrollo de nuestro proyecto, fueron más allá de un apoyo y ayuda en los momentos que más lo necesitamos, fueron una guía constante desde el inicio, al ingeniero Juan Carlos Jiménez por dedicarnos el tiempo para compartir su conocimiento y paciencia con nosotros.

Finalmente, a nuestro director Claudio Moreno por creer en nosotros desde el primer día y siempre darnos su apoyo y conocimiento en cada momento, nuestro codirector Juan Camilo Cely por estar siempre en los momentos que más lo necesitamos, igualmente a los profesores Luis Figueroa el cual nos brindó su conocimiento y experiencia para el desarrollo del proyecto de igual manera el profesor Roberto Moreno el cual en la parte final de nuestro proyecto fue fundamental con su conocimiento y explicación, además de brindarnos una retroalimentación acerca de mejora del proyecto.

**Andres Felipe Gutierrez Babativa**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1. ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA LA INDUSTRIA PLÁSTICA.	15
1.1 Industria plástica	15
1.2 Refrigeración	16
1.2.1 <i>Historia de la refrigeración</i>	16
1.2.2 <i>Refrigeración mecánica</i>	17
1.3 Intercambiadores de calor	27
1.3.1 <i>Tipos básicos de intercambiadores de calor</i>	28
1.3.2 <i>Consideraciones para el diseño</i>	29
1.3.3 <i>Coeficiente global de transferencia de calor</i>	30
1.3.4 <i>Factores de depósito o suciedad</i>	31
1.3.5 <i>Diferencia logarítmica media de temperatura</i>	31
1.3.6 <i>Eficiencia de un intercambiador de calor</i>	33
1.4 Torres de enfriamiento	34
1.4.1 <i>Definición y propósito</i>	34
1.4.2 <i>Funcionamiento</i>	34
1.4.3 <i>Clasificación</i>	35
1.4.4 <i>Partes de una torre de enfriamiento</i>	40
1.4.5 <i>Normativa y mantenimiento</i>	41
1.5 Intercambiadores tubos y coraza	43
1.5.1 <i>Definición y propósito</i>	43
1.5.2 <i>Funcionamiento</i>	43
1.5.3 <i>Clasificación</i>	44
1.5.4 <i>Partes de un intercambiador tubos y coraza</i>	44
1.5.5 <i>Normativa y mantenimiento</i>	45
1.6 Intercambiadores rotativos (aeroenfriadores)	47
1.6.1 <i>Definición y propósito</i>	47
1.6.2 <i>Funcionamiento</i>	47

1.6.3 <i>Clasificación.</i>	48
1.6.4 <i>Partes de los intercambiadores rotativos</i>	48
1.6.5 <i>Normativa y mantenimiento</i>	49
1.7 Intercambiadores de placas	51
1.7.1. <i>Definición y propósito</i>	51
1.7.2 <i>Funcionamiento</i>	51
1.7.3 <i>Clasificación</i>	53
1.7.4 <i>Partes de un intercambiador de placas</i>	53
1.7.5 <i>Normativa y mantenimiento</i>	55
2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA CON MAYOR VIABILIDAD.	56
2.1 Métodos de selección o matrices de decisión	56
2.2 Análisis de aspectos técnicos, financieros y ambientales.	56
2.3 Elección de matriz de decisión.	60
2.4 Desarrollo de la matriz de decisión.	61
2.5 Análisis de la matriz de decisión.	62
3. MODELAMIENTO	63
3.1 Tipos de modelo.	63
3.2 Selección de modelo.	64
3.3 Ajuste y parametrización de variables.	68
3.4 Desarrollo de modelo	71
3.5 Resultados del modelo	80
3.5 Análisis de modelo.	86
4. ANÁLISIS FINANCIERO	87
4.1 Costos del equipo.	88
4.2 Costos de operación	89
4.3 Evaluación de viabilidad financiera del proyecto.	91
5. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	100

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Ciclo de refrigeración.	19
Figura 2. Ciclo de Carnot inverso.	20
Figura 3. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	21
Figura 4. Diferencia de temperatura media logarítmica en contracorriente.	33
Figura 5. Diferencia de temperatura media logarítmica en paralelo.	34
Figura 6. Torre de enfriamiento de tiro atmosférica.	36
Figura 7. Torre de enfriamiento de tiro natural.	37
Figura 8. Torre de enfriamiento de tiro forzado con flujo contracorriente	38
Figura 9. Torre de enfriamiento inducido con flujo contracorriente.	39
Figura 10. Torre de enfriamiento inducido de tiro cruzado.	40
Figura 11. Partes de una torre de enfriamiento	41
Figura 12. Principales componentes de un intercambiador de calor de coraza y tubo.	45
Figura 13. Aeroenfriador en forma de V.	49
Figura 14. Características salientes de los Intercambiadores de placas	53
Figura 15. Partes de un intercambiador de calor de placas	55
Figura 16. Métodos de limpieza.	56
Figura 17. Diagrama de un autoencoder	72
Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo para el modelo autoencoder	73
Figura 19. Resultados de simulación Anexo 1	83
Figura 20. Gráfica de comportamiento altura vs humedad relativa	84
Figura 21. Gráfica de proyección del día deseado	85
Figura 22. Gráfica de consumos de energía del día deseado	86
Figura 23. Gráfica de consumo de agua del día objetivo	87
Figura 24. Costos de consumo de agua	92
Figura 25. Costos de consumo energético	92
Figura 26. Esquema de sistema de refrigeración para la producción de preforma.	97

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Refrigerantes de mayor uso	24
Tabla 2. Propiedades ambientales y de seguridad.	25
Tabla 3. Propiedades termodinámicas	26
Tabla 4. Propiedades físicas Tabla	27
Tabla 5. Origen de los refrigerantes	28
Tabla 6. Componentes numerados según norma TEMA de un intercambiador de coraza y tubos.	46
Tabla 7. Enumeración de alternativas	63
Tabla 8. Matriz de decisión	64
Tabla 9. Costos de partes	91
Tabla 10 Proyección de costos operativos anuales de la torre de enfriamiento.	93
Tabla 11. Valor y tiempos necesarios de mantenimientos.	94
Tabla 12. Resumen de análisis financiero	96

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ecuación global de transferencia de calor	31
Ecuación 2. Sumatoria total de resistencias en un intercambiador de tubos.	32
Ecuación 3. Media logarítmica en un sistema contracorriente.	34
Ecuación 4 . Eficiencia para un intercambiador en contracorriente.	35
Ecuación 5. Eficiencia para un intercambiador en paralelo.	35
Ecuación 6. Presión de saturación para el agua.	74
Ecuación 7. Humedad específica de saturación para el agua.	74
Ecuación 8. Entalpía de saturación para el agua.	74
Ecuación 9. Presión de saturación para el aire.	74
Ecuación 10. Humedad específica para el aire.	74
Ecuación 11. Entalpía para el aire.	75
Ecuación 12. Pendiente de la línea de equilibrio.	75
Ecuación 13. Pendiente de la línea de operación mínima.	75
Ecuación 14. Flujo de aire mínimo.	76
Ecuación 15. Entalpía del aire.	76
Ecuación 16. Pendiente de la línea de operación.	76
Ecuación 17. Relación entre flujos de agua.	77
Ecuación 18. Área transversal por medio relación de flujos de agua.	77
Ecuación 19. Área transversal por medio de relación de flujos de aire.	77
Ecuación 20. Corroboración de flujos por medio del área transversal.	77
Ecuación 21. Diferencial de entalpías.	77
Ecuación 22. Temperatura del aire a la salida.	78
Ecuación 23. Humedad absoluta del aire a la salida.	78
Ecuación 24. Delta de temperatura del agua.	79
Ecuación 25. Delta de temperatura del aire.	79
Ecuación 26. Tasa de transferencia de calor.	79
Ecuación 27. Coeficiente convectivo del agua.	79
Ecuación 28. Coeficiente convectivo del aire.	79
Ecuación 29. Coeficiente de transferencia de masa.	79
Ecuación 30. Sumatoria de resistencias de transferencia de calor y masa.	80
Ecuación 31. Coeficiente global de resistencias.	80
Ecuación 32. Altura de la torre con integral implícita.	80
Ecuación 33. Altura de la torre con integral resuelta.	80
Ecuación 34. Diámetro del ventilador.	81
Ecuación 35. Caudal de aire.	81
Ecuación 36. Potencia del ventilador.	81
Ecuación 37. Tasa de pérdidas de agua por arrastre.	81
Ecuación 38. Porcentaje de pérdidas de agua.	82
Ecuación 39. Costo de adquisición.	94
Ecuación 40. Valor de salvamento.	95
Ecuación 41. Valor final de CAUE	95

## RESUMEN

Para la producción de preforma en la industria plástica se usan máquinas inyectoras, en el caso de estudio se toma de referencia la maquinaria Husky, la cual necesita un sistema de refrigeración tanto para su sistema hidráulico como el molde en el cual se produce la preforma; dicho esto el proyecto se evalúa con una búsqueda bibliográfica de alternativas como sistemas de refrigeración, para luego por medio de una matriz de decisión, realizar la comparativa de las alternativas encontradas mediante criterios técnicos-ambientales con el fin de obtener la mejor alternativa bibliográfica, posteriormente con uso de un software modelar dicha alternativa, estimando así el comportamiento que tendrá para las condiciones de operación de la maquinaria Husky, finalmente el desarrollo de la viabilidad económica por medio de un indicador financiero con el fin de evaluar si la alternativa es rentable tanto técnica como financieramente.

**PALABRAS CLAVE:** Preforma, intercambiador de calor, industria plástica, torre de enfriamiento, matriz de decisión, modelo autoencoder, viabilidad financiera.

## INTRODUCCIÓN

La industria plástica es cada vez más crucial en las diferentes actividades del mundo moderno y en las nuevas tecnologías. El plástico se encuentra en aviones, automóviles, impresiones 3D, aplicaciones médicas, en equipos para la generación de energías no convencionales, aparatos electrónicos y de información, en empaques para preservar la vida verde de alimentos y bebidas [3].

El caso de estudio se plantea para una empresa de plásticos, la cual es productora de preforma, tapas plásticas, botellas, tapas metálicas como lo son tapas corona y tapas aluminio. Dado que tienen toda esta variedad de productos y una cantidad aproximada de 40 máquinas, las cuales en su mayoría operan 24 horas 7 días a la semana, esto requiere un sistema de refrigeración amplio y eficiente ya que, para la producción, la temperatura de las máquinas es esencial para su funcionamiento, la cual actualmente cuenta con un sistema de aerofriadoreres, sistema de refrigeración con consumos de energía eléctrica elevados los cuales representan mayores costos operativos para la empresa.

Al ser empresa de continua producción en especial el área de preforma, se necesita un sistema de refrigeración eficiente, sin dejar de lado que no tenga un consumo elevado de energía eléctrica y agua, con una mitigación del impacto ambiental consecuente del uso de estos recursos. Se busca analizar las diferentes alternativas, que podrían llegar a aplicarse para darle un mayor aprovechamiento al sistema de refrigeración, reduciendo su impacto energético y ambiental en el uso de energía eléctrica y agua, generando una opción que produzca cierto ahorro en los costos de operación.

Partiendo de los datos obtenidos bibliográficamente, se desarrolla una propuesta de mejora para el sistema de refrigeración el cual será seleccionado mediante una matriz de decisión, posteriormente se estima el comportamiento de la alternativa seleccionada mediante un modelo, la cual finalmente por medio de un análisis económico se determinará su viabilidad financiera para la industria.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Elaborar una propuesta técnico financiera como alternativa para el sistema de refrigeración en la industria plástica para la producción de preforma.

### **Objetivos específicos**

Identificar las diferentes alternativas existentes para la industria de plásticos en sistemas de refrigeración.

Seleccionar mediante una matriz de decisión la alternativa más viable para el sistema de refrigeración, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales.

Estimar el comportamiento de las variables de diseño del sistema de refrigeración mediante un modelo.

Realizar el análisis financiero de la alternativa seleccionada.

# 1. ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PARA LA INDUSTRIA PLÁSTICA

## 1.1 Industria plástica

La historia de la industria plástica inicia en Estados Unidos, en 1860, cuando se ofreció un gran premio para quien pudiera sustituir el marfil para fabricar bolas de billar. El vencedor fue John Hyatt, quien inventó el celuloide, que a su vez dio origen a la industria cinematográfica. Para 1907, Leo Baekeland inventó la baquelita, que fue considerada como el primer plástico termoestable. Era aislante, resistente al calor moderado a ácidos y al agua. Su fama creció rápidamente y ya para 1930 los científicos estaban creando los polímeros modernos que ahora dominan la industria [1]. La industria plástica en Colombia hace parte del Programa de transformación productiva, por lo tanto, tiene una proyección internacional y tiende a desarrollarse como tipo clase mundial, esto debido a la calidad de producción y valores agregados que poseen los productos terminados de esta industria.

“En Colombia se destaca una amplia oferta de envases y preformas plásticas en polipropileno, polietileno, además cuenta con la producción de resinas plásticas como PP, PE, PET, PS y PVC, las cuales tienen una alta demanda en el mundo, fabricadas con equipos de control altamente tecnificados y calidad de exportación.” [2].

La industria plástica es cada vez más crucial en las diferentes actividades del mundo moderno y en las nuevas tecnologías. El plástico se encuentra en aviones, en automóviles, en impresiones 3D, en miles de instrumentos y aplicaciones médicas, en equipos para la generación de energías no convencionales, en celulares y casi todos los aparatos electrónicos y de información, en empaques para preservar la vida verde de alimentos y bebidas, en equipos para proteger a las personas, en viviendas, en acueductos, entre muchos otros [3].

## 1.2 Refrigeración

El concepto de refrigeración está asociado con el de enfriamiento. Un cuerpo más caliente tiene una temperatura mayor que otro más frío como índice del mayor contenido de energía mecánica de las moléculas. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica los de más energía ceden calor espontáneamente a los fríos. En el

proceso de calentamiento el caliente se enfría y el frío se calienta hasta que sus temperaturas se hacen iguales [1].

“El uso industrial a gran escala, por ejemplo, en la fabricación de hielo y la deshidratación de gases. Las aplicaciones en la industria del petróleo incluyen la purificación de aceites lubricantes, las reacciones a bajas temperaturas y la separación de hidrocarburos volátiles. Un proceso estrechamente relacionado es la licuefacción de los gases, que tiene aplicaciones comerciales importantes. “[2].

La lista de procesos o productos que han mejorado con el uso de la refrigeración es prácticamente interminable. Por ejemplo, la refrigeración ha hecho posible la construcción de enormes presas de captación, vitales para la recuperación de recursos en gran escala y para proyectos hidroeléctricos. Ha hecho posible la construcción de caminos y túneles y el hundimiento de cimentaciones y tiros de minas, a través de formaciones terrestres inestables.

### ***1.2.1 Historia de la refrigeración***

En la prehistoria el hombre se vio en la necesidad de almacenar los alimentos en cuevas frías o en la nieve para así tener reservas. A lo largo de la historia hemos podido ver su evolución hasta llegar a los equipos de refrigeración que disponemos hoy en día.

Los egipcios producían hielo llenando de agua vasijas poco profundas de arcilla para después colocarlas sobre un lecho de paja durante la noche, en la India en el siglo IV y durante el periodo musulmán en la Península Ibérica se empezaron a utilizar los primeros métodos artificiales mediante procesos químicos. Mediante el uso de nitrato sódico y nitrato de potasio en el agua se conseguía disminuir la temperatura.

Para el siglo XIX ya eran más y mejores las tecnificaciones en mezclas de sales y agua en cuestión de generación de un ambiente frío y controlado, para finales del siglo XVIII ya varios científicos trabajaban en la producción mecánica de hielo, y con este avance poder producir cantidades inagotables de un frío controlado y estable, Para 1744 se descubrió el amoníaco y el dióxido de carbono y la invención de la primera máquina frigorífica de compresión.

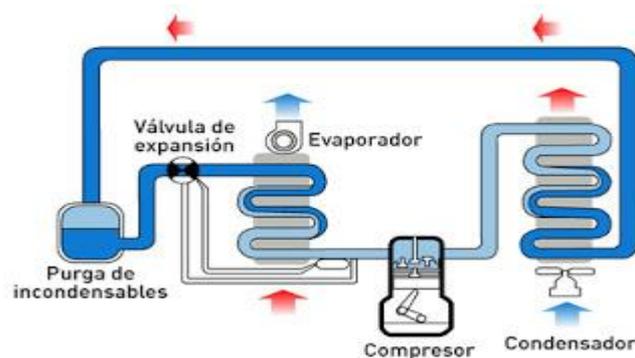
Ya desde 1987 en adelante, la evolución en las mezclas y químicos que se venían utilizando en la refrigeración dio paso a catástrofes ambientales que se intentaron contrarrestar desde entonces con tratados y protocolos como el de Montreal y los acuerdos como el de París actualmente, gracias a la ONU y otros organismos en pro de cuidar la capa de ozono muchos refrigerantes ahora sintéticos y basados en hidrocarburos buscan reemplazar las sustancias que deterioran el medio ambiente y pronto llegarán más refrigerantes aún mejores y más limpios [4]

### 1.2.2 Refrigeración mecánica

Consiste fundamentalmente en el empleo de refrigerantes que al ser sometidos a un descenso de presión su punto de ebullición disminuye ostensiblemente. En el evaporador, el refrigerante ebulle absorbiendo calor del medio provocando un descenso en la temperatura de la cámara. Luego, el vapor de refrigerante que es comprimido y enfriado a presiones elevadas mediante agua o aire se licúa en el condensador.

**Figura 1.**

*Ciclo de refrigeración.*



**Nota.** La figura representa el ciclo base de refrigeración, donde se da un preliminar de los procesos y equipos bases necesarios. Tomado de: refrigeracioncyltda, «refrigeracióncyc,»Refrigeración Correa&Cardenas,16Agosto2018.[Enlínea].Available :<https://www.refrigeracioncyc.com/historia-refrigeracion-breve-resena/>. [Último acceso: 1 Febrero 2021].

1.2.2.a. Refrigerador de Carnot. El ciclo de Carnot es totalmente reversible, permitiendo que los cuatro procesos que comprenden el ciclo puedan invertirse. El resultado es un ciclo que opera en dirección contraria a las manecillas del reloj, que se llama ciclo invertido de Carnot.

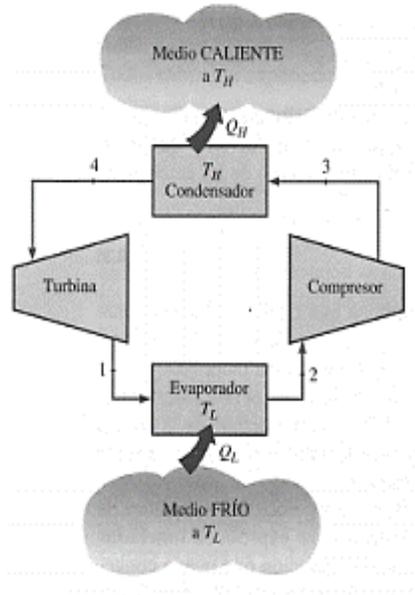
Aquel dispositivo que opera bajo este sistema se le conoce como refrigerador o bomba de calor de Carnot, aunque hoy en día no es utilizado por lo inviable lo cual se explicará, aun así, sirve de referencia para evaluar el desempeño de un dispositivo real que trabaje bajo las mismas condiciones de temperatura.

Los inconvenientes de un ciclo de refrigeración de Carnot como modelo de dispositivo práctico radican en los procesos de compresión y expansión. En general debe evitarse comprimir una mezcla húmeda por el daño de las presencias de pequeñas gotas líquidas puedan causar al compresor (caso análogo de las turbinas de vapor).

La expansión con una turbina bajo condiciones similares a la ya descrita es igual de perjudicial, la restricción a las condiciones de saturación limita la capacidad de absorber calor. Las modificaciones para evitar estos dos tipos de problemas inherentes al ciclo de Carnot conducen en la práctica al ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

**Figura 2.**

*Ciclo de Carnot inverso.*



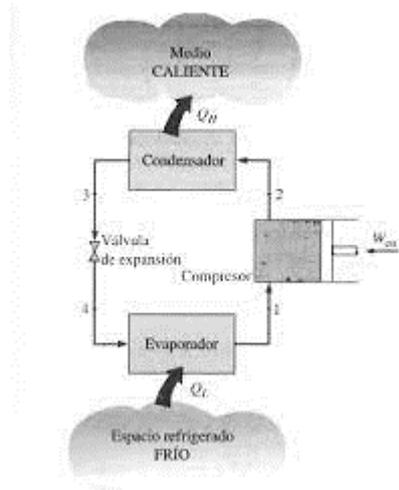
**Nota.** La figura representa el ciclo de transferencia de calor mediante el uso de una máquina de Carnot inversamente para la refrigeración. Tomado de: Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, McGraw Gill, 7ta Edición, 2009.

1.2.2.b Sistemas de compresión y absorción de vapor. En el proceso de compresión de vapor se realizan modificaciones al ciclo de Carnot basados en las siguientes consideraciones:

- En el proceso de compresión, el fluido de trabajo solo debe estar en la fase de vapor.
- Para expandir el refrigerante es recomendable utilizar un dispositivo más económico y con cero mantenimientos (válvula de estrangulamiento o tubo capilar).
- La temperatura de condensación no debe limitarse a la zona de saturación.

**Figura 3.**

*Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.*



**Nota.** En la figura se representa el ciclo de refrigeración por medio de la compresión de vapor, en un sistema cilindro émbolo. Tomado de: Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, McGraw Gill, 7ta Edición, 2009.

El término "absorción" se asocia directamente a los procesos físicos y químicos que ocurren al entrar en contacto gases y líquidos, gases y sólidos o líquidos y sólidos, e incorporarse el fluido a la otra sustancia, pudiéndose separar el fluido mediante el proceso inverso y llegar a la condición inicial.

En el sistema de absorción se utiliza la energía calorífica, para elevar la presión del refrigerante, la baja presión del evaporador se mantiene, mediante el uso de otra sustancia llamada Absorbente. Dos componentes, el absorbedor y el generador, realizan una función semejante a la del compresor. En el sistema de absorción se utilizan a menudo componentes auxiliares como las bombas.

1.2.2.c Refrigerante y recuperación de estos. La evolución de los refrigerantes ha sido notoria con el paso del tiempo, en sus inicios se tuvo refrigeración natural con el uso de hielo almacenado y con el aprovechamiento de la vaporización del agua para el control de la temperatura. La primera generación de refrigerantes utilizados por cien años fueron solventes y productos químicos de alta volatilidad, de estos casi todos eran inflamables, tóxicos y reactivos. Los dos refrigerantes que sobresalen de este periodo de tiempo son el propano (R-290) del cual se tenía predilección por encima del amoniaco (R-717), el propano se describe como un refrigerante seguro y sin olor para aquella época.

En continuación se empezó con el uso de fluoroquímicos, estos al tener una mayor seguridad a la hora del uso y una mayor durabilidad los hacía tener una gran predilección; pero esto al tener compuestos tóxicos y contaminantes para la atmósfera, contribuyentes al agujero de ozono conocido en la época de 1930. Para 1980 se reconoce la gran problemática de estos refrigerantes, esto conlleva a la transición final a los refrigerantes alternativos los cuales debían de tener una gran eficiencia, no ser tóxicos o con olor para su manipulación y sin tener un gran impacto ambiental, para el cual se tiene una meta para el año 2030 en la eliminación total y uso nulo de clorofluorocarbonos y los hidroclorofluorocarbonos (CFC y HCFC) .[6].

La recuperación se basa en extraer un fluido frigorífico de un sistema frigorífico con el fin de ser almacenado, reciclado, regenerado o transportado. Las operaciones de recuperación implican la utilización de tres clases de material: Recipientes específicos, equipos de recuperación, materiales y herramientas conexas.

“Posteriormente se realiza el reciclaje del refrigerante. La reutilización de una sustancia controlada recuperada mediante un procedimiento de depuración básico, tal como el filtrado o el secado. En el caso de los refrigerantes, el reciclado normalmente entraña la recarga en el equipo. A menudo tiene lugar “sobre el terreno” [7].

Para culminar con la regeneración del refrigerante, la reelaboración y purificación de una sustancia controlada recuperada mediante mecanismos como el filtrado, el secado, la destilación y el tratamiento químico a fin de restablecer el estándar de rendimiento especificado de las sustancias. A menudo entraña la elaboración “fuera

del lugar” en una instalación central.

1.2.2.d Selección de refrigerante. La selección de un refrigerante consiste en un proceso de análisis de sustancias seleccionadas, para ello es necesario tener clara información relevante como lo sería las propiedades ambientales y de seguridad, propiedades físicas, propiedades termodinámicas y el origen de la sustancia a usar.

Existe un método llamado Ponderación Lineal Scoring, el cual permite evaluar, diagnosticar y asignar mediante una decisión multicriterio el valor o peso a las alternativas previamente seleccionadas.

Propiedades de los refrigerantes.

Para realizar una comparación se debe tener en cuenta las propiedades objetivo de las sustancias refrigerantes indicadas en la tabla 1.

**Tabla 1.***Refrigerantes de mayor uso*

Identificación	Nombre químico	Fórmula química
R 22	Clorodifluorometano	CHClF <sub>2</sub>
R 134a	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
R 170	Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>
R 290	Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
R 600	Butano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
R 600a	2-Metilpropano (Isobutano)	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>
R 1270	Propileno	CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>
R 717	Amoníaco	NH <sub>3</sub>
R 744	Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>
R 404A (HP62)	Mezcla HFC (R125-R143a-R134a) (44 %-52 %-4 %)	-
R407C	Mezcla HFC-HFD (R134a-R125-R32) (52 %-25 %-23 %)	-
R410A	Mezcla HFC-HFD (R125-R32) (50 %-50 %)	-
MO29 (R402D)	Mezcla HFC-HC (R134a-R125- R 600a) (31.5 %-65.1 %-3.4 %)	-
MO49 (R413A)	Mezcla HFC (R134a-PFC218-R600a) (88 %-9 %-3 %)	-
MO59 (R417A)	Mezcla HFC-HC (R125-R134a-R600) (46.6 %-50 %-3.4 %)	-
MO79 (R422A)	Mezcla HFC-HC (R125-R134a-R600a) (85.1 %-11.5 %-3.4 %)	-
HFO 1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoropropeno	CF <sub>3</sub> CFCH <sub>2</sub>
R507	Mezcla HFC (R125-R143a) (50 %-50 %)	-

**Nota.** Esta tabla representa los refrigerantes de mayor uso en la industria. Tomado de Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 n° 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives.

## Propiedades ambientales y de seguridad

Estas propiedades representan el potencial agotador de ozono-PAO y el potencial de calentamiento global-PCG.

**Tabla 2.***Propiedades ambientales y de seguridad.*

Refrigerante	PAO (ODP)	PCG (GWP) 100 años	Clasificación de seguridad	Inflamabilidad % de volumen en el aire	Temperatura de autoignición
R134a	0	1430	A1	N/A	743 °C
R600	0	3	A3	LFL 1.4 % UFL 9.5 %	365 °C
R 600a	0	3	A3	LFL 1.85 % UFL 8.5 %	460 °C
R 22	0.055	1700	A1	N/A	632 °C
R407C	0	1774	A1	N/A	-
R410A	0	2088	A1	N/A	-
R 290	0	3	A3	LFL 2.1 % UFL 9.5 %	470 °C
R 404A	0	3922	A1	N/A	-
R 170	0	3	A3	LFL 3.0 % UFL 12.5 %	515 °C
R 717	0	0	B2	LFL 16 % UFL 25 %	651.1 °C
R 744	0	1	A1	N/A	-
R 1270	0	2	A3	LFL 2.1 % UFL 11.1 %	455 °C
MO29 (R402D)	0	2230	A1	N/A	-
MO49 (R413A)	0	1085	A1	N/A	-
MO59 (R417A)	0	1950	A1	N/A	-
MO79 (R422A)	0	2530	A1	N/A	-
HFO 1234yf	0	4	A2L	LFL 6.2 % UFL 12.3 %	405 °C
R507	0	3985	A1	N/A	750 °C

**Nota.** Esta tabla indica la clasificación de seguridad y las propiedades ambientales de los diferentes refrigerantes. Tomado de Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 n° 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives.

**Tabla 3.***Propiedades termodinámicas*

Refrigerante	Temperatura de congelación a 1.013 bares	Temperatura de evaporación a 1.013 bares	Presión de condensación a 25°C	Temperatura crítica a 1.013 bares	Presión crítica absoluta
	°C	°C	kPa	°C	kPa
R134a	-103.3	-26.5	665.7	101.2	4067
R600	-138.29	-0.54	242.65	151.98	3796
R 600a	-159.6	-11.75	-	134.66	3629
R 22	-160.0	-40.76	1044	96.15	4988
R407C	-	-43.5	1174	86.74	4620
R410A	-	-51.58	1650	72.13	4926
R 290	-187.3	-42.1	951.8	96.7	4248
R 404A	-	-46.45	1254.67	72.07	3731
R 170	-182.8	-88.6	787	32.3	4872
R 717	-77.74	-33.33	98.8	132.5	11330
R 744	- 56.57	-78.5	-	31.1	7377
R 1270	-185.25	-47.8	1158	92.42	4665
MO29 (R402D)	-	-43	1220	79.5	3903
MO49 (R413A)	-	-43	778	102.5	4120
MO59 (R417A)	-	-39	985	87.1	4039
MO79 (R422A)	-	-47	1274	71.7	3750
HFO 1234yf	-	-29.55	673	94.7	3382
R507	-	-46.9	1274	70.9	3793

**Nota.** Esta tabla representa las propiedades termodinámicas de los diferentes tipos de refrigerantes. Tomado de Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 n° 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives.

**Tabla 4.**

*Propiedades físicas Tabla*

Refrigerante	Masa molar	Densidad líquido a 1.013 bares en el punto de ebullición	Densidad vapor a 1.013 bares en el punto de ebullición	Volumen específico en fase vapor a 1.013 bares	Calor latente de vaporización a punto de ebullición
	kg/mol	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg
R134a	102.03	1376	5.278	0.2035	216.92
R600	58.12	601.26	27.093	0.3949	385.71
R 600a	58.12	593.821	28.265	0.3786	365.101
R 22	86.47	1.409.172	47.039	0.2262	233.75
R407C	86.20	1134	4.6	0.2242	249.9
R410A	72.59	1062	4.12	0.2569	276
R 290	44.10	581	2.427	0.441	425.5
R 404A	97.61	1048	5.41	0.1955	200
R 170	30.07	543.83	2.054	0.5166	489.4
R 717	17.03	681.97	0.889	11.853	1369.5
R 744	44.01	763	1.83	0.3723	131.59
R 1270	42.08	504.45	1.762	0.4508	286.26
MO29 (R402D)	109.9	1144	5.88	0.1763	190.22
MO49 (R413A)	103.7	1188	3.9	0.1868	211.6
MO59 (R417A)	109	1149	5.61	0.1808	197.9
MO79 (R422A)	116	-	6.25	0.1641	175.8
HFO 1234yf	114.04	-	5.98	0.1798	-
R507	98.9	1237	5.51	0.1925	200.5
R 404A	-	-46.45	1254.67	72.07	3731
R 170	-182.8	-88.6	7.87	32.3	4872
R 717	-77.74	-33.33	98.8	132.5	11330
R 744	-56.57	-78.5	-	31.1	7377
R 1270	-185.25	-47.8	1158	92.42	4665
MO29 (R402D)	-	-43	1220	79.5	3903
MO49 (R413A)	-	-43	778	102.5	4120
MO59 (R417A)	-	-39	985	87.1	4039
MO79 (R422A)	-	-47	1274	71.7	3750
HFO 1234yf	-	-29.55	673	94.7	3382
R507	-	-46.9	1274	70.9	3793

**Nota.** Esta tabla hace referencia a las propiedades físicas, como densidades, volumen y calor latente de los diferentes tipos de refrigerantes. Tomado de Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 nº 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives.

**Tabla 5.**

*Origen de los refrigerantes*

<b>Refrigerante</b>	<b>Natural</b>	<b>Sintético</b>
R134a		X
R600	X	
R 600a	X	
R 22		X
R407C		X
R410A		X
R 290	X	
R 404A		X
R 170	X	
R 717	X	
R 744	X	
R 1270	X	
MO29 (R402D)		X
MO49 (R413A)		X
MO59 (R417A)		X
MO79 (R422A)		X
HFO 1234yf		X
R507		X

**Nota.** Esta tabla indica el tipo de origen, si es natural o sintético de los diferentes refrigerantes. Tomado de Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 n° 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives.

### **1.3 Intercambiadores de calor**

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. Un entendimiento básico de los componentes mecánicos de los intercambiadores de calor es necesario para comprender cómo estos funcionan y operan para un adecuado desempeño [9].

En otras palabras, estos equipos son aquellos que permiten la transferencia de calor

entre un medio caliente y uno frío, por lo general son fluidos. De los cuales existen 3 tipos básicos de intercambiadores

### ***1.3.1 Tipos básicos de intercambiadores de calor***

Los recuperadores, regeneradores e intercambiadores de calor de contacto directo son los tipos básicos de intercambiadores de calor.

“Los recuperadores: En este tipo de intercambiador de calor los fluidos caliente y frío están separados por una pared y el calor se transmite mediante una combinación de convección hacia y desde la pared y de conducción a través de ella.” [1]

“Son conocidos los recuperadores de calor de tubo y coraza, de amplio uso en las industrias termo energéticas por su elevada eficiencia en la transmisión del calor, elevando significativamente la transferencia de calor del portador energético al medio enfriador.” [10]

El uso de regeneradores es frecuente para recuperar calor de los humos que proceden de los hornos en los que se efectúa un proceso metalúrgico. Así, en el horno Martin-Siemens o en los hornos de vidrio, los humos calientes se hacen pasar a través de un apilamiento de ladrillos refractarios, que resisten en forma adecuada las temperaturas elevadas de operación y cuando se han calentado convenientemente se cambia el flujo de humos por el flujo de aire que se precisa en el horno. [11]

Intercambiadores de calor de contacto directo: han sido propuestos para diversas aplicaciones entre ellas la desalinización de agua y para su utilización con fuentes alternas de energía; como estanques solares y energía geotérmica de temperatura media. Estos intercambiadores de calor presentan ventajas comparados con los intercambiadores de calor convencionales de coraza y tubos, no ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor, altas velocidades de transferencia de calor y bajo costo de construcción. Se usa la diferencia de densidades para la transferencia de calor a contracorriente entre dos fluidos inmiscibles [12].

### ***1.3.2 Consideraciones para el diseño***

En el momento de especificar el diseño de un intercambiador de calor, es necesario definir si los fluidos a tratar son mezclados o sin mezclar.

Definir según la bibliografía y la necesidad del proceso, el tipo de intercambiador a usar, ya sea con panel de tubo fijos, de cascada, desmontable o de un paso.

También es importante tener claras las dimensiones y valores recomendados que se le darán a este equipo, tales como: el diámetro de tubos, espesor, longitud, paso entre tubos, diámetro de la envolvente, deflectores, llantas de sellado y varillas de unión.

Un factor importante es la selección del material del cual serán construidos los diferentes componentes del intercambiador de calor, además de esto se tendrán en cuenta algunas de las propiedades como lo son:

### 1. Las propiedades mecánicas

A continuación, se describen las propiedades más importantes como:

- Resistencia a la tracción
- Consistencia, rigidez y módulos clásicos
- Resistencia a fracturas
- Dureza
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al arrastre

### 2. Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas

Como descripción de estas propiedades, es importante la resistencia a la tracción y los módulos elásticos de los metales ya que estos decrecen al momento de elevar la temperatura.

### 3. Corrosión

Es el deterioro que sufre un material en sus propiedades debido a una reacción con el medio, por medio de un mecanismo electroquímico de intercambio de electrones.

El avance de la ingeniería ha permitido la producción de muchos materiales resistentes a la corrosión. Algunos factores que influyen en la corrosión son:

- pH de la solución: La velocidad de corrosión del acero aumenta a medida que disminuye el pH. Esta relación de la velocidad con el pH está influenciada por la

composición del electrolito

- Agentes oxidantes: los agentes oxidantes son con frecuencia potentes aceleradores del proceso de corrosión (como el hidrógeno). Aunque pueden acelerar la corrosión de unos materiales, pueden en cambio retardar la que se produce en otros mediante formación de óxidos en superficie o absorción de capas de oxígeno que las hacen resistentes a los ataques químicos.
- Temperatura: al igual que las reacciones químicas, la velocidad de corrosión aumenta generalmente con la temperatura; la velocidad se duplica por cada diez grados centígrados que aumenta esta.
- Gases disueltos: El oxígeno, dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico disueltos en agua aumentan la corrosividad de esta, por lo tanto, los gases en solución acuosa son la principal causa de los problemas de corrosión.

#### 4. Presión

Será un factor importante ya que se tendrá en cuenta para la selección del grosor del material [13].

### 1.3.3 Coeficiente global de transferencia de calor

Uno de los primeros enfoques que se deben tener en cuenta al momento de hacer un análisis térmico es el de evaluar el coeficiente global de transferencia de calor entre las dos corrientes de fluidos a tratar. El concepto anteriormente mencionado es la relación entre un fluido caliente con temperatura  $T_h$  y un fluido frío con temperatura  $T_c$ , separados por una superficie se define mediante la siguiente ecuación:

#### **Ecuación 1. Ecuación global de transferencia de calor**

$$Q = UA(T_h - T_c)$$

Donde U: coeficiente global de transferencia de calor,  $U = (W/m^2K)$

$$UA = \frac{1}{\sum_{n=1}^n R_n} = \frac{1}{(1/h_1A_1) + (L/KA_k) + (1/h_2A_2)}$$

Si el coeficiente de transferencia de calor se basa en el área externa,  $A_o$ , tenemos que:

$$U_o = \frac{1}{(A_o/A_i h_i) + [A_o \ln(r_o/r_i) / 2\pi K L] + (1/h_o)}$$

Si el coeficiente de transferencia de calor se basa en el área interna,  $A_i$ , tenemos que:

**Ecuación 2.** *Sumatoria total de resistencias en un intercambiador de tubos.*

$$U_i = \frac{1}{(1/h_i) + [A_i \ln(r_o/r_i) / 2\pi K L] + (A_i/A_o h_o)}$$

#### **1.3.4 Factores de depósito o suciedad**

El ensuciamiento, conocido como Fouling por su definición en inglés, consiste en una deposición de materiales no deseados en la superficie de transferencia de calor. “El término Fouling hace referencia a la acumulación de suciedad, residuos, sedimentos en la superficie donde se lleva a cabo la transferencia de calor, reduciendo la eficiencia del proceso y dando lugar a problemas en planta y a altos costos de producción.” [14]. Esta terminología se usa ampliamente para describir la acumulación y formación de sustancias no deseadas en una interfaz, que es causa de la disminución de la eficiencia [15].

#### **1.3.5 Diferencia logarítmica media de temperatura**

Las temperaturas de los fluidos en un intercambiador de calor en general no suelen ser constantes, sino que varían de un punto a otro, conforme el calor fluye del fluido más caliente al más frío. Por lo tanto, incluso en el caso de una resistencia térmica constante, el flujo de calor variará a lo largo de la trayectoria de los intercambiadores porque su valor depende de la diferencia de temperaturas entre el fluido caliente y el frío en esa sección [1].

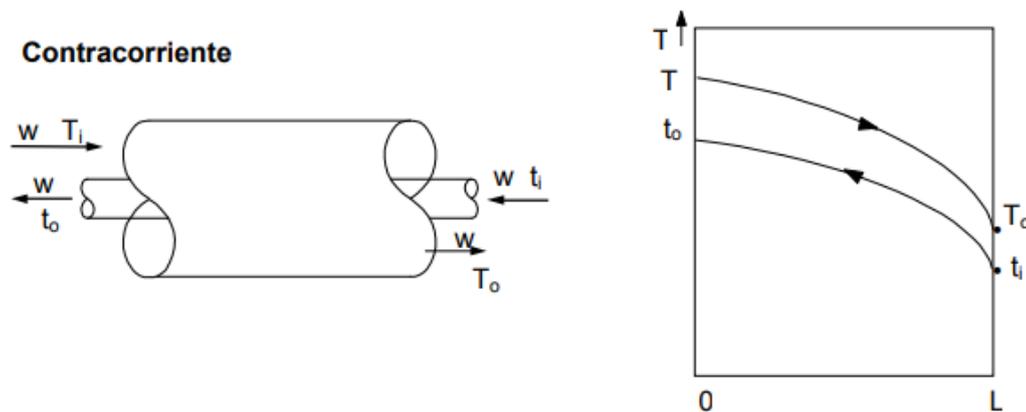
“Mediante un balance diferencial de energía en un punto del intercambiador; se llega a la conclusión de que el promedio logarítmico de la diferencia de temperaturas de los extremos del intercambiador representa la verdadera fuerza impulsora de un intercambiador en contracorriente o en paralelo, siendo a su vez estas medias logarítmicas para cada tipo de flujo, diferentes.” [16].

“La obtención de la diferencia de temperatura media logarítmica implica dos hipótesis importantes: los calores específicos no varían con la temperatura y los coeficientes de transferencia de calor por convección se mantienen constantes al atravesar el intercambiador de calor. Los fluidos se desplazan, por lo general, en corrientes del mismo sentido o en contracorriente.” [16]

A continuación, se presentan dos casos de transferencia de calor, en contracorriente y en paralelo, con una demostración gráfica del distinto comportamiento del perfil de temperatura en la transferencia de calor. Con su correspondiente ecuación matemática para hallar la diferencia logarítmica media de temperatura o como es abreviada LMTD.

**Figura 4.**

*Diferencia de temperatura media logarítmica en contracorriente.*



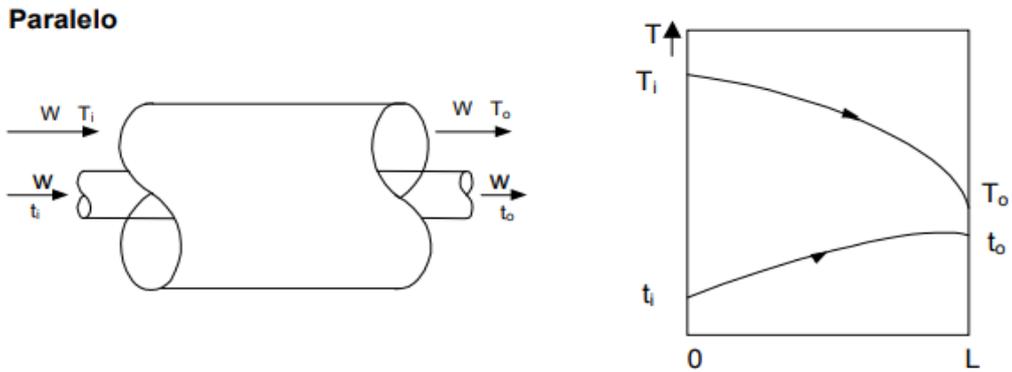
**Nota.** En la figura se representa el perfil de temperaturas en un intercambiador de calor contracorriente. Tomado de: M. González, “Operaciones Unitarias I Unidad N ° 4,” 2012.

**Ecuación 3.** *Media logarítmica en un sistema contracorriente.*

$$LMTD = \frac{(T_i - t_o) - (T_o - t_i)}{\ln \left( \frac{T_i - t_o}{T_o - t_i} \right)}$$

**Figura 5.**

*Diferencia de temperatura media logarítmica en paralelo.*



**Nota.** En la figura se representa el perfil de temperatura en un intercambiador de flujo en paralelo. Tomado de. González, "Operaciones Unitarias I Unidad N ° 4," 2012.

### 1.3.6 Eficiencia de un intercambiador de calor

"El parámetro de la eficiencia en un intercambiador, no es muy empleado en la comprobación del desempeño de un intercambiador. El mismo refiere en qué medida el intercambio de calor se realiza a la máxima temperatura. El paso del calor tiene lugar en virtud del gradiente térmico, el cual dependerá de la diferencia de temperatura entre ambos fluidos." [17]. Este término matemático se puede determinar de dos distintas maneras de manera general, primero teniendo como referencia la sustancia con mayor temperatura a la entrada del equipo, denominada, sustancia hot, por otro lado, si se tiene como referencia la sustancia con menor temperatura esta es denominada sustancia cold, todas las propiedades físicas y químicas se les añade un subíndice h o c, haciendo referencia a lo previamente mencionado.

A continuación, se presentan las dos alternativas de la ecuación de eficiencia.

**Ecuación 4.** *Eficiencia para un intercambiador en contracorriente.*

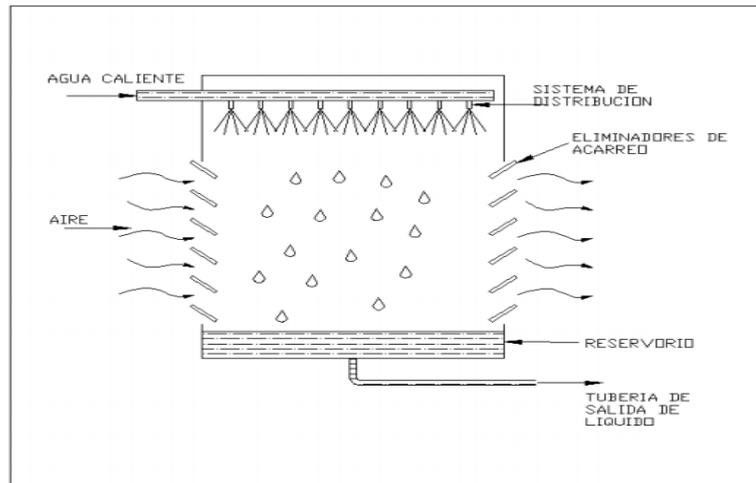
$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,entrada} - T_{h,salida})}{C_{min}(T_{h,salida} - T_{c,entrada})}$$

**Ecuación 5.** Eficiencia para un intercambiador en paralelo.

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,salida} - T_{c,entrada})}{C_{min}(T_{h,entrada} - T_{c,entrada})}$$

**Figura 6.**

*Torre de enfriamiento de tiro atmosférica.*

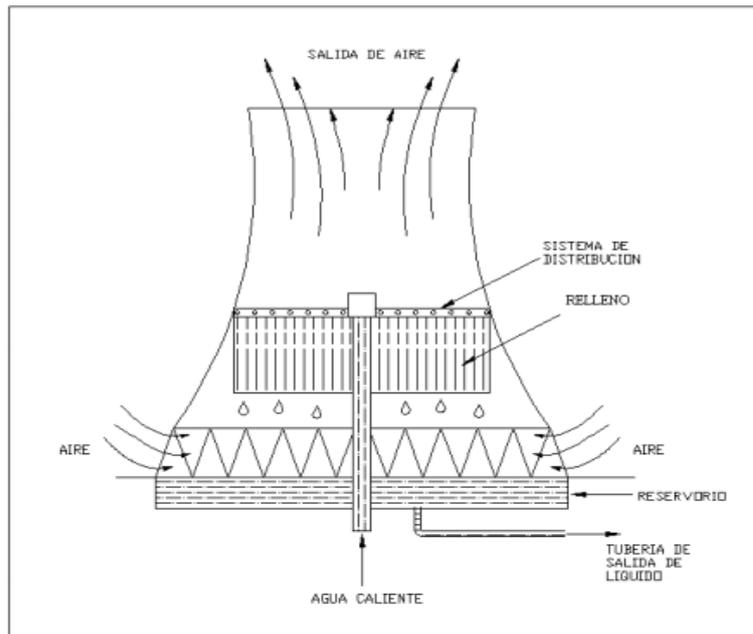


**Nota.** En la figura se representa un bosquejo de una torre de enfriamiento de tiro inducido, la cual deja fluir el aire libremente en la parte inferior. Tomado de: S. Villa, Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

Torres de tiro natural: "Aquella en la que el aire es inducido por una chimenea, donde la diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico crea un tiro de aire a través de la torre" [18].

**Figura 7.**

*Torre de enfriamiento de tiro natural.*



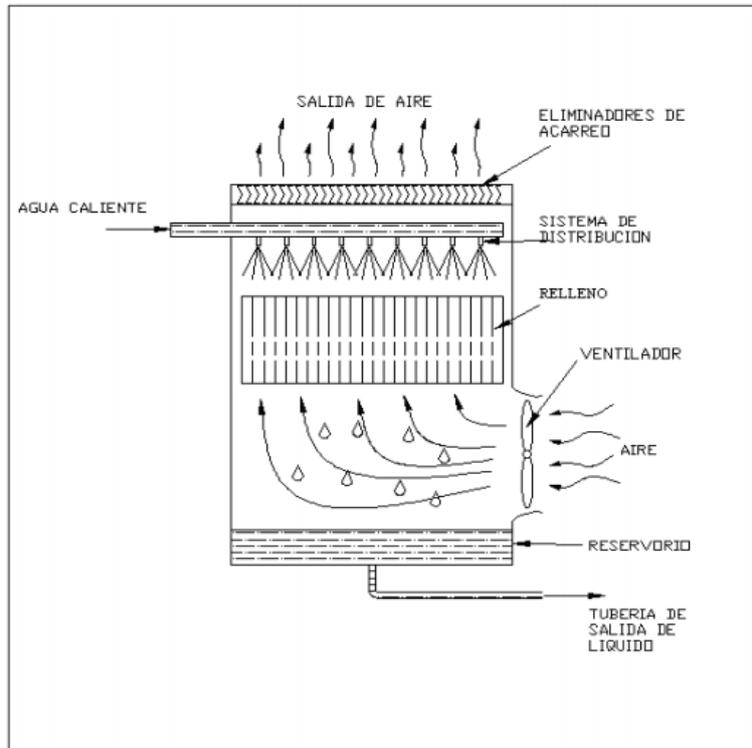
**Nota.** En la figura se visualiza una torre de tiro natural, la cual permite el libre flujo de aire atmosférico. Tomado de: S. Villa ,Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

Las torres de tiro mecánico se clasifican en:

Torres de tiro forzado: En estas torres el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior, generalmente son torres de flujo contracorriente. Este tipo de torres presentan mayor eficiencia que las de tiro inducido, lo que significa que el equipo tendrá mayor duración ya que el ventilador trabaja con aire frío, no saturado y menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida [18].

**Figura 8.**

*Torre de enfriamiento de tiro forzado con flujo contracorriente.*

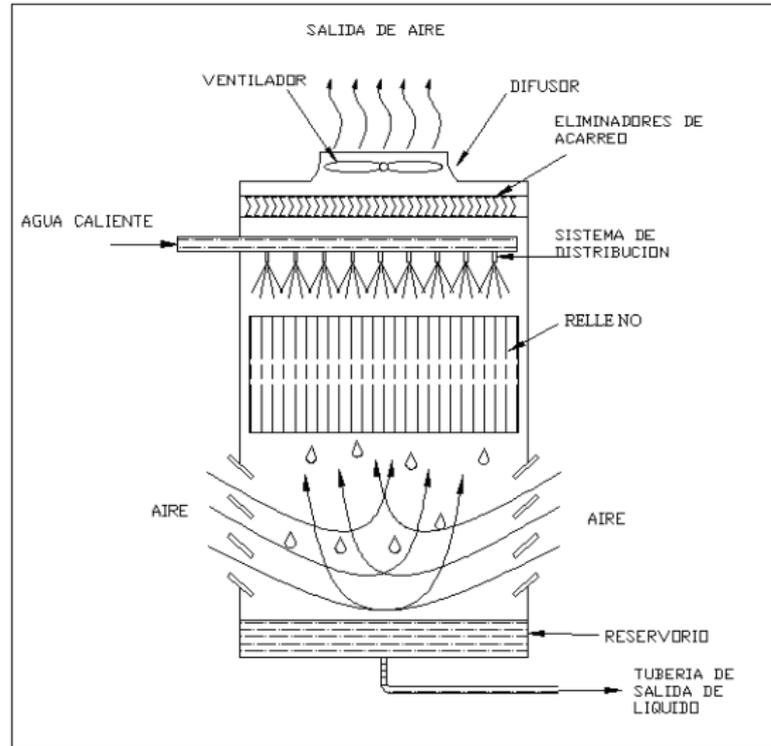


**Nota.** En la figura se representa una torre de enfriamiento la cual succiona el aire mediante un ventilador y sale por diferencial de densidad por la cima. Tomado de: S. Villa, Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

Torres de tiro inducido: “Estas torres pueden ser de flujo contracorriente o cruzado, donde el aire puede entrar en una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir medidas de altura de entrada, además eleva la velocidad evitando riesgos de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre.” [18].

**Figura 9.**

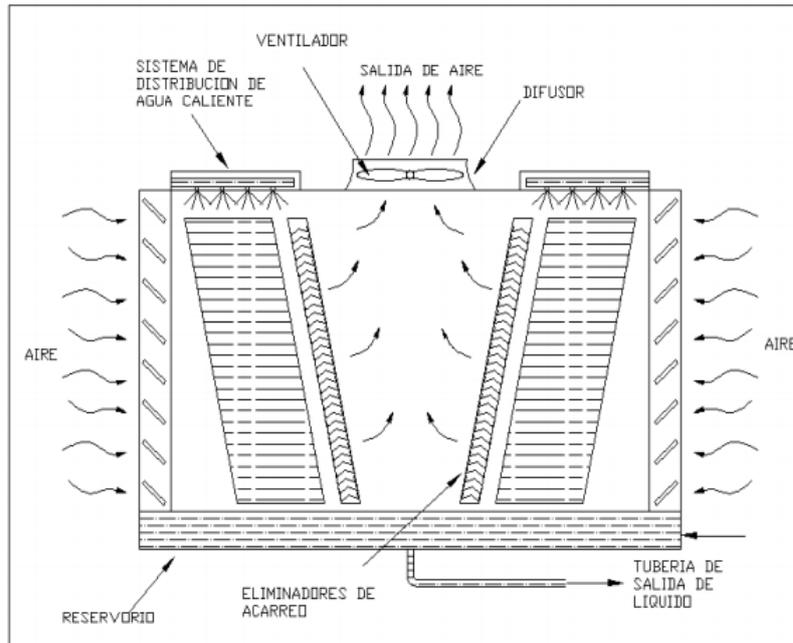
*Torre de enfriamiento inducido con flujo contracorriente.*



**Nota.** En la figura se representa la torre de enfriamiento más frecuente de uso en las industrias, en la cual el ventilador se encuentra en la parte superior y hay un contacto en contracorriente del fluido y el aire. Tomado de: S. Villa, Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

**Figura 10.**

*Torre de enfriamiento inducida de tiro cruzado.*



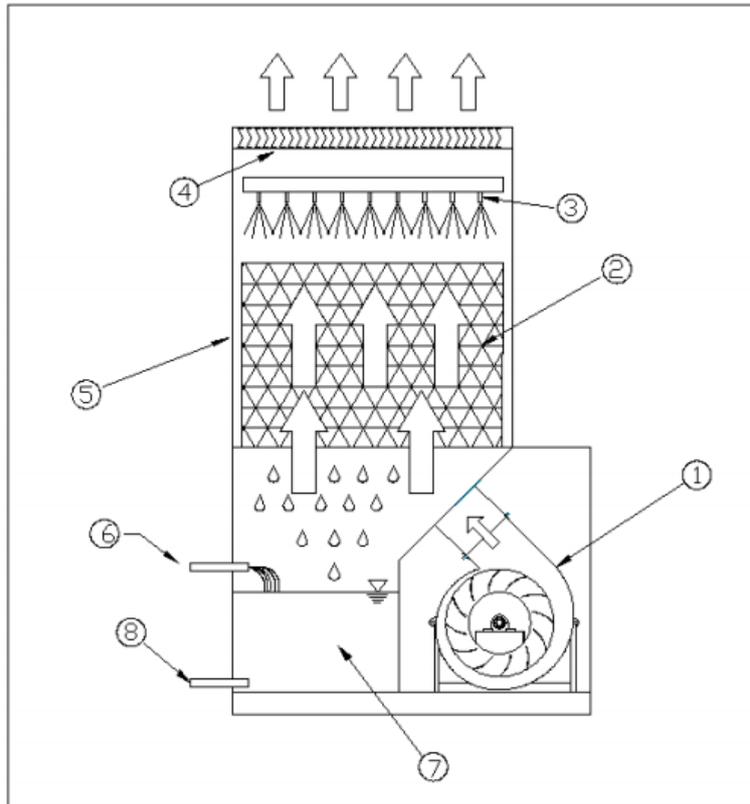
**Nota.** En la figura se representa una torre, en la cual el aire en un área mayor para un contacto con el fluido a enfriar. Tomado de: S. Villa, Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

#### 1.4.4 Partes de una torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento por lo general poseen las siguientes partes:

**Figura 11.**

*Partes de una torre de enfriamiento.*



**Nota.** En la figura se representa un secuenciamiento de las partes de una torre de enfriamiento convencional de contracorriente, de tiro inducido. Tomado de: S. Villa, Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.

1. Ventilador: Elemento mecánico que permite que el aire llegue al relleno interior, este elemento puede ser axial o centrífugo.
2. Relleno: Es una estructura interna de material metálico, plástico o madera, cumple con la función que el agua entrante se pueda dividir las gotas más pequeñas y a su vez que permanezcan la mayor cantidad de tiempo dentro del cuerpo de la torre.

3. Sistema de distribución y aspersores: Permiten que el agua caliente ingrese a la torre en forma de gotas y logrará mayor superficie de contacto.
4. Eliminadores de acarreo: Son unas estructuras ubicadas en la parte superior de la torre y tienen la finalidad de que las gotas pequeñas no sean arrastradas por la corriente de aire hacia afuera del sistema.
5. Cuerpo: Es parte de la estructura que le da forma y soporte a la torre, su material de construcción puede ser metal, hormigón, fibra de vidrio o de una combinación aleación de ellos.
6. Tubería de restitución de líquido: Conforme se produce vapor de agua, es necesario ir restituyendo, para ello se usa una tubería de presión que mantiene el nivel reservorio constante.
7. Reservorio: Su ubicación es en el fondo de la torre y es un tanque que recolecta agua enfriada con el fin de ser regresada al sistema y mejorar la carga térmica del proceso.
8. Tubería de salida de líquido: Su ubicación está en el nivel inferior del reservorio y su objetivo es extraer el agua que se ha logrado enfriar y enviarla a la carga térmica [18].

#### ***1.4.5 Normativa y mantenimiento***

Las torres de refrigeración necesitan cierta serie de operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo, esto con el fin de conservar un funcionamiento eficaz y prolongar la vida útil del equipo.

Además de las operaciones habituales de mantenimiento mecánico, estos equipos llevan asociadas otro tipo higiénico sanitario debido a la posible aparición de Legionella en ellas. Estas operaciones vienen reguladas por la normativa nacional y comunitaria, dentro del mantenimiento preventivo del equipo se encuentran áreas mecánicas, eléctricas y de control de parámetros que permiten mantener el funcionamiento eficiente y seguro, también evitar o minimizar paradas imprevistas, algunos de los mantenimientos básicos son:

Mantenimiento de la calidad de agua de refrigeración: Un punto importante al momento de diseñar una torre de refrigeración es conocer la calidad del agua de aporte y su disponibilidad, para ello es conveniente hacer análisis fisicoquímicos y

biológicos del agua. Esto permitirá evidenciar el comportamiento del agua de enfriamiento en la torre y determinará el tratamiento más indicado para nuestro proceso [19].

En la actualidad existen diversas maneras de realizar el análisis de los tratamientos de agua, lo normal es recurrir a una empresa experta en el sector o consolidar un área interna de calidad dentro de la misma empresa.

Los parámetros fundamentales a estudiar en el agua son la temperatura, pH, conductividad, dureza, alcalinidad, turbidez, incrustación, crecimiento de algas, crecimiento de microorganismos, control de corrosión, control de sólidos disueltos, control de sólidos en suspensión.

Normativa y legionelosis: Es indispensable cumplir con los niveles de calidad, por ello la presencia de microorganismos y algas en el agua de la torre de refrigeración es un aspecto importante a controlar. Es recomendable la ausencia de algas y protozoos porque facilita cobijo y protección a la Legionella, bacteria que tiene como medio natural las aguas superficiales como lagos, ríos, estanques, formando parte de la flora bacteriana [19].

El protocolo de limpieza y desinfección consiste en controlar el crecimiento de este tipo de bacterias dentro de las instalaciones, la normativa obliga a realizar cada seis meses en las torres de funcionamiento anual un protocolo el cual se realizará por un ente exterior o por el área interna designada para realizar esta operación, la cual cuenta con las siguientes características:

- Cloración del agua del sistema, al menos 5 ppm. de cloro libre residual. Añadir biodispersantes / anticorrosivos. pH entre 7 y 8.
- Recirculación del sistema durante 3 horas. Medición del cloro libre residual cada hora reponiendo la cantidad perdida.
- Neutralización del cloro, vaciado y aclarado con agua a presión.
- Realización de las operaciones de mantenimiento mecánico del equipo y reparación de averías.
- Limpiar a fondo las superficies del equipo con detergentes y agua a presión y aclarar.
- Adicionar cloro para alcanzar 15 ppm de cloro residual libre, con anticorrosivos

compatibles y en cantidad adecuada.

- Recircular el sistema durante dos horas: Medición de cloro libre cada media hora.
- Neutralización de cloro nuevamente, vaciar y aclarar.
- Llenar de agua y añadir el desinfectante de mantenimiento. [19]

## **1.5 Intercambiadores tubos y coraza**

### **1.5.1 Definición y propósito**

La construcción más básica y común de los intercambiadores de calor es la de tipo tubo y coraza, consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de coraza o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la coraza por las placas del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. En sistemas donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido con una presión más baja se circula del lado de la cáscara. Esto es debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones 3 más altas que la cáscara del cambiador con un costo mucho más bajo. [9]

Dichos intercambiadores son seleccionados para servicios tales como: enfriamiento de líquidos o gases, procesos donde se condensa vapores de refrigerantes o condensación de vapor de agua, procesos de evaporación de refrigerantes agua u otros líquidos; procesos de extracción de calor y calentamiento regenerativo del agua de alimentación a calderas; para la recuperación del calor en efluentes gaseosos y líquidos residuales calientes, para el enfriamiento de aire y aceite de lubricación en compresores, turbinas y motores, mediante camisas de enfriamiento y muchas otras aplicaciones industriales [2].

### **1.5.2 Funcionamiento**

Este tipo de intercambiador se emplea en grandes aplicaciones industriales. Contienen un gran número de tubos empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se

mueve por dentro de los tubos, por lo cual el otro se mueve por fuera de estos, pasando por el casco. Por lo general se emplean desviadores en el casco, lo cual fuerza al fluido a moverse en dirección transversal a dicho casco con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espacio uniforme entre los tubos [20].

### 1.5.3 Clasificación

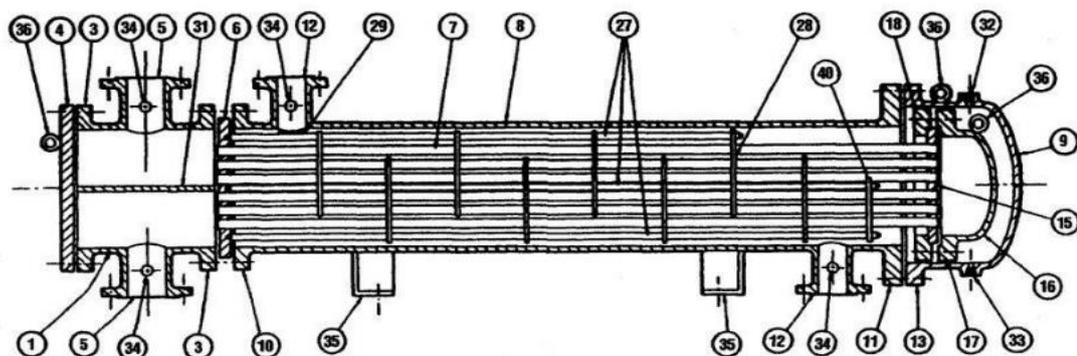
Se clasifican por el número de veces que pasa el fluido por la coraza y por el número de veces que pasa el fluido por los tubos, también el tipo de arreglo influye en esta clasificación.

### 1.5.4 Partes de un intercambiador tubos y coraza

“TEMA (Tubular exchanger manufacturers association), esta norma internacional, los principales componentes de un intercambiador de calor se muestran en la Figura 8, donde se enumeran las principales partes, estas son válidas para cualquier tipo de configuración en un intercambiador de coraza y tubos.” [21]. En este caso, se numeran para una configuración de doble paso por la coraza y de paso simple por los tubos, uno de los más utilizados en la industria. En la Tabla 6 se describen los componentes.

**Figura 12.**

*Principales componentes de un intercambiador de calor de coraza y tubo.*



**Nota.** En la figura se evidencia las partes de un intercambiador tubos y coraza, de un paso en coraza y un paso en tubos. Tomado de: TEMA, Standards of the tubular exchanger manufacturers association 9na ed., New York, 2007.

**Tabla 6.**

*Componentes numerados según norma TEMA de un intercambiador de coraza y tubos.*

1	Cabezal estacionario canal	21	Cubierta del cabezal flotador exterior
2	Cabezal estacionario casquete	22	Faldón de lámina de cierre tubular del flotador
3	Pestaña de cabezal estacionario, canal o casquete	23	Brida de prensaestopas
4	Cubierta de canal	24	Empaque
5	Tobera de cabezal estacionario	25	Anillo seguidor de empaque
6	Lámina estacionaria de tubo	26	Anillo de cierre hidráulico
7	Tubos	27	Bielas y espaciadores
8	Casco	28	Desviadores transversales o placas de apoyo
9	Cubierta del casco	29	Desviador de choque
10	Brida del casco, extremo del cabezal estacionario	30	Desviador longitudinal
11	Brida del casco, extremo del cabezal posterior	31	Separación de paso
12	Tobera del casco	32	Conexión de ventila
13	Brida de la cubierta del casco	33	Conexión de drenaje
14	Junta de expansión	34	Conexión de instrumentos
15	Lámina de cierre tubular del flotador	35	Albardilla de soporte
16	Cubierta del cabezal flotador	36	Talón elevador
17	Brida del cabezal flotador	37	Ménsula de soporte
18	Dispositivo de apoyo del cabezal flotador	38	Vertedero
19	Anillo de cizalla dividida	39	Conexión de nivel líquido
20	Brida de apoyo dividida	40	Soporte cabezal flotante

**Nota.** En la tabla se nombra las partes de la Figura 12. Tomado de: TEMA, Standards of the tubular exchanger manufacturers association 9na ed., New York, 2007.

### **1.5.5 Normativa y mantenimiento**

“Los intercambiadores de calor de coraza y tubos, suelen encontrarse en diferentes tamaños estandarizados, según el área de transferencia requerida para un proceso, se fabrican según normas internacionales como la norma TEMA (Tubular exchanger manufacturers association) o en algunos casos se rigen igualmente por la normativa ASME (American Society Of Mechanical Engineers)” [21]. No hay predilección por alguna solamente que hoy en día se facilita el uso de la normativa TEMA y es la que tiene una mayor popularidad en su uso.

El correspondiente mantenimiento se realiza por alguna de las siguientes causas.

1. Ensuciamiento excesivo. Los intercambiadores expuestos a ensuciamiento deberán ser limpiados periódicamente ya que una ligera capa de suciedad en tubos reducirá su eficiencia. Un aumento de la caída de presión y/o una reducción del rendimiento

normalmente indican que es necesaria una limpieza de los tubos del haz. Debido a que la dificultad de la limpieza del haz incrementa a medida que aumenta el espesor de ensuciamiento, los intervalos de limpieza no deberán ser excesivos.

2. Bolsas de aire o gas, motivadas por un conexionado incorrecto o por la ausencia de venteos en el intercambiador.

3. Corrosión de la carcasa, distribuidor y/o tubos del haz, produciendo holgura excesiva entre bandejas y tubos o bandejas y carcasa y disminución de espesores.

Los intercambiadores podrán limpiarse mediante métodos químicos o mecánicos, siendo el usuario del equipo el que deberá seleccionar el método de limpieza más apropiado en función del tipo de equipo y de la disponibilidad de los medios de limpieza existentes en la planta. A continuación, se describen diferentes procedimientos de limpieza a ser considerados:

1. Circulación de aceite caliente a alta velocidad a través de los tubos del haz o de la carcasa.

Será efectivo para suciedades fácilmente desprendibles.

2. Circulación de agua caliente limpia por la carcasa o por los tubos para eliminar posibles

depósitos salinos.

3. Limpiadores de tubos de tipo turbina para suciedades en el interior de los tubos.

4. Baquetas o cepillos helicoidales de alambre para la extracción de incrustaciones u otras

deposiciones.

5. Limpieza por agua a alta presión.

## **1.6 Intercambiadores rotativos (aeroenfriadores)**

### **1.6.1 Definición y propósito**

Un aeroenfriador o refrigerador es un equipo formado por una batería de tubos y aletas, y un número determinado de ventiladores, todo ello integrado en una carcasa de chapa. Su función es la de enfriar un fluido (agua, aceite, glicol, vapor, entre otros) con aire. El fluido entra en los tubos que van atravesando las aletas. El aire es impulsado por unos ventiladores. El sistema funciona de forma que el fluido se enfría al pasar por las aletas que le están dando el calor al aire. En sí mismo es un sistema de intercambio de calor, que estudiaremos con mayor profundidad en apartados posteriores. [22].

### **1.6.2 Funcionamiento**

Son equipos en los cuales se retira calor de una corriente de proceso (en una operación de enfriamiento y/o condensación) usando aire como medio refrigerante. La mayor ventaja de estos equipos frente a los refrigerados por agua es que hacen innecesario todo el equipamiento que implica un circuito de agua de enfriamiento (torre, bombas, cañerías, sistemas de tratamiento, entre otros). Por esto, son la opción obligada en plantas donde no existe o está colmada la capacidad de enfriamiento con agua. Otros usos típicos son como condensador de tope de las columnas de destilación, para enfriar productos de salida de planta hacia tanques de almacenaje, como condensadores de ciclos frigoríficos, como enfriadores interetapa y post enfriadores de compresores de gas, entre otros [22].

Permite un ahorro considerable de energía, aprovechando el proceso natural del enfriamiento adiabático.

El proceso adiabático permite que el agua, proveniente de un tubo colocado sobre los serpentines de condensación, bañe los paneles evaporativos a través de los cuales pasa el aire caliente y seco extraído del ambiente, que de esta manera se enfría.

“El efecto de enfriamiento permite reducir la temperatura de condensación obteniendo una reducción considerable de la (relación de presión) del compresor, con los consiguientes beneficios de energía. El agua que pasa a través de los paneles se recoge mediante un sistema de "canelones", formado por canales ubicados debajo de

paneles individuales que hacen que el agua fluya hacia el exterior.” [23].

### 1.6.3 Clasificación.

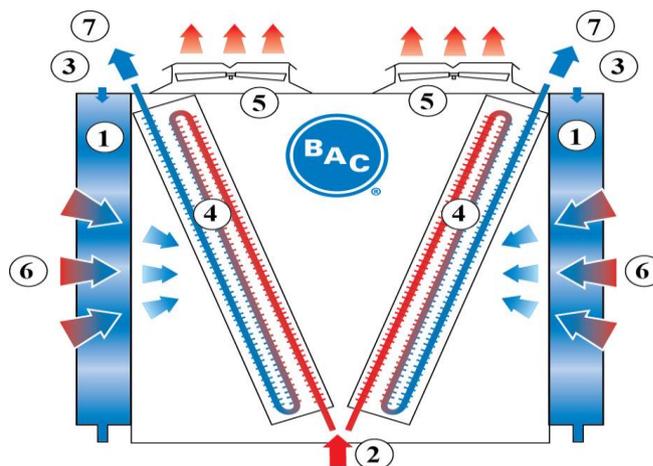
“Aeroenfriador de tiro forzado: Estos equipos requieren menor potencia, presentan mayores facilidades para mantenimiento y por otro lado los tubos están expuestos a la intemperie. Este tipo de aeroenfriadores se usan cuando el fluido caliente tiene temperaturas mayores a los 350 °F” [22].

Aeroenfriador de tiro inducido: Consume mayor potencia que el aeroenfriador de tiro forzado. Por razones de seguridad la temperatura del aire efluente está limitada a 200 °F. [22].

### 1.6.4 Partes de los intercambiadores rotativos

Figura 13.

*Aeroenfriador en forma de V.*



**Nota.** Esta figura representa un aeroenfriador convencional, el cual se asemeja a una torre de enfriamiento inducida de tiro cruzado. Tomado de A. Amor, «acrlatinoamérica,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.acrlatinoamerica.com/201905068705/articulos/otros-enfoques/torres-de-enfriamiento-2.html>. [Último acceso: 4 Febrero 2021].

Un aroenfriador en forma de V equipado con pre enfriadores adiabáticos (1) que enfrían el fluido del proceso (2) caliente mediante transferencia de calor sensible. El agua fluye (3) de manera uniforme por las almohadillas situadas frente a la batería aleteada seca (4). Al mismo tiempo, los ventiladores axiales (5) emiten aire (6) a través de las almohadillas, donde una parte del agua se evapora y enfría el aire saturado. Esto aumenta la capacidad de enfriamiento del aire entrante para el fluido (7) del proceso dentro de la batería [24].

Los aroenfriadores se configuran en las llamadas bahías que constan de los siguientes componentes:

**Mazos de tubos:** cada mazo es un conjunto de tubos aletados transversalmente por cualquiera de los distintos métodos posibles (arrolladas, incrustadas, extruidas, entre otros), cabezales de chapa soldada en calidad espesor según las condiciones de diseño y soportes de tubos.

**Ventiladores:** son de flujo axial y mueven el aire en sentido perpendicular a los tubos. Si se ubican impulsando el aire frío a través de los mazos el equipo es de tiro forzado; si, en cambio, se ubican encima de los mazos aspirando el aire caliente, el equipo es de tiro inducido.

**Pleno:** es el espacio cerrado que permite lograr un flujo de aire bien distribuido entre el ventilador y los tubos. Los hay de tipo transición o de sección recta.

**Estructura:** consta de las columnas y las vigas que soportan al resto del equipo.

### ***1.6.5 Normativa y mantenimiento***

AMCA (La Asociación Internacional del Movimiento y Control de Aire, Inc.) es una asociación internacional sin fines de lucro de los fabricantes de los equipos de sistemas de aire relacionados, primeramente, torres de enfriamiento y aroenfriadores. fue establecido en 1955, para garantizar la integridad en las calificaciones de ventiladores y otros productos del sistema de aire. Hoy en día, cerca de 300 fabricantes acreditan su información y compiten con la integridad de la igualdad de condiciones, con el apoyo de la mayoría de los seleccionadores que requieren certificación de terceras partes para el desempeño de los equipos que adquieren. [25].

Los mantenimientos o inspecciones al equipo se pueden catalogar en:

Mantenimiento rutinario diario, el cual consiste en:

- Inspección visual de la zona (fugas de agua, ruidos y vibraciones extrañas, entre otros)
- Presión y temperatura del agua de aporte a la torre
- Inspección visual de la válvula de aporte
- Comprobación del caudal aportado en las últimas 24 horas, si se dispone de caudalímetro en el aporte
- Temperatura del agua en la entrada a la torre
- Temperatura del agua en la balsa, y comprobación del salto térmico
- Comprobación del buen funcionamiento de los equipos de dosificación química

Mantenimiento semestral, el cual consiste en:

- Comprobación del consumo del ventilador
- Engrase de ejes del ventilador
- Inspección visual del relleno
- Inspección visual de la distribución de agua en la parte superior
- Análisis de vibraciones de ventiladores, si se dispone del equipo adecuado

Revisión anual, la cual consiste en:

- Limpieza y/o sustitución de rellenos en torres de refrigeración
- Comprobación de rociadores y sistemas de distribución de agua en el interior de la torre
- Inspección interna de la estructura de la torre
- Limpieza de la balsa
- Revisión de las bombas de impulsión
- Comprobación de la estanqueidad de todo el circuito
- Comprobación de los equipos de dosificación de productos químicos
- Limpieza de intercambiadores
- Calibración sistemática de toda la instrumentación

Revisión cada tres años, la cual consiste en:

- Cambio de boquillas de riego
- Cambio de rellenos
- Comprobación de tubería por corrosión [26]

## **1.7 Intercambiadores de placas**

### **1.7.1. Definición y propósito**

Un intercambiador de calor de placas usualmente consta de una estructura armada que mantiene en posición un conjunto de placas paralelas que forman un conjunto de canales. El núcleo de cada unidad consiste en placas corrugadas intercambiadoras de calor, hechas con varios materiales, en dependencia de las condiciones de aplicación. Al borde de cada placa se le acopla una junta de goma y, por consiguiente, todas las placas se convierten en una estructura compacta, que forma canales de flujo para los medios [23].

Los intercambiadores de calor de placas, en comparación con los de carcasa y tubos, son los más eficientes, siempre que la diferencia de temperatura entre ambas corrientes fluidas sea baja. Logran una alta eficiencia gracias a la gran superficie de intercambio que existe entre los dos fluidos; ellos circulan por canales muy estrechos en los que es posible incrementar la superficie de contacto, pero en cambio presentan problemas de incrustaciones y elevada pérdida de carga debido al uso de fluidos incrustantes [27].

### **1.7.2 Funcionamiento**

“Los intercambiadores de placa y armazón consisten en un bastidor con placas recambiables y juntas de estanqueidad de caucho, sin elementos de soldadura. Las placas están preformadas de acuerdo a un diseño de corrugación que facilita el intercambio térmico entre los fluidos caliente y frío” [28].

## Figura 14.

### *Características salientes de los Intercambiadores de placas.*



**Nota.** En la figura se representa un intercambiador de placas, con la representación del flujo de los fluidos, manejando un flujo cruzado. Tomado de: E. Torres Tamayo, Y. Retirado Medianeja, y E. Góngora Leyva, "Coeficientes de transferencia de calor experimental para el enfriamiento de licor en intercambiadores de placas," *Ing. Mecánica*, vol. 17, no. 1, pp. 68–77, 2014

Con una gran superficie de intercambio y las placas en conjunto proporcionan una mayor eficiencia térmica requiriendo menor espacio de instalación. Precisión de intercambio y mayor superficie de intercambio térmico, los circuitos funcionan a contra corriente y el resultado es una gran transferencia térmica. Ausencia de contaminación entre circuitos debido al sellado independiente de ambos mediante las juntas de estanqueidad. El área intermedia ventea a la atmósfera en caso de rotura o desgaste de juntas, evitando así la no deseada contaminación interior [28]

Su diseño proporciona más fácil manipulación en planta, embarque y seguridad de uso en la instalación. Debido a su diseño autolimpiante de las placas. Posibilidad de ampliación de placas para el futuro incremento del rendimiento térmico en planta y renovación de efectividad con el cambio de placas. Juntas de caucho natural o sintético, incrustadas a presión. Pueden ser también de elastómeros como Goma nitrilo, Neopreno etc. Estas juntas tienen una doble función: Conducir los líquidos a través del cambiador y hacer el cierre del intercambiador [28].

### **1.7.3 Clasificación**

Existen varios tipos de intercambiadores de calor de placas que se pueden clasificar de la siguiente forma.

“Según la forma de unión de las placas - Mediante juntas: Las placas se unen ejerciendo presión entre ellas mediante las barras del bastidor e interponiendo entre ellas juntas para garantizar la estanqueidad. Se desmonta fácilmente desatornillando las barras de unión, con lo que las operaciones de mantenimiento y limpieza se pueden efectuar rápidamente” [28].

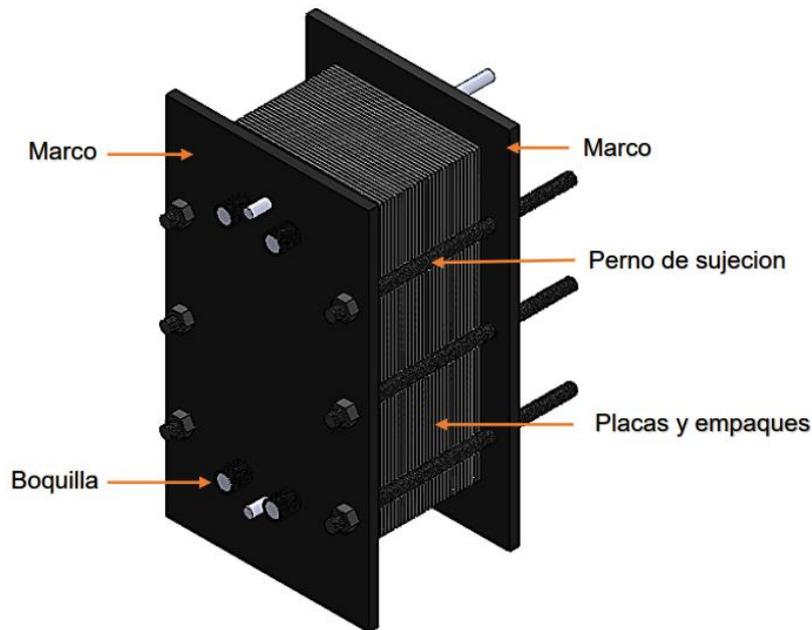
Soldado: Las placas se unen por medio de soldaduras de manera que no se necesitan juntas para garantizar la estanqueidad. La ventaja principal de este tipo es que pueden utilizarse en aplicaciones donde la presión es un obstáculo para las juntas. Pueden trabajar hasta presiones de unos 30-32 bares.

### **1.7.4 Partes de un intercambiador de placas**

Los intercambiadores de placas consisten en un conjunto de placas metálicas onduladas o en relieve y empaques. Estas serán comprimidas mediante un marco o bastidor que consiste en dejar una placa fija y la otra móvil, este marco además cuenta con una barra guía superior e inferior para asegurar una correcta alineación, con tornillos de apriete, esto con el fin de garantizar la compresión óptima y hermeticidad total del equipo [29].

**Figura 15.**

*Partes de un intercambiador de calor de placas*



**Nota.** En esta figura se identifica las partes de un intercambiador de placas. Tomado de: S. Díaz Guevara y G. Vega Patiño, "Diseño y construcción de un intercambiador de calor de placas paralelas para el laboratorio de transferencia de calor" Duitama, Boyacá, 2017.

**Boquilla:** Los ICP cuentan con boquillas para la entrada y salida de los fluidos, en ellas se conecta la tubería, estas boquillas están alineadas con los puertos de las placas. Para resistir la corrosión las boquillas son generalmente construidas del mismo material de la placa.

**Placas o Empaque:** Estos empaques están diseñados de tal manera que generen una compresión del 10% de su espesor, para seleccionar el material se tienen en cuenta factores como: la resistencia química, temperatura, propiedades de sellado y periodo de vida.

**Pernos de sujeción:** Los pernos están contruidos generalmente en acero de baja aleación de 1% Cr 0.5% Mo. Estos se encargan de sujetar las placas dentro de los marcos y generar el apriete de las placas creando el cierre hermético.

**Marco o bastidor:** El bastidor consta de dos placas las cuales son diseñadas para

soportar los esfuerzos provocados por el ajuste de los tornillos y generar el cierre hermético. [29]

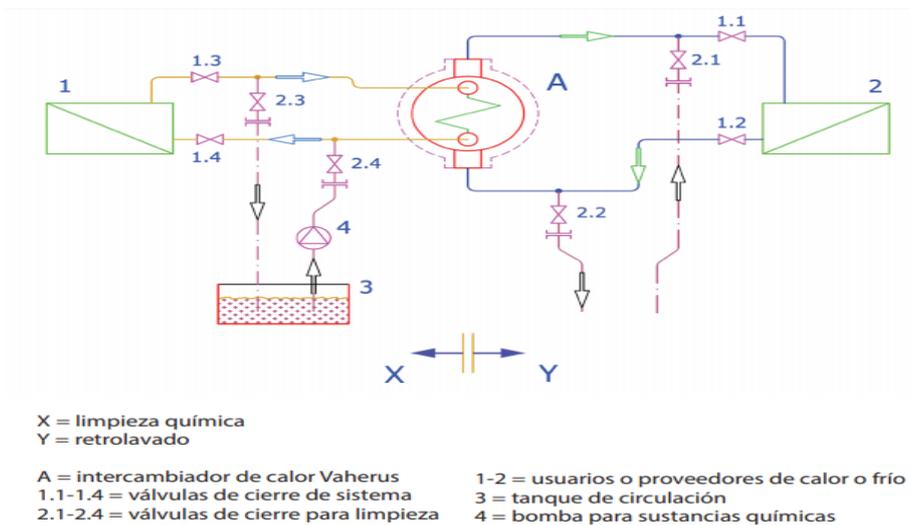
### 1.7.5 Normativa y mantenimiento

“Las normas y requisitos para la limpieza de un intercambiador de calor, varían según el tipo, además de esto si llegan a existir riesgos de contaminación, el rendimiento de la unidad debe controlarse midiendo la temperatura y la pérdida de presión. Cuando las pérdidas son mayores de lo permitido, debe limpiarse el intercambiador de calor.” [30]

El mantenimiento y norma a usar se determina teniendo en cuenta las siguientes indicaciones:

**Figura 16.**

*Métodos de limpieza.*



**Nota.** En esta figura se identifican los mantenimientos para la limpieza de un intercambiador de placas. Tomado de: Manual CE y Seguridad", Jnegre.es, 2021. [Online]. Available: <https://www.jnegre.es/Descargas/Vahterus/Manual%20mantenimiento%20Vahterus%20ES.pdf>. [Accessed: 12- Mar- 2015]

## 2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA CON MAYOR VIABILIDAD

### **2.1 Métodos de selección o matrices de decisión**

Una matriz de decisión es un gráfico que permite a un equipo o un individuo identificar y analizar la tasa de la fuerza de las relaciones entre conjuntos de información. Una matriz de decisión se utiliza con frecuencia durante las actividades de planificación de la calidad para seleccionar producto / servicio, características y objetivos y desarrollar los procesos y sopesar las alternativas. Para mejorar la calidad una matriz de decisión puede ser útil en la selección de un proyecto, en la evaluación de soluciones alternativas a problemas, y en el diseño de los recursos. [31].

¿Cuándo usar una matriz de decisión? Cuando una lista de opciones debe reducirse a una sola opción, cuando la decisión debe tomarse sobre la base de varios criterios y después de que una lista de opciones se haya reducido a un número manejable.

Las situaciones típicas son:

1. Cuando se debe seleccionar una oportunidad de mejora o un problema a trabajar.
2. Cuando solo se puede implementar una solución o un enfoque de solución de problemas
3. Cuando solo se puede desarrollar un nuevo producto.

Siendo la situación número 1, la que se presenta en el caso de estudio

“Según Kurniawan, al crear una matriz de decisiones, es importante comenzar por comprender el problema y sus implicaciones. Una vez que haya identificado estos aspectos, puede crear su análisis con filas y columnas “[31].

### **2.2 Análisis de aspectos técnicos, financieros y ambientales**

Para la creación de una matriz de decisión lo que da el parámetro de elección son los aspectos a evaluar, en este caso se hizo la elección de aspectos técnicos, en base de bibliografías, ya que de equipo a equipo esto cambia y depende de muchos más factores, aun a si se pueden tener valor aproximados que dan un aspecto estándar a los criterios elegidos.

Dichos criterios fueron clasificados y obtenidos mediante una elección en base a toda la bibliografía citada, además se tomó como base a una empresa manufacturera de plásticos como anteriormente se ha mencionado y por medio de esta se pudo determinar cuáles son los factores principales al momento de elegir un equipo.

**Eficiencia teórica:** La eficiencia de un intercambiador compara la velocidad de transferencia térmica real, que es la absorbida por el fluido que se calienta, con la velocidad de transferencia térmica máxima que podría transmitirse en un intercambiador en contracorriente y de superficie infinita.

En el intercambiador de calor en contracorriente, uno de los fluidos experimentará la diferencia de temperaturas máxima posible, si la capacitancia térmica del fluido caliente es mayor que la del fluido frío, el fluido frío experimentaría entonces el cambio más grande de temperatura, y si la longitud del intercambiador es infinita, el fluido frío se calienta a la temperatura de entrada del fluido caliente. Este parámetro ya tiene un rango establecido para las opciones que se comparan, ya que depende del diseño de cada equipo, pero se tiene un estimado.

**Acople a las máquinas:** Las máquinas especificadas para el planteamiento del problema de referencia Husky, las cuales pertenecen al área de inyección de preforma. La aclaración que se hace es que el flujo de agua circundante en el sistema de refrigeración es el flujo de agua total proveniente de toda la máquina, tanto de enfriamiento del molde tanto para los engranajes y sistema hidráulico.

**Alta área de transferencia de calor:** Es muy importante que el fluido circundante tenga un área de contacto donde se presente una transferencia de calor, entre mayor versatilidad se tenga para el equipo mejor eficiencia se presentará durante en el proceso de enfriamiento.

**Caídas de presión:** La pérdida de carga (o caída de presión) es el diferencial de presión medido en dos diferentes puntos del sistema.

“Existen puntos donde una caída de presión es necesaria como es el caso de la válvula de expansión, sin embargo, un diferencial de presión en otros componentes no es deseable debido a que dichas pérdidas ocasionarán un desempeño ineficiente del sistema generando un consumo energético mayor para el usuario final” [20].

Las caídas de presión son totalmente inevitables, ya que todo fluido desplazándose dentro de un volumen delimitado tendrá un diferencial de presión ocasionado por la resistencia del medio representada por la fricción, siendo que, cuanto mayor sea la longitud de la tubería mayor será este diferencial. La regla es simple, una mayor velocidad implica una mayor pérdida y un diámetro menor mayor velocidad [20].

**Bajo costo de operación:** Para este criterio se tuvo en cuenta el costo de flujo de agua requerido, como flujos de agua adicionales y consumo eléctrico del equipo, esto teniendo como base los costos para una compañía ubicada en Madrid, tanto el costo del metro cúbico de agua y del Kw-h.

**Manejo de altas temperaturas:** Este es un valor agregado para el equipo, ya que si se implementa en otra área donde se manejan temperaturas mayores o críticas el equipo se puede acoplar fácilmente.

**Variación de capacidad calorífica:** Este criterio se puede aplicar durante la utilización de los equipos facilitando una versatilidad de estos al momento de implementar diferentes flujos aumentando la carga térmica a solventar en el proceso.

**Manejo de altos flujos de agua:** A partir del manual de las máquinas Husky se puede estimar que el flujo de agua a enfriar es alto, siendo mayor de 30000 Kg/h.

**Bajo volumen de retención:** Este parámetro cumple un papel crítico ya que, si el agua a enfriar se reposa demasiado tiempo en el equipo, requeriría aumentar presiones de tuberías, aumentar flujos de agua ya que no se cumpliría con el ciclo del agua y por ende la máquina podría tender a sobrecalentarse.

**Alto coeficiente de adaptabilidad:** Esto se refiere a la capacidad para adaptarse en un cambio estructural y operativo dentro de la empresa donde se ubique el equipo y los requerimientos a solventar.

**Facilidad en mantenimientos:** Se mide la facilidad, eficacia y tiempo necesario para realizar los respectivos mantenimientos, evitando tiempos prolongados (más de tres días) de parada en la producción y funcionamiento de las máquinas.

**Resistencia a condiciones ambientales:** Las condiciones ambientales tienen que ver con el diseño de aspectos y condiciones climatológicas con enfoque en un desgaste

progresivo del equipo ya que este se ubicaría en los exteriores de la empresa.

Vida útil prolongada: Este se define como el ciclo en que un equipo puede desempeñar su labor operativa, teniendo en cuenta que hoy en día se buscan equipos con vida útil prolongada con el fin de reducir costos y desperdicios provenientes de dicho equipo.

Requerimiento de equipos adicionales: Este requerimiento nace de las especificaciones del equipo, con el fin de alcanzar el montaje del equipo necesarios para la operación, ya sean rellenos, ventiladores adicionales, bombas, válvulas, aspersores, filtros, entre otros.

Bajo requerimiento de agua: Se presenta en equipos de transferencia donde el fluido refrigerante es agua, por ende, se necesita un caudal proporcional al suministrado de las máquinas para enfriar y cumplir con la demanda térmica.

Bajo requerimiento de energía eléctrica: Para el funcionamiento de cualquier equipo es necesaria la energía eléctrica, donde hay equipos que requieren adicionales, ya sean ventiladores los cuales tienen un consumo dependiente a las condiciones energéticas, los cuales fluctúan y puede llegar a representar un consumo elevado por parte del equipo.

Ventaja medioambiental en transferencia de calor: El planteamiento de la ubicación del equipo es en Madrid, Cundinamarca donde las condiciones ambientales son favorables para su aprovechamiento del calor extraído, al ser un ambiente frío y húmedo.

Uso de agua como refrigerante: Usando el agua como refrigerante natural, se logra un sistema eficiente, seguro y amigable con el medioambiente, ya que es un servicio ideal por su bajo costo comparado con los refrigerantes sintéticos.

Baja frecuencia de limpieza: Ya que los equipos industriales requieren tiempos periódicos de limpieza y mantenimiento para mantener su buen estado y prolongar su vida útil, si esta frecuencia fuera elevada repercute en la parada de producción por parte de la empresa, afectando días operativos y costos para esta.

Baja reología: Condicionando el fluido a bajas velocidades evitando la pérdida de

eficiencia en el ciclo de refrigeración, por lo tanto, disminuye el desgaste en las tuberías, bombas, válvulas y el equipo de refrigeración como tal por el golpe de velocidad del fluido.

### **2.3 Elección de matriz de decisión**

La existencia de matrices de decisión es amplia pero este proyecto se centra en el análisis y comparativa de dos, la matriz DOFA, la cual es conocida en el ámbito empresarial para la toma de decisiones y la matriz PUGH creada por el británico Stuart Pugh un reconocido ingeniero de diseño, responsable de acuñar el concepto de diseño total. El diseño total es la actividad sistemática necesaria que va desde la identificación de la necesidad del mercado/usuario hasta la venta exitosa del producto para satisfacerla.

La matriz DOFA es un método de análisis empresarial, que permite mirar la empresa desde el exterior como si fuéramos observadores neutrales, para evaluar las condiciones actuales de la empresa. El nombre DOFA viene de las iniciales de los aspectos que se analizan en este procedimiento. Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas.

Este tipo de matriz es de gran ayuda a la hora del estudio de mercado para la salida de un producto, pero como el proyecto está focalizado en la decisión de viabilidad de un sistema para su implementación en una empresa, el cual presenta una inversión sin oportunidad de retorno por el equipo.

La Matriz de Pugh es una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante un arreglo multidimensional (una matriz de decisiones). Su aplicación más habitual es durante la fase de diseño de un producto, ya sea completamente nuevo o una actualización de uno existente. El primer paso es identificar los criterios que serán evaluados. Los criterios son básicamente las necesidades del cliente. Estos son ubicados generalmente como filas de la matriz. Luego se deben especificar los posibles conceptos de diseño que apunten al cumplimiento de los criterios definidos. Los mismos aparecerán en las columnas de

la matriz.

Por ende, la matriz PUGH es idónea para el proyecto ya que el sistema de refrigeración está en su etapa de diseño y conceptualización, el cómo se desarrolla dicha matriz es lo que a continuación se explicará:

Se realiza el estudio comparativo entre las distintas alternativas, aquí se utiliza la primera alternativa como base, es decir, su puntuación va a ser en todos los campos igual (esto es opcional) ya que con base bibliografía se puede realizar el estudio de esta alternativa igualmente, y en función de esto se compara cada una de las siguientes alternativas con la primera o con base de información bibliométrica, para cada uno de los conceptos. La valoración será: +1 si es mejor que el criterio base o -1 si es peor, 0 para el caso de ser similares es importante.

#### **2.4 Desarrollo de la matriz de decisión**

**Tabla 7.**

*Enumeración de alternativas*

N°1	Intercambiadores tubos y coraza
N°2	Torres de enfriamiento
N°3	Aeroenfriadores
N°4	Intercambiadores de placas

**Nota.** En la tabla se evidencia la creación de prefijos para denominar a las alternativas a comparar.

La calificación cuantitativa de los criterios frente a cada alternativa, se realizó mediante el aprendizaje adquirido mediante la búsqueda bibliográfica de las alternativas.

**Tabla 8.***Matriz de decisión*

N°	Criterios de decisión	Alternativas			
		N°1	N°2	N°3	N°4
1	Eficiencia teórica	1	1	1	1
2	Acople a las máquinas	1	1	1	1
3	Alta área de transferencia de calor	1	-1	-1	0
4	Baja caídas de presión	0	1	1	0
5	Bajo costo de operación	-1	-1	0	-1
6	Manejo de altas temperaturas	1	0	0	1
7	Variación de capacidad calorífica	0	1	-1	0
8	Manejo de altos flujos de agua	1	1	0	0
9	Bajo volumen de retención	-1	0	0	0
10	Alto coeficiente de adaptabilidad	0	1	1	1
11	Facilidad en mantenimientos	0	1	1	1
12	Resistencia a condiciones ambientales	1	1	1	1
13	Vida útil prolongada	1	1	1	1
14	Requerimiento de equipos adicionales	1	1	1	1
15	Bajo requerimiento de agua	-1	1	1	0
16	Bajo requerimiento de energía eléctrica	0	0	-1	0
17	Ventaja medioambiental en transferencia de calor	0	1	1	0
18	Uso de agua como refrigerante	1	1	1	1
19	Baja frecuencia de limpieza	0	0	0	0
20	Baja reología	1	0	1	0
<b>Total</b>		7	11	9	8

**Nota.** En esta tabla se aprecia el desarrollo de una matriz PUGH para la selección de la mejor alternativa, mediante diferentes criterios de decisión.

**2.5 Análisis de la matriz de decisión**

En base a los criterios estipulados en la matriz PUGH, la torre de enfriamiento es el mejor equipo para la problemática a tratar, ya que su enfoque está dirigido hacia los criterios de una empresa manufacturera dedicada a la producción de plásticos, siendo el equipo anteriormente mencionado, la alternativa con mejores resultados teóricos; un resultado acorde a lo esperado ya que la empresa actualmente hace uso de equipos aeroenfriadores como sistema de refrigeración.

### 3. MODELAMIENTO

#### 3.1 Tipos de modelo

Existen diversas acepciones de lo que puede ser un modelo. Modelo en su definición formal es: "una descripción simplificada de un sistema (o situación específica) que ayuda a su futura predicción". Estas descripciones simplificadas contenidas y usadas en los modelos de aprendizaje y las simulaciones virtuales, están contextualizadas en una primera instancia en un ambiente.

Es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí.

Los modelos cualitativos determinan, de manera general, las relaciones entre diferentes factores o componentes del sistema. Estos modelos no pretenden cuantificar dichas relaciones sino solamente facilitar el entendimiento de cómo funciona el proceso específico que nos interesa. Al construir modelos gráficos, es aconsejable comenzar en forma sencilla para luego ampliar el modelo y poder incluir todos los factores esenciales. Es así como finalmente se puede describir el proceso específico que nos interesa con todo el detalle necesario para cumplir el propósito del análisis. La modelación es una actividad creativa, interesante y de mucha utilidad.

Modelos cuantitativos después de desarrollar un modelo cualitativo que represente adecuadamente la realidad, se procede a incluir números y expresiones matemáticas para convertirlo en un modelo cuantitativo. Este paso ayuda a refinar el modelo conceptual al intentar introducir valores numéricos a todos los factores incluidos en el modelo. Cuando falta la información numérica, se puede recurrir a tres acciones como paliativo a estas restricciones:

- Modificar el modelo cualitativo conforme para incluir sólo los datos disponibles.
- Introducir valores supuesto, basándose en la experiencia personal y en referencias bibliográficas.
- Determinar los valores numéricos requeridos, por medio de un estudio específico de la situación en cuestión.

### **3.2 Selección de modelo**

Para el desarrollo del proyecto se usará un modelo cuantitativo, obviamente este subyace de un modelo cualitativo en el cual se tiene una parametrización de balances de masa y energía de un volumen de control del sistema a estudiar, posteriormente se desarrollan dichas ecuaciones matemáticas con valores numéricos del volumen de control, esto en un lenguaje de programación, ya sea R, Python, Matlab, Macros de Excel, Octave, entre otras opciones. Para ello se explicará un poco más a fondo dichos programas para tener una certeza de cual usar para dicho modelo.

Python fue creado por Guido van Rossum, un programador holandés a finales de los 80 y principio de los 90 cuando se encontraba trabajando en el sistema operativo Amoeba. Primariamente se concibe para manejar excepciones y tener interfaces con Amoeba como sucesor del lenguaje ABC. Hoy en día, los científicos de cualquier rama usan la programación como una herramienta más para la solución de sus problemas. Ellos necesitan que sus herramientas sean simples y eficientes, de modo que se puedan concentrar en los problemas de sus respectivos campos [32].

Python es liberado bajo una licencia propia llamada Python Licence que ha sido certificada por el movimiento Open Source, y es compatible con la GPL (GNU Public Licence) de la Free Software Foundation (Fundación del Software Libre). La principal diferencia de ésta con respecto a la GPL es que no existe una restricción copyleft en esta, concepto que la acerca más al movimiento Open Source. Lo que quiere decir que se pueden producir programas que se podrán distribuir libremente sin la necesidad de entregar su código fuente. Esto significa que puede usarse Python tanto para hacer software libre como software privativo [32].

R fue creado en 1992 en Nueva Zelanda por Ross Ihaka y Robert Gentleman (Ihaka [1998]). La intención inicial con R, era hacer un lenguaje didáctico, para ser utilizado en el curso de Introducción a la Estadística de la Universidad de Nueva Zelanda. Para ello decidieron adoptar la sintaxis del lenguaje S desarrollado por Bell Laboratories. Como consecuencia, la sintaxis es similar al lenguaje S, pero la semántica, que aparentemente es parecida a la de S, en realidad es sensiblemente diferente, sobre todo en los detalles un poco más profundos de la programación [33].

R es muy útil para el trabajo interactivo, pero también es un poderoso lenguaje de

programación para el desarrollo de nuevas herramientas, por ejemplo rclimdex, cliMTA-R, etc. Otra ventaja muy importante es que tiene una comunidad muy activa, por lo que, haciendo las preguntas correctas rápidamente encontrarás la solución a los problemas que se te presenten en el ámbito de la programación con R. Estas características han promovido que el número de sus usuarios en el área de las ciencias se incremente enormemente. Al ser software libre lo hace un lenguaje atractivo, debido a que no hay que preocuparse por licencias y cuenta con la libertad que garantiza GNU. Es decir, con R se tiene la libertad de: 1) correrlo para cualquier propósito, 2) estudiar cómo trabaja el programa y adaptarlo a sus necesidades, pues se tiene acceso al código fuente, 3) redistribuir copias, y 4) mejorar el programa y liberar sus mejoras al público en general [33].

MATLAB es un programa computacional que ejecuta una gran variedad de operaciones y tareas matemáticas. Es una herramienta poderosa, y puede manejar los cálculos involucrados en problemas de ingeniería y ciencia. Su nombre significa «MATrix LABoratory» (laboratorio de matrices) y fue diseñado en un principio para trabajar con vectores y matrices. Ya hoy abarca muchísimo más. Como MATLAB es el programa más dominante del mundo técnico, muchos ingenieros y científicos requieren manejarlo para poder desempeñarse bien en sus nuevos puestos de trabajo [34].

MATLAB puede ser usado para resolver un gran abanico de problemas técnicos relacionados con matemática, desde la evaluación de una simple función hasta la resolución numérica de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, por ejemplo. También puede resolver problemas simbólicos y presentar los resultados de forma agradable y visual de manera que los resultados obtenidos sean más fáciles de comunicar a otros colaboradores que no trabajen directamente con la ingeniería de los problemas prácticos [34].

Entre las ventajas de usar MATLAB, puede resaltarse que:

Es interactivo, es decir, no siempre se requiere crear código, o definir variables de forma explícita. Para muchos usos, solo es necesario usar instrucciones sencillas y obtener la respuesta inmediatamente. También permite modificar la instrucción fácilmente para ver otros escenarios a través de pocas instrucciones.

Es compatible con una gran cantidad de software utilizado ampliamente en los ámbitos científicos y técnicos: puede interactuar con hojas de Microsoft Excel, software elaborado usando C + +, Fortran y otros.

Posee una gran cantidad de herramientas, llamadas Toolboxes, que pueden ser usadas de forma gráfica para resolver problemas de ingeniería avanzada, como lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos, optimización numérica, machine learning, procesamiento de imágenes y video, control de procesos, entre muchos otros.

Permite elaborar programas y aplicaciones que pueden ejecutarse en cualquier computador, y más relevante en los tiempos actuales, en cualquier dispositivo, con interfaces para trabajar con dispositivos móviles, hardware industrial, microprocesadores y más [34].

La mayoría de los problemas encontrados en ingeniería son sofisticados e interdisciplinarios. Aspen Plus® es un software que permite la simulación de procesos químicos de forma sencilla, aplicando todos los conocimientos adquiridos durante la carrera. En general, una planta de procesamiento químico se compone de reactor (unidad central) y de las operaciones unitarias ya sea como etapas de tratamiento previo y/o posterior. Aspen Plus es una herramienta muy poderosa que se puede utilizar para abordar diferentes procesos químicos desde modelamiento, simulación, optimización, regresión de datos, especificaciones de diseño, análisis de sensibilidad, manejo de sólidos, dinámica y control, ahorro de energía, cumplimiento de seguridad y, finalmente, análisis económico de procesos.

Dado un diseño de proceso y una selección adecuada de modelos termodinámicos, AP utiliza modelos matemáticos para predecir el desempeño del proceso. Los ingenieros normalmente simularán esto usando el software para optimizar el diseño y mejorar los existentes. Este modelo preciso de las propiedades termodinámicas es particularmente importante en la separación de mezclas no ideales. Una de las mejores ventajas es que Aspen Plus ya tiene una base de datos existente de especies y sus parámetros regresados puros / binarios. También puede manejar procesos muy complejos, como:

- Sistemas de separación de columnas múltiples
- Reactores químicos
- Destilación de compuestos químicamente reactivos
- Soluciones de electrolitos como en la industria de cloro-álcali
- Reciclaje complejo: flujo de derivación en procesos
- Modelamiento de sistemas de refrigeración

“Octave es un lenguaje de alto nivel, destinado principalmente a cálculos numéricos. Este lenguaje proporciona capacidades para la resolución numérica de problemas lineales y no lineales, y para realizar otras pruebas numéricas. También proporciona capacidades gráficas extensas para la visualización y manipulación de datos “[35].

“Octave se utiliza normalmente a través de su interfaz de línea de comandos interactiva, pero también se puede utilizar para escribir programas no interactivos. El lenguaje de programación Octave es bastante similar a Matlab, por lo que la mayoría de los programas son reutilizables en este lenguaje “[35].

Octave tiene una gran cantidad de herramientas para resolver problemas de álgebra numérica comunes, encontrar las soluciones de ecuaciones no lineales, realizar integrales de funciones ordinarias, manipular polinomios, e integrar ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones diferenciales algebraicas. Es fácil de extender y modificar a través de funciones definidas por el usuario escritas en el propio lenguaje de Octave, o utilizando módulos cargados dinámicamente escritos en otros lenguajes como C, C ++, Fortran, etc. GNU Octave es un software de distribución libre. Puedes distribuir y/o modificar GNU Octave bajo las condiciones del contrato GNU General Public License (GPL) publicado por la Free Software Foundation.[35]

### El lenguaje Octave

1. La sintaxis es similar a la utilizada en MATLAB.
2. Es un lenguaje interpretado.
3. No permite pasar argumentos por referencia. Siempre se pasan por valor.
4. No permite Puntero (programación).
5. Se pueden generar scripts.
6. Soporta gran parte de las funciones de la biblioteca estándar de C.

7. Puede extenderse para ofrecer compatibilidad a las llamadas al sistema UNIX.
8. El lenguaje está pensado para trabajar con matrices y provee mucha funcionalidad para trabajar con éstas.
9. Soporta estructuras similares a los "struts" de Lenguaje de Programación C.

Con todos los programas y lenguajes de programación mencionados anteriormente, para el proyecto se decidió que la mejor alternativa era Python, este al tener interfaces gráficas, capacidad de manejo de bases de datos amplias además de una facilidad de entendimiento de código y amigable con el usuario.

### **3.3 Ajuste y parametrización de variables**

Con antelación se realizaron unas suposiciones y aclaraciones previas.

El agua circundante está libre de sólidos suspendidos, ya que es un parámetro que afecta la selección del tipo de relleno a emplear para la torre de enfriamiento.

El flujo de agua circundante, es el flujo total de la máquina tanto del sistema hidráulico cómo de la refrigeración del molde.

Las caídas de presión dentro del equipo se asumen como cero, siendo un parámetro que facilita el control de la reología del fluido para evitar desgaste en el equipo.

- $L =$  Flujo de agua circundante (kg/h)
- $C_{pa} =$  Capacidad calorífica del agua (J/kg \* °C)
- $TL_{máx} =$  Temperatura de entrada del agua (°C)
- $TL_{min} =$  Temperatura de salida del agua (°C)
- $TA =$  Temperatura de entrada del aire (°C)
- $P =$  Presión atmosférica (kPa)
- $P_{satL} =$  Presión de saturación del agua (kPa)
- $P_{satA} =$  Presión de saturación del aire a la entrada (kPa)
- $\rho =$  Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)
- $G =$  Gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- $V_1 =$  Velocidad inicial del aire (m/s)
- $V_2 =$  Velocidad de salida del aire (m/s)
- $Z_1 =$  Altura a nivel del suelo (m)
- $Z_2 =$  Altura de la torre (m)
- $Z =$  Altura de la torre (m)
- $E =$  Eficiencia del ventilador
- $Hr =$  Humedad relativa del aire de entrada

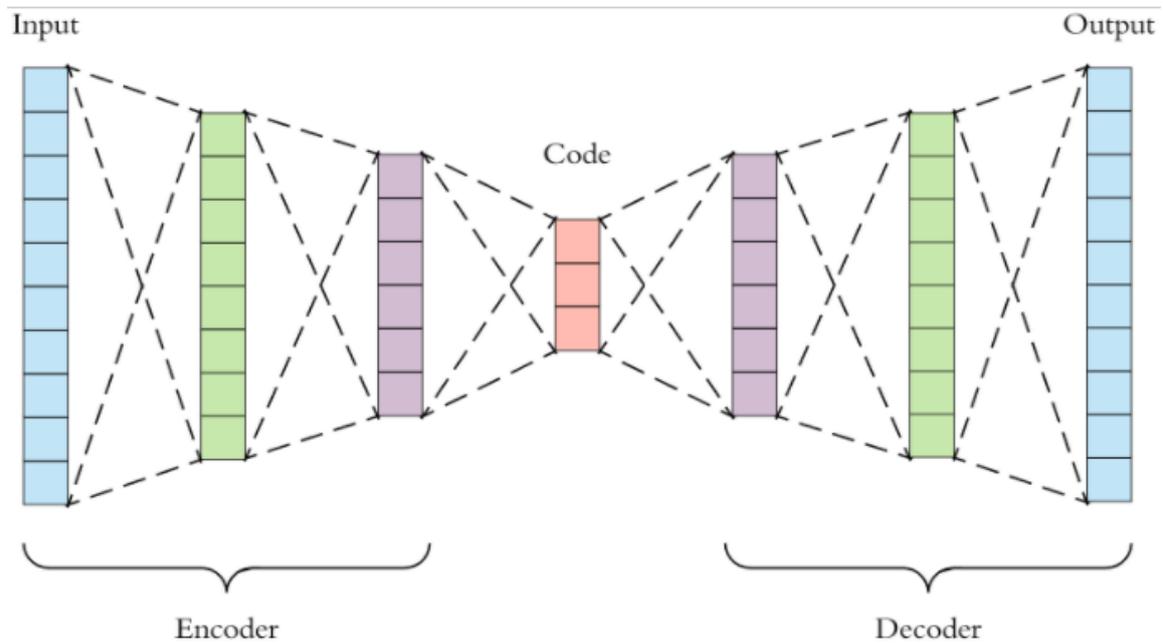
$$\begin{aligned}
Y'L &= \text{Humedad absoluta del agua a la entrada} \\
Y'A &= \text{Humedad absoluta del aire de entrada} \\
m_{eq} &= \text{Pendiente de la línea de equilibrio (J/kg * }^\circ\text{C)} \\
m_{op} &= \text{Pendiente de la línea de operación (J/kg * }^\circ\text{C)} \\
m_{op_{min}} &= \text{Pendiente de la línea de operación mínima (J/kg * }^\circ\text{C)} \\
H'L &= \text{Entalpía del agua a la entrada (J/kg)} \\
H'A &= \text{Entalpía del aire a la entrada (J/kg)} \\
H'L_{max} &= \text{Entalpía máxima del agua (J/kg)} \\
H'L_{min} &= \text{Entalpía mínimo del agua (J/kg)} \\
G_{op} &= \text{Flujo de aire (kg/h)} \\
G_{s\ min} &= \text{Flujo de aire mínimo (kg/h)} \\
L'_{min} &= \text{Flux de agua mínimo (kg/h * m}^2\text{)} \\
G'_{s} &= \text{Flux de aire (kg/h * m}^2\text{)} \\
A_t &= \text{Área transversal (m}^2\text{)} \\
\Delta H &= \text{Diferencial de entalpía (J/kg)} \\
T_{G_2} &= \text{Temperatura del aire a la salida (}^\circ\text{C)} \\
Y'_2 &= \text{Humedad absoluta del aire a la salida} \\
\Delta TL &= \text{Diferencial de temperatura del agua (}^\circ\text{C)} \\
\Delta TA &= \text{Diferencial de temperatura del aire (}^\circ\text{C)} \\
q &= \text{Transferencia de calor (J)} \\
K_{ya} &= \text{Resistencia global de transferencia de masa y calor (kg/h * m}^2\text{)} \\
k_{ya} &= \text{Coeficiente de transferencia de masa (kg/h * m}^2\text{)} \\
h_L &= \text{Coeficiente convectivo del agua (J/h * m}^2 \text{ * }^\circ\text{C)} \\
h_g &= \text{Coeficiente convectivo del aire (J/h * m}^2 \text{ * }^\circ\text{C)} \\
D &= \text{Diámetro del ventilador (m)} \\
Q &= \text{Caudal de aire (m}^3\text{/h)} \\
W &= \text{Potencia del ventilador (kW)} \\
w_{H_2O} &= \text{Pérdidas de agua por arrastre (kg/h)}
\end{aligned}$$

### 3.4 Desarrollo de modelo

Un modelo Variational AutoEncoders (VAE) es un modelo de aprendizaje el cual se puede interpretar como un algoritmo que puede entrenarse mediante una serie de datos, generando un resultado de interés similar a los de entrenamiento, este cuenta con una estructura general como se presenta a continuación:

**Figura 17**

*Diagrama de un autoencoder*

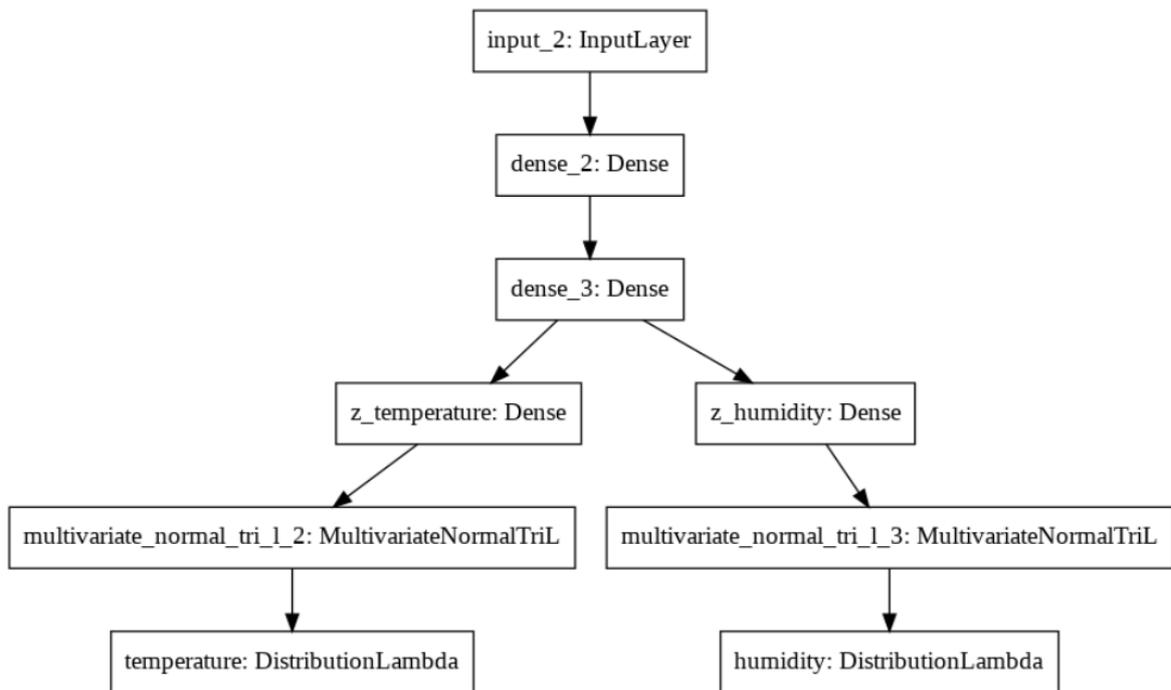


**Nota:** Este diagrama representa la estructura general de un autoencoder haciendo uso de un codificador para los datos de entrada (Input) y un decodificador para los datos resultantes (Output). Tomado de: F. S. Caparrini, «Variational AutoEncoder,» 2 Marzo 2020. [En línea]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=233> [Último acceso: 5 Junio 2021].

Dicho modelo tiene un acoplamiento directo con la base de datos del IDEAM en cuanto a variables input como temperatura y humedad relativa, con el fin de establecer un aprendizaje en el secuenciamiento de ecuaciones, dando como resultado un modelo capaz de predecir el comportamiento del equipo.

**Figura 18**

Diagrama de flujo del algoritmo para el modelo autoencoder



**Nota.** Se presenta un diagrama de flujo, en el cual se resume el procedimiento del modelo autoencoder, teniendo como entrada los datos procedentes del IDEAM, como salida los valores de temperatura y humedad en base a proyección por entrenamiento del modelo.

Por lo consecuente desarrollado en el modelo anterior, se encuentra explícito en el Anexo 1, este permitirá una alimentación a los dos siguientes modelos Anexo 2 y Anexo 3, los cuales permiten un cálculo del dimensionamiento del equipo y el funcionamiento de este, tanto, así como los costos operativos que tendrá este en consumos energéticos y reposiciones de agua. Para lo cual se tiene en cuenta la siguiente metodología y secuenciamiento de ecuaciones.

Dichas ecuaciones están presentes en los Anexos 1, 2 y 3; las cuales fueron desarrolladas mediante el software Python con base bibliográfica del “R. E.Treybal, Operaciones de transferencia de masa, LTC.; 2ª edición, 1997.”

### 1. Presión de Saturación

Se estima la presión de saturación, para calcular la humedad específica de saturación (Y'L) y la entalpía de saturación siendo esta última un dato de partida para la creación

de la línea de saturación o línea de equilibrio.

**Ecuación 6.** *Presión de saturación para el agua.*

$$P_{satL} = e^{(A - \frac{B}{C+TL})}$$

**Ecuación 7.** *Humedad específica de saturación para el agua.*

$$Y'_L = 0.622 \frac{P_{satL}}{P - P_{satL}}$$

**Ecuación 8.** *Entalpía de saturación para el agua.*

$$H'_L = TL(1005 + 1884Y'_L) + 2502300Y'_L$$

## 2. Propiedades del Aire

Se realiza un procedimiento semejante al anterior, en base a la humedad relativa se calcula el valor de la presión de saturación del aire entrante, dando como resultado el cálculo de los valores de humedad específica y entalpía de entrada, este último valor es la partida para la creación de las líneas de operación mínima y línea de operación del equipo.

**Ecuación 9.** *Presión de saturación para el aire.*

$$P_{satA} = Hr(e^{(A - \frac{B}{C+TA})})$$

**Ecuación 10.** *Humedad específica para el aire.*

$$Y'_A = 0.622 \frac{P_{satA}}{P - P_{satA}}$$

**Ecuación 11.** *Entalpía para el aire.*

$$H'_A = TA(1005 + 1884Y'_A) + 2502300Y'_A$$

3. Pendiente de equilibrio

Esta línea es un resultado de la gráfica de los valores de entalpías de saturación y del perfil de temperaturas del agua dentro del equipo donde hay una disminución de 40 °C hasta 35 °C.

**Ecuación 12.** *Pendiente de la línea de equilibrio.*

$$m_{eq} = \frac{H'_{Lmax} - H'_{Lmin}}{TL_{max} - TL_{min}}$$

4. Pendiente de la línea de operación mínima

Esta línea es un resultado de la gráfica de los valores de entalpía del aire entrante y la entalpía de saturación a la temperatura máxima (H'L máx), con el perfil de temperaturas del agua dentro del equipo como se realizó en el paso anterior.

**Ecuación 13.** *Pendiente de la línea de operación mínima.*

$$\begin{aligned} H'_{2max} &= H'_{Lmax} \\ H'_1 &= H'_A \\ m_{opmin} &= \frac{H'_{2max} - H'_1}{TL_{max} - TL_{min}} \end{aligned}$$

5. Pendiente de la línea de operación

Para graficar la línea de operación se tiene en cuenta una suposición la cual consta en que el flujo de aire es dos veces el flujo mínimo de aire requerido, siendo este último dato procedente de la pendiente de la línea de operación mínima.

Siendo la gráfica de la línea de operación una función lineal dada por las entalpías del aire, tanto de entrada como de salida, con el perfil de temperaturas del agua dentro del equipo.

**Ecuación 14.** *Flujo de aire mínimo.*

$$\begin{aligned}
 G_{op} &= 2G_{s_{min}} \\
 L &= 31800 \\
 C_{p_{agua}} &= 4187 \\
 G_{s_{min}} &= L \times C_{p_{agua}} \left( \frac{TL_{max} - TL_{min}}{H'_{2_{max}} - H'_1} \right)
 \end{aligned}$$

**Ecuación 15.** *Entalpía del aire.*

$$H'_2 = \frac{(L \times C_{p_{agua}})(TL_{max} - TL_{min})}{G_{op}} + H'_1$$

**Ecuación 16.** *Pendiente de la línea de operación.*

$$m_{op} = \frac{H'_2 - H'_1}{TL_{max} - TL_{min}}$$

## 6. Área transversal

Se tiene en cuenta una suposición la cual consta en que el flux mínimo de agua es la mitad del flujo de agua, ya para el cálculo del área transversal se establece una relación tanto de flujos de aire y flujos de agua, siendo dos formas independientes de cálculo y a su vez permite una corroboración entre estas.

**Ecuación 17.** *Relación entre flujos de agua.*

$$L'_{min} = \frac{L}{2}$$

**Ecuación 18.** *Área transversal por medio de la relación de flujos de agua.*

$$A_t = \frac{L}{L'_{min}}$$

**Ecuación 19.** Área transversal por medio de relación de flujos de aire.

$$\hat{A}_t = \frac{G_{op}}{Gs_{min}}$$

**Ecuación 20.** Corroboración de flujos por medio del área transversal.

$$L'_{min} = \frac{L}{A_t}$$

## 7. Temperatura de salida del aire

Para calcular el valor de la temperatura de salida de aire, se hace uso de una ecuación procedente del método Mickley del cual se han basado los cálculos anteriores de pendientes de equilibrio, operación mínima y operación e igualmente se tendrá como referencia para los cálculos posteriores de dimensionamiento.

**Ecuación 21.** Diferencial de entalpías.

$$\Delta H = H'_2 - H'_1$$

**Ecuación 22.** Temperatura del aire a la salida.

$$TG_2 = TA + \Delta H \left( \frac{TL_{min} - TA}{H'_{L_{min}} - H'_1} \right)$$

**Ecuación 23.** Humedad absoluta del aire a la salida.

$$Y'_2 = \frac{H'_2 - 1005TG_2}{1884TG_2 + 2502300}$$

## 8. Altura de la Torre

Como primer paso se calcula la transferencia de calor en el equipo, con el flujo de agua,  $C_p$  del agua y el delta de temperatura, este dato será usado al momento de calcular el coeficiente convectivo del agua ( $h_L$ ) y del aire ( $h_G$ ), siendo el delta temperatura del coeficiente convectivo del aire la diferencia de temperatura de salida y la temperatura de ingreso del aire, paralelamente para el caso del agua el delta de temperatura, es la temperatura de entrada del agua y la temperatura de salida del agua.

El coeficiente de transferencia de masa ( $k_{ya}$ ), es un valor de velocidad de difusión, que la relaciona la tasa de transferencia de masa del aire, ya que este arrastra agua en el equipo. Medida por las humedades específicas calculadas anteriormente.

La resistencia total de transferencia de masa y calor ( $K_{ya}$ ), es procedente de la energía retirada por la transferencia de calor entre los fluidos y la energía retirada por la transferencia de masa. La pendiente de equilibrio es tomada en cuenta para que las unidades sean consistentes.

La altura es calculada por una relación del flux de aire y la resistencia total de transferencia de masa y calor, multiplicando una integral de entalpías tanto entalpías del equilibrio como de operación, siendo los límites integrales el delta de temperatura del agua en el equipo.

**Ecuación 24.** *Delta de temperatura del agua.*

$$\Delta TL = TL_{max} - TL_{min}$$

**Ecuación 25.** *Delta de temperatura del aire.*

$$\Delta TA = TG_2 - TA$$

**Ecuación 26.** *Tasa de transferencia de calor*

$$q = \frac{L \times C_{p_{agua}} \times \Delta T}{3600}$$

**Ecuación 27.** Coeficiente convectivo del agua.

$$hL = \frac{q}{A_t \Delta TL}$$

**Ecuación 28.** Coeficiente convectivo del aire.

$$hG = \frac{q}{A_t \Delta TA}$$

**Ecuación 29.** Coeficiente de transferencia de masa.

$$k_{ya} = \frac{\frac{Gs_{min}}{3600}}{Y_2' - Y_A'}$$

**Ecuación 30.** Sumatoria de resistencias de transferencia de calor y masa.

$$\frac{1}{K_{Ya}} = \frac{1}{k_{ya}} + \frac{m_{eq}}{hL} + \frac{m_{eq}}{hG}$$

**Ecuación 31.** Coeficiente global de resistencias.

$$K_{Ya} = \frac{hL hG k_{ya}}{m_{eq} hL k_{ya} + m_{eq} hG k_{ya} + hL hG}$$

**Ecuación 32.** Altura de la torre con integral implícita.

$$Z = \frac{Gs_{min}}{K_{Ya}} \int_{40}^{35} \frac{1}{H_L' - H'} dH' \times 1m$$

**Ecuación 33.** Altura de la torre con integral resuelta.

$$Z = \frac{Gs_{min}}{K_{Ya}} \times \frac{\frac{H_2' - H_A'}{H_{Lmin}' - H_A'} - \frac{H_2' - H_A'}{H_{Lmax}' - H_2'}}{\ln\left(\frac{H_{Lmax}' - H_2'}{H_{Lmin}' - H_A'}\right)} \times 1m$$

**Ecuación 33.** Altura de la torre con integral resuelta.

## 9. Dimensionamiento y potencia del ventilador

Para el cálculo del dimensionamiento del ventilador, se usó una ecuación que relaciona el área transversal anteriormente calculada, la potencia del ventilador requerida para extraer el aire en la torre se calculó mediante la primera ley de la termodinámica en base a una sumatoria de deltas de energía cinética y energía potencial. Tomando como referencia una eficiencia del ventilador del 70 %.

**Ecuación 34.** *Diámetro del ventilador.*

$$\begin{aligned}\rho &= 1.29 \quad (\text{kg/m}^3) \\ Z_1 &= 0 \quad (\text{m}) \\ Z_2 &= Z \quad (\text{m}) \\ G &= 9.81 \quad (\text{m}^2/\text{s}) \\ V_1 &= 0 \quad (\text{m/s}) \\ V_2 &= 5 \quad (\text{m/s}) \\ E &= 0.7 \\ D &= \sqrt{\frac{4At}{\pi}}\end{aligned}$$

**Ecuación 35.** *Caudal de aire.*

$$Q = \frac{\frac{G_{op}}{3600}}{\rho}$$

**Ecuación 36.** *Potencia del ventilador.*

$$\begin{aligned}W &= W_{ec} + W_p \\ W &= \frac{1}{2}Q_s(V_2^2 - V_1^2) + Q_sG(Z_2 - Z_1)\end{aligned}$$

## 10. Pérdidas del Agua

Como se mencionó anteriormente en el cálculo de la resistencia total de transferencia de masa y calor, en esta se especificó que el aire arrastra agua, en este último paso

se calcula dichas pérdidas del sistema mediante el uso del valor de flujo de aire circundante y la diferencia de humedades específicas, las cuales hacen un símil a concentraciones de agua en este caso.

**Ecuación 37.** Tasa de pérdidas de agua por arrastre.

$$W_{H_2O} = G_{op}(Y_2' - Y_A')$$

**Ecuación 38.** Porcentaje de pérdidas de agua.

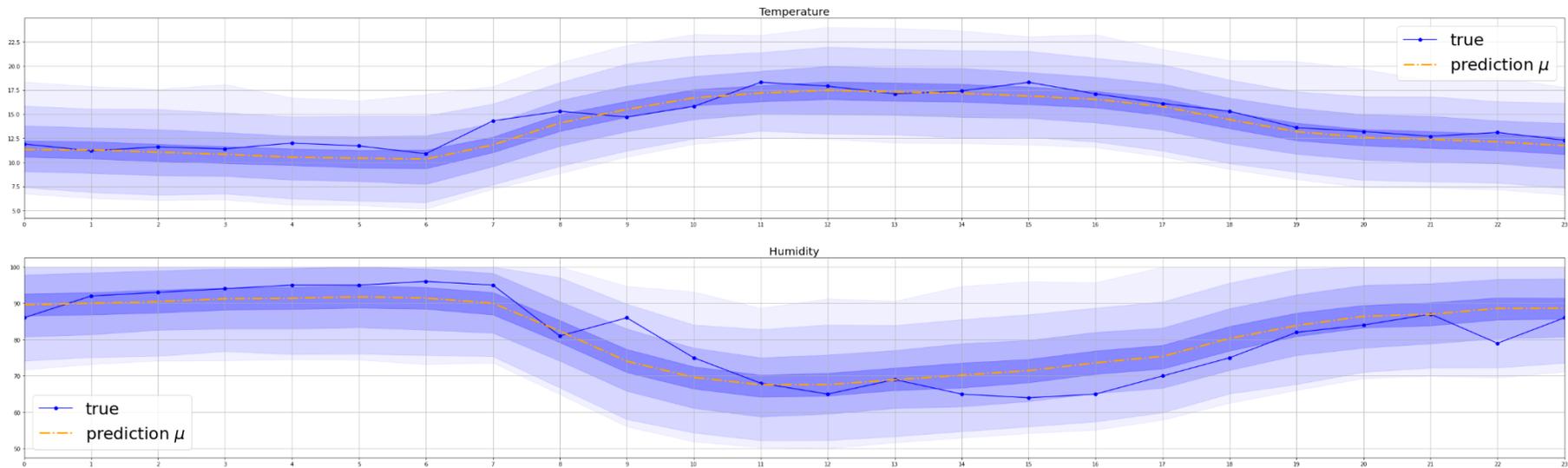
$$\%W_{H_2O} = 100 \frac{W_{H_2O}}{\rho_{Agua}}$$

### **3.5 Resultados del modelo**

Del modelo autoencoder, presente en el Anexo 1, se obtuvo una serie de gráficas relacionando la temperatura y la humedad relativa en el transcurso del día, comenzando en una hora 0 hasta la hora 23, siendo las 11 pm. De las cuales se pueden aumentar o disminuir la cantidad de simulaciones deseadas, el número de observación e igualmente la escala de distribución, es decir el margen de error permitido en el modelo, por consiguiente aumentando la cantidad de simulaciones y con un margen de error cercano a 0, con valores no mayores a 0,1 se logran predicciones cada vez más certeras, como se presenta a continuación, con un número de simulaciones de 2000, un número de observación de 2600, siendo este un dato seleccionado entre 0 y 20940, los cuales representan la cantidad de días registrados en la base de datos del IDEAM, con un margen de error de 0,07.

**Figura 19.**

*Resultados de simulación Anexo 1*

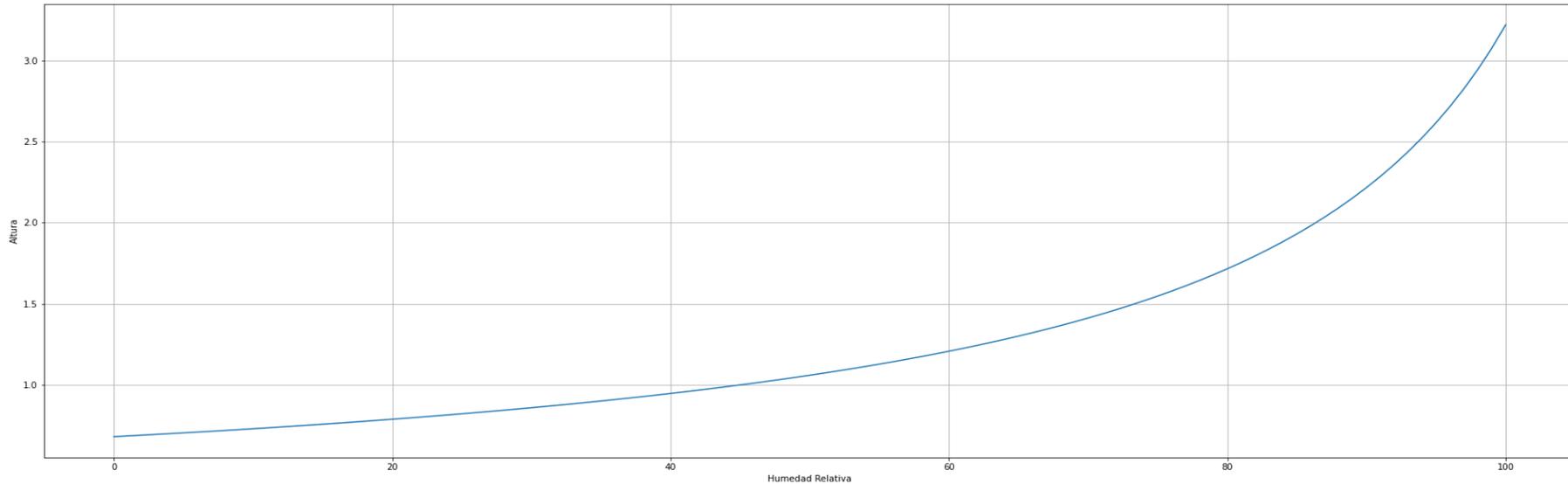


**Nota.** De las gráficas se entiende que la línea punteada de color naranja es la predicción que hace el modelo, y la línea azul con puntos es el día real considerado la base de datos del IDEAM, dando así un margen de exactitud representado mediante sigmas, siendo estos sigmas la degradación de color morado latente de la línea punteada naranja hacia afuera, teniendo una cantidad total de 4 sigmas para el control de los datos.

Como resultado del Anexo 2, en el cual se evalúa el dimensionamiento de la torre de enfriamiento mediante una condición máxima e histórica de temperatura y humedad relativa presente en la base de datos del IDEAM, de 32 °C con 100%, dando como resultado una altura de 3,22 m, un área transversal de 2 metros cuadrados, un ventilador con un diámetro de 1,6 m y una potencia de motor del ventilador de 1 horsepower.

**Figura 20.**

*Gráfica de comportamiento altura vs humedad relativa*

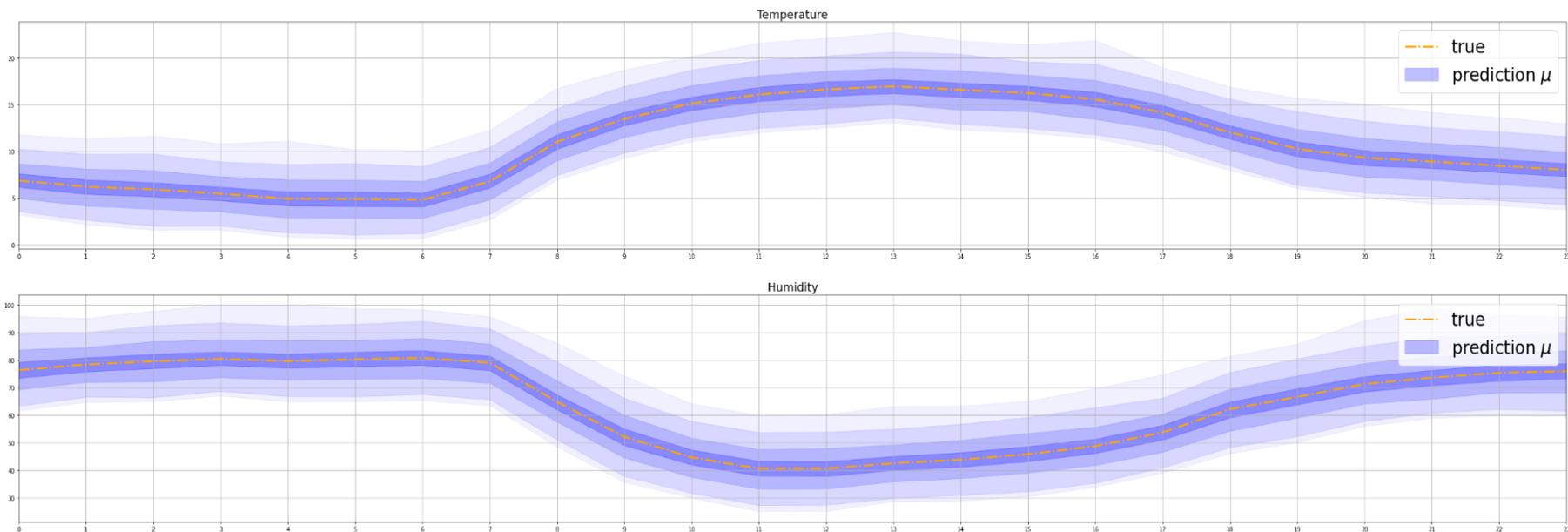


**Nota.** De esta gráfica se puede estimar la relación que existe entre la variable altura y la variable humedad relativa, de esta manera se analiza la existencia de una tendencia exponencial de la cual se concluye que existe mayor demanda de altura con una humedad relativa cada vez mayor.

Finalmente, en el Anexo 3, se evalúa el comportamiento de la torre de enfriamiento mediante las simulaciones de proyección para el día deseado, de la cual se obtiene un resultado de consumo energético por parte del ventilador y un consumo de agua, estas pérdidas de agua son generadas por arrastre, además esta gráfica indica ambos consumos tendiendo a un pico máximo en las horas cercanas al medio día.

**Figura 21.**

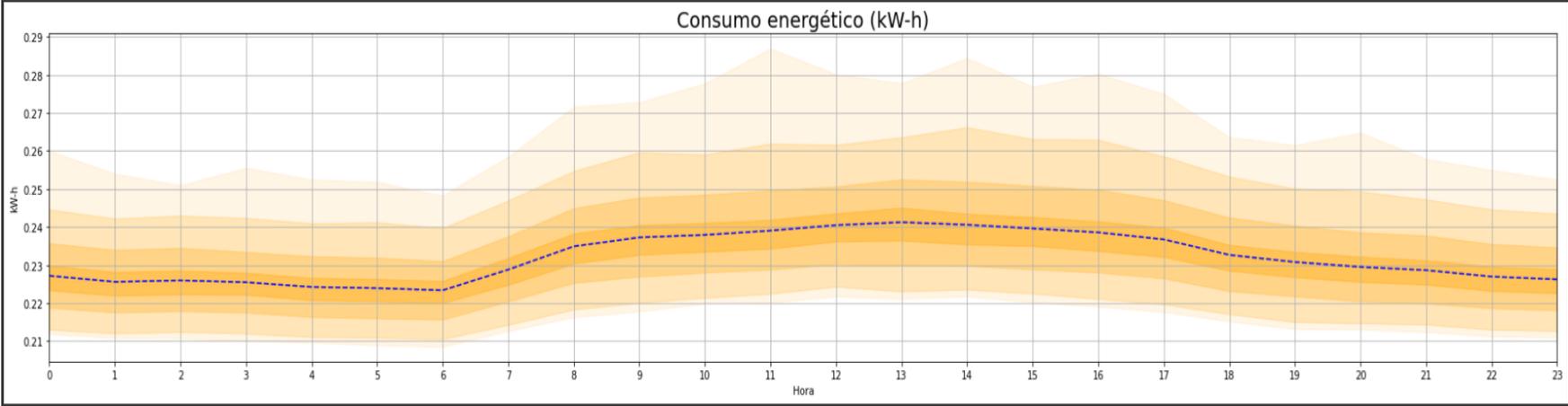
*Gráfica de proyección del día deseado*



**Nota.** En esta gráfica se puede observar el comportamiento de lo que sería nuestra simulación objetivo, donde se ingresa un día aleatorio o específico, en este caso se realiza la simulación del modelo para el día 2021 /12 /20, con rangos de temperatura de 0 a 20 °C y humedades de 0 a 80, obteniendo una predicción demarcada por la línea punteada naranja y un margen de error con los sigmas de degradación de color morado latente.

**Figura 22.**

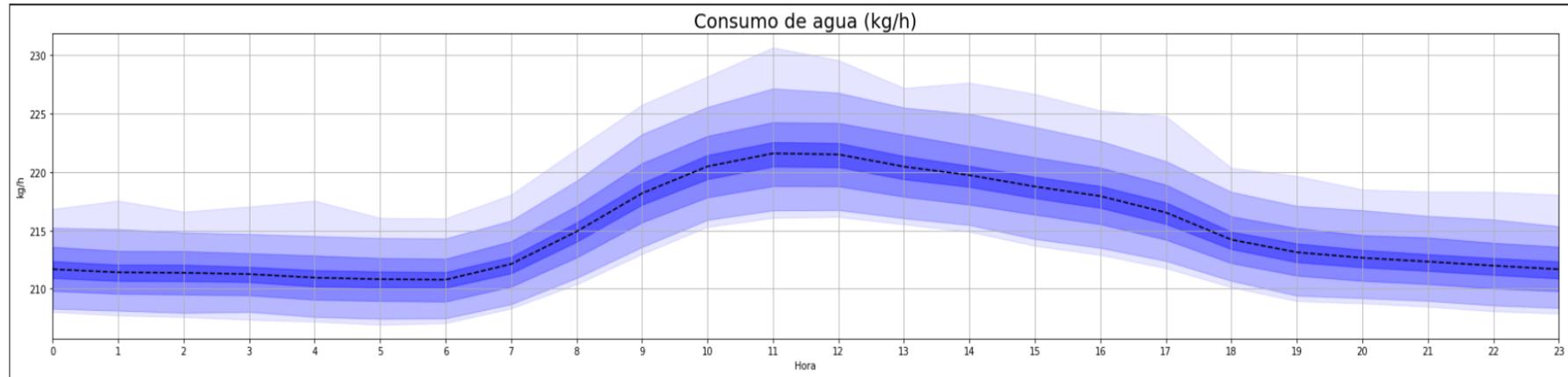
*Gráfica de consumos de energía del día deseado*



**Nota.** En esta gráfica se puede visualizar el consumo energético en el transcurso del día objetivo representado por la figura 20. Además, se puede evidenciar que en las horas que rondan el medio día, es cuando la torre de enfriamiento presenta mayor gasto energético debido a que el ventilador debe girar con mayor velocidad.

**Figura 23.**

*Gráfica de consumo de agua del día objetivo*



**Nota.** En esta gráfica se puede visualizar el consumo de agua que tiene la torre de enfriamiento en el transcurso del día objetivo representado por la figura 20 Además se puede evidenciar que en las horas que rondan el medio día, es cuando la torre de enfriamiento presenta mayor consumo de agua debido al arrastre por el aire.

Mediante estas gráficas se puede establecer el comportamiento de los consumos energéticos y consumos de agua diarios de la torre de enfriamiento, para el día objetivo de las figuras 21 y 22, teniendo un punto crítico o pico de consumo máximo en el día de 0.25 kW-h y 234.15 kg/h valores que se pueden apreciar en la representación de los sigmas, además de esto se puede estimar la potencia consumida en el día con un valor de 5.04 kW-h y la cantidad total de agua perdida en el día es de 5143.18 kg/h.

### **3.5 Análisis de modelo**

Termodinámicamente se analizó que la temperatura del aire y humedad de este tienen un rol fundamental, ya que de ser el caso de que el aire tuviera una temperatura cercana a los 35°C, siendo esta la temperatura a la cual se quiere refrigerar el agua, el equipo necesitaría una altura extrema, mayor a los 20 metros o un área transversal mayor a los 15 m<sup>2</sup>, esto debido a un delta de temperatura cercano a 0 entre los dos fluidos en contacto.

Además, se logra evidenciar una relación entre la humedad relativa y las dimensiones del equipo, debido a que la humedad relativa es el parámetro que identifica la presencia de agua en este, al tener una humedad con mayor porcentaje de agua implica que requiere un mayor dimensionamiento, ya que aire al tener una relación con la temperatura tiende a comportarse de la siguiente manera, a una baja temperatura y baja humedad se facilita la transferencia de masa y calor. Se analizó que el comportamiento del ventilador varía dependiendo de las condiciones climáticas, es decir que este no está en funcionamiento las 24 horas, generando así ahorros energéticos.

Las pérdidas de agua no deben de superar al 2% del flujo total de agua entrante, según las compañías de diseño de torres de enfriamiento, eso se estipula ya que si hubiera una pérdida mayor habría defectos en el diseño en la torre de enfriamiento. Aumentando costos operativos de esta y no representaría un equipo rentable y eficiente. No siendo el caso del equipo modelado ya que, en una condición crítica y extrema, este no supera el 0,7% de pérdidas de agua.

#### 4. ANÁLISIS FINANCIERO

“Un estudio financiero es el proceso a través del que se analiza la viabilidad de un proyecto. Tomando como base los recursos económicos que se tienen disponibles y el coste total del proceso de producción.” [38].

“El estudio financiero se convierte en una parte fundamental en cualquier proyecto de inversión. No importa si se trata de un emprendedor con una idea de negocio, una empresa que quiere crear una nueva área de negocios o incluso un inversor que está interesado en poner su dinero en una empresa con el fin de obtener rentabilidad.” [38].

“El estudio financiero formará parte de un posterior estudio de mercado. Toda la información recogida permitirá hacer el análisis de riesgos de un proyecto y evaluar en profundidad su viabilidad” [38].

De todos los indicadores financieros para evaluar un proyecto, como puede ser la TIR, VPN, CAUE, se decidió aplicar el indicador financiero CAUE, ya que para la evaluación del proyecto no se contó con valores de ingresos, solamente el valor del equipo y valor de operación de este.

El método del CAUE consiste en convertir todos los ingresos y egresos, en una serie uniforme de pagos. Obviamente, si el CAUE es positivo, es porque los ingresos son mayores que los egresos y por lo tanto, el proyecto puede realizarse; pero, si el CAUE es negativo, es porque los ingresos son menores que los egresos y en consecuencia el proyecto debe ser rechazado. Siendo en este proyecto un ingreso el valor de salvamento del equipo, el cual después de su vida útil la venta de este por un porcentaje alrededor del 20% para una recuperación monetaria de este.

Los Componentes para la evaluación del CAUE son:

- Inversión original: Costo de adquisición; Valor de la maquinaria.
- Costos de operación (o mantenimiento): Es el valor mensual o anual de operar y realizar mantenimientos a un bien.
- Salvamento (o valor residual): Es el valor que posee un bien al final de su vida útil, el cual puede ser recuperado por medio de la venta del mismo.
- Los flujos son evaluados a la Tasa de interés de Oportunidad (TIO) [39]

Se manejó un IPC del 6%, este por los valores estándar que se han presentado en la economía colombiana, un DTF del 2% igualmente que se ha analizado de la tasa del banco de la república y una rentabilidad mínima del 13%, ya que al ser un proyecto de alta eficiencia con larga vida útil se establece dicho valor, dando una TIO de 21%; recordando que este valor para proyectos debe oscilar entre 20% a 40%.

#### 4.1 Costos del equipo

Se realizó la búsqueda de los elementos para la construcción y ensamble de una torre de enfriamiento basados en páginas de distribución comercial online de equipos, además de una asesoría con un Ingeniero con más de 5 años de experiencia en el diseño de torres de enfriamiento.

**Tabla 9.**

#### Costos de partes

ITEM	DESCRIPCION	Unidad	Cant.	V. Unit	V. Tot	Factor	Precio FI	OBSERVACIONES
1	PRFV	m2mm	179	30,000	5,362,021	1.40	7,506,829	Fibra de vidrio
2	Motor Siemens 1 hp @ 1200 rpm	Pieza	1.0	800,000	800,000	1.40	1,120,000	Siemens
3	Ventilador diam 1,6 m (60") - 6 aspas	Pieza	1.0	2,500,000	2,500,000	1.40	3,500,000	Axial
4	Eliminador de Gota en PVC	m2	2.0	160,000	318,080	1.40	445,312	PVC
5	Relleno 12060 PVC	m3	2.0	600,000	1,192,800	1.40	1,669,920	3 niv
6	Relleno PG-25 Polipropileno	m3	0.0	360,000	0	1.40	0	
7	Relleno OG	m2	0.0	43,000	0	1.40	0	
8	Estructura soporte sistema motriz	kg	40	3,500	140,000	1.40	196,000	
9	Tubo 3" AC sch 40	m	3.00	60,000	180,000	1.40	252,000	Sistema de Riego
10	Brida SO 3" RF #150	Pieza	2.00	40,000	80,000	1.40	112,000	Sistema de Riego
11	Brida ciega 14" RF #150	Pieza	1.00	60,000	60,000	1.40	84,000	Sistema de Riego
12	Tubo 1" AC sch 40	m	6.00	30,000	180,000	1.40	252,000	Sistema de Riego
13	Codo 2 1/2" AC sch 40	Pieza	0.00	11,000	0	1.40	0	Sistema de Riego
14	Te 2 1/2" AC sch 40	Pieza	0.00	16,500	0	1.40	0	Sistema de Riego
15	Unión 2 1/2" AC sch 40	Pieza	8.00	3,000	24,000	1.40	33,600	Sistema de Riego
16	Boquillas de riego	Pieza	8.00	7,200	57,600	1.40	80,640	B-8000-P
17	Tornillo 5/16"x2 1/2"	Pieza	150.00	900	135,000	1.40	189,000	Soporte del Ventilador
18	Empaque caucho espuma	m	15.00	4,000	60,000	1.40	84,000	
19	Pintura	m2	5.29	27,000	142,830	1.40	199,962	
20	Trampa de arena	m2	2.0	12,050	24,100	1.40	33,740	
21	Dobleces	Doblez	10.0	4,300	43,000	1.40	60,200	
22	Soldadura 7018	kg	5.0	29,800	149,000	1.40	208,600	
23	Corte Oxiacetileno	m	4.0	14,000	56,000	1.40	78,400	
24	Corte Lamina Máquina	Corte	6.0	4,300	25,800	1.40	36,120	
25	Taladros	H/Maq	10.0	21,150	211,500	1.40	296,100	
26	Maquinados	H/Maq	10.0	29,800	298,000	1.40	417,200	
27	Mano de Obra	Dia/ho	20.0	135,500	2,710,000	1.70	4,607,000	Imprevistos
28	Embalaje y cargue	gl	0.0%	21,462,623	0	1.00	0	
29	Varios	Var	3.0%	21,462,623	643,879	1.00	643,879	
				<b>Total</b>	<b>15,393,610</b>	<b>1.438</b>	<b>22,106,502</b>	
				<b>Número de celdas</b>				<b>1</b>
				<b>Total del equipo</b>				<b>\$ 22,106,502</b>

**Nota.** El valor presente de factor, es una medida financiera que estipula el encarecimiento de las partes y mano de obra para la construcción del equipo, ya que estos valores son del mes de junio del año 2021, pero estos valores pueden variar en el transcurso del tiempo.

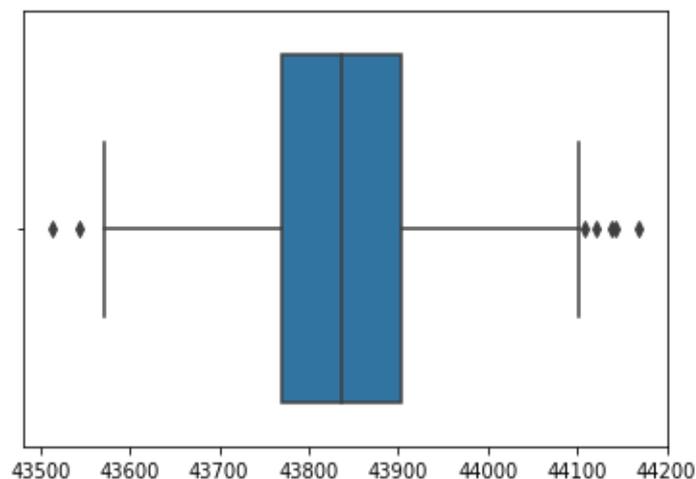
Además, se tiene en cuenta la cantidad de agua, 31,8 m<sup>3</sup> para el arranque del equipo, el cual tiene un valor de 271.000 pesos, los valores de las partes y equipos adicionales, esta cotización fue realizada mediante el contacto del Ingeniero Juan Carlos Jiménez quien hace parte de una organización de gestión de proyectos y diseño de equipos, de la cual se resalta la elaboración de torres de enfriamiento, siendo los precios datos procedentes de la base interna de la empresa.

#### 4.2 Costos de operación

Los costos de operación están estipulados en las reposiciones de agua necesarias para el funcionamiento de la torre y la energía consumida por el ventilador, las cuales se estipulan en el Anexo 3, mediante el modelo desarrollado en Python, dichos costos se aproximaron a un valor de 50.000 pesos como valor de día de consumo de agua y 4.000 pesos de consumo energético por día.

**Figura 24.**

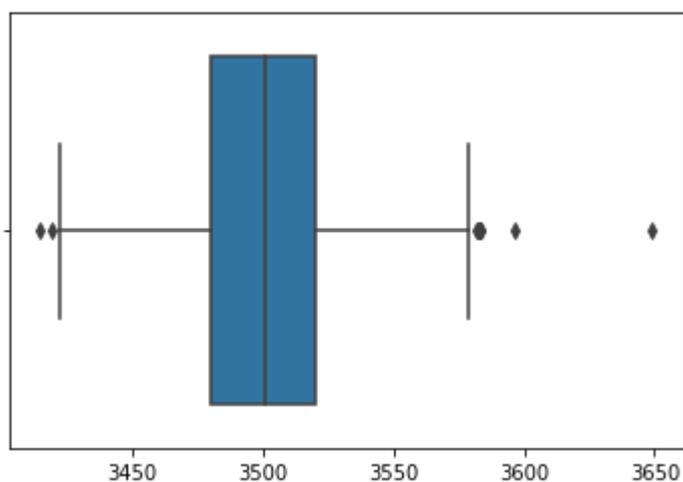
*Costos de consumo de agua*



**Nota.** Se evidencia en el diagrama de cajas, un consumo ponderado del consumo de agua en el día objetivo de la figura 20, presentando un valor aproximado de 43809,63 +/- 118,26.

**Figura 25.**

*Costos de consumo energético*



**Nota.** Se evidencia en el diagrama de cajas, un consumo ponderado del consumo energético en el día objetivo de la figura 20, presentando un valor aproximado de  $3230.58 \pm 20.51$ .

### **4.3 Evaluación de viabilidad financiera del proyecto**

En el proyecto se estableció una durabilidad del equipo de 10 años. A continuación, se presenta el aumento del valor anual de consumo mediante el IPC de 6%.

**Tabla 10**

*Proyección de costos operativos anuales de la torre de enfriamiento.*

Año 1	19.710.000
Año 2	20.892.600
Año 3	22.146.156
Año 4	23.474.925
Año 5	24.883.421
Año 6	26.376.426
Año 7	27.959.012
Año 8	29.636.552
Año 9	31.414.746
Año 10	33.299.630

**Nota.** En la tabla se evidencia un costo en la operación de la torre tomando en cuenta la devaluación monetaria, con el IPC de 6%.

Para el desarrollo del CAUE, son necesarios 3 diferentes valores, los cuales se explicarán a continuación:

A1: “El costo de adquisición se convierte en una serie uniforme (pago; cuota o costo periódico) utilizando para ello la expresión del valor presente de una anualidad (VPA), la cual tendrá una duración igual a la vida útil del proyecto, esta se puede interpretar como costo por unidad de tiempo (preferiblemente años)” [39].

**Ecuación 39. Costo de adquisición.**

$$A = \frac{\text{valor de maquinaria}}{\left[ \frac{1 - (1 + TIO)^{-n} \text{ (es la vida útil)}}{TIO} \right]}$$

Siendo como consecuente el valor de A1 = \$ 5.519.720

A2: “Llevar el costo de mantenimiento y operación a un valor anual, de esta forma, se genera una serie anual correspondiente al costo de mantenimiento u operación, cabe resaltar que, de esta forma, esta cifra ya se encuentra en forma de serie uniforme, por tanto, no requiere ninguna conversión.” [39].

Siendo como consecuente el valor de A2 = \$ 21.146.164

**Tabla 11.**

*Valor y tiempos necesarios de mantenimientos.*

Boquillas de riego (cambio) cada 3 años	511.920
Balanceo del ventilador cada 6 meses	270.000
Cambio de relleno cada 3 años	5.279.760
Limpieza cada año	270.000
Cambio de pintura cada 5 años	469.962
<b>Total</b>	<b>6.801.642</b>

**Nota.** Durante la función del equipo se estipula que se deben realizar algunos ajustes y cambios en el transcurso del tiempo, con el fin de prevenir fallos en el equipo.

A3: Para convertir el valor de salvamento en una serie uniforme (pago; cuota o costo periódico), debe tenerse en cuenta que el salvamento está en el periodo n, es decir es un valor que se recupera al final, por lo tanto, se utilizará el valor de una suma futura equivalente (VFA) que tendrá una duración igual a la vida útil del proyecto, esta se puede interpretar como costo por unidad de tiempo (preferiblemente años). Como el valor de salvamento representa una entrada de dinero o beneficio, esta cantidad entrará con signo negativo [39].

**Ecuación 40.** Valor de salvamento.

$$A = \frac{\text{valor de salvamento} * TIO}{[(1 + TIO)^n - 1]}$$

Para el cual el valor del salvamento se estableció como el 20% del valor del equipo.

Siendo como consecuente  $A_3 = \$ 164.094$

**Ecuación 41.** Valor final de CAUE

$$CAUE = A_1 + A_2 - A_3$$

Finalmente, el valor de CAUE para este proyecto es de \$26.501.790, siendo una inversión rentable ya que el equipo tiene una vida útil de 10 años, un coeficiente de productividad óptimo para la refrigeración de maquinaria.

**Tabla 12.**

*Resumen del análisis financiero.*

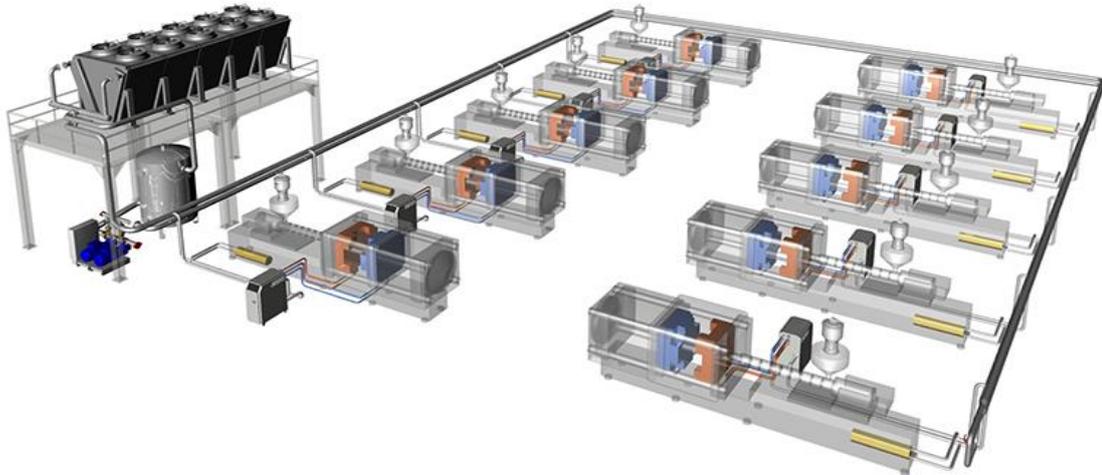
<b>TIO</b>	21%	
<b>IPC</b>	<b>DTF</b>	<b>Rentabilidad mínima</b>
6%	2%	13%
<b>A1</b>	\$5,519,719.83	
<b>A2</b>	\$21,146,164.20	
<b>A3</b>	\$164,094.24	
<b>CAUE</b>	<b>\$26,501,789.80</b>	

**Nota.** Se presenta una tabla resumen consolidando los valores de entrada y respuesta para el análisis financiero.

Se presenta un bosquejo de cómo sería el sistema de refrigeración presente en la producción de preforma, el cual cuenta con una serie de máquinas Husky las cuales son refrigeradas mediante aerofriadores, los cuales serían reemplazados por la alternativa del caso de estudio definida como una torre de enfriamiento.

**Figura 26.**

*Esquema de sistema de refrigeración para la producción de preforma.*



**Nota.** Se visualiza una serie de inyectoras las cuales son refrigeradas mediante un sistema de aeroenfriadores, equipo con proyección de cambio por la alternativa estudiada y evaluada. Tomada de: P. M. S. D. C.V., «Tecnología del plástico,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.plastico.com/temas/Sistema-de-refrigeracion-Flexcool,-maxima-flexibilidad-de-aplicacion-y-eficiencia-en-la-operacion+111035>. [Último acceso: 13 Julio 2021].

Para el sector manufacturero especialmente la industria plástica, se suele usar sistemas de refrigeración con uso de aire ya sean aeroenfriadores o torres de enfriamiento. En la empresa tomada como referencia hacen uso de aeroenfriadores ya que es un sistema de refrigeración con alta eficiencia y una característica única, el agua de refrigeración nunca está en contacto con el aire, presentando un ahorro en el uso de filtros y tratamientos químicos de esta, pero estos presentan elevados consumos energéticos, ya que los ventiladores requieren una gran cantidad de energía para su funcionamiento continuo, siendo una torre de enfriamiento una alternativa viable para la empresa, ya que esta cuenta con instalaciones adecuadas y funcionales de una PTAR, lo que presenta una viabilidad para el equipo sugerido ya que representaría un ahorro mayor en el consumo de agua al ser recirculado y tratado por la misma y presenta consumos mínimos energéticos.

## 5. CONCLUSIONES

Se identificó que para la industria plástica se ofrece una gran variedad de opciones en cuanto a sistemas de enfriamiento, en función de las necesidades, de las cuales se abarca un 70% por alternativas con uso de aire ya sean aroenfriadores o torres de enfriamiento.

Se seleccionó por medio de una matriz de decisión una torre de enfriamiento, este equipo demostró que no solo en la teoría sino en la realidad, es un equipo con una larga vida útil la cual depende de muchos factores, pero ronda los 10 años, eficiencias superiores al 95% y gran acople a la industria de plásticos, esto en cuanto a uso de agua como líquido a enfriar ya que las máquinas de la industria usan dicho líquido para su refrigeración.

Se demostró mediante las ecuaciones que rigen el comportamiento de la torre de enfriamiento, una representación mediante algoritmos en lenguaje programativo, siendo Python la mejor opción para esquematizar dichas ecuaciones por su avanzada interfaz y la visualización de resultados mediante interfaces gráficas.

Se evidenció el comportamiento del equipo, abarcando su funcionalidad termodinámica, dimensional, operacional y económica, las cuales varían mediante las condiciones climatológicas, siendo temperaturas mayores a los 30°C y humedades cercanas al 100% condiciones operacionales límite del equipo tanto termodinámicamente como dimensionalmente.

Se visualizó los consumos energéticos y de agua máximos, en la franja horaria de 11 de la mañana a 2 de la tarde, esto debido al incremento de la temperatura y disminución de la humedad, siendo una relación inversa.

Se estimó mediante un indicador financiero la viabilidad del equipo, contemplando el costo bruto de la torre de enfriamiento, su costo operacional y sus costos por mantenimientos en el transcurso de su vida útil, siendo una inversión viable para una industria de plásticos, por su capacidad de implementación y costos operacionales menores al valor bruto del equipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. B. Aguilar Moràn, i. González Quintanilla, N. L. Ruiz Peraza y O. M. Tinetti Castro, «Propuesta de diseño de un sistema de refrigeración por absorción para mejorar la eficiencia de operación de planta en una central geotérmica,» Ciudad Universitaria, San Salvador, 2012.
- [2] C. F. Morales, N. J. Cruz, Á. Payares y O. M. Torres, «La gestión de la logística inversa como estrategia indispensable en el crecimiento de las empresas del subsector del plástico en Bogotá,» Universidad EAN, Bogotá D.C., 2018.
- [3] Acoplásticos, «Plásticos en Colombia,» Acoplásticos, nº XLIX, pp. 1-200, 2019.
- [4] refrigeracioncyc Ltda, «refrigeración cyc,» Refrigeración Correa & Cardenas, 16 Agosto 2018.[Enlínea].Available:<https://www.refrigeracioncyc.com/historia-refrigeracion-breve-resena/>. [Último acceso: 1 Febrero 2021].
- [5] Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, McGraw Gill, 7ta Edición, 2009.
- [6] C. A. Vargas Isaza, J. . C. Posada Correa, L. Y. Jaramillo Zapata y L. A. García, «Consumos de energía en la industria del plástico: Revisión de estudios realizados,» Revista CEA, vol. 1, nº 1, pp. 93-107, 2015.
- [7] C. A. Orozco, J. A. Montoya y H. Gonzalez, «Prototipo de recuperación de refrigerantes,» Scientia Et Technica, vol. X, nº 26, pp. 91-96, 2004.
- [8] Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 11 nº 1: 75-89, enero-junio 2018 artículo Methodology for the selection of refrigerants ecological and energetically efficient alternatives
- [9] O. A. Jaramillo, «Intercambiadores de calor,» *Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México*, pp. 2-25, 2007.
- [10] J. Imbert González y R. Guillen Gordín, «Evaluación de un recuperador de calor en una industria frigorífica,» Ingeniería Mecánica, vol. 17, nº 1, pp. 12-21, 2014.
- [11] J. L. O. Carrasco, Regeneradores de calor de etapas múltiples, Madrid: Universidad Complutense De Madrid, 2015.
- [12] J. L. Bonilla, Avances y resultados del programa de cooperación energética de la

agencia para el desarrollo internacional (USAID-México) en México, México D.F: Agenda para el Desarrollo Internacional, 1997.

- [13] A. Barcamp, "Diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para sistema propanol-agua", Academia.edu, 2021. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/42996932/Dise%C3%B1o\\_de\\_un\\_intercambiador\\_de\\_calor\\_de\\_carcasa\\_y\\_tubos\\_para\\_sistema\\_propanol\\_agua](https://www.academia.edu/42996932/Dise%C3%B1o_de_un_intercambiador_de_calor_de_carcasa_y_tubos_para_sistema_propanol_agua). [Accessed: 04-Jun- 2021].
- [14] T. Ardsomang, J. Hines and B. Upadhyaya, "Heat exchanger fouling and estimation of remaining useful life," in Annual conference of prognostics and health management society, 2013.
- [15] K. Huang and J. Goddard, "Influence of fluid milk product composition on fouling and cleaning of Ni-PTFE modified stainless steel heat exchanger surfaces," Journal of Food Engineering, 2015, pp. 22-29.
- [16] M. González, "Operaciones Unitarias I Unidad N ° 4," 2012.
- [17] E. D. E. Un and I. D. E. Calor, "Evaluación De Un Intercambiador De Calor. Estudio De Su Empleo Como Recuperador De Calor," Tecnol. Química, vol. 31, no. 3, pp. 302–312, 2011.
- [18] S. Villa, "Determinación de correlaciones para la tasa global de transferencia de calor y caída de presión en un determinado relleno de torre de enfriamiento utilizando un equipo experimental", Guayaquil-Ecuador, 2008.
- [19] D. Aguilar Morán, I. Quintanilla, N. Ruiz Peraza and O. Tinetti Castro, "Propuesta de diseño de un sistema de refrigeración por absorción para mejorar la eficiencia de operación de planta en una central geotérmica" El Salvador, 2012.
- [20] S. P. Burbano Rojas, «Diseño de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos,» Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C, 2014.
- [21] TEMA, Standards of the tubular exchanger manufacturers association 9na ed., New York, 2007.
- [22] A. A. I. I and T. Calderas, "Aire Acondicionado (I.I.)," 2015. [Online]. Available:

[https://personales.unican.es/rene/doc/Trasp/Trasp\\_AA/008Calderas OK.pdf](https://personales.unican.es/rene/doc/Trasp/Trasp_AA/008Calderas OK.pdf).

- [23] Api Schmidt-Bretten GmbH & Co. K. G., Plate Heat Exchangers, Alemania, 2004.
- [24] A. Amor, «acrlatinoamérica», 2020. [En línea]. Available: <https://www.acrlatinoamerica.com/201905068705/articulos/otros-enfoques/torres-de-enfriamiento-2.html>. [Último acceso: 4 Febrero 2021].
- [25] Air movement and control association international, «AMCA», [En línea]. Available: <https://www.amca.org/>. [Último acceso: 6 Febrero 2021].
- [26] C. García, «Seguas», 18 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.seguas.com/mantenimiento-preventivo-de-torres-de-refrigeracion/>. [Último acceso: 5 Mayo 2021].
- [27] R. Martínez, “Guía Para Seleccionar Intercambiadores De Calor,” Tlatemoani, no. 6, 2011.
- [28] E. Torres Tamayo, Y. Retirado Medianeja, y E. Góngora Leyva, “Coeficientes de transferencia de calor experimental para el enfriamiento de licor en intercambiadores de placas,” *Ing. Mecánica*, vol. 17, no. 1, pp. 68–77, 2014.
- [29] S. Díaz Guevara and G. Vega Patiño, “Diseño y construcción de un intercambiador de calor de placas paralelas para el laboratorio de transferencia de calor” Duitama, Boyacá, 2017.
- [30] “Manual CE y Seguridad”, Jnegre.es, 2021. [Online]. Available: <https://www.jnegre.es/Descargas/Vahterus/Manual%20mantenimiento%20Vahterus%20ES.pdf>. [Accessed: 12- Mar- 2015]
- [31] O. li and F. Alfaro-, “Matriz de Decisiones ¿Qué es?” [Online]. Available: [http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624\\_u9\\_Matriz\\_de\\_decisiones.pdf](http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624_u9_Matriz_de_decisiones.pdf).
- [32] R. A. Challenger-Pérez, Iveta. Díaz-Ricardo, Yanet. Becerra-García, “El lenguaje de programación Python/The programming language Python,” *Ciencias Holguín*, vol. XX, pp. 1–13, 2014, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181531232001.pdf>.

- [33] J. S. Santana and E. M. Farfán, El Arte de programar en R. 2014.
- [34] A. J. P. Requez, «ACAPMI,» [En línea]. Available: <http://acapmi.com/blog/2017/09/18/que-es-matlab/>. [Último acceso: 16 03 2021].
- [35] J. W. Eaton, GNU Octave, no. July. 2007.
- [36] F. S. Caparrini, «Variational AutoEncoder,» 2 Marzo 2020. [En línea]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=233> [Último acceso: 5 Junio 2021].
- [37] R. E. Treybal, Operaciones de transferencia de masa, LTC.; 2ª edición, 1997.
- [38] A. Pérez, «OBS Business School,» 21 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.obsbusiness.school/blog/estudio-financiero-en-que-consiste-y-como-llevarlo-cabo>. [Último acceso: 5 Junio 2021].
- [39] R. Montenegro, «Ingeniería Económica,» Bogotá , 2021.
- [40] P. M. S. D. C.V., «Tecnología del plástico,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.plastico.com/temas/Sistema-de-refrigeracion-Flexcool,-maxima-flexibilidad-de-aplicacion-y-eficiencia-en-la-operacion+111035>. [Último acceso: 13 Julio 2021].

## ANEXOS

## ANEXO 1.

### MODELO

Para visualizar el código respectivo del Anexo 1, entrar al siguiente link:

[https://drive.google.com/file/d/1zOA6\\_sruKA7rmkt92L2wcRXDTz4aTH41/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1zOA6_sruKA7rmkt92L2wcRXDTz4aTH41/view?usp=sharing)

O escanear el siguiente código QR



## ANEXO 2. DIMENSIONAMIENTO

Para visualizar el código respectivo del Anexo 2, entrar al siguiente link:

<https://drive.google.com/file/d/191vNjVfwDyBMqnDst21YYcc2Voug6Tfw/view?usp=sharing>

O escanear el siguiente código QR



### ANEXO 3. COSTOS

Para visualizar el código respectivo del Anexo 3, entrar al siguiente link:

<https://drive.google.com/file/d/1gMdqWgW6J1CKNCJc39o3MtDZMJJ2TF4M/view?usp=sharing>

O escanear el siguiente código QR



## **ANEXO 4.**

### **RECOMENDACIONES**

Validar el modelo expuesto y esquematizado en el lenguaje programativo Python, en un simulador.

Elaborar una guía de modificación del modelo, en el cual se estime un paso a paso para el arrastre de información, parametrización de variables o predicciones que realice el modelo en cuanto al entrenamiento de este.

Consolidar un ejecutable, partiendo del código esquematizado, para la manipulación a nivel industrial.

Tener en consideración para la torre de enfriamiento, nuevas localizaciones en Colombia que permitan un estudio de factibilidad del equipo, con uso en plantas satélites o industrias ubicadas en distintas partes de Colombia.

Plantear una red de tuberías, válvulas y bombas con su respectivo diagrama P&ID, para el flujo de agua de refrigeración de la máquina hacia la torre de enfriamiento con sus respectivos lazos de control.

Evaluar una energía renovable, como lo pueden ser paneles solares para la alimentación energética del ventilador en la torre de enfriamiento.