

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Cálculo y diseño de la instalación de una torre de enfriamiento para el proceso de soplado de botellas PET en una industria de envases plásticos ubicada dentro de la ciudad de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Jonathan Abraham Chicoj Tocay para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024









UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Cálculo y diseño de la instalación de una torre de enfriamiento para el proceso de soplado de botellas PET en una industria de envases plásticos ubicada dentro de la ciudad de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Jonathan Abraham Chicoj Tocay para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024



Vo.Bo.:



(f)

Ing. Rony José Herrarte Estevez

Tribunal Examinador:



(f)


Ing. Rony José Herrarte Estevez

(f)



Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f)



Ing. César Alberto Rosales Gómez

Fecha de aprobación: Guatemala, 07 de Junio de 2024.



<b>Lista de figuras</b>	X
<b>Lista de cuadros</b>	XII
<b>Resumen</b>	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	5
3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>7</b>
4.1. Torres de enfriamiento . . . . .	8
4.1.1. Partes de una torre de enfriamiento . . . . .	9
4.2. Tipos de torre de enfriamiento . . . . .	10
4.2.1. Torres de enfriamiento de flujo natural . . . . .	10
4.2.2. Torres de enfriamiento de tiro mecánico . . . . .	11
4.3. Principio de operación . . . . .	13
4.3.1. Teoría de enfriamiento . . . . .	16
4.4. Psicometría . . . . .	21
4.4.1. Carta psicométrica . . . . .	21
4.5. Principios para determinar el diámetro de la tubería . . . . .	22
4.5.1. Compresibilidad de un fluido . . . . .	23
4.5.2. Flujo estacionario o no estacionario . . . . .	23
4.5.3. Flujo laminar y turbulento . . . . .	23
4.5.4. Pérdida de carga total para flujo turbulento . . . . .	24
4.5.5. Método para comprobar el diámetro de la tubería . . . . .	25
4.6. Principios para determinar el tipo y capacidad de bombeo . . . . .	25
4.6.1. Bombas centrífugas . . . . .	25
4.6.2. Bombas de desplazamiento positivo . . . . .	25

4.6.3.	Altura neta positiva de aspiración	26
4.6.4.	Curva característica de bomba	26
4.7.	Mantenimiento a torres de enfriamiento	28
4.7.1.	Tipos de mantenimiento industrial	28
4.8.	Implementación plan básico de mantenimiento preventivo	29
4.8.1.	Primer arranque	30
4.8.2.	Estructura externa e interna	30
4.8.3.	Persianas para el flujo de aire	31
4.8.4.	Eliminadores de rocío	31
4.8.5.	Aspersores de agua	31
4.8.6.	Relleno	31
4.8.7.	Depósito de agua fría	32
4.8.8.	Motor eléctrico	32
4.8.9.	Ventilador	32
4.8.10.	Bomba de agua	33
4.8.11.	Fugas de agua	33
4.9.	Tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento	34
4.9.1.	Control de la calidad del agua	34
4.9.2.	Parámetros ideales del agua de circulación	36
4.10.	Nomenclatura	38
<b>5.</b>	<b>Metodología</b>	<b>41</b>
5.1.	Definición de requisitos de diseño	41
5.2.	Identificación de necesidades	42
5.3.	Descripción de la metodología	42
5.4.	Torre de enfriamiento	44
5.4.1.	Obtención de datos de operación del compresor <i>Francois</i>	44
5.4.2.	Cálculo de la eficiencia actual de enfriamiento	45
5.4.3.	Determinación de valores del aire de ingreso a la torre de enfriamiento	46
5.4.4.	Determinación de las propiedades del aire de entrada	46
5.4.5.	Cálculo del Número de Unidades de Transferencia <i>NTU</i>	47
5.4.6.	Cálculo de la altura total del relleno de la torre de enfriamiento	50
5.4.7.	Cálculo de la capacidad térmica mínima de enfriamiento para la se-	
	lección de la torre de enfriamiento	51
5.4.8.	Instalación eléctrica de la torre de enfriamiento	52
5.5.	Diámetro mínimo de la tubería de agua	53
5.5.1.	Diámetro preliminar y velocidad de diseño	53
5.5.2.	Cálculo del número de <i>Reynolds</i>	54
5.5.3.	Cálculo del factor de fricción por medio de la ecuación de <i>Colebrook</i>	55
5.5.4.	Cálculo de la pérdida de carga total en la tubería de succión y descarga	55
5.5.5.	Comprobación del diámetro de la tubería de succión y descarga	57
5.6.	Selección de bomba hidráulica	58
5.6.1.	Cálculo de la carga hidrostática necesaria de la bomba	58
5.6.2.	Cálculo de la potencia útil de la bomba hidráulica	59
5.6.3.	Cálculo de la altura neta positiva de aspiración	60
5.6.4.	Uso de la curva característica de la bomba	61
5.6.5.	Instalación eléctrica de la bomba hidráulica	62
5.7.	Validación de requisitos de diseño	64

<b>6. Resultados</b>	<b>67</b>
<b>7. Discusión de resultados</b>	<b>77</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>81</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>83</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>85</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>87</b>
11.1. Propuesta torre de enfriamiento - Industrial Mexicana . . . . .	88
11.2. Propuesta torre de enfriamiento - Reymosa . . . . .	89
11.3. Propuesta torre de enfriamiento - BAC . . . . .	90
11.4. Propuesta bomba centrífuga . . . . .	91
11.5. Formato de la rutina de inspección y limpieza . . . . .	92
11.6. Formato del plan de mantenimiento preventivo . . . . .	93
11.7. Programa de mantenimiento químico del agua . . . . .	94
11.8. Diseño de planos . . . . .	95
<b>12. Glosario</b>	<b>97</b>





---

Lista de figuras

---

1. Ciclo de enfriamiento del proceso industrial con torre de enfriamiento . . . . .	8
2. Relleno de torre de enfriamiento . . . . .	9
3. Componentes de una torre de enfriamiento . . . . .	10
4. Torre de enfriamiento de flujo natural . . . . .	11
5. Torre de enfriamiento de tiro forzado . . . . .	12
6. Curva del comportamiento de la relación agua-aire dentro de una torre de enfriamiento . . . . .	13
7. Análisis psicométrico del proceso de enfriamiento de la torre de enfriamiento . . . . .	14
8. Gradientes de temperatura y humedad de la parte inferior y superior de una torre de enfriamiento . . . . .	15
9. <i>aca</i> . . . . .	15
10. Relación de transferencia de energía y masa entre el aire, la interfase y el agua . . . . .	16
11. Perfil del flujo laminar y del flujo turbulento . . . . .	23
12. Curvas de rendimiento de una bomba centrífuga . . . . .	26
13. Curvas características de la misma familia de bombas con diámetros distintos de rotor . . . . .	27
14. Diagrama Ishikawa para identificar el problema raíz . . . . .	42
15. Programa <i>on-line</i> publicado por <i>ASHRAE</i> . . . . .	49
16. Tipos de diseño de entramados de madera para torre de enfriamiento . . . . .	51
17. Valores de velocidad máxima para sistemas de enfriamiento por agua . . . . .	54
18. Diagrama para determinar la carga hidrostática necesaria de la boma . . . . .	59
19. Curva característica de bombas de caudal alto que operan a 2,850 rev/min . . . . .	61
20. Relación del amperaje y máxima carga de voltaje para calibre del 6 al 14 . . . . .	63
21. Curva característica del proceso de enfriamiento de la torre con valores de diseño del año 2021 . . . . .	68
22. Temperatura de bulbo seco del aire del año 2021 . . . . .	69
23. Humedad relativa del aire del año 2021 . . . . .	70
24. Temperatura máxima en la ciudad de Guatemala en época de verano del año 2024 . . . . .	71
25. Humedad relativa máxima en la ciudad de Guatemala en época de verano del año 2024 . . . . .	72

26. Curva característica del proceso de enfriamiento de la torre con valores de diseño del año 2024 . . . . .	72
27. Circuito de fuerza para el motor de la torre de enfriamiento . . . . .	75
28. Circuito de fuerza para la bomba hidráulica . . . . .	76

---

Lista de cuadros

---

1. Comparativo entre torre de enfriamiento de tiro forzado y tiro inducido . . . .	12
2. Características entre mantenimientos . . . . .	29
3. Parámetros del control de calidad del agua de enfriamiento para torres de refrigeración . . . . .	37
4. Tratamiento físico y químico del agua de circulación en un sistema con torre de enfriamiento . . . . .	37
5. Requisitos de diseño para la instalación y funcionamiento de la torre de enfriamiento . . . . .	41
6. Datos compresor <i>Francois</i> de 40 BAR . . . . .	44
7. Carga de refrigeración de la torre en malas condiciones . . . . .	45
8. Porcentaje de eficiencia de mejora en el proceso de refrigeración . . . . .	45
9. Propiedades del aire ambiente para proceso de diseño . . . . .	46
10. Propiedades del aire ambiente del año 2013 al 2022 . . . . .	47
11. Propiedades del aire de entrada a 5,000 pies de altura sobre el nivel del mar . . . . .	47
12. Cálculo del Número de Unidades de Transferencia NTU . . . . .	48
13. Valor de la entalpía del aire a la salida de la torre de enfriamiento . . . . .	49
14. Valores de A y n para entramados de madera . . . . .	52
15. Datos del motor eléctrico de la torre de enfriamiento . . . . .	52
16. Código de colores y distancia de cable calibre #20 para la instalación de la torre de enfriamiento. . . . .	53
17. Velocidad y diámetro preliminar . . . . .	54
18. Valores de rugosidad equivalente para tuberías comerciales nuevas . . . . .	55
19. Longitud de tubería para el diseño de instalación . . . . .	56
20. Coeficiente de pérdida de carga en accesorios de la tubería de succión de 3" . . . . .	56
21. Coeficiente de pérdida de carga en accesorios de la tubería de descarga de 2.5" . . . . .	57
22. Datos técnicos de distintos modelos de bombas centrífugas de alto caudal . . . . .	62
23. Datos eléctricos del motor eléctrico de la bomba hidráulica . . . . .	63
24. Código de colores y distancia de cable calibre #14 . . . . .	64
25. Validación de requisitos de diseño para la instalación y funcionamiento de la torre de enfriamiento. . . . .	67
26. Altura del relleno de madera para torres de enfriamiento . . . . .	71

27. Carga de refrigeración necesaria por liberar según los valores de diseño . . . . .	71
28. Reynolds en la tubería de succión y descarga . . . . .	73
29. Factor de fricción en succión y descarga . . . . .	73
30. Pérdida de carga total en tubería de succión y descarga . . . . .	73
31. Diámetro teórico de la tubería de succión . . . . .	73
32. Diámetro teórico de la tubería de descarga . . . . .	74
33. Carga hidrostática necesaria de la bomba hidráulica . . . . .	74
34. Potencia útil de la bomba hidráulica . . . . .	74
35. Altura neta positiva de aspiración NPSH . . . . .	74

El presente trabajo de graduación consistió en determinar la capacidad de enfriamiento de una torre de enfriamiento y el diseño de su instalación, para el proceso de soplado de botellas de *Tereftalato de Polietileno* (*PET*, por sus siglas en inglés), en una industria de envases plásticos ubicada dentro de la ciudad de Guatemala.

El principal problema radica en el aumento de temperatura del compresor y de la línea de producción. El compresor presenta varios reportes de alta temperatura, resultado del intercambio de calor entre el aceite refrigerante y el agua de la torre de enfriamiento. Además, la máquina de la línea de producción envía reportes de alta temperatura del aire proveniente del compresor que afecta y altera los parámetros de producción.

El objetivo del trabajo de graduación consistió en calcular y diseñar la instalación de una torre de enfriamiento que evite los problemas antes mencionados, el cual fue determinado por medio de análisis psicométrico del aire ambiente, el cálculo de la capacidad térmica de enfriamiento del compresor, el cálculo de diámetros de tubería, la potencia y selección de la bomba hidráulica capaz de evitar cavitación, así como el diseño de los planos mecánicos.

Se calculó y se seleccionó una torre de enfriamiento capaz de liberar la carga térmica del compresor trabajando al 92% de su máxima capacidad de refrigeración. Se determinó que el diámetro de la tubería de succión puede ser de 3 pulgadas y el diámetro de la tubería de descarga puede ser de 2-1/2 pulgadas. El sistema utilizó una bomba hidráulica con una potencia de al menos 2 HP para vencer 44 pies de pérdida de carga total.



Actualmente la torre de enfriamiento de tiro mecánico, instalada en la planta de producción *PET*, presenta fugas de agua en la tubería interna que provoca pérdida de eficiencia dentro del proceso de enfriamiento.

El principal problema se presenta en el aumento de temperatura del compresor por la falta de refrigeración que la torre de enfriamiento debería de cubrir. Este aumento de temperatura provoca que las alarmas del compresor se activen, al igual que las alarmas en los secadores y en los moldes de soplado, por la variación de temperatura fuera del rango especificado.

En el área administrativa, los indicadores de gestión (*KPI*, siglas en inglés), del departamento de mantenimiento y de control de calidad se están viendo afectados; el primero por la disposición de maquinaria y el segundo por la merma provocada por los paros de operación.

La metodología consistió en obtener los datos del aire ambiente por medio de las mediciones del INSIVUMEH de la zona más cercana a la planta de producción para el análisis psicrométrico. Seguidamente se verificó el valor de la temperatura del agua de ingreso y salida del compresor para determinar la carga térmica actual y ser comparada con los valores teóricos de enfriamiento. Dichos valores se encuentran en el manual técnico del compresor. También se realizó el análisis para determinar el diámetro ideal de la tubería de succión y descarga de agua, el tipo y potencia de la de bomba hidráulica. Se propuso un programa de mantenimiento preventivo para los equipos, al igual que un programa para el tratamiento del agua de circulación. Por último, se presentaron los planos del diseño de la instalación.





Para todas las industrias, la eficiencia de producción es un tema importante, el cual es abordada desde el proceso del diseño de la instalación de planta. Esto ayuda a identificar las condiciones ideales y necesarias que cada equipo debe contar para que la industria produzca productos al menor costo unitario posible. Al inicio de la operación, la eficiencia de los procesos industriales se centra en el máximo rendimiento permitido que pueden alcanzar los activos instalados, pero dichas condiciones cambian y se reducen conforme a las horas de producción, el mantenimiento ejecutado y la vida útil de cada equipo («Qué es la eficiencia de la producción y cómo se alcanza», 2021).

En la planta de producción de plásticos PET, se presentan alarmas por temperatura elevada en el compresor, alarmas de alta temperatura del aire ingresado a la máquina sopladora de plásticos, paros no programados de la máquina sopladora por parámetros fuera de límites y aumento de merma en la línea de producción. El aumento de temperatura también repercute en la reducción de eficiencia de los equipos y en el bajo desempeño de los indicadores de gestión (KPI, por sus siglas en inglés). El origen de lo mencionado radica en la baja eficiencia de enfriamiento de la torre de refrigeración instalada para liberar el calor del aceite y del aire del compresor. La eficiencia de refrigeración de la torre de enfriamiento se ve afectada por corrosión en la tubería del relleno y erosión en los rociadores de agua por la falta de aplicación del programa de mantenimiento preventivo y tratamiento del agua.

Es necesario el cálculo, dimensionamiento y diseño de la instalación de una nueva torre de enfriamiento de tiro mecánico con el principal objetivo de eliminar los paros no programados por alta temperatura de operación. Con esto se pretende que aumentará la disponibilidad de los equipos de la línea de producción, se reducirá la merma de producción, se eliminarán las alarmas por alta temperatura en el compresor y en la máquina sopladora, se maximizarán los KPI's de mantenimiento y la inversión adquirida se verá reflejada en la reducción significativa del costo de producción por unidad. El programa de mantenimiento preventivo y el tratamiento de agua deberán respetarse y cumplirse para maximizar la vida útil de la torre y evitar fallas drásticas que afecten la operación y rendimiento del sistema.

El aporte y mejora significativa que se implementará con esta inversión será el poder operar dos líneas de producción en consecutivo para mejorar la eficiencia de producción en la planta de plásticos PET. Actualmente el compresor sólo suministra de aire comprimido a una de las dos líneas de producción de forma individual. Operar con ambas líneas de producción no será posible si se sigue operando con la misma torre de enfriamiento ya que, el operar dos líneas de producción en consecutivo requiere que el compresor aumente los ciclos de trabajo por el consumo de aire de ambas máquinas, más las pérdidas de aire en el sistema, y, por ende, el mismo exigirá mayor capacidad de enfriamiento.

### 3.1. Objetivo general

Diseñar la instalación de una torre de enfriamiento de tiro mecánico para extraer más de 80 toneladas de refrigeración y aumentar un 5% la eficiencia del proceso de soplado de botellas PET.

### 3.2. Objetivos específicos

1. Analizar la eficiencia actual del sistema de refrigeración para ser comparada con la nueva instalación y justificar su implementación.
2. Determinar la carga térmica a eliminar por la torre de enfriamiento por medio del flujo másico de agua caliente proveniente del compresor.
3. Seleccionar una torre de enfriamiento de flujo cruzado y tiro forzado que opere con un caudal mínimo de 92 GPM.
4. Calcular la potencia necesaria de la bomba de agua para la recirculación del flujo de agua entre la torre de enfriamiento y el compresor.
5. Elaborar planos del diseño de instalación de la torre de enfriamiento conectada a dos líneas de producción.
6. Elaborar un programa de mantenimiento preventivo para la torre de enfriamiento y un programa de mantenimiento para el tratamiento del agua.



Los procesos industriales generan grandes cantidades de calor que debe ser disipado para que las instalaciones operen de forma eficiente. Usualmente dicho calor es transferido a un flujo de agua fría que libera energía térmica a la atmósfera mediante el intercambio de calor y masa (Lacovic, Mirjana S. et al., 2016). El agua es el líquido mayormente utilizado para la liberación de energía por poseer un elevado coeficiente de calor específico y su disponibilidad en las zonas industrializadas.

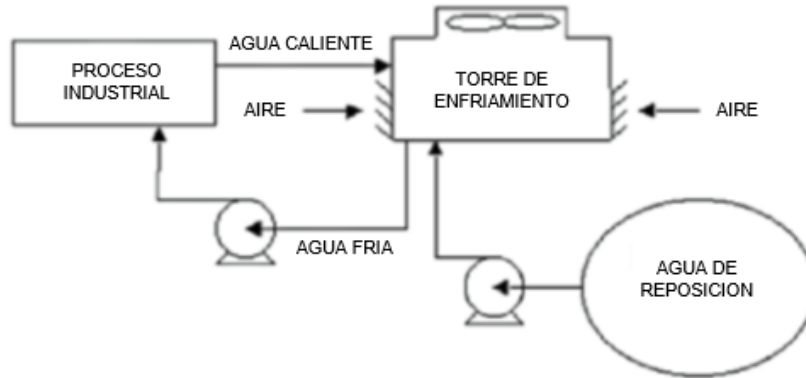
Desde 1961 se han realizado diversos estudios para lograr que las gotas de agua liberen la mayor cantidad de energía con el mínimo contacto del aire (The American Society of Heating & Engineers, 2000). Esto se logra aumentando el área de contacto entre el aire y el agua por medio de una película fina de agua en la que ocurre transferencia de calor sensible y calor latente.

Las torres de enfriamiento son excelentes intercambiadores de calor, diseñados para liberar grandes cantidades de energía térmica (Lacovic, Mirjana S. et al., 2016). Estas están diseñadas de materiales como: madera, plástico, concreto y metales; según las condiciones de diseño.

En la [Figura 1](#) se observa el ciclo de enfriamiento generado por el proceso industrial, que es disipado por medio de la torre de enfriamiento. El fluido utilizado es agua, esta sale del proceso industrial con alta temperatura e ingresa por la parte superior de la torre de enfriamiento, el calor es liberado a la atmósfera por el contacto entre el flujo de agua con el flujo de aire, sale a baja temperatura por la parte inferior de la torre y se dirige hacia la bomba que le inyecta presión y velocidad para ingresar al proceso industrial y volver a ser utilizada como medio refrigerante.

El agua de reposición es requerida ya que, sólo el 98 % del agua es recuperada y el otro 2 % es absorbido por el aire y liberado a la atmósfera por medio de evaporación (Lacovic, Mirjana S. et al., 2016). La transferencia de calor y masa se explicará en la [Sección 4.3](#) donde se abordarán temas como calor sensible, calor latente y la relación entre la entalpía del aire con la entalpía del agua.

Figura 1: Ciclo de enfriamiento del proceso industrial con torre de enfriamiento



Fuente: (Lacovic, Mirjana S. et al., [2016](#)). *Ejemplo del intercambio de calor para procesos industriales*

## 4.1. Torres de enfriamiento

También conocidas como torres de refrigeración, son equipos que funcionan bajo el principio del enfriamiento evaporativo (Arnabat C., [2018](#)). El enfriamiento evaporativo es un proceso natural que se da cuando el flujo de agua tiene contacto directo con el flujo de aire. Dicho proceso evapora un pequeño porcentaje de agua y reduce su temperatura. El calor latente de evaporación del agua lo genera el proceso industrial, lo absorbe el agua y lo libera el agua durante el contacto con el aire para refrigerarse.

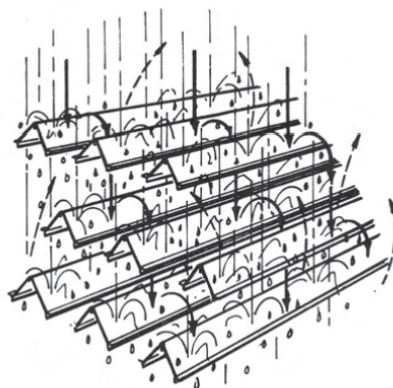
Por consiguiente, para que la torre de refrigeración sea eficiente, se debe garantizar el mayor contacto posible entre estos dos fluidos provocando que el agua ingrese en forma de rocío.

Considerando la [Figura 1](#), el agua que ha absorbido la energía térmica generada del proceso industrial es bombeada a la torre de enfriamiento a través de tuberías. Ingresando por la parte más alta de la torre y es rociada por medio de boquillas de rocío sobre un conjunto de láminas llamado relleno o empaque. En la [Figura 2](#) se puede observar el diseño y estructura de un relleno común utilizado en torres de enfriamiento de flujo mecánico.

Gracias al diseño y estructura del relleno, la película delgada de agua pulverizada tiene un flujo lento y la expone a una mayor superficie para maximizar el contacto aire-agua. Mientras que el agua fluye a través del relleno, el aire ingresa por las aberturas inferiores de la torre de enfriamiento y fluye en sentido contrario o perpendicular a través del relleno, generando la acción de enfriamiento como consecuencia de la evaporación de cierto volumen de agua (Arnabat C., [2018](#)).

Finalmente el agua ya refrigerada cae al depósito para ser bombeada de regreso al proceso industrial para absorber nuevamente calor y ser bombeada a la torre de enfriamiento para ser refrigerada una vez más. Ciertos diseños cuentan con eliminadores de rocío, instalados por arriba de los rociadores de agua, con el único objetivo de evitar el escape de gotas hacia el exterior por la corriente de aire.

Figura 2: Relleno de torre de enfriamiento



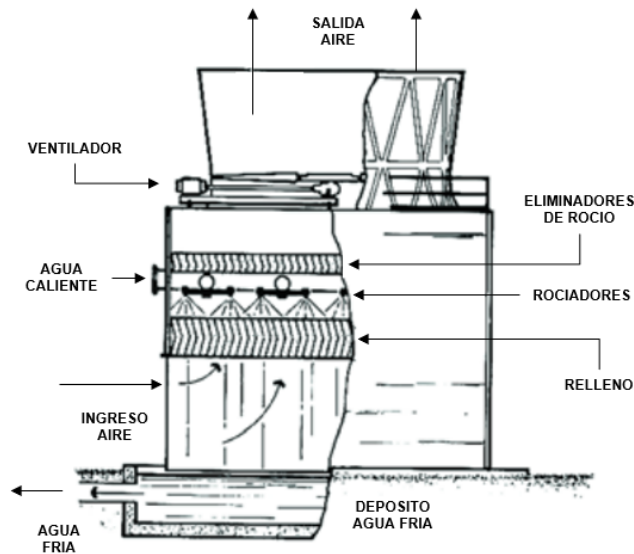
Fuente: (SPX Cooling Technologies, 2009). *Diseño común del relleno o empaque de las torres de enfriamiento*

#### 4.1.1. Partes de una torre de enfriamiento

En la [Figura 3](#) se observan los principales componentes de una torre de enfriamiento. Se utiliza como ejemplo la figura de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contra flujo, ya que contiene partes que otros diseños no utilizan. En la [Sección 4.2](#) se hablará de los tipos de torres de enfriamiento.

1. Estructura: pueden ser diseñadas de chapa de metal, fibra de vidrio, plástico o combinación de materiales y su función es soportar y proteger el diseño de la torre. Las torres hiperbólicas que exigen alta demanda de refrigeración son construidas de cemento o concreto.
2. Ventilador: componente mecánico que puede ser radial o axial, dependiendo de si el diseño del flujo de aire es forzado o inducido, correspondientemente.
3. Eliminadores de rocío: instaladas por arriba del ingreso de agua a alta temperatura. Su función es evitar la expulsión de las gotas de agua propulsadas por la corriente de aire.
4. Rociadores: gracias a ellos el agua es pulverizada y distribuida a lo ancho del relleno.
5. Relleno: componente en donde ocurre la transferencia de calor latente y sensible. Está formado por un conjunto de láminas de metal o plástico en torres de enfriamiento de circuito abierto y por un serpentín en torres de enfriamiento cerrado.
6. Depósito de agua: situado en la parte inferior de la torre de enfriamiento que almacena el agua refrigerada.

Figura 3: Componentes de una torre de enfriamiento



Fuente: (Lacovic, Mirjana S. et al., 2016). *Componentes principales de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contra flujo*

## 4.2. Tipos de torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son diseñadas y producidas de distintos tipos y tamaños, de acuerdo a las condiciones de diseño. Todas las torres trabajan bajo condiciones atmosféricas y carga de calor variable (Cofrico, 2022). Conocer las ventajas y limitaciones de cada diseño es importante para determinar el tipo de torre a utilizar, a continuación y de forma general, las torres de enfriamiento se clasifican en dos grandes grupos:

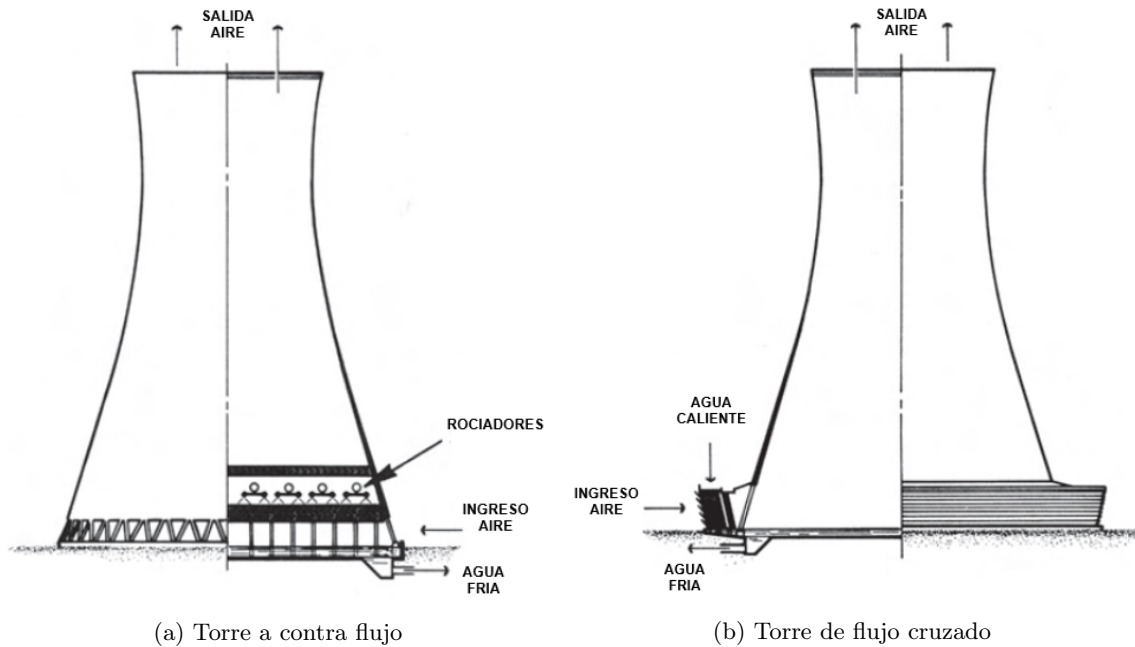
### 4.2.1. Torres de enfriamiento de flujo natural

Son aquellas torres de enfriamiento que no utilizan ningún dispositivo mecánico para hacer fluir aire a través de la torre. El flujo de aire se crea por la diferencia de densidad entre el aire caliente del interior (menor densidad) con el aire frío del exterior (mayor densidad) (SPX Cooling Technologies, 2009).

En la Figura 4 se observa el diseño hiperbólico de las torres de enfriamiento de flujo natural. El nombre se deriva de la figura geométrica. Estas pueden ser diseñadas a contra flujo, como se observa en la Figura 4a, o de flujo cruzado, como se observa en la Figura 4b, dependiendo de las condiciones de diseño, ambos diseños el empaque ocupa sólo la sección de la base. El costo de adquisición es elevado comparado con las torres de flujo mecánico y son comúnmente instaladas en plantas nucleares, centrales eléctricas, refinamiento de petróleo o en plantas en donde las cargas de calor son unificadas. Pueden llegar a alcanzar los 150 metros de altura, manejando un flujo de agua de hasta 250,000 galones por minuto.



Figura 4: Torre de enfriamiento de flujo natural



Fuente: (SPX Cooling Technologies, 2009). *Diseño de torre de enfriamiento de flujo natural a contra flujo y flujo cruzado*

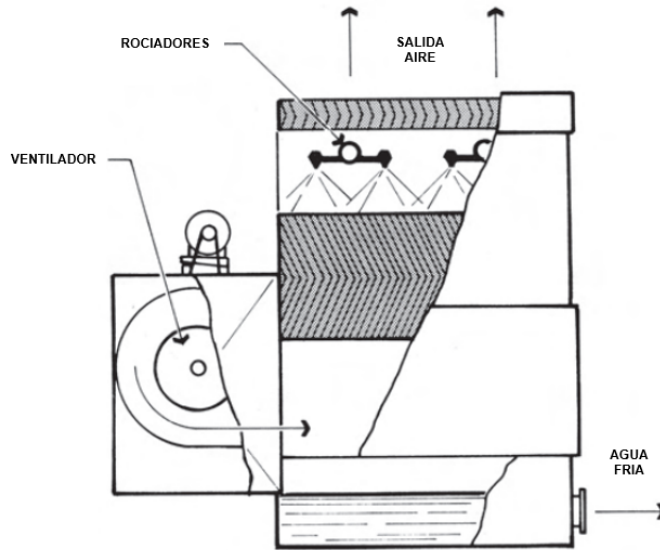
#### 4.2.2. Torres de enfriamiento de tiro mecánico

Son aquellas torres de enfriamiento que utilizan uno o varios ventiladores para generar flujo de aire a un volumen controlado dentro de la torre de enfriamiento y son afectadas por algunas variables psicométricas (SPX Cooling Technologies, 2009), por esta razón, su desempeño térmico tiende a ser más estable comparado con las torres de flujo natural. Estos diseños se categorizan por ser de tiro forzado o inducido.

##### Torre de tiro mecánico forzado

En la Figura 5 se muestra el diseño de las torres de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo. Caracterizada por tener instalados los ventiladores a la entrada del aire ambiente ubicados en la parte inferior de la torre. Este diseño obliga al flujo de aire pasar a través del relleno y ser liberado a la atmósfera por la parte superior de la torre (SPX Cooling Technologies, 2009).

Figura 5: Torre de enfriamiento de tiro forzado



Fuente: (SPX Cooling Technologies, 2009). Torre de enfriamiento de tiro forzado a contra flujo

### Torre de tiro mecánico inducido

En la Figura 3 se muestra el diseño de las torres de tiro inducido a contra flujo. Al contrario del diseño anterior, los ventiladores están ubicados en la parte superior de la torre para extraer el aire del interior que ingresa por medio de las rejillas.

En la Tabla 1 se comparan características entre las torres de enfriamiento de tiro forzado y tiro inducido.

Tabla 1: Comparativo entre torre de enfriamiento de tiro forzado y tiro inducido

	Velocidad ingreso del aire	Velocidad salida del aire	Recirculación de aire	Congelamiento	Tipo de ventilador
Torre de enfriamiento de tiro forzado	Alta	Baja	Sí, por la baja velocidad de aire a la salida de la torre	Sí, por la baja temperatura que el aire llegue a alcanzar durante la noche	Centrifugo
Torre de enfriamiento de tiro inducido	Baja	Muy alta	No	No, el aire caliente evita la formación de hielo en los álabes	Axial

Fuente: SPX Cooling Technologies, 2009

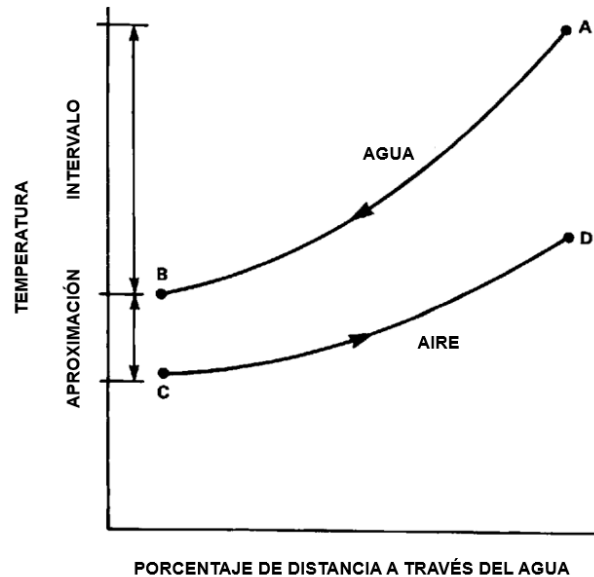
Una de las ventajas de las torres de tiro forzado es que fácilmente rompen la columna de presión estática y la convierten a presión dinámica generando flujo de aire frío con mayor densidad debido a que el ventilador está instalado al ingreso del aire. El ventilador tendrá un mayor tiempo de vida debido a que no trabaja con aire caliente saturado que provoca corrosión. La desventaja es que podría darse recirculación de aire caliente provocado por la baja velocidad de descarga del aire saturado.

La principal ventaja de las torres de tiro inducido es que se logra una mayor distribución de aire por la sección transversal del relleno debido a la alta velocidad de descarga. La desventaja es que el ventilador reduce su potencia durante el arranque, debido a que debe superar la caída de presión estática entre el aire que asciende y el agua que desciende. Los ventiladores deben protegerse contra corrosión del aire caliente y húmedo.

### 4.3. Principio de operación

Cuando entra en contacto el flujo de un fluido caliente con un gas insaturado, parte del líquido se evapora y su temperatura desciende (McCabe, Warren L. et al., 2007). En la Figura 6 se muestra la relación que existe entre el flujo de agua y el flujo de aire al entrar en contacto. La curva  $AB$  muestra la caída de temperatura del agua y la curva  $CD$  el aumento de temperatura del aire. El INTERVALO es la diferencia de temperatura entre el ingreso y la salida del agua de la torre de enfriamiento y se representa por la curva  $AB$ . La APROXIMACIÓN es la diferencia de temperatura entre la salida del agua y el ingreso de bulbo húmedo del aire, se representa por el vector  $BC$ .

Figura 6: Curva del comportamiento de la relación agua-aire dentro de una torre de enfriamiento



Fuente: (The American Society of Heating & Engineers, 2000). *Diagrama de la relación de temperatura entre agua y aire en una torre de enfriamiento de flujo cruzado*

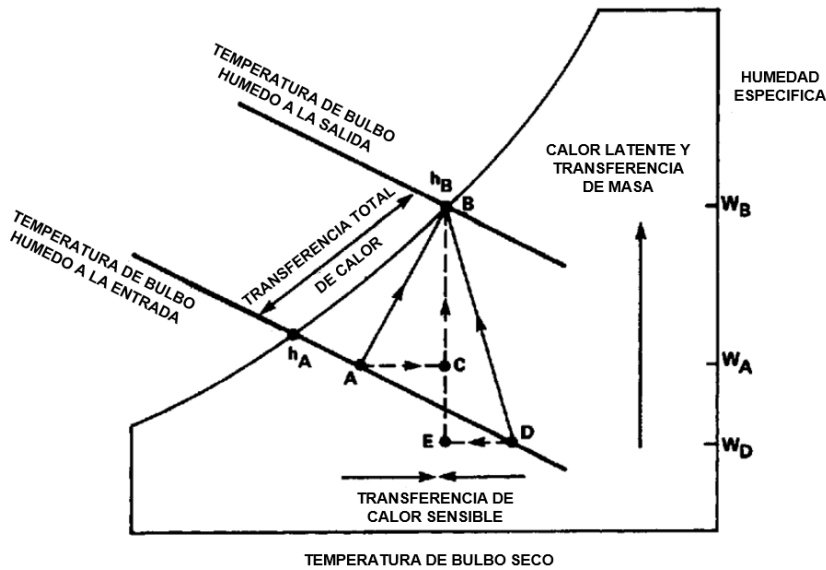
La aproximación es función de la capacidad de refrigeración de la torre de enfriamiento; entre menor sea el valor, mayor deberá ser la capacidad de enfriamiento de la torre. La temperatura de bulbo húmedo del aire representa el límite termodinámico de enfriamiento (Lacovic, Mirjana S. et al., 2016), lo que quiere decir que el agua no podrá enfriarse a un valor menor, además que los fabricantes no garantizan el correcto desempeño si el valor de la aproximación es menor a  $5^{\circ}\text{F}$  (Towers, 2016).

"... el rendimiento térmico de una torre de enfriamiento depende principalmente de la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante. La temperatura del bulbo seco del aire entrante y la humedad relativa, tomadas independientemente, tienen un efecto insignificante en el rendimiento térmico de las torres de refrigeración de tiro mecánico, pero sí afectan a la velocidad de evaporación del agua en la torre de refrigeración." (The American Society of Heating & Engineers, 2000, capítulo 36)

El agua es refrigerada por una combinación de transferencia de calor y masa que ocurre en el interior de la torre. La diferencia de temperatura ocurre por medio de la transferencia de calor sensible y la diferencia de humedad por medio del calor latente, al entrar en contacto el agua con el aire.

En la Figura 7 se observa el análisis psicrométrico del aire que fluye a través de la torre de enfriamiento. El punto  $A$  representa el ingreso del aire ambiente, absorbe calor y humedad del agua y sale de la torre como aire saturado en el punto  $B$ . La cantidad de calor liberada del agua al aire es proporcional a la diferencia de entalpía del aire entre la salida e ingreso ( $h_B - h_A$ ). Dado que las líneas de entalpía casi coinciden con las líneas de temperatura de bulbo húmedo, el cambio de entalpía podría ser determinado por el cambio de temperatura de bulbo húmedo del aire (The American Society of Heating & Engineers, 2000).

Figura 7: Análisis psicrométrico del proceso de enfriamiento de la torre de enfriamiento



Fuente: (The American Society of Heating & Engineers, 2000). Análisis psicrométrico del aire fluyendo a través de la torre de enfriamiento

En la figura anterior, se ilustran dos procesos de enfriamiento bajo condiciones distintas. El primero, el vector  $AB$  y el segundo, el vector  $DB$ . Ambos vectores se dividen en componentes que representan la liberación de calor sensible y calor latente. Se observa que el proceso de enfriamiento del vector  $AB$  demanda mayor liberación de calor sensible y menor liberación de calor latente que el proceso de enfriamiento del vector  $DB$ .

El vector  $AB$  representa la transferencia total de calor del agua, se divide por el vector  $AC$  que representa la liberación del calor sensible liberado a la atmósfera y por el vector  $CB$  que representa la liberación de calor latente transferido al aire atmosférico. Como se observa en el vector  $DB$ , la misma transferencia total de calor del agua sucede al aumentar la temperatura de bulbo seco, pero se observa que el esfuerzo de enfriamiento será mayor por tener una mayor pendiente y habrá mayor disipación de calor latente.

La transferencia de masa o evaporación ocurre en la transferencia de calor latente y es proporcional al cambio de humedad específica (The American Society of Heating & Engineers, 2000). Es decir, en la Figura 7 se observa que el cambio de humedad específica del vector  $DB$  es mayor que el cambio de humedad específica que describe el vector  $AB$ , lo que concluye que la transferencia de calor latente, y por lo tanto el porcentaje de evaporación será mayor en las condiciones de operación del vector  $DB$ .

Otra forma de ejemplificar el gradiente de temperatura y humedad de la mezcla líquido-gas en la parte inferior y superior de la torre se observan en la Figura 9 (McCabe, Warren L. et al., 2007).

Figura 8: Gradientes de temperatura y humedad de la parte inferior y superior de una torre de enfriamiento

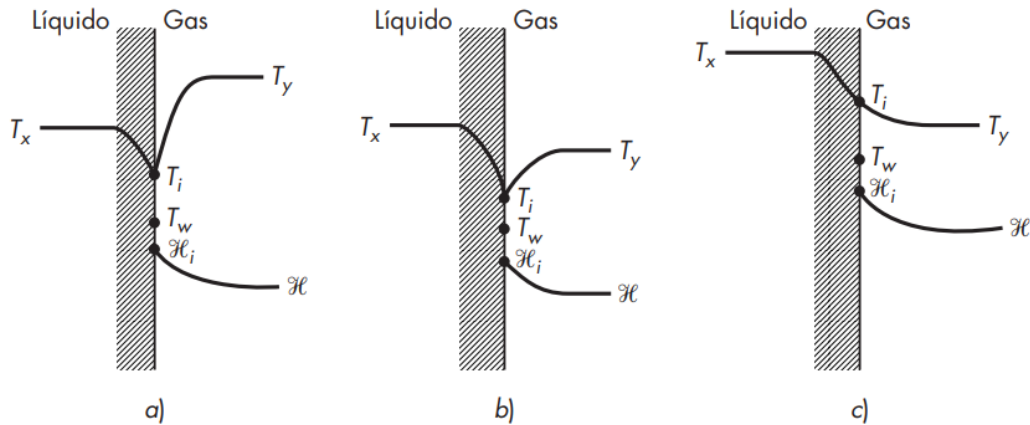


Figura 9: aca

Fuente: (McCabe, Warren L. et al., 2007). *Gradientes típicos de temperatura y humedad dentro de la torre de enfriamiento: a) y b) Parta inferior, c) Parte superior*

En la parte inferior podrían ocurrir dos condiciones a) y b) que se diferencian por la temperatura del aire  $T_y$  comparada con la temperatura del líquido  $T_x$ . En la condición b) en la temperatura  $T_y$  es menor a  $T_x$  los gradientes son similares a la condición a), pero existe menor transferencia de calor sensible a través de la película gaseosa. En ambas condiciones,  $T_x$  inicia a enfriarse al transitar por la superficie de contacto  $T_i$  ya que esta es menor. También se observa que la humedad de la superficie de contacto  $H_i$  es mayor a la humedad del aire  $H$ , gradiente que proporciona la fuerza impulsora para la transferencia de masa del vapor de agua.

Respecto a la condición c), a medida que el flujo del aire fluye hacia la parte superior, la temperatura del aire se irá incrementando de forma gradual cuando el aire con mayor

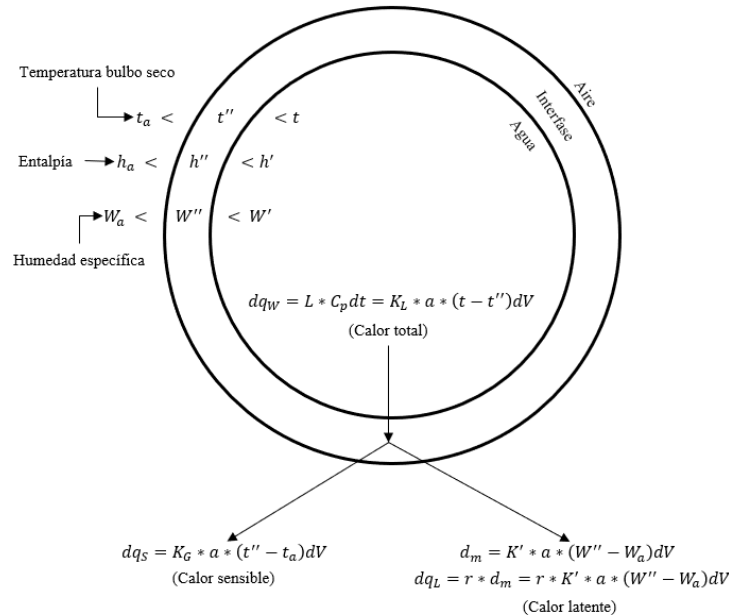
temperatura entre en contacto con el flujo de agua con mayor temperatura. El calor transferido del agua a la superficie de contacto se utiliza para calentar el aire, así como para proveer el calor de vaporización (McCabe, Warren L. et al., 2007). La temperatura del aire a la salida tiende, por lo regular, a ser unos grados menor a la temperatura del agua de entrada.

En las tres condiciones, la temperatura de la superficie de contacto  $T_i$  debe ser superior a la temperatura del bulbo húmedo  $T_w$ , puesto que si  $T_x = T_y$ , todos los calores de vaporización deberán provenir del aire, y no existirá gradiente de temperatura ni enfriamiento del agua (McCabe, Warren L. et al., 2007). En este punto, la torre de enfriamiento ha alcanzado su máxima operación o el aire ambiente está saturado de humedad, ya que el agua no puede enfriarse por debajo de la temperatura del bulbo húmedo del aire ambiente.

### 4.3.1. Teoría de enfriamiento

Varios investigadores han dedicado su tiempo para investigar de forma teórica y experimental acerca de la teoría de la transferencia de energía y masa. Fue hasta que en 1922 que *Robinson C.* fue el primer investigador en considerar el análisis de una torre de enfriamiento. En 1923, *Walker W. et al* desarrollaron ecuaciones para la transferencia de calor y masa de forma individual, considerando únicamente la humedad del aire como fuerza impulsora (Meneceur, N. et al., 2018).

Figura 10: Relación de transferencia de energía y masa entre el aire, la interfase y el agua



Fuente: (The American Society of Heating & Engineers, 2000). *Transferencia de energía y masa entre el flujo de aire, el relleno y el flujo de agua de una torre de enfriamiento*

Y para 1925, fue *Merkel F.* quien propuso el primer modelo práctico para describir el proceso de transferencia de calor y masa para una torre de enfriamiento húmeda combinando

las ecuaciones de transferencia de calor y transferencia de vapor de agua. Fue el primero en demostrar que el calor total o diferencia de entalpía son las fuerzas impulsoras que permiten la transferencia de calor sensible y latente (Meneceur, N. et al., 2018).

En el presente trabajo de graduación se utilizará la teoría de *Merkel*, ya que es la teoría más conocida y utilizada para el cálculo de torres de enfriamiento, También se utilizará el análisis de *Baker y Shryock* desarrollado en 1961 (The American Society of Heating & Engineers, 2000).

La Figura 10 ejemplifica el análisis de la transferencia de calor y vapor de agua dentro de una torre de enfriamiento, considerando que la torre de enfriamiento cuenta con un área de  $1 \text{ pie}^2$ . El agua en la interfase con temperatura  $t$  está rodeada por el aire a la temperatura de bulbo seco  $t_a$ , con entalpía  $h_a$  y humedad específica  $W_a$ . Asumiendo que el relleno o interfase es una película de aire saturado con una temperatura media  $t''$ , entalpía  $h''$  y humedad específica  $W''$  se deducen las siguientes ecuaciones: (The American Society of Heating & Engineers, 2000).

La energía total transferida del agua hacia la interfase se calcula por medio de la Ecuación 1:

$$dq_w = L * C_p * dt = K_L * a * (t - t'') * dV \quad (1)$$

La transferencia de calor sensible de la interfase hacia el aire se calcula por medio de la Ecuación 2:

$$dq_s = K_G * a * (t'' - t_a) * dV \quad (2)$$

La difusión del vapor de agua de la interfase hacia el aire se calcula por medio de la Ecuación 3:

$$dm = K' * a * (W'' - W_a) * dV \quad (3)$$

La transferencia de calor latente de la interfase hacia el aire se calcula por medio de la Ecuación 4:

$$dq_L = r * dm = r * K' * a * (W'' - W_a) * dV \quad (4)$$

Bajo condiciones adiabáticas, el proceso de enfriamiento alcanza equilibrio cuando la temperatura del aire seco  $t_a$  es igual a la temperatura del agua  $t$  y el aire se satura de humedad a esa temperatura; o a la temperatura termodinámica de bulbo húmedo del aire (The American Society of Heating & Engineers, 2000). El flujo de agua rápidamente alcanza esta temperatura cuando la torre de enfriamiento opera sin carga térmica.

El análisis de la entalpía como fuerza impulsora debe plantearse para relacionar la ecuación de *Lewis* y obtener la ecuación de *Merkel* (Baker, Donald R. & Shryock, Howard A., 2016). La Ecuación 5 se utiliza para determinar la entalpía del aire:

$$h_a = C_{pa} * (t_a - t_{a0}) + W_a[r + C_p'' * (t_a - t_0'')] \quad (5)$$

Puesto que  $W_a$  y  $t_a$  son variables, se procede a derivar la [Ecuación 5](#) y se utiliza la ecuación del calor específico del aire húmedo  $C_{pm} = C_{pa} + W_a * C_p''$  para determinar la [Ecuación 6](#) (Baker, Donald R. & Shryock, Howard A., [2016](#)):

$$dh_a = C_{pm} * dt_a + [r + C_p'' * (t_a - t_0'')] * dW_a \quad (6)$$

Considerando el sistema como estacionario y realizando un análisis de masa y energía simplificado, la transferencia de masa del agua por evaporación equivale al incremento de humedad del aire y se representa por medio de la [Ecuación 7](#). El calor liberado por el flujo de agua equivale al calor incrementado del flujo de aire y se representa por medio de la [Ecuación 8](#).

$$dL = G * dW_a \quad (7)$$

$$G * dh_a = L * C_{pw} dt \quad (8)$$

Igualando el diferencial de entalpía del aire seco  $dh_a$  de la [Ecuación 8](#) al de [Ecuación 6](#) se obtiene la primera aproximación a la ecuación de *Merkel* indicada en la [Ecuación 9](#), en donde el primer término representa el calor sensible y el segundo término representa el calor latente.

$$L * C_{pw} * dt = G * C_{pa} * dt + [r + C_p'' * (t_a - t_0'')] * G * dW_a \quad (9)$$

*Merkel* asumió que la relación de *Lewis* es igual a uno al incluir el calor específico del aire húmedo dentro de su ecuación.

$$1 = \frac{K_G}{K' * C_{pm}} \dots = \dots K_G = K' * C_{pm} \quad (10)$$

Seguidamente se sustituye el término  $K_G$  de la [Ecuación 2](#) por el de la relación de *Lewis* y se iguala el resultado al término del calor sensible de la [Ecuación 9](#) para obtener la [Ecuación 11](#).

$$G * C_{pa} * dt = K' * C_{pm} * a * (t'' - t_a) * dV \quad (11)$$

En paralelo, se iguala el término del calor latente de la [Ecuación 9](#) a la [Ecuación 3](#) para obtener la [Ecuación 12](#):

$$G * dW_a = K' * a * (W'' - W_a) * dV \quad (12)$$



Ahora reescribiendo la [Ecuación 9](#) sustituyendo los términos de la [Ecuación 11](#) y [Ecuación 12](#) por el término del calor sensible y calor latente de la misma y seleccionando el término  $K' * a * dV$  como factor común, se obtiene la [Ecuación 13](#):

$$L * C_{pw} * dt = (K' * a * dV) * [C_{pm} * (t'' - t_a) + (W'' - W_a)[r + C_p'' * (t_a - t_0'')]] \quad (13)$$

Con el objetivo de reducir la [Ecuación 13](#), se sustituirá la ecuación del calor específico del aire húmedo  $C_{pm}$  dentro de la ecuación [Ecuación 5](#), se operan los términos, se factoriza el término  $W_a$  y se resuelve para determinar la [Ecuación 14](#). Expresando dicha ecuación en términos de la temperatura de la interfase, se determina la [Ecuación 15](#).

$$t_a = \frac{h_a + C_{pa} * t_{a0} - W_a(r - C_p'' * t_0'')}{C_{pm}} \quad (14)$$

$$t'' = \frac{h'' + C_{pa} * t_{a0} - W''(r - C_p'' * t_0'')}{C_{pm}} \quad (15)$$

Se sustituye la [Ecuación 14](#) y la [Ecuación 15](#) dentro del primer término de la [Ecuación 13](#), ya que se necesita saber el comportamiento de la temperatura del aire en la interfase. Se opera y se encontrará el término  $(W_a - W'') * (r - C_p'' * t_0'')$  el cual es relativamente pequeño (de 1% al 5%) y habitualmente se descarta (Baker, Donald R. & Shryock, Howard A., 2016). Reordenando los términos se deduce la [Ecuación 16](#) que determina la transferencia de materia en la interfase mediante la diferencia del potencial de entalía.

$$L * C_{pw} * dt = G * dh_a = (K' * a * dV) * (h'' - h_a) \quad (16)$$

Integrando la ecuación [Ecuación 16](#) respecto a  $L$  y/o  $G$  se determina la ecuación de *Merkel* por medio de la [Ecuación 17](#) y [Ecuación 18](#):

... integrando respecto a  $L$ :

$$\int_0^V \frac{K' * a}{L} dV = \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_{pw}}{h'' - h_a} dt$$

Se obtiene la ecuación de *Merkel* utilizando el diferencial de temperatura:

$$\frac{K' * a * V}{L} = C_{pw} * \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{h'' - h_a} dt = NTU \quad (17)$$

... integrando respecto a  $G$ :

$$\int_0^V \frac{K' * a}{G} dV = \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h'' - h_a} dh_a$$

Se obtiene la ecuación de *Merkel* utilizando el diferencial de entalpía:

$$\frac{K' * a * V}{G} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h'' - h_a} dh_a \quad (18)$$

En la práctica de la transferencia de energía de las torres de enfriamiento, comúnmente la [Ecuación 17](#) se refiere al número de unidades de transferencia (*NTU Number of Transfer Units*). El *NTU* es el número de veces que el valor promedio del potencial de entalpía ocupa dentro del cambio de temperatura del agua (The American Society of Heating & Engineers, [2000](#)).

La altura de las unidades de transferencia *HTU Height of Transfer Units* se representa por medio de la [Ecuación 19](#), es el valor que determina la altura de cada unidad de transferencia y depende del valor de la unidad de conductancia de la transferencia de masa de la interfase hacia el flujo de aire  $K'$ .

$$HTU = \frac{G_s}{K' * a} \quad (19)$$

$$Pies = \frac{\frac{Lb}{h * pie^2}}{\frac{Lb}{h * pie^2 * \frac{Lb}{Lb}} * \frac{pie^2}{pie^3}}$$

Donde:

- $G_s$  = Flujo de aire por área transversal del relleno.

Finalmente, la altura del relleno de la torre de enfriamiento  $Z$  se determina por medio de la [Ecuación 20](#).

$$Z = NTU * HTU \quad (20)$$

El diseño de geometría del empaque o relleno suele ser complejo para que el coeficiente de transferencia de masa  $K'$  no pueda predecirse de forma analítica, ya que los fabricantes protegen dicha información bajo propiedad intelectual o derechos de autor. El coeficiente  $K'$  sólo podrá obtenerse de forma experimental y será único y diferente para cada diseño de geometría del relleno (Goshayshi, Hamid R., [2006](#)).

Una alternativa analítica y gráfica fue presentada por *Kelly, N.* y *Swenson, L.* en 1956, para determinar la altura del relleno por medio de un análisis experimental con rellenos

entramados de madera como se observa en la [Figura 16](#) (Fraas, Arthur P. & Ozisik, Necati, 1965). La capacidad de enfriamiento de cada diseño entramado puede aproximarse bajo la [Ecuación 21](#):

$$NTU = 0.07 + A * N * \left(\frac{L}{G}\right)^{-n} \quad (21)$$

Por último, para determinar la altura del relleno de la torre  $Z$  se deberá de multiplicar el número de pisos  $N$  por la distancia vertical del diseño seleccionado de la [Figura 16](#).

## 4.4. Psicometría

La psicometría es la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas de las mezclas de gas y vapor (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019). Como por ejemplo, el aire que nos rodea está compuesto por una mezcla de gases y vapor de agua en pequeños porcentajes y está involucrado en los procesos de humidificación en las torres de enfriamiento. Dichas propiedades son las siguientes y se encuentran definidas en la sección del Glosario. Las mismas pueden ser calculadas por medio de fórmulas o por medio de la carta psicométrica que se explica en la [Subsección 4.4.1](#).

- [Temperatura de bulbo seco](#): ubicada en la escala horizontal de la parte inferior.
- [Temperatura de bulbo húmedo](#): ubicada en la escala superior izquierda sobre la curva del 100 % de humedad relativa.
- [Temperatura de punto de rocío](#): ubicada en la escala superior izquierda sobre la curva del 100 % de humedad relativa, pero de forma horizontal.
- [Humedad específica](#): ubicada en la escala vertical del lado derecho.
- [Humedad relativa](#): su escala son las líneas curvas que se extienden hacia arriba y a la derecha de la carta psicométrica. La línea del 100 % de humedad relativa es la misma línea de la escala de temperaturas del bulbo húmedo y de punto de rocío.
- [Entalpía](#): ubicada en la escala de la izquierda en diagonal sobre la extensión de las líneas de temperatura de bulbo húmedo.
- [Volumen específico](#): ubicado en la escala horizontal de la parte inferior por debajo de la escala de la temperatura de bulbo seco.

### 4.4.1. Carta psicométrica

Las carta psicométricas son gráficas de las propiedades del aire mencionadas en la [Sección 4.4](#). Son útiles para calcular y visualizar de forma rápida procesos como humidificación y deshumidificación comparado con las tablas psicométricas o sus fórmulas (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019). Existen cuatro tipos distintos de cartas psicométricas de

las cuales dos son más conocidas, en este trabajo de graduación se utilizará la carta psicométrica de *Grosvenor* y la calculadora digital de ASHRAE. A continuación los cuatro tipos y la diferencia entre cada diseño es la propiedad que grafican en el eje de las abscisas y eje de las ordenadas:

- Carta de *Grosvenor*
- Carta de *Bowen*
- Carta de *Mollier*
- Carta de *Salen-Soininen*

La carta psicométrica de *Grosvenor*, grafica la temperatura en el eje horizontal contra la humedad en el eje vertical, es el diseño convencional producido por ASHRAE. La línea de saturación es una curva que inicia en la parte inferior izquierda hacia la parte superior derecha, y las curvas de humedad relativa son casi paralelas a esta (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019).

La carta psicométrica de *Bowen*, grafica la entalpía en el eje horizontal contra la humedad en el eje vertical. Son ideales para determinar de forma rápida el valor de entalpía, como en procesos de secado por convección adiabático en donde la línea de operación es constante (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019).

La carta psicométrica de *Mollier*, no es ortogonal y grafica la humedad en el eje horizontal contra la entalpía en líneas en diagonal, que inician desde la parte superior izquierda hacia la parte inferior derecha. Las líneas de temperatura constante son curvas con una pequeña pendiente respecto a la horizontal, suele abarcar un intervalo de temperatura más amplio que la carta de *Grosvenor*. Las líneas de saturación adiabática no son del todo paralelas y la pendiente de las líneas de entalía son negativas por lo que son útiles para procesos de secado (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019).

La carta psicométrica de *Salen-Soininen* es un gráfico triangular que abarca un rango de humedad más amplio que los antes mencionados, por lo que es muy utilizado para mezclas de aire que contienen alto porcentaje de humedad y cálculos cercanos al punto de ebullición (Don W., Green & Marylee Z., Southhard, 2019).

## 4.5. Principios para determinar el diámetro de la tubería

La tubería es el medio para transportar el flujo proveniente de cualquier proceso industrial hacia el dispositivo de refrigeración, en este caso a la torre de enfriamiento. Las tuberías pueden ser diseñadas de polímeros, metales o aleaciones de metales y la elección dependerá de las condiciones de diseño y del tipo de fluido a utilizar como podría ser: agua, aceites, refrigerantes, entre otros.

El fluido en dichas condiciones se fuerza a fluir por medio de bombas industriales que presurizan el fluido y le otorga velocidad, sale a resaltar el factor de fricción de la tubería que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga.

### 4.5.1. Compresibilidad de un fluido

Los fluidos se clasifican como compresibles o incompresibles dependiendo del nivel de variación de la densidad que experimentó en el trayecto de la tubería. Los líquidos son incompresibles, es decir, el volumen permanecerá inalterado y la densidad será constante («Steady flow of incompressible fluids», 2023).

### 4.5.2. Flujo estacionario o no estacionario

En un flujo estacionario, la velocidad de una partícula del fluido cambia con la posición y el tiempo («Steady flow of incompressible fluids», 2023). Es decir, el flujo estacionario implica que las propiedades del fluido pueden cambiar de partícula a partícula, pero en cualquier partícula fija siempre permanecerán constantes. Equipos como torres de enfriamiento, intercambiadores de calor, turbinas, calderas y compresores operan durante prologados períodos bajo las mismas condiciones y son catalogados como equipos de flujo estacionario, pero el flujo no estacionario se produce durante el proceso de arranque y paradas de turbomáquinas o durante vibraciones y procesos de golpe de ariete.

### 4.5.3. Flujo laminar y turbulento

En la [Figura 11](#), se observa a la izquierda el perfil de un flujo laminar en tuberías y a la derecha el perfil del flujo turbulento en tuberías.

El flujo laminar, las partículas del fluido se mueven en capas de forma paralela sin mezclarse entre sí y el perfil de velocidad es desigual. En la práctica, es poco común el flujo laminar totalmente desarrollado. («Flow in pipes and valves and fittings», 2023). El flujo turbulento, las capas individuales forman remolinos e intercambian energía. La distribución de la velocidad es constante y se caracteriza por movimientos tridimensionales impredecibles («Flow in pipes and valves and fittings», 2023).

Figura 11: Perfil del flujo laminar y del flujo turbulento



Fuente: («Flow in pipes and valves and fittings», 2023). *Izquierda, perfil laminar, flujo ordenado. Derecha, perfil turbulento, flujo desordenado.*

El flujo de fluidos de baja viscosidad, como el agua, a velocidades altas es por lo común turbulento. Los experimentos conducidos por Osborn Reynolds dieron como resultado la [Ecuación 22](#) como parámetro clave para determinar el régimen de flujo en los tubos.

En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo de una tubería es laminar si  $Re$  es menor o igual a 2,300 y turbulento si  $Re$  es mayor o igual a 4,000; el valor intermedio se le

llama flujo transicional, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} Re &\leq 2,300 - \text{flujo laminar} \\ 2,300 &\leq Re \leq 4,000 - \text{flujo transicional} \\ Re &\geq 4,000 - \text{flujo turbulento} \end{aligned}$$

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\rho * V_{prom} * D}{\mu} \quad (22)$$

#### 4.5.4. Pérdida de carga total para flujo turbulento

En el análisis de los sistemas de tuberías se observa que están compuestos por distintos accesorios con propiedades específicas, como lo es la pérdida de carga («Flow in pipes and valves and fittings», 2023). La pérdida de carga comúnmente se expresa en términos de la altura de la columna del flujo equivalente. Las pérdidas de carga total  $h_{L,Total}$  equivale a la suma de la pérdida de carga mayor  $h_{L,mayor}$  con la pérdida de carga menor  $h_{L,menor}$  a la que se somete el fluido al circular por las tuberías.

#### Pérdida de carga mayor para flujo turbulento

La Ecuación 23 es utilizada para determinar la pérdida de carga mayor y es dependiente del factor de fricción  $f$  para flujos en tuberías de régimen turbulento.

$$h_{L,mayor} = f * \frac{L}{D} * \frac{V_{prom}^2}{2 * g} \quad (23)$$

El factor de fricción  $f$  puede terminarse de forma gráfica por medio del diagrama de *Moody* en función de  $Re$  y la rugosidad relativa  $\frac{\epsilon}{D}$  o de forma analítica para flujo turbulento por medio de la Ecuación 24 y el valor de  $\epsilon$  por medio de la Tabla 18.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 * \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (24)$$

#### Pérdida de carga menor para flujo turbulento

La pérdida de carga menor  $h_{L,menor}$  que se crea en tuberías de flujo turbulento son probocadas por accesorios que interrumpen el flujo y provocan pérdidas adicionales. Son ejemplos de accesorios: válvulas, codos, ramificaciones, entradas, salidas, ensanchamientos, contracciones, entre otros («Flow in pipes and valves and fittings», 2023). Por medio de la Ecuación 25 se podrá determinar la pérdida menor de una tubería en términos del coeficiente de pérdida  $K_L$  de accesorios de tubería para flujo turbulento.

$$h_{L,menor} = K_L * \frac{V_{prom}^2}{2 * g} \quad (25)$$

#### 4.5.5. Método para comprobar el diámetro de la tubería

Con el objetivo de comprobar los cálculos realizados con las ecuaciones anteriores y así obtener otro valor para determinar el porcentaje de error, *Swamee* y *Jain* determinaron la [Ecuación 26](#) que es precisa hasta el 2% del Diagrama de *Moody*.

$$D = 0.66 \left[ \varepsilon^{1.25} * \left( \frac{L * \dot{V}^2}{g * h_L} \right)^{4.75} + \nu * \dot{V}^{9.4} * \left( \frac{L}{g * h_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad (26)$$

$$10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$$

$$5,000 < Re < 3x10^8$$

### 4.6. Principios para determinar el tipo y capacidad de bombeo

Conceptos como la altura de aspiración y la altura de impulsión son utilizados en el análisis para la selección de bombas hidráulicas, por ejemplo: la altura de aspiración, es la presión neta en el área de succión de la bomba equivalente a la presión existente sobre el líquido más las pérdidas de carga por rozamiento en la tubería; lo mismo sucede con la altura de impulsión, pero en el área de descarga de la bomba.

#### 4.6.1. Bombas centrífugas

Se diseñan para trasladar fluidos de baja viscosidad de un punto a otro por medio de la transformación de energía mecánica de un motor a energía cinética. Son reconocidas por su carcasa en forma de caracol llamada voluta, son muy utilizadas en las industrias por su eficiencia, economía, fácil mantenimiento y por su versatilidad («What is a centrifugal pump?», [2023](#)).

#### 4.6.2. Bombas de desplazamiento positivo

Se diseñan para desplazar el fluido en porciones pequeñas («Positive displacement pumps», [2022](#)). El mecanismo que desplaza al volumen de control pueden ser pistones, álabes, diafragma. Son bombas ideales cuando se trabaja con fluidos viscosos y donde sea necesario controlar el volumen desplazado como por ejemplo: en industria automotriz para bombear aceite, en industria farmacéutica para bombeo de jarabes y en la industria de alimentos para bombear chocolate.

### 4.6.3. Altura neta positiva de aspiración

*Net Positive Suction Head* conocido por sus iniciales *NPSH* trata sobre la diferencia de presión del fluido en el eje impulsor y la presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo («Qué es y cómo se calcula el NPSH disponible de una bomba centrífuga», 2017) y se determina por medio de la Ecuación 27. En la práctica se elige una bomba con un *NPSH* menor al calculado para que el cambio de presión no produzca burbujas que fomenten cavitación. El colapso de dichas burbujas provocan ruido, vibración, reducen la eficiencia y provocan daños en los álabes.

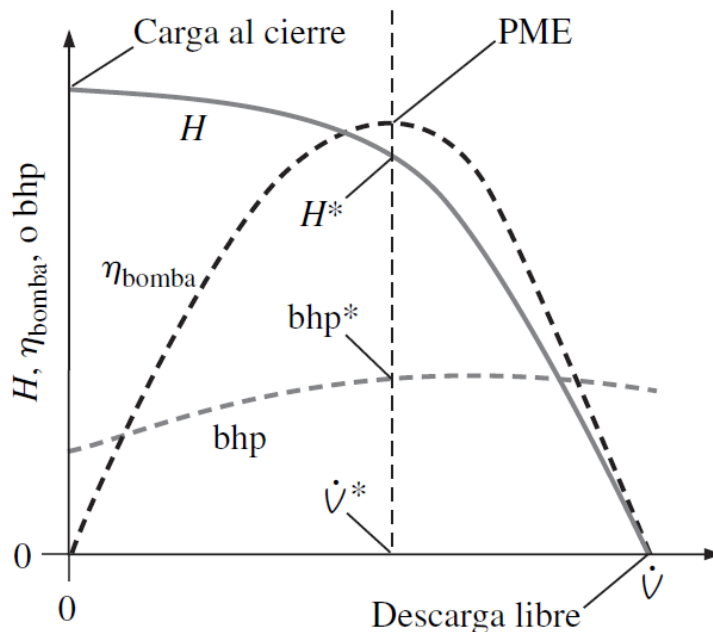
$$NPSH = \left( \frac{P}{\rho * g} + \frac{V^2}{2 * g} \right)_{entrada,bomba} - \frac{P_v}{\rho * g} \quad (27)$$

### 4.6.4. Curva característica de bomba

La curva característica de una bomba es un gráfico generado por fabricantes que representa la capacidad de la bomba para generar flujo del fluido en función del caudal y la pérdida de carga total.

En la Figura 12 se representan tres curvas distintas llamadas curvas de rendimiento, las cuales son representativas del funcionamiento de la bomba.

Figura 12: Curvas de rendimiento de una bomba centrífuga



Fuente: (Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M., 2006). *Curva característica dependiente del caudal y la pérdida de carga total del sistema*



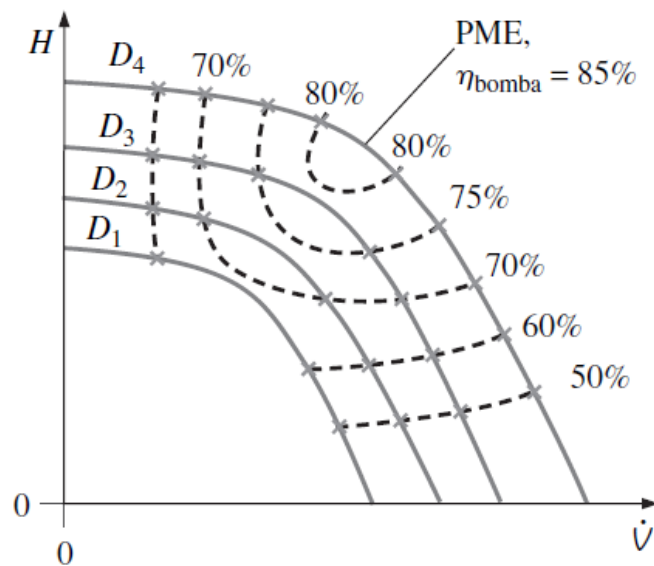
La curva de rendimiento continua, representa la curva característica de funcionamiento en función de la pérdida de carga total (eje vertical) y el flujo volumétrico (eje horizontal). La curva de rendimiento punteada color negro, representa la curva Punto de la Mejor Eficiencia (PME por sus siglas) en función del porcentaje de eficiencia (eje vertical) y el flujo volumétrico (eje horizontal). Por último, la curva de rendimiento punteada color gris, representa la potencia de freno en función del flujo volumétrico (eje horizontal) y la potencia en el eje vertical.

En la curva característica, se observa que el máximo flujo volumétrico se da cuando la pérdida de carga es cero o cuando no existe pérdida de carga. A ese punto punto se le llama descarga libre. También se observa que en ese punto la eficiencia de la bomba es cero ya que no está generando un trabajo útil. En el otro extremo de la curva, se tiene al punto de carga al cierre, que se da cuando la descarga de la bomba se encuentra bloqueada, es decir, no existe flujo volumétrico y la pérdida de carga del sistema es máxima. La eficiencia de la bomba también es cero, ya que la bomba no realiza un trabajo útil.

La curva Punto de la Mejor Eficiencia, representa el valor máximo de eficiencia que puede entregar la bomba. Y la curva de la potencia de freno, es la potencia entregada al eje de la bomba. Los valores máximos de operación se representan por medio del simbolo: \*.

Otra forma gráfica de identificar la eficiencia de las bombas centrífugas es por medio de la **Figura 13** en donde los fabricantes combinan las curvas de rendimiento de la misma familia con distintos diámetros de rotor. En esta figura se puede observar que los fabricantes trazan curvas punteadas que pasan por todos los puntos que tiene el mismo valor de eficiencia para diferentes diámetros de rotor.

Figura 13: Curvas características de la misma familia de bombas con diámetros distintos de rotor



Fuente: (Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M., 2006).

## 4.7. Mantenimiento a torres de enfriamiento

El mantenimiento industrial se define como el conjunto de procedimientos realizados a fin de conservar en óptimas condiciones de servicio los activos (equipos, maquinaria e instalaciones) de una planta garantizando el correcto funcionamiento del proceso de producción industrial (IntegraMarkets, 2018).

Uno de los principales objetivos del departamento no consiste, como normalmente se cree, en reparar de forma urgente las fallas que surgen. Sino que consiste en implementar indicadores de gestión, que reflejarán la situación actual y la evolución que experimentará con la toma de decisiones. Indicadores de gestión como: disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad brindarán información numérica útil para conocer el estado actual del departamento.

### 4.7.1. Tipos de mantenimiento industrial

#### Mantenimiento correctivo

Es el tipo de mantenimiento en el que las fallas se solucionan en el momento de su reporte, con el único objetivo de retornar el activo a su servicio de trabajo en el menor tiempo posible (Mobley, R. Keith et al., 2008). También se le conoce como el tipo de mantenimiento más primitivo en el que el activo determina los paros de producción ya que, el departamento de mantenimiento desconoce el momento en el que el activo fallará.

Factores como: la planeación deficiente y el mantenimiento incompleto lo clasifican como el mantenimiento de mayor costo, esto se debe a que todas las reparaciones se realizan fuera del programa de actividades, no se cuenta con material de trabajo, no se tiene el repuesto en stock y el tiempo disponible para rehabilitar el activo es el mínimo; es decir, la mano de obra, los materiales y los repuestos son adquiridos sin importar el precio con tal de habilitar el activo, para que trabaje a su mínima capacidad de desempeño y cumplir con el programa de producción. Una práctica correcta es habilitar el activo para que cumpla con su función y posteriormente programar su reparación en el próximo mantenimiento preventivo.

#### Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es el dedicado a preservar los activos de la planta de producción en las mejores condiciones de operación y evitar la ocurrencia de fallas (Mobley, R. Keith et al., 2008). Este mantenimiento se basa en un plan en que se detallan actividades previamente establecidas con el fin de anticiparse a los paros no programados. El éxito del programa radica en el constante análisis, reingeniería y estricto seguimiento de sus actividades, que tendrá una enorme repercusión en el ahorro energético y en la vida útil de los equipos.

El mantenimiento planificado conlleva coordinar al personal técnico capacitado, materiales y repuestos, pero principalmente se debe acordar el tiempo que conllevará realizar las reparaciones con el departamento de producción. Las tareas periódicas o de rutina, como la

lubricación, ajuste y limpieza, no se considera como mantenimiento preventivo, pero ayudan a mantener la operación del activo y se aprovecha para realizar la inspección rutinaria.

### Mantenimiento predictivo

Es considerado el mantenimiento planificado con una inversión considerable en tecnología que permite conocer el estado interno del funcionamiento de los activos, mediante equipo de medición no destructiva (Mobley, R. Keith et al., 2008). Análisis de: vibración, termográfica, lubricantes y ultrasonido, son algunas técnicas comunes utilizadas para detectar fallas potencialmente imprevistas, que en algún momento puedan detener la producción. El equipo utilizado es sofisticado y por ello es recomendable usarlo sólo para activos de alto costo o que formen parte de un proceso vital sin mayor acceso.

La ventaja del mantenimiento predictivo es que se cuenta con un registro de la curva característica de la técnica analizada con la cual se evalúa el desempeño para programar reparaciones en la próxima parada programada, de ser necesario.

La principal diferencia entre el mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo, es que el primero se ejecuta después de haberse reportado la falla en el activo, el segundo se ejecuta antes, con el objetivo de prevenir que ocurra la falla y el último se predice la falla en base a datos estadísticos (Mobley, R. Keith et al., 2008). En la Tabla 2 se mencionan las principales diferencias entre el mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo.

Tabla 2: Características entre mantenimientos

Característica	Mantto correctivo	Mantto preventivo	Mantto predictivo
Tiempo muerto	Alto	Nulo	Nulo
Costo reparación	Alto (no planificado)	Bajo	Alto (equipo especializado)
Planificación	No	Sí	Sí
Calidad de reparación	Bajo	Alto	Alto
Solución de falla	Se busca reactivar el activo	Sí	Sí

Fuente: propia.

## 4.8. Implementación plan básico de mantenimiento preventivo

Con el objetivo de conservar, alargar la vida útil de los componentes y llevar un control de las revisiones periódicas de la torre de enfriamiento, se propuso un plan de mantenimiento preventivo que deberá ser ejecutado por el personal técnico capacitado. Los técnicos designados, deberán estar familiarizados con los componentes y diseño de operación, además de seguir de forma estricta con los procedimientos establecidos en el manual del fabricante.

Se debe prestar atención a los procedimientos de mantenimiento y al uso de las herramientas adecuadas para la manipulación, elevación, instalación, operación y reparación de los

activos de la torre para evitar lesiones en el personal técnico. En consecuencia, es obligación tanto del departamento de mantenimiento, como del departamento de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional (SISO), el implementar normas y procedimientos de seguridad tanto para el personal técnico como para los equipos.

El objetivo de la implementación del plan básico de mantenimiento preventivo, está diseñado para que el lector se familiarice con las operaciones de mantenimiento sanitario referidas a la limpieza y desinfección, para evitar o minimizar crecimiento de algas y bacterias, además de las actividades del registro de mantenimiento como: revisión, lubricación, reparaciones mecánicas y control de parámetros (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007).

#### 4.8.1. Primer arranque

Antes de iniciar el primer arranque o después de haber estado fuera de servicio durante un período muy prolongado, se deberá realizar inspecciones, limpieza y mediciones de los componentes más importantes (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007), por ejemplo:

- Limpiar y eliminar todo objeto que obstruya la entrada de aire en la estructura, ventilador y motor eléctrico.
- Asegurarse que el ventilador gire libremente en la dirección correspondiente.
- Drenar y lavar el depósito de agua fría con el objetivo de eliminar lodos y crecimiento de bacterias. En caso ser el primer arranque, asegurarse que no existan objetos que puedan ser succionados hacia la tubería.
- La secuencia de arranque deberá organizarse de forma que las bombas de recirculación arranquen antes que el ventilador helicoidal. La desconexión para el paro programado deberá ser en orden inverso.
- Realizar una revisión completa de la unidad por ruidos o vibraciones anormales.

#### 4.8.2. Estructura externa e interna

Las estructuras de la torre de enfriamiento principalmente son armadas de fibra de vidrio, polímeros o de metal, se deberá prestar atención de que los productos químicos utilizados para el tratamiento del agua no provoquen oxidación o desprendimiento de pintura (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007). Se deberá:

- Identificar y coordinar la reparación de daños o deterioros por esfuerzos mecánicos o golpes.
- Promover el cuidado de la capa de recubrimiento.

### 4.8.3. Persianas para el flujo de aire

Las persianas para el ingreso y egreso del flujo de aire contienen una protección de malla metálica diseñada para retener todo objeto que el aire arrastre con el fin de evitar contaminación y daños a los componentes internos (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007). Se deberá:

- Revisar antes de cada turno por obstrucciones.
- Retirar cualquier desecho que obstruya el flujo de aire.

### 4.8.4. Eliminadores de rocío

Las operaciones básicas de mantenimiento incluyen inspección por crecimiento de alga y limpieza con agua a presión, ambas se pueden realizar sin necesidad de acceder al área de instalación. En caso se requiera cambiar uno o varios eliminadores, se deberá acceder desde la parte superior de la torre o por medio de la ventanilla de acceso.

### 4.8.5. Aspersores de agua

Antes del primer arranque o después de un largo período sin operación, se deberán inspeccionar para detectar posibles obstrucciones, flujos desiguales o falta de flujo de agua. Para extraerlas, se deberá acceder desde la parte superior de la torre desmontando previamente los eliminadores de rocío o por medio de la ventanilla de acceso (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007). Para comprobar el funcionamiento se deberá apagar el ventilador y continuar con el funcionamiento de la bomba para que el flujo de aire no interfiera con el flujo de agua.

### 4.8.6. Relleno

Clasificado como uno de los componentes principales de la torre para efectuar la liberación de calor. Este componente está formado por una serie de láminas de polímero o de metal y se deberá (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007):

- Inspeccionar por láminas desgastadas, fracturadas o deformadas.
- Asegurar una distancia equidistante entre láminas para asegurar la misma relación entre aire y agua.
- Planificar el desmontaje para limpieza y eliminar acumulaciones de sedimentos, hojarasca, insectos o cualquier otro contaminante.
- Planificar el desmontaje para reparación de láminas o cambio por nuevas.

#### 4.8.7. Depósito de agua fría

Con la limpieza se eliminará cualquier acumulación de sólidos, crecimiento de bacteria y se identificará puntos de corrosión o fuga. La válvula del flotador deberá calibrarse entre 5 y 10 centímetros por debajo del nivel máximo (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007). El mantenimiento preventivo al depósito de agua fría debe incluir:

- Limpieza y desinfección del depósito.
- Limpieza del filtro de agua.
- Calibración de la válvula flotador.
- Inspección por áreas de óxido y/o grietas.

#### 4.8.8. Motor eléctrico

- Medición de voltaje y amperaje. Esta se logra desarmando la tapa de bornes y por medio del multímetro se toman los valores.
- Revisar la correcta sujeción a su base.
- Detectar ruidos y/o vibraciones anormales.

En lo que corresponde a un mantenimiento más específico, se deberá consultar el manual del propietario para programar tareas como:

- Desarmado de la unidad.
- Revisión del estado del aislamiento.
- Medir continuidad del bobinado.
- Revisión del estado del bobinado, estador y rotor.

#### 4.8.9. Ventilador

En las torres de enfriamiento de tiro inducido, los ventiladores se instalan a la salida del aire cálido y húmedo que provoca condensación del vapor de agua en su interior por lo cual, se deberá revisar el estado del material del aislamiento y la conexión a tierra para evitar paros no programados (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007).

- Revisión y limpieza del rodete. Es posible realizar la limpieza con agua a presión para evitar desarmar la parte superior.
- Revisar y retirar cualquier objeto que impida el movimiento libre del conjunto de álabes.

- Asegurar la correcta sujeción del conjunto a la estructura de la torre para evitar vibración.

Dentro del mantenimiento específico, se deberá consultar el manual de propietario para planificar tareas como, por ejemplo:

- Desarmado de la unidad.
- Limpieza del interior.
- Lubricar o cambio de cojinetes.
- Revisión y lubricación de chaveta que sujetan los álabes al motor.

#### **4.8.10. Bomba de agua**

Considerar las siguientes tareas dentro de su programa básico de mantenimiento preventivo:

- Detección por corrosión exterior.
- Ruidos y vibraciones anormales.
- Examinar bridas por posibles fugas.

En lo que respecta a un análisis profundo, se deberá consultar el manual de propietario y considerar las siguientes actividades:

- Desarmado de la unidad.
- Verificar si existe desgaste interno.
- Restaurar o reparar piezas como el eje, impulsor y álabes.
- Cambio de sellos y/o empaques.
- Revisión de corrosión interna.
- Verificar si los álabes sufren de cavitación.

#### **4.8.11. Fugas de agua**

Dentro del programa de mantenimiento se debe crear una rutina que incluya la observación de fugas, goteos o agua acumulada que puedan darse en uniones de tubería, en la bomba de agua o por defectos en los aspersores de agua. Tales pérdidas de agua, además de los químicos disueltos, pueden facilitar el crecimiento de algas y mohos que provocarán corrosión en el entorno del equipo (Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2007).

## 4.9. Tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento

Los equipos de enfriamiento continuo, tales como las torres de enfriamiento, deben seguir un estricto protocolo de mantenimiento que reduzca la contaminación bacteriológica, la corrosión, número de incrustaciones, los sólidos en suspensión, entre otros. Esto se logra realizando rutinas: de inspección, de limpieza y cumpliendo el programa de tratamiento de agua con la aplicación de biocida y desincrustante.

Factores como la alta temperatura y velocidad de circulación de agua son idóneos para acelerar el proceso de corrosión, incluso un leve aumento del pH acelera el proceso, como se verá a continuación.

Los desincrustantes, por otro lado, son productos químicos utilizados para evitar o eliminar el depósito de sales que se forman en las paredes de las tuberías como consecuencia de la evaporación del agua. Las incrustaciones tienen efectos perjudiciales como el descenso del coeficiente de transferencia de calor, disminución de la sección interna de la tubería, deformación y rotura en las tuberías por falta de refrigeración.

### 4.9.1. Control de la calidad del agua

Mediante el análisis de laboratorio se podrá determinar la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua en condiciones normales de operación para posteriormente ejecutar el programa de mantenimiento preventivo. Se busca tener bajo control el crecimiento microbiano para evitar efectos adversos en el sistema de enfriamiento. Como procedimiento general, todos los productos químicos empleados para los distintos puntos de análisis deben aplicarse en el depósito de agua fría o en la tubería de succión y de forma automatizada.

Los siguientes puntos deberán ser considerados en torres de enfriamiento, se expondrá la naturaleza del problema, los efectos y la forma de prevenirlos. En la [Tabla 4](#) se detallan tratamientos físicos y químicos de ciertos contaminantes.

### Control de incrustaciones

Se manifiestan por la formación de cristales insolubles en las superficies de las instalaciones. Estos cristales suelen ser carbonatos de calcio e hidróxidos de magnesio, ocasionalmente también incluyen productos de corrosión como óxidos e hidróxidos de hierro (Gratacós, Jordi M. et al., [s.f.](#)).

Para determinar qué tipo de medidas de antiincrustación implementar y saber el número de ciclos de concentración del sistema con el objetivo de optimizar el funcionamiento de la torre, es necesario conocer:

- La calidad del agua de aporte al sistema (Dureza, conductividad, pH, alcalinidad, entre otros).
- Factores fisicoquímicos (Iones de bicarbonato y temperatura).



El tratamiento de antiincrustación puede ser externo, para evitar aumento de iones de calcio o magnesio al sistema, o interno, para evitar la precipitación de las sales en las superficies interiores. Los tratamientos externos se utilizan para aguas duras con la instalación de un sistema de descalcificación (conjunto de resinas que intercambian iones de calcio o magnesio por iones de sodio). Los tratamientos internos utilizan aditivos químicos (Fosfonatos, fosfatos o poliacrilatos), combinados con la regulación del pH, que interfieren el proceso de formación de cristales (Gratacós, Jordi M. et al., [s.f.](#)).

### **Control de crecimiento de alga**

La incidencia de luz solar que atraviesa las persianas para ingreso del aire, los separadores de gotas simples y las mallas de inspección en la estructura, facilitan la producción de fotosíntesis, y por tanto el crecimiento de algas verdes en zonas difíciles de acceder (Gratacós, Jordi M. et al., [s.f.](#)).

Las algas, al igual que los protozoos, en general, protegen el crecimiento de Legionella frente a la acción de los productos biocidas en el agua, por lo que es recomendable su ausencia. Esto se consigue mediante la minimización de incidencia solar y la limpieza periódica de las superficies interiores. Incluso, existen biocidas químicos con efecto alguicida que se agregan en dosis en conjunto con el plan del tratamiento del agua.

### **Control de crecimiento de microorganismos**

En sistemas de enfriamiento se tiende a formar una biocapa por el tipo de material, temperatura e incidencia de luz solar. La biocapa está formada por sustancias orgánicas segregadas por las propias bacterias y por microorganismos como mecanismo de defensa, cuando las condiciones de supervivencia no son adecuadas para el desarrollo microbiano (Gratacós, Jordi M. et al., [s.f.](#)). Se emplean diversos tipos de tratamiento físicos, químicos y fisicoquímicos para controlar el crecimiento de microorganismos, bacterias aerobias y Legionella. Por ejemplo, se utilizan detergentes o biodispersantes que destruyen o evitan el desarrollo de las bacterias en el agua.

### **Control de corrosión**

En torres de enfriamiento, la corrosión se produce debido a la disolución del metal por el efecto de formación de pila electrolítica. Una parte de la superficie metálica actúa como cátodo, cediendo electrones al agua que los usa para generar grupos de oxidrilo y la parte que sufre desgaste actúa como ánodo, en la que el metal se transfiere al agua en forma de ion (Gratacós, Jordi M. et al., [s.f.](#)). Para evitar este fenómeno, frecuentemente se dosifican productos que crean una película protectora sobre las superficies metálicas como, por ejemplo, poliaminas, fosfatos de zinc, silicatos, molibdatos, entre otros.

## Control de sólidos disueltos en el agua

La evaporación constante del agua de circulación aumenta la concentración de iones presentes en el agua, dichos iones provienen directamente del agua de aporte al que se le incorpora una fracción soluble de las partículas que el agua absorbe del aire durante el proceso de pulverización y el tratamiento químico (Adición de biocidas, alguicidas, antiincrustantes, desincrustantes, entre otros). Estos procesos dan lugar al aumento de la salinidad que favorece al aumento de concentraciones, corrosión y al número de iones disueltos que incrementa el nivel de conductividad en el agua (Gratacós, Jordi M. et al., s.f.).

## Control de sólidos en suspensión

La pulverización del agua sobre una corriente de aire ascendente provoca la constante contaminación de esta con las partículas del ambiente exterior. El número de partículas en suspensión se determinan mediante el análisis de turbidez del agua. La turbidez del agua se mide en Unidades Nefelométricas de Formacina (UNF, también se usan las siglas en inglés NTU) (Gratacós, Jordi M. et al., s.f.).

Es importante mantener el agua libre de partículas, ya que entre estas existen partículas de origen vegetal y animal que serán potenciales nutrientes para las bacterias. Estas, más los productos anticorrosión y antiincrustantes, forman materia que tiende a depositarse en los puntos de disminución de velocidad de circulación de agua. Para contrarrestar este fenómeno se deben instalar filtros de partículas en suspensión en las persianas de ingreso de aire y filtros tipo Yee o tipo ciclón en distintas partes de la tubería de agua para extraer la materia sólida.

### 4.9.2. Parámetros ideales del agua de circulación

Los parámetros de las propiedades del agua de circulación ideales para el proceso de enfriamiento deberán situarse dentro: pH entre 6.5 y 9.0, el contenido de cloruro de sodio NaCl (dureza) deberá ser inferior a 500 mg/l, el contenido de sulfato (SO<sub>4</sub>) deberá ser inferior a 250 mg/l y su alcalinidad total deberá ser inferior a 500 mg/L, al igual que el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Los productos químicos no deberán contaminar el agua con sustancias extrañas y se deberá contar con un tratamiento de agua adecuado para minimizar los puntos que se aclararon en el Control de la calidad del agua.

Durante el primer arranque, las condiciones del agua son esenciales para evitar la corrosión prematura del equipo por ello, se deberá implementar un control en los primeros dos meses de funcionamiento. Si se utilizara cloro, se deberá mezclar con agua residual y utilizarse por periodos cortos e intermitentemente en cantidades que no superen 2 mg/l.

La combinación de productos químicos para controlar el sarro, la corrosión y el crecimiento de bacteria deberán ser utilizados por expertos; la combinación de estos productos puede provocar reacciones que contribuyan a la corrosión y reduzcan la eficiencia del tratamiento.

Tabla 3: Parámetros del control de calidad del agua de enfriamiento para torres de refrigeración

<b>Parámetro</b>	<b>Método / Instrumento de análisis</b>	<b>Periodicidad</b>	<b>Toma de muestra</b>
<b>Nivel de cloro</b> o <b>Nivel de biocida</b>	Según principio activo de la sustancia	Diario	Punto más alejado del agua de suministro
<b>pH</b>	Medidor de pH de lectura directa o colorimétrico	Mensual	Mismo punto utilizado para el parámetro del biocida
<b>Conductividad</b>	Sonda electroquímica de lectura directa	Mensual	Depósito de agua fría de la torre
<b>Turbidez</b>	Turbidímetro	Mensual	Depósito de agua fría de la torre
<b>Hierro total</b>	Espectrofotométrico o colorimétrico	Mensual	Depósito de agua fría de la torre
<b>Crecimiento de microorganismos</b>	Recuento de colonias por medio de cultivo	Mensual	Una muestra en el depósito de agua fría de la torre y otra en la tubería de retorno de agua
<b>Legionella sp</b>	Por medio de cultivo	Trimestral	Una muestra en el depósito de agua fría de la torre y otra en la tubería de retorno de agua

Fuente: (Gratacós, Jordi M. et al., s.f.)

Tabla 4: Tratamiento físico y químico del agua de circulación en un sistema con torre de enfriamiento

<b>Contaminante</b>	<b>Causa</b>	<b>Tratamiento</b>
<b>Color</b>	Formación de espuma y disminuye la visibilidad	Coagulación y filtrado
<b>Crecimiento de alga</b>	Formación de biocapas que impide la acción de los biocidas	Cloración
<b>Sólidos en suspensión</b>	Formación de capas en la superficie	Coagulación, filtración y asentamiento
<b>Sólidos disueltos</b>	Formación de espuma	Destilación, suavización y desmineralización
<b>Dureza</b>	Costras en las superficies internas de tubos	Suavización y destilación
<b>Ácidos minerales</b>	Corrosión en las superficies internas de tubos	Neutralizar con sustancia alcalina

Fuente: (Gratacós, Jordi M. et al., s.f.)

Para programar el plan de mantenimiento químico del agua de refrigeración se utilizará la [Tabla 3](#) y la [Tabla 4](#). Todas las determinaciones deben llevarse a cabo por personal experto y con instrumentos sujetos al control de calidad, con calibraciones adecuadas.

En la [Tabla 3](#), se especifican los parámetros básicos utilizados en cualquier análisis de laboratorio para conocer la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua. También se especifica el método o instrumento de análisis y la periodicidad de la toma de muestras.

En la [Tabla 4](#) se detalla la causa y el tratamiento físico o químico a tratar cuando se presentan una serie de contaminantes que afectan la calidad del agua de circulación.

## 4.10. Nomenclatura

$A$  y  $n$  = Constantes para cada diseño de entramado de madera tabuladas en la [Tabla 14](#).

$a$  = Área de la interfase por unidad de volumen,  $\left[\frac{pie^2}{pie^3}\right]$

$C_p''$  = Calor específico del vapor en la interfase,  $\left[\frac{BTU}{Lb*F}\right]$

$C_{pa}$  = Calor específico del aire seco a presión constante,  $\left[\frac{BTU}{Lb*F}\right]$

$C_{pw}$  = Calor específico del aire húmedo,  $\left[\frac{BTU}{Lb*F}\right]$

$C_{pw}$  = Calor específico del agua,  $\left[\frac{BTU}{Lb*F}\right]$

$D$  = Diámetro de la tubería,  $[pie]$

$I_{electrica}$  = Corriente eléctrica,  $[Amp]$

$dm$  = Difusión de vapor de agua,  $\left[\frac{Lb}{h}\right]$

$dq_L$  = Transferencia del calor latente de la interfase hacia el flujo de aire,  $\left[\frac{BTU}{h}\right]$

$dq_s$  = Transferencia de calor sensible,  $\left[\frac{BTU}{h}\right]$

$dq_W$  = Transferencia total de calor,  $\left[\frac{BTU}{h}\right]$

$dV$  = Volumen de enfriamiento,  $[pie^3]$

$f$  = Factor de fricción,  $[adimensional]$

$G$  = Flujo de aire,  $\left[\frac{Lb}{h}\right]$

$g$  = Gravedad,  $\left[\frac{pie}{s^2}\right]$

$h'$  = Entalpía a la temperatura del agua,  $\left[\frac{BTU}{LB_{aire}}\right]$

$h''$  = Entalpía de la interfase,  $\left[\frac{BTU}{LB_{aire}}\right]$

$$h_a = \text{Entalpía del aire, } \left[ \frac{BTU}{LB_{\text{aireseco}}} \right]$$

$$h_{L,mayor} = \text{Pérdida de carga mayor, } [Pies]$$

$$h_{L,menor} = \text{Pérdida de carga menor, } [Pies]$$

$$h_{L,total} = \text{Pérdida de carga total, } [Pies]$$

$$HTU = \text{Altura de las unidades de transferencia, } [Pies]$$

$$K' = \text{Unidad de conductancia de la transferencia de masa de la interfase hacia el flujo de aire, } \left[ \frac{Lb}{h * \pi e^2 * \frac{Lb}{Lb}} \right]$$

$$K_G = \text{Unidad de conductancia del calor sensible transferido de la interfase hacia el flujo de aire, } \left[ \frac{BTU}{h * \pi e^2 * F} \right]$$

$$K_L = \text{Unidad de conductancia del calor transferido del agua a la interfase, } \left[ \frac{BTU}{h * \pi e^2 * F} \right]$$

$$K_{L,Tuberia} = \text{Coeficiente de pérdida menor, } [adimensional]$$

$$L = \text{Flujo de agua, } \left[ \frac{Lb}{h} \right]$$

$$L_{Tuberia} = \text{Longitud de la tubería de agua, } [Pies]$$

$$N = \text{Número de pisos de entramado de madera, } [adimensional]$$

$$NPSH = \text{Altura neta positiva de aspiración. } [Pies]$$

$$NTU = \text{Número de unidades de transferencia, } [adimensional]$$

$$P = \text{Presión atmosférica o a la altura que se encuentre el lugar, } [psi]$$

$$P_1 = \text{Presión en el punto de análisis 1, } \left[ \frac{Lbf}{\pi e^2} \right]$$

$$P_2 = \text{Presión en el punto de análisis 2, } \left[ \frac{Lbf}{\pi e^2} \right]$$

$$P_{electrico} = \text{Potencia eléctrica, } [W]$$

$$r = \text{Calor latente de evaporización, } \left[ \frac{BTU}{Lb} \right]$$

$$Re = \text{Número de Reynolds, } [adimensional]$$

$$t' = \text{Temperatura del agua, } [^{\circ}F]$$

$$t'' = \text{Temperatura de la interfase, } [^{\circ}F]$$

$$t_0'' = \text{Temperatura de referencia para el vapor de agua, } [^{\circ}F]$$

$$t_a = \text{Temperatura de bulbo seco del aire, } [^{\circ}F]$$

$$t_{a0} = \text{Temperatura de referencia para el aire, } [^{\circ}F]$$

$t_{1,nueva}$  = Temperatura del agua de entrada para la torre de enfriamiento nueva, [ $^{\circ}F$ ]  
 $t_{2,nueva}$  = Temperatura del agua de salida para la torre de enfriamiento nueva, [ $^{\circ}F$ ]  
 $t_{1,antigua}$  = Temperatura del agua de entrada para la torre de enfriamiento antigua, [ $^{\circ}F$ ]  
 $t_{2,antigua}$  = Temperatura del agua de salida para la torre de enfriamiento antigua, [ $^{\circ}F$ ]  
 $\dot{V}$  = Flujo volumétrico, [ $\frac{Pie^3}{s}$ ]  
 $V_{electrico}$  = Voltaje eléctrico, [V]  
 $V_{prom}$  = Velocidad promedio del flujo, [ $\frac{Pie}{s}$ ]  
 $V_1$  = Velocidad del fluido en el punto de análisis 1, [ $\frac{Pie}{s}$ ]  
 $V_2$  = Velocidad del fluido en el punto de análisis 2, [ $\frac{Pie}{s}$ ]  
 $W'$  = Humedad específica a la temperatura del agua, [ $\frac{BTU}{LB_{aire}}$ ]  
 $W''$  = Humedad específica de la interfase, [ $\frac{BTU}{LB_{aireseco}}$ ]  
 $\dot{W}_{potencia,util}$  = Potencia de bombeo útil, [HP]  
 $W_a$  = Humedad específica del aire, [ $\frac{BTU}{LB_{aireseco}}$ ]  
 $Z$  = Altura del relleno de la torre de enfriamiento, [Pies]  
 $Z_1$  = Altura de la tubería en el punto de análisis 1. [Pies]  
 $Z_2$  = Altura de la tubería en el punto de análisis 2. [Pies]

### Letras griegas

$\alpha$  = Factor de corrección de energía cinética para flujos turbulentos, [1]  
 $\mu$  = Viscosidad dinámica del agua, [ $\frac{Lbm}{Pie*s}$ ]  
 $\nu$  = Viscosidad cinemática del agua, [ $\frac{Pie^2}{s}$ ]  
 $\rho$  = Densidad del agua, [ $\frac{Lbm}{Pie^3}$ ]  
 $\varepsilon$  = Rugosidad de tuberías, [adimensional]  
 $\vartheta$  = Factor de potencia, [grados]

## 5.1. Definición de requisitos de diseño

La planta de producción de soplado de botellas *PET* requiere que se consideren los puntos de la [Tabla 5](#):

Tabla 5: Requisitos de diseño para la instalación y funcionamiento de la torre de enfriamiento

Código	Requisitos
RD1	La torre de enfriamiento debe absorber el calor generado por el compresor de 40 BAR.
RD2	Las incrustaciones de sarro deben ser eliminadas del sistema de enfriamiento.
RD3	El sistema de tubería debe contar con válvulas filtro para retener los sólidos que circulen en el flujo y un sistema de limpieza purga que no detenga la operación.
RD4	La instalación debe contar con únicamente una bomba centrífuga que recircule el agua de enfriamiento.
RD5	La torre de enfriamiento debe incorporar el ventilador dentro de su estructura para respetar el área disponible.
RD6	La torre de enfriamiento debe medir hasta 1.75 metros de longitud y menos de 1.75 metros de ancho.
RD7	Crear un programa de mantenimiento preventivo de acuerdo a las especificaciones y recomendaciones del fabricante.
RD8	Elaborar el procedimiento para la toma de mediciones de las propiedades químicas del agua.
RD9	Realizar un formato de inspección diaria para evitar obstrucciones en el área de ingreso de aire de la torre de enfriamiento, así como limpieza del área de instalación.
RD10	Generar planos del diseño de la instalación de la torre de enfriamiento y sus accesorios de acuerdo a la norma ASME Y 14.5M-2009.

Fuente propia.

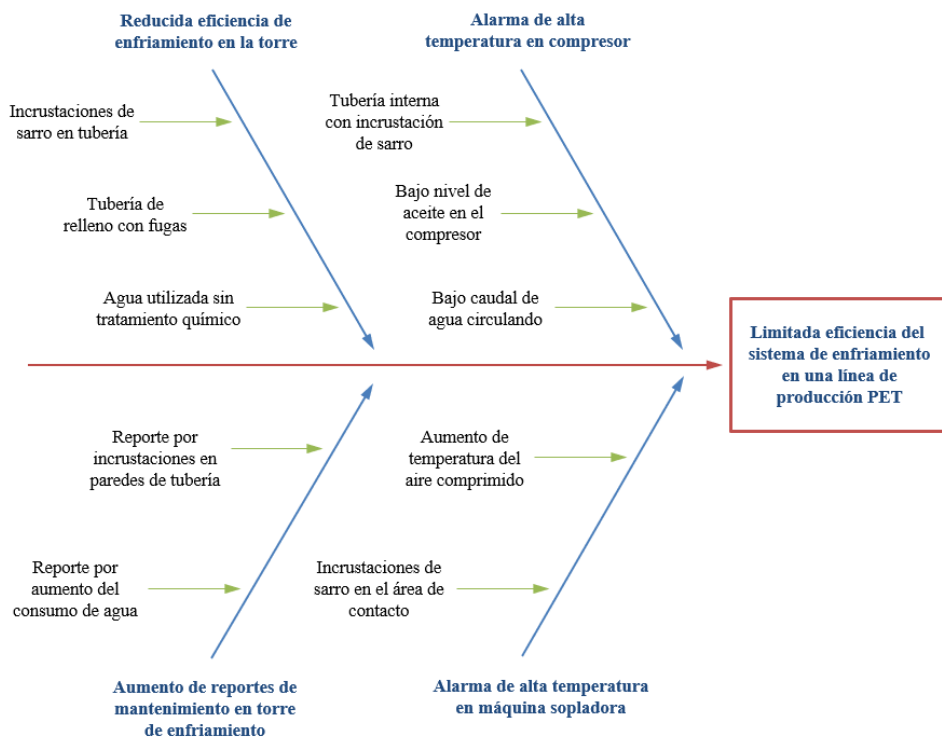
## 5.2. Identificación de necesidades

Debido a la constante demanda de botellas PET con alto estándar de calidad que ofrece la planta, se debe mejorar el sistema de refrigeración de la línea de producción a un estado en el que los equipos estén en disposición de operar a su máxima capacidad.

Tal como se observa en la **Figura 14**, esta necesidad se ve afectada por la ineficiencia del sistema de enfriamiento de la torre. El diagrama Ishikawa se realizó analizando el 20 % de los reportes de mantenimiento (regla del 20-80) hasta determinar los 4 problemas más repetitivos presentes en la línea de producción.

Se observa que el problema raíz en la línea de producción incurre en la limitada eficiencia del sistema de enfriamiento, las posibles causas pueden llegar a ser uno de los problemas secundarios o incluso se debe a la mala calidad del agua de enfriamiento que ha incrustado sarro en las cavidades internas de todo el sistema de enfriamiento lo que ha disminuido la transferencia de temperatura por conducción y la reducción en el flujo másico.

Figura 14: Diagrama Ishikawa para identificar el problema raíz



Fuente propia. Se consideró el 20 % de las fallas secundarias para determinar la causa raíz

## 5.3. Descripción de la metodología

Fue necesario partir de la definición de requisitos del sistema para darle cumplimiento al objetivo principal, que radica en mejorar la eficiencia de enfriamiento.



Para ello se investigó sobre el funcionamiento y la clasificación de las torres de enfriamiento, con el objetivo de conocer su estructura interna y los diferentes diseños de operación. Seguidamente se utilizó la carta psicrométrica para determinar las variaciones del aire al modificar la humedad y temperatura, para ello se recopilaron datos como: la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire para calcular la temperatura del punto de rocío del aire, los primeros dos fueron determinados como el promedio de las mediciones del INSIVUMEH de años atrás y el punto de rocío del aire se determinó por medio de la carta psicrométrica. Se determinó la altura del relleno de la torre de enfriamiento por medio del cálculo del número de unidades de transferencia *NTU* y constantes para entramados de madera. Posteriormente se determinó la capacidad térmica mínima de enfriamiento que debe refrigerar la torre de enfriamiento para liberar la carga térmica generada por el compresor. Seguidamente se procedió a la selección de la torre de enfriamiento.

Se procedió a comprobar el diámetro de la tubería por medio de la ecuación de Swamee y Jain después de haber: uno, calculado un diámetro preliminar con la ecuación de continuidad y área de una sección circular; dos, calculado del número de *Reynolds*; tres, calculado el factor de fricción por medio de la ecuación de *Colebrook* y cuatro, calculado la pérdida de carga total. Seguidamente se calculó la potencia de bombeo útil de la bomba hidráulica por medio de la ecuación de energía después de haber considerado dos puntos de análisis en el sistema. También se calculó un NPSH para evitar cavitación en el área de succión de la bomba.

Así mismo, se estudiaron programas de mantenimiento de fabricantes de torres de enfriamiento para proponer un programa de mantenimiento preventivo personalizado que maximice el tiempo de vida útil de la torre y sus accesorios. También se estudió sobre las propiedades del agua y los aditivos a utilizar para evitar daños como corrosión y crecimiento bacteriano que afecte en la eficiencia de enfriamiento.

Por último, se generaron los planos de instalación de acuerdo a las dimensiones disponibles del lugar, ya que el espacio es limitado por la instalación de otros equipos para la industria de soplado.

Se investigaron y analizaron fuentes de información para recopilar información referente al análisis y selección de torres de enfriamiento, cálculos y diseño de tubería para instalaciones de enfriamiento, cálculo y selección del tipo de bomba para instalaciones de enfriamiento, implementación del programa de mantenimiento preventivo para torres de enfriamiento y la implementación del programa de mantenimiento químico para el agua de enfriamiento en torres de enfriamiento.

Se tuvo acceso a libros, artículos científicos, reportes técnicos elaborados por profesionales en el área, folletos publicados en páginas de internet como soporte al estudiante y a la página del Ministerio de Salud de España para acceder a información relacionada con las enfermedades provocadas por la falta de implementación de un programa de mantenimiento químico en depósitos de agua de torres de enfriamiento.

Se investigó sobre los diferentes diseños de torres de enfriamiento, diferencia entre el ingreso del flujo de aire al interior de las torres de enfriamiento y la función de cada parte de la torre de enfriamiento con el objetivo de seleccionar un diseño acorde a las necesidades y delimitaciones.

También se investigó sobre el principio de operación y la teoría de enfriamiento para determinar fórmulas que determinan el número de unidades de transferencia [Ecuación 18](#) y la altura de las unidades de transferencia [Ecuación 21](#) que justifica las dimensiones del relleno de la torre de enfriamiento.

Información relacionada con la investigación de psicometría fue necesaria para hacer uso de la carta psicométrica y determinar datos como entalpía y temperatura de bulbo húmedo del flujo de aire al ingreso de la torre de enfriamiento.

Se accedió a información para determinar el diámetro mínimo de la tubería de la instalación de enfriamiento por medio de los requisitos de diseño para conocer la longitud de tubería y calcular las pérdidas mayores y menores provocadas por los accesorios instalados.

También fue necesario acceder a información para determinar la potencia de la bomba hidráulica, calcular el NPSH ([Ecuación 27](#)) para evitar cavitación en el eje impulsor y así seleccionar el tipo de bomba adecuado a la instalación de la torre de enfriamiento.

Por último, se accedió a información para proponer un programa de mantenimiento acorde a los antecedentes y requisitos de diseño.

## 5.4. Torre de enfriamiento

### 5.4.1. Obtención de datos de operación del compresor *Francois*

Se tuvo acceso al lugar de la instalación de la torre de enfriamiento para tomar medidas del área disponible y acceder al manual de operación del compresor *Francois* de 40 BAR para definir las temperaturas y flujo volumétrico de operación. Los datos se muestran en la [Tabla 6](#).

Las temperaturas del agua de entrada y salida fueron utilizadas para determinar el número de unidades de transferencia, el flujo volumétrico fue utilizado para determinar la cantidad de calor que la torre de enfriamiento debe liberar, determinar el diámetro mínimo de la tubería y determinar la potencia útil. Se explicará a detalle más adelante.

Las dimensiones del área disponible fueron utilizados en el diseño de la instalación de la tubería.

Tabla 6: Datos compresor *Francois* de 40 BAR

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Temperatura del agua de entrada	$t_{1,nueva}$	91.40	°F
Temperatura del agua de salida	$t_{2,nueva}$	116.60	°F
Caudal de agua	$\dot{v}$	0.20600	$Pies^3/s$

Fuente propia. Valores de diseño de operación obtenidos del manual del compresor *Francois*.

### 5.4.2. Cálculo de la eficiencia actual de enfriamiento

Este análisis se utilizó para determinar la carga de refrigeración de la torre de enfriamiento que se desea reemplazar para compararla con la carga de refrigeración de la nueva torre seleccionada y así, determinar el incremento de la eficiencia enfriamiento.

Fue necesario tomar el valor de la temperatura en la tubería de entrada y salida del agua del compresor bajo el enfriamiento de la torre en malas condiciones, ya que los valores de temperatura son completamente distintos a los valores de diseño de la nueva torre.

El valor de la densidad del agua entre el rango de 90°F a 150°F, no varía significativamente, sin embargo, se determinó el valor de la densidad del agua a 123.80°F, que es el valor de la temperatura del agua de salida del compresor con la torre en malas condiciones para hacer el cálculo más preciso. Por medio de tablas termodinámicas se obtuvo un valor de densidad de  $\rho = 61.70 \text{ Lbm/Pies}^3$ .

El valor de la carga de refrigeración con la torre en malas condiciones, se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$Q_{T,agua} = \dot{v} * \rho * C_{pw} * (t_{2,antigua} - t_{1,antigua}) * 3,600$$

En donde  $t_{2,antigua}$  y  $t_{1,antigua}$  son los valores de temperatura del agua a la salida y entrada del compresor bajo la refrigeración de la torre en malas condiciones. El valor de 3,600 es una constante y la variable  $C_{pw} = 1 \text{ BTU}/(\text{Lb} * \text{F})$ . Considerando las incrustaciones y fugas de agua en la tubería de enfriamiento y dentro de la torre de enfriamiento en malas condiciones se consideró una reducción del 20% del flujo volumétrico del agua, siendo este valor conservador igual a  $\dot{v} = 0.1648 \text{ Pies}^3/\text{s}$ .

Los resultados se muestran en la [Tabla 7](#). Y en la [Tabla 8](#) se determinó que la planta de producción tendrá un incremento de enfriamiento del 58.15% tomando como el 100% el valor de la carga de refrigeración antigua trabajando a su máxima potencia.

Tabla 7: Carga de refrigeración de la torre en malas condiciones

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Temperatura del agua de entrada	$t_{1,antigua}$	102.20	°F
Temperatura del agua salida	$t_{2,antigua}$	123.80	°F
Carga de refrigeración	$Q_{T,agua}$	789,266.49	BTU/h

Fuente propia. *Valores de operación con la torre de enfriamiento en mal estado.*

Tabla 8: Porcentaje de eficiencia de mejora en el proceso de refrigeración

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Carga térmica torre antigua	$Q_{T,antigua}$	789,266.49	BTU/h
Carga térmica torre nueva	$Q_{T,nueva}$	1,248,210	BTU/h
Eficiencia de mejora	%	58.15	%

Fuente propia. *Incremento en la eficiencia de enfriamiento comparando la carga de refrigeración de la torre antigua con la instalación de la torre nueva.*

### 5.4.3. Determinación de valores del aire de ingreso a la torre de enfriamiento

Por medio de correo electrónico y a través del formulario en línea se solicitó al INSU-VUMEH el historial de lectura de 10 años atrás de la sede de medición más cercana a la planta de producción *PET* en donde se instalará la torre de enfriamiento. Se obtuvo la base de datos de la sede de medición La Aurora y únicamente se consideraron los valores de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa mostrados de la [Tabla 10](#).

Con la combinación más alta de estos dos, se determina el mayor valor de la temperatura de bulbo húmedo del aire, que se relaciona con la temperatura del agua de entrada bajo el concepto de aproximación. La aproximación es función de la capacidad de refrigeración de la torre de enfriamiento; entre menor sea el valor, mayor deberá ser la capacidad de enfriamiento de la torre [Sección 4.3](#). Es decir, se está considerando un escenario conservador para el desempeño de enfriamiento de la torre.

La temperatura de bulbo seco, la humedad relativa del aire de entrada, la altura de la planta de producción a nivel del mar y la presión atmosférica a esa altura del nivel del mar se muestran en la [Tabla 9](#).

Tabla 9: Propiedades del aire ambiente para proceso de diseño

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Temperatura de bulbo seco del aire	$t_{a1}$	77	°F
Humedad relativa del aire	$RH_{a1}$	71	%
Altura de la industria al nivel del mar	h	5,000	Pies
Presión al nivel del mar	$P_{atm}$	12.18	Psia

*Valores de diseño promedio del aire ambiente del año 2013 al 2022 obtenidos bajo el análisis de datos compartidos por el INSIVUMEH.*

Los valores del aire de la [Tabla 9](#) fueron elegidos de la [Tabla 10](#) del año 2021, fueron graficados en la [Figura 22](#) y [Figura 23](#). En la figura se observa que los valores de humedad relativa aumentan al 98% en el mes de octubre, época de invierno y los valores de temperatura de bulbo seco alcanzaron los 29°C en el mes de marzo, época de verano, lo cual coincide con las estaciones de nuestro país.

### 5.4.4. Determinación de las propiedades del aire de entrada

Se utilizó la carta psicrométrica en línea que ofrece *ASHRAE* por medio del acceso: <https://daytonashrae.org/psychrometrics/psychrometrics.shtml> que se muestra en la [Figura 15](#), para determinar la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada por medio de la temperatura de bulbo seco y humedad relativa del año 2021.

Las propiedades del aire se muestran en la [Tabla 11](#). Se ingresó el valor de 5,000 pies

Tabla 10: Propiedades del aire ambiente del año 2013 al 2022

Año	Promedio temperatura máxima (C)	Promedio humedad relativa (%)	Temperatura de bulbo húmedo (F)
2013	24.7010	70.5232	68.90
2014	24.5970	69.5698	68.54
2015	20.8940	57.1424	59.36
2016	23.9500	63.8413	65.84
2017	24.2112	69.5725	68.00
2018	24.8231	67.9489	68.54
2019	14.9053	37.2903	45.50
2020	21.2032	59.2580	60.26
2021	25.1104	71.5134	69.98
2022	22.7075	63.8064	63.86

Fuente propia. *Promedio de temperatura de bulbo seco y humedad relativa del año 2013 al 2022.*

en la casilla de presión barométrica, ya que la planta *PET* se encuentra a esa altura sobre el nivel del mar, se ingresó el valor de 71 % en la casilla de humedad relativa y 77°F en la casilla de temperatura de bulbo seco, ya que fueron determinados en la [Tabla 9](#).

Tabla 11: Propiedades del aire de entrada a 5,000 pies de altura sobre el nivel del mar

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Entalpía del aire seco	$h_{a1}$	37.23	BTU/Lb aire seco
Temperatura de bulbo húmedo	Wbt	69.62	°F

Fuente («Psychrometrics», [2019](#)). *Valores obtenidos por medio de la carta psicométrica digital con el 71 % de humedad relativa y 77°F de bulbo seco de aire.*

#### 5.4.5. Cálculo del Número de Unidades de Transferencia *NTU*

Se utilizó la [Ecuación 18](#) y el ejemplo del capítulo 36 de (The American Society of Heating & Engineers, [2000](#)) para obtener los resultados de la [Tabla 12](#) y [Figura 21](#).

$$\frac{K' * a * V}{G} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h^* - h_a} dh_a$$

Los valores de cada columna de la [Tabla 12](#), se explican a continuación (el número de columna se cuenta de izquierda a derecha):

Tabla 12: Cálculo del Número de Unidades de Transferencia NTU

T(°F)	$h'$ (BTU/Lb)	$h_a$ (BTU/Lb aire seco)	$h' - h_a$ (BTU/Lb)	$1/(h' - h_a)$	$\Delta T$	$(h' - h_a)_{avg}$	NTU
91.40	65.62	37.23	28.39	0.0352			
					1.05	28.5125	0.0368
92.45	67.44	38.805	28.635	0.0349			
					1.05	28.7825	0.0365
93.50	69.31	40.38	28.93	0.0346			
					1.05	29.1075	0.0361
94.55	71.24	41.955	29.285	0.0341			
					1.05	29.4875	0.0356
95.60	73.22	43.53	29.69	0.0337			
					1.05	29.9225	0.0351
96.65	75.26	45.105	30.155	0.0332			
					1.05	30.4175	0.0345
97.70	77.36	46.68	30.68	0.0326			
					1.05	30.9725	0.0339
98.75	79.52	48.255	31.265	0.0320			
					1.05	31.5875	0.0332
99.80	81.74	49.83	31.91	0.0313			
					2.10	32.6650	0.0643
101.90	86.4	52.98	33.42	0.0299			
					2.10	34.3100	0.0612
104.00	91.33	56.13	35.2	0.0284			
					2.10	36.2500	0.0579
106.10	96.58	59.28	37.3	0.0268			
					2.10	38.5100	0.0545
108.20	102.15	62.43	39.72	0.0252			
					2.10	41.1050	0.0511
110.30	108.07	65.58	42.49	0.0235			
					2.10	44.0650	0.0477
112.40	114.37	68.73	45.64	0.0219			
					2.10	47.4150	0.0443
114.50	121.07	71.88	49.19	0.0203			
					2.10	51.1900	0.0410
116.60	128.22	75.03	53.19	0.0188			
						$\Sigma Total$	<b>0.70376</b>

Fuente propia. *Tabla que muestra los valores y gradientes de temperatura para determinar el número de unidades de transferencia para la torre de enfriamiento.*

La primera columna, T(°F), está formada por valores de temperatura del flujo de agua. El valor mínimo, 91.40°F, es igual a la temperatura del agua a la que debe ingresar al compresor y el valor máximo, 116.60°F, es igual a la temperatura del agua que saldrá del compresor. Los cambios de intervalo están anotados en la sexta columna,  $\Delta T$ .

La segunda columna,  $h'$ (BTU/Lb), son valores de entalpía de saturación del aire a la temperatura del agua y al 100% de humedad relativa obtenidos de la página en línea de *ASHRAE*. Se considera el 100% de humedad relativa debido a que el análisis es en la interface de contacto en donde se asume que el aire se satura de humedad para liberar el calor adquirido en forma de vapor de agua a la atmósfera.

Figura 15: Programa *on-line* publicado por ASHRAE



Fuente («Psychrometrics», 2019). Programa *on-line* que permite calcular las propiedades psicrométricas del aire.

La tercera columna son valores de entalpía del aire seco determinados por medio de la siguiente fórmula:

$$h_a(BTU/Lb_{aireseco})$$

El primer valor,  $37.23 \text{ BTU/Lb}_{aireseco}$ , se determinó en la Tabla 11 y el último valor,  $75.03 \text{ BTU/Lb}_{aireseco}$ , se determina por medio de la Ecuación 8 y se despeja para  $h_{a2}$ , la cual quedará:

$$h_{a2} = h_{a1} + \frac{L}{G} * \frac{t_2}{t_1}$$

La relación  $L/G$  de líquido-gas de acuerdo a Perry, explica que dicho valor puede variar de 0.75 hasta 1.5 (Don W., Green & Marylee Z., Southard, 2019). Se asume un valor de 1.5 para maximizar el desempeño de la torre en las condiciones en las que exista 1.5 veces más líquido que flujo de aire (puede ocurrir cuando el ventilador se detiene de forma inesperada). El resultado se muestra en la Tabla 13.

$$0.75 \leq L/G < 1.5$$

Tabla 13: Valor de la entalpía del aire a la salida de la torre de enfriamiento

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Entalpía del aire a la salida	$h_{a2}$	72.03	BTU/Lb aire seco

Después de haber determinado el primer y último valor, sólo queda determinar los valores intermedios. Estos fueron calculados por medio de la siguiente ecuación en donde se considera  $C_{pw} = 1 \text{ BTU}/(Lb * F)$

$$h_{actual} = h_{anterior} + (L/G) * C_{pw} * \Delta T$$

La cuarta columna,  $h' - h_a(BTU/Lb)$ , es la diferencia entre la entalpía del aire seco con la entalpía de saturación.

La quinta columna,  $1/(h' - h_a)$ , es el inverso del resultado de la cuarta columna.

La séptima columna,  $(h' - h_a)_{avg}$ , es el promedio de los cambios de entalpía de la cuarta columna. El primer valor, 28.5125, es el promedio de los primeros dos valores de la cuarta columna, 28.390 y 28.635. El segundo valor, 28.7825, es el promedio entre el valor anterior y el valor próximo de entalpía, 28.635 y 28.930. Y así sucesivamente se determinan el resto de valores.

La octava y última columna, NTU, está descrita por la siguiente ecuación:

$$NTU = \frac{C_{pw} * \Delta T}{(h' - h_a)_{avg}}$$

Y al final,  $\sum Total$ , es la sumatoria de todos los valores calculados del NTU.

Los cálculos del  $NTU$  de forma gráfica se muestran en la [Figura 21](#), en donde el área debajo de la curva entre la línea de operación del agua y la línea de operación del aire representa el valor del Número de Unidades de Transferencia.

#### 5.4.6. Cálculo de la altura total del relleno de la torre de enfriamiento

Se asume que el relleno estará fabricado por entramados de madera, ya que los valores del coeficiente de transferencia de materia para rellenos de polímeros o metales están protegidos por derechos de autor y solamente se determinan de forma experimental. Este cálculo no afecta en la selección de la torre de enfriamiento, ya que no se está diseñando la torre de enfriamiento sino que solamente se desea ejemplificar la altura del relleno con valores de geometría de entramados de madera. Se utiliza la [Ecuación 21](#) y se resuelve para N.

$$N = \frac{NTU - 0.07}{A * \left(\frac{L}{G}\right)^{-n}}$$

Se eligió el diseño del relleno tipo C de la [Figura 16](#) para determinar la distancia vertical entre pisos. La elección del diseño es a conveniencia, puede elegirse cualquier otro diseño de geometría.

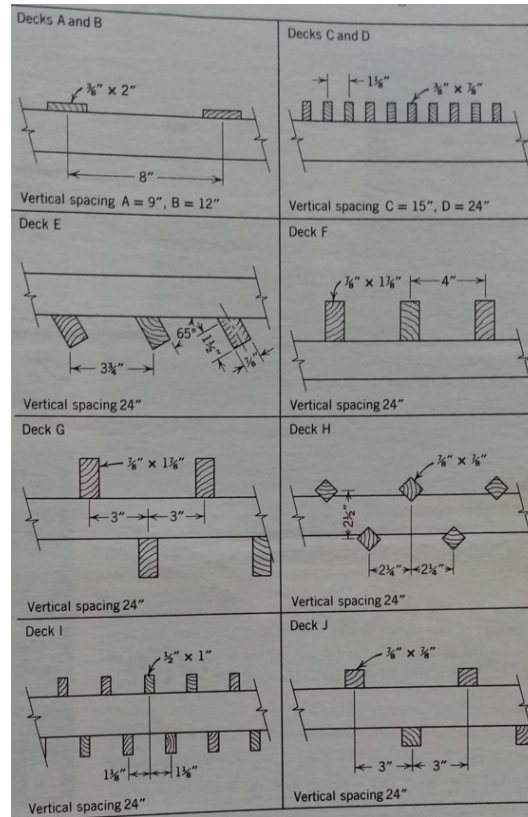
Las constantes A y n se eligen de la [Tabla 14](#) de acuerdo al diseño del relleno elegido, en este caso, el tipo C.

Los valores asumidos y la altura del relleno se muestran en la [Tabla 26](#).

Como se observa en la [Tabla 26](#), la altura del relleno sobrepasa los 3 metros, esto se debe a que se utilizaron valores y diseños de rellenos fabricados de madera con un distanciamiento vertical de casi 0.5 metros. En la actualidad, se fabrican rellenos de polímeros o metales con un distanciamiento vertical de hasta 38 mm, obteniendo una altura máxima del relleno de hasta 610 mm para torres de enfriamiento a contra-flujo (Industries, [2011](#)).



Figura 16: Tipos de diseño de entramados de madera para torre de enfriamiento



Fuente: (Fraas, Arthur P. & Ozisik, Necati, 1965). *Diseño de geometrías utilizadas para la construcción de rellenos de madera en torres de enfriamiento*

#### 5.4.7. Cálculo de la capacidad térmica mínima de enfriamiento para la selección de la torre de enfriamiento

Se desea determinar el calor absorbido por el agua al salir del compresor en funcionamiento para obtener una capacidad térmica mínima de referencia que la torre de enfriamiento deba liberar. Para ello, se determina la densidad del agua a 116.60 grados fahrenheit por medio de tablas termodinámicas, ya que será la temperatura que ingrese a la torre de enfriamiento.

El calor a liberar del agua de enfriamiento se determina con la siguiente ecuación y el resultado se muestra en la Tabla 27 («Calculating cooling loads», 2004).

$$Q_{T,agua} = \dot{v} * \rho * C_{pw} * (t_{2,nueva} - t_{1,nueva}) * 3,600$$

En donde  $t_2$  y  $t_1$  se determinaron en la Tabla 6, 3,600 es una constante,  $C_{pw} = 1^{BTU}/(Lb * F)$  y  $\rho = 61.70Lbm/Pies^3$ .

Tabla 14: Valores de A y n para entramados de madera

Deck	A	n
A	0.060	0.62
B	0.070	0.62
C	0.092	0.60
D	0.119	0.58
E	0.110	0.46
F	0.100	0.51
G	0.104	0.57
H	0.127	0.47
I	0.135	0.57
J	0.103	0.54

Fuente: Fraas, Arthur P. y Ozisik, Necati, [1965](#)

#### 5.4.8. Instalación eléctrica de la torre de enfriamiento

Los valores que se observan en la [Tabla 15](#) serán utilizados para determinar el amperaje que consume el motor en funcionamiento y con ello, determinar el calibre del cable necesario para su instalación. Para ello, se utiliza la fórmula de potencia eléctrica para circuitos trifásicos:

$$P_{electrica} = \sqrt{3} * V_{electrico} * I_{electrica} * \cos \alpha$$

Se despeja  $I_{electrica}$ , se asume un valor de 0.9 como factor de potencia y obtiene un valor de: 4.722 Amp. Se le suma el 20% como factor de seguridad y se obtiene un valor de 5.666 Amp. Se busca una tabla de calibres de cables como el de la [Figura 20](#) para calibres mayores al calibre #14 y se determina que el calibre #20 es el correcto porque soporta hasta 8 amperios. El calibre #18 soporta 10 Amp y el calibre #22 soporta 5 Amp.

Tabla 15: Datos del motor eléctrico de la torre de enfriamiento

Magnitud	Valor	Dimensión
Potencia	3	HP
Voltaje	440	V
Tipo conexión	Trifásico	

*Valores obtenidos de la ficha técnica de la torre de enfriamiento.*

El tablero eléctrico trifásico 440V se encuentra a 20 metros de la torre de enfriamiento; durante 15 metros de distancia los cables se encuentran protegidos por una parrilla aérea para cables eléctricos, y los 5 metros restantes de cable están protegidos por tubo metálico flexible, ya que estarán a la intemperie. La cantidad de cable eléctrico calibre #20 será multiplicada por 5 veces, ya que existen 3 líneas de corriente (por ser sistema trifásico), la línea neutro y la línea de tierra. Se seguirá el mismo código de colores para sistema trifásico de la planta de producción la cual se muestra en la [Tabla 16](#).

Las 5 líneas eléctricas saldrán del tablero central y llegarán al tablero auxiliar por medio de la parrilla eléctrica aérea. En este tablero auxiliar se instalará una botonera eléctrica para

Tabla 16: Código de colores y distancia de cable calibre #20 para la instalación de la torre de enfriamiento.

Línea	Código color	Distancia
Línea de corriente 1	Rojo	20 metros
Línea de corriente 2	Celeste	20 metros
Línea de corriente 3	Negro	20 metros
Neutro	Blanco	20 metros
Tierra	Verde	20 metros
Tubo metálico flexible	—	5 metros

prender y apagar la torre de enfriamiento y los componentes eléctricos para el circuito de potencia. En la [Figura 27](#) se observa el diseño del circuito de potencia para el funcionamiento de la torre de enfriamiento de tiro inducido. Las tres fases, representadas como L1, L2 y L3, se conectan al flipon trifásico C1, el flipon se conecta al disyuntor magnetotérmico Q1, el último se conecta al contactor K1, el contactor al guardamotor o relé térmico F1 y por último, al motor eléctrico de 3HP de la torre de enfriamiento que estará conectado a tierra.

El flipon C1, se utiliza para aislar al tablero auxiliar de la corriente cuando se necesite realizar trabajos de mantenimiento. El magnetotérmico Q1, es utilizado para proteger al resto de componentes de un valor elevado de corriente del cual no fue diseñado. El contactor K1, es el encargado de controlar el funcionamiento cíclico del motor eléctrico. El relé térmico F1, se utiliza para proteger a las líneas contra cortocircuitos, sobrecargas y fallos de fase.

Es importante notar que el motor trifásico de la torre de enfriamiento está conectado con conexión estrella-delta para que la tensión se reduzca en el momento del arranque con el objetivo de eliminar picos de corriente y maximizar el tiempo de vida útil del motor.

## 5.5. Diámetro mínimo de la tubería de agua

El procedimiento consistirá en asumir velocidades para el área de succión y descarga de la bomba. Seguidamente se determinarán los diámetros para la tubería de succión y descarga por medio de la ecuación de continuidad y área transversal para secciones circulares. Se procede a calculará el Número de *Reynolds*, el factor de fricción de Colebrook, las pérdidas de carga mayor y menor en la tubería. El diámetro preliminar será comprobado con la [Ecuación 26](#) de Swamee y Jain para determinar el porcentaje de error de error. Se asume que el flujo se considera como estacionario, incompresible y el número de Reynolds es turbulento.

### 5.5.1. Diámetro preliminar y velocidad de diseño

La velocidad de succión y descarga fueron asumidas considerando los valores descritos en la [Figura 17](#). Se eligieron valores promedio por facilidad y se eligió el valor de la velocidad de succión menor al valor de la velocidad de descarga para evitar una posible cavitación en el eje impulsor de la bomba.

Figura 17: Valores de velocidad máxima para sistemas de enfriamiento por agua

Application	Maximum Velocity	
	(m/s)	(ft/s)
General Water Service	0.9 - 2.4	3 - 8
Tap water (low noise)	0.5 - 0.7	1.6 - 2.3
Tap water	1.0 - 2.5	3.3 - 8.2
Cooling water	1.5 - 2.5	4.9 - 8.2
Suction boiler feed water	0.5 - 1.0	1.6 - 3.3
Discharge boiler feed water	1.5 - 2.5	4.9 - 8.2
Condensate	1.0 - 2.0	3.3 - 6.5
Process water	1.5 - 3	5 - 10
Pump discharge	1.5 - 3	5 - 10
Pump suction	0.9 - 2.4	3 - 8
Heating circulation	1.0 - 3.0	3.3 - 9.8

Fuente: («Water velocities in pipes and tubes should not exceed certain limits», 2003).  
*Velocidades máxima del agua en tuberías y tubos.*

El diámetro preliminar se determinó con la ecuación de continuidad y área de una sección transversal circular por medio de la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{v}}{\pi * V}}$$

En la tubería de succión se determinó un diámetro mínimo de 0.2290 pies y se aproximó a 0.2500 pies. En la tubería de descarga se determinó un diámetro mínimo de 0.1936 pies y se aproximó a 0.2083 pies. Se decidió aproximar cada valor al próximo comercial para facilitar los cálculos. Los valores se muestran en la [Tabla 17](#)

Tabla 17: Velocidad y diámetro preliminar

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Velocidad de succión	$V_{succion}$	5	Pies/s
Velocidad de descarga	$V_{descarga}$	7	Pies/s
Diámetro de succión preliminar	$D_{succion.preliminar}$	0.2500	Pies
Diámetro de descarga preliminar	$D_{descarga.preliminar}$	0.2083	Pies

Fuente propia. *Los diámetros fueron aproximados al valor próximo comercial después de determinar el diámetro de una sección circular, como lo describe la ecuación anterior.*

### 5.5.2. Cálculo del número de *Reynolds*

Los datos para determinar el número de *Reynolds* fueron obtenidos de tablas de las propiedades del agua saturada a presión atmosférica y a la temperatura del agua a la entrada del compresor.

El número de *Reynolds* se calcula por medio de la [Ecuación 22](#), se determina que es turbulento y el resultado se muestra en la [Tabla 28](#).

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu} = \frac{\rho * V_{prom} * D}{\mu}$$

$$\begin{aligned}
 Re &\leq 2,300 - \text{Flujolaminar} \\
 2,300 &\leq Re \leq 4,000 - \text{flujotransicional} \\
 Re &\geq 4,000 - \text{flujoturbulento}
 \end{aligned}$$

### 5.5.3. Cálculo del factor de fricción por medio de la ecuación de Colebrook

El factor de fricción de Colebrook fue calculado por medio de la Ecuación 24.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 * \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

Para el valor de la rugosidad equivalente del hierro,  $\varepsilon$ , se seleccionó la del hierro galvanizado de la Tabla 18, ya que la tubería será nueva de hierro galvanizado. El resultado se muestra en la Tabla 29.

Tabla 18: Valores de rugosidad equivalente para tuberías comerciales nuevas

Material	Rugosidad (Pies)
Vidrio o plástico	0
Concreto	0.003 - 0.03
Duela de madera	0.0016
Hule alisado	0.000033
Tubería de cobre o latón	0.000005
Hierro fundido	0.00085
Hierro galvanizado	0.0005
Hierro forjado	0.00015
Acero inoxidable	0.000007
Acero comercial	0.00015

Fuente: Cengel, Yunus A. y Cimbala, John M., 2006

### 5.5.4. Cálculo de la pérdida de carga total en la tubería de succión y descarga

El cálculo de la pérdida de carga total, descrita por la siguiente ecuación, es la suma entre la pérdida de carga menor, calculado con la Ecuación 25, y la pérdida de carga mayor, calculado con la Ecuación 23.

$$h_{L,total} = \frac{V^2}{2 * g} * \left( f * \frac{L}{D} + \sum K_L \right)$$

El análisis de la tubería se dividió en tubería de succión y tubería de descarga del flujo de agua. La longitud total de la tubería de succión como de descarga, se determinó tomando mediciones de longitud en las visitas a la planta. Los valores se muestran en la Tabla 19. Tomando en cuenta que las longitudes de los tubos comerciales son de 6 metros, se determina

que se utilizarán 2 tubos de 3 pulgadas en la tubería de succión y 9 tubos de 2.5 pulgadas en la tubería de descarga.

Tabla 19: Longitud de tubería para el diseño de instalación

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Longitud total	$L_{total}$	190.94	Pies
Longitud de succión	$L_{succion}$	29.86	Pies
Longitud de descarga	$L_{descarga}$	161.09	Pies

Fuente propia. *Los valores fueron obtenidos de las mediciones del lugar respetando los equipos ya instalados en el área disponible.*

El análisis y cálculo del coeficiente de pérdida de carga en la tubería de succión se muestra en la [Tabla 20](#). Los valores fueron determinados por medio de la Tabla 8-4 del capítulo 8 del libro de Mecánica de fluidos (Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M., [2006](#)). La contracción repentina de flujo en la tubería de succión, se da cuando el flujo sale de la torre de enfriamiento para dirigirse al compresor y cuando sale del compresor para dirigirse a la torre.

El filtro Yee de la tubería de succión será utilizado para retener cualquier sólido que pudiera filtrarse al flujo de agua. Esta se instalará entre la torre de enfriamiento y la bomba en un *bypass* para no detener la operación mientras se limpia.

El sistema cuenta con una válvula balance para garantizar el equilibrio hidráulico, manteniendo el flujo volumétrico, regulando la presión y compensando la pérdida de carga del sistema dentro de los parámetros operativos en cualquier punto de la tubería. Ya que el diseño interno de la válvula balance es parecido al diseño interno de la válvula de globo y ambas son utilizadas para regular y estrangular el caudal, el valor del coeficiente de pérdida de carga fue asumido como para una válvula de globo de 3 pulgadas.

Tabla 20: Coeficiente de pérdida de carga en accesorios de la tubería de succión de 3"

Cantidad	Elemento	$K_L$
1	Contracción repentina de 4" a 3"	0.25
3	Codo suave de 90° roscado de 3"	0.9
2	Conexión Tee roscada de 3"	2
3	Válvula de bola total abierta de 3"	0.05
1	Válvula balance de 3"	6
1	Filtro Yee roscado de 3"	0.9
<b>TOTAL <math>K_L</math> succión</b>		<b>14</b>

Fuente (Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M., [2006](#))

El análisis y cálculo del coeficiente de pérdida de carga en la tubería de descarga se muestra en la [Tabla 21](#). Los valores fueron determinados de la misma forma que el punto anterior.

La válvula cheque se instalará en la sección de la tubería de descarga seguido de la bomba para cuando la operación se detenga, el agua no regrese al depósito de agua fría de la torre de enfriamiento. Los relojes medidores del flujo y de la temperatura del agua no se les anotó

el coeficiente de pérdida de carga, ya que fueron considerados en las uniones Tee porque van conectados al final de dicha desviación de flujo. El filtro Yee de la tubería de descarga tendrá la misma función que el instalado en la tubería de succión y serán instalados uno cerca del otro para limpiarlos de forma simultánea. Las dos expansiones de flujo son: entrada al compresor y entrada a la torre. Se consideró que ambos tienen conectores de tubería de 4 pulgadas. La contracción de flujo en la tubería de descarga se da cuando el flujo de agua caliente sale del compresor y se dirige a la torre de enfriamiento. Se asumió un coeficiente de pérdida de carga igual a 10 al compresor de 40 BAR por el diseño de la tubería interna que la bomba debe vencer para recircular el agua de enfriamiento.

Tabla 21: Coeficiente de pérdida de carga en accesorios de la tubería de descarga de 2.5"

Cantidad	Elemento	$K_L$
1	Válvula cheque tipo charnela de 2.5"	2
2	Reloj de flujo de 2.5"	0
2	Reloj de temperatura de 2.5"	0
1	Filtro Yee roscado de 2.5"	0.9
3	Válvula de bola totalmente abierta de 2.5"	0.05
6	Conexión Tee roscada de 2.5"	2
6	Codo suave de 90° roscado de 2.5"	0.9
3	Unión roscada de 2.5"	0.08
2	Expansión repentina de 2.5" a 4"	0.371
1	Contracción repentina 4" a 2.5"	0.37
1	Compresor de 40 Bar	10
	<b>TOTAL <math>K_L</math> descarga</b>	<b>31.80</b>

Fuente (Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M., 2006).

La cantidad de accesorios, tanto en la tubería de succión como en la de descarga, fueron tomados del diseño de la tubería con acceso al diseño de planos del [Capítulo 11](#). Por último, el cálculo de la pérdida de carga menor y mayor de la tubería de succión y descarga se muestra en la [Tabla 30](#). Se debe mencionar que los valores son representativos y los mismos deberán ser actualizados por los valores que los fabricantes otorgen.

### 5.5.5. Comprobación del diámetro de la tubería de succión y descarga

Se utiliza la [Ecuación 26](#) para determinar el diámetro ideal.

$$D = 0.66 \left[ \varepsilon^{1.25} * \left( \frac{L * \dot{V}^2}{g * h_L} \right)^{4.75} + \nu * \dot{V}^{9.4} * \left( \frac{L}{g * h_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04}$$

En la [Tabla 31](#) se compara el valor del diámetro de succión preliminar con el ideal obteniendo un porcentaje de error del 46%. El valor del porcentaje de error no quiere decir que el valor del diámetro preliminar esté malo, sino que se está tomando un escenario conservador, ya que se podría elegir un valor comercial menor próximo como 0.2083 pies que

equivale a una tubería comercial de 2.5 pulgadas. Si se desea cambiar el valor del diámetro de succión preliminar a 0.2083 pies, habría que volver a calcular: el número de *Reynolds*, el factor de fricción de *Colebrook*, la pérdida de carga mayor, la pérdida de carga menor, para volver a determinar el diámetro ideal de succión y así determinar el porcentaje de error.

El resultado del diámetro ideal de la tubería de descarga se muestra en la [Tabla 32](#) con un porcentaje de error del 24 %. Se considera que del diámetro ideal de descarga podría ser el valor del diámetro de descarga preliminar, ya que 0.1678 pies está fuera de los valores comerciales de tubería y 0.2083 pies es el valor comercial próximo.

## 5.6. Selección de bomba hidráulica

### 5.6.1. Cálculo de la carga hidrostática necesaria de la bomba

En esta sección se consideraron 2 puntos de análisis, el punto 1 y punto 3 como se observa en la [Figura 18](#). También se utilizará la siguiente fórmula que depende de valores de presión, velocidad y altura de dos puntos distintos de análisis.

$$H_{necesaria} = h_{bomba,util} = \frac{P_3 - P_1}{\rho * g} + \frac{\alpha_3 * V_3^2 - \alpha_1 * V_1^2}{2 * g} + (Z_3 - Z_1) + h_{turbina} + h_{L,total}$$

El punto 1 de análisis, se encuentra sobre la superficie del depósito de agua fría de la torre de enfriamiento con las siguientes características:

- La presión es la atmosférica a 5,000 pies de altura equivalente a 12.18 psi.
- La velocidad del fluido se considera 0, ya que no hay movimiento.
- La altura se considera a 1.42 pies del nivel del suelo. El dato se obtiene de la ficha técnica de la torre elegida [Capítulo 11](#).

El punto 3 se encuentra exactamente a la salida de los aspersores de la torre de enfriamiento que pulveriza el agua caliente proveniente del compresor.

- La presión es la atmosférica a 5,000 pies de altura equivalente a 12.18 psi.
- La velocidad del fluido no es 0 y se calcula por medio de la formula  $V_3$  que se describe a continuación. La ficha técnica del modelo de la torre indica que la presión de la tubería de los aspersores mantiene entre 2 psi a 5 psi, se tomarán 4 porque siempre debe manejar presión la tubería para pulverizar el agua. Esta presión se le suma a la atmosférica para determinar el valor de la velocidad en este punto.

$$V_3 = \sqrt{\frac{2 * g * P_3}{w}}$$

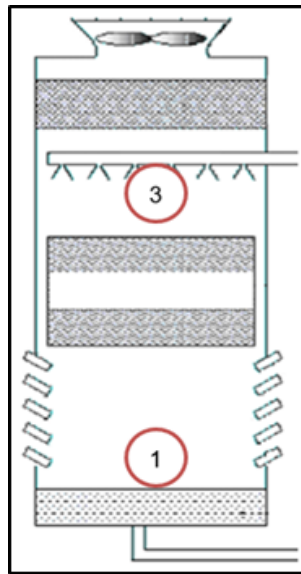
En donde:



- $V_3$  = Velocidad a la que sale el agua de los aspersores.
  - $P_3$  = Presión en ese punto (4 psi + 12.18 psi).
  - $w$  = Peso específico del agua ( $62.43 \text{Lbf}/\text{Pies}^3$ ).
- La altura se considera a 5.75 pies del nivel del suelo. El dato se obtiene de la ficha técnica de la torre elegida [Capítulo 11](#).

Al resolver la fórmula de la de la carga hidrostática necesaria de la bomba se elimina el término de la velocidad en el punto 1, ya que es 0 porque no hay movimiento. Se elimina el término de la carga de la turbina, ya que en el sistema no existe ninguna instalada. El factor de corrección de energía cinética para ambos puntos se considera = 1 por tratarse de flujos turbulentos. Se resuelve para  $H_{necesaria}$  y los resultados se muestran en la [Tabla 33](#).

Figura 18: Diagrama para determinar la carga hidrostática necesaria de la boma



Fuente propia. Se consideran dos puntos de análisis para determinar la carga hidrostática necesaria de la boma.

### 5.6.2. Cálculo de la potencia útil de la bomba hidráulica

Se hace uso del valor de  $H_{necesaria}$  para resolver la siguiente fórmula. Se multiplica por el caudal, la densidad y la gravedad y se obtiene la potencia útil. El valor de la potencia útil, en  $HP$ , se muestra en la [Tabla 34](#).

Se deben conocer las siguientes relaciones para la conversión de dimensiones:

$$1HP = 0.7457Kw$$

$$1Kw = 737.56Lbf * Pies/s$$

$$1Lbf = 32.174Lbm * Pies/s^2$$

$$\dot{W}_{potencia,util} = \rho * g * \dot{V} * H_{necesaria}$$

### 5.6.3. Cálculo de la altura neta positiva de aspiración

Esta es la sección complementaria a [Subsección 5.6.1](#) en donde se considera el punto 1 y el punto 2 de análisis. Se utilizará la [Ecuación 27](#) que depende de la presión de vapor de agua el cual fue determinado por medio de tablas de las propiedades del agua saturada a 1 atmósfera y 91.40°F.

$$NPSH = \left( \frac{P}{\rho * g} + \frac{V^2}{2 * g} \right)_{entrada,bomba} - \frac{P_v}{\rho * g}$$

Las condiciones del punto 1 de análisis se considera iguales a las condiciones descritas en la [Subsección 5.6.1](#), por tratarse del mismo punto de análisis.

El punto 2 se considera en la tubería de succión justo antes de la bomba.

- El valor de la presión será igual al valor de la presión de vapor del agua determinado en la [Tabla 28](#).
- El valor de la velocidad será igual al valor de la velocidad del agua en la tubería de succión asumido en la [Tabla 17](#).
- La altura de la bomba se considera que está a nivel del suelo 0 pies.

Se plantea la fórmula de la carga hidrostática necesaria de la bomba, en donde se considera:

$$H_{necesaria} = h_{bomba,util} = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + \frac{\alpha_2 * V_2^2 - \alpha_1 * V_1^2}{2 * g} + (Z_2 - Z_1) + h_{turbina} + h_{L,total}$$

- Se elimina el término de la velocidad en el punto 1 por ser 0 Pies/s.
- Se elimina el término de la carga de la bomba, ya que la misma no se considera entre los puntos de análisis.
- Se elimina el término de la altura en el punto 2, ya que la bomba está al nivel del suelo.
- Se elimina el término de la carga de la turbina, ya que no existe una instalada entre los puntos de análisis.

Se despeja el término de la presión en el punto 2 y se sustituye en el término de la presión atmosférica de la [Ecuación 27](#), se ordenan los términos y se determina la siguiente ecuación:

$$NPSH_{real} = \frac{P_{atm} - P_v}{g * \rho} + Z_1 - (h_{L,mayor,succion} + h_{L,menor,succion}) + \frac{V_{succion}^2 * (1 - \alpha)}{2 * g}$$

El cálculo del NPSH de la bomba se muestra en la [Tabla 35](#) y se deben considerar las siguientes relaciones para la conversión de dimensiones:

$$1\text{psi} = 144\text{Lbf}/\text{Pies}^2$$

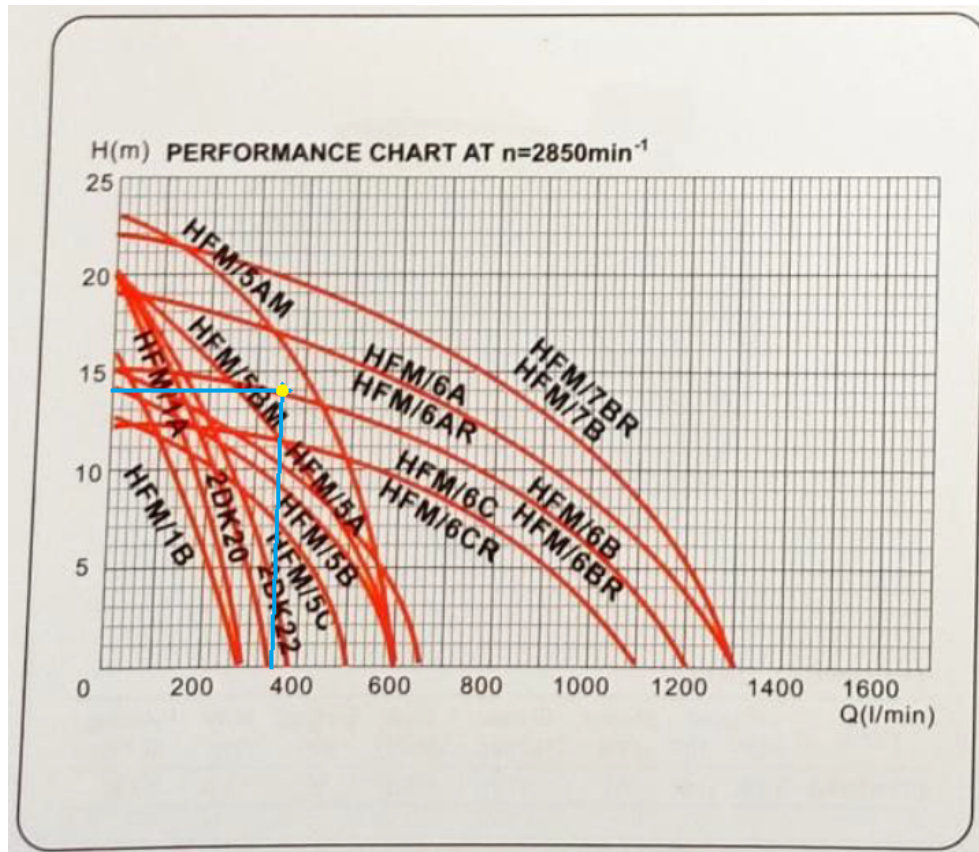
$$1\text{Lbf} = 32.174\text{Lbm} * \text{Pies}/\text{s}^2$$

#### 5.6.4. Uso de la curva característica de la bomba

Dentro de la oferta de compra por la bomba centrífuga de 3HP modelo HFM/6A, anexa en la [Sección 11.4](#), se incluye la curva característica de varios modelos de bombas, mostrada en la [Figura 19](#) al igual que sus valores de operación mostrados en la [Tabla 22](#).

El procedimiento para determinar el modelo de bomba ideal para la instalación es por medio del uso de la curva característica, como se explicó en la [Subsección 4.6.4](#).

Figura 19: Curva característica de bombas de caudal alto que operan a 2,850 rev/min



Fuente (AISA, [2023](#)). En el eje horizontal está tabulado el flujo volumétrico en litros/minuto y en el eje vertical está tabulada la pérdida de carga total del sistema en metros.

Como primer paso, se ubican los 350 l/min que equivale a los 0.20600 Ft<sup>3</sup>/s del caudal de agua, descritos en la [Tabla 6](#), y se traza una línea vertical hacia arriba. Seguidamente, se

ubican los 45.808 pies de pérdida de carga total del sistema, mostrados en la [Tabla 30](#), que equivalen a 13.96 metros y se traza una línea horizontal hacia la derecha.

Por último, se elige el modelo de bomba que más cerca esté al punto de intersección entre la pérdida de carga y el caudal. Idealmente se debe elegir la curva característica próxima mayor al punto de intersección o si en caso dicha intersección está sobre una línea característica, también puede ser elegida y evaluar su eficiencia de operación según la posición en la que se intersecta, como se explicó en la [Subsección 4.6.4](#).

En la [Figura 19](#) se trazaron las líneas azules y el punto amarillo es la intersección entre ambas. Se determinó que se puede elegir la bomba con la curva característica del modelo HFM/6B o HFM/6BR operando aproximadamente al 70%. También se podría elegir el modelo de bomba HFM/5AM operando aproximadamente al 80% o el modelo de bomba HFM/6A o HFM/6AR operando aproximadamente al 60%. Dichos porcentajes son aproximados y dependen de la curva característica de diseño del fabricante.

Por último, se verifica que los datos técnicos del modelo de bomba elegida de la [Tabla 22](#), cumpla con la potencia útil calculada y mostrada en la [Tabla 34](#). El modelo de bomba HFM/6B podría ser la seleccionada, ya que opera con una potencia de 2 HP, soporta una pérdida de carga máxima de 15 metros y entrega un caudal máximo de 1,200 L/min.

Tabla 22: Datos técnicos de distintos modelos de bombas centrífugas de alto caudal

TIPO	POTENCIA		H. MAX	Q. MAX	DIMENSIONES	CARGA SUCCION
	KW	HP	metros	litros/min	pulgadas	metros
HFM/5AM	1.5	2	23	600	2x2	8
HFM/6C	1.1	1.5	12	1,100	3x3	8
HFM/6CR	1.1	1.5	12	1,100	4x4	8
HFM/6B	1.5	2	15	1,200	3x3	8
HFM/6BR	1.5	2	15	1,200	4x4	8
HFM/6A	2.2	3	19	1,300	3x3	8
HFM/6AR	2.2	3	19	1,300	4x4	8

Fuente (AISA, [2023](#)). *Datos técnicos del modelo de bomba HFM/6B.*

### 5.6.5. Instalación eléctrica de la bomba hidráulica

Los valores que se observan en la [Tabla 23](#) serán utilizados para determinar el amperaje que consume el motor en funcionamiento y con ello, determinar el calibre del cable necesario para su instalación. Para ello, se utiliza la fórmula de potencia eléctrica para circuitos monofásicos:

$$P_{\text{eléctrica}} = V_{\text{eléctrico}} * I_{\text{eléctrica}} * \cos \alpha$$

Se despeja  $I_{\text{eléctrica}}$ , se asume un valor de 0.9 como factor de potencia y obtiene un valor de: 10.905 Amp. Se le suma el 20% como factor de seguridad y se obtiene un valor de 13.086 Amp. Se utiliza la tabla de calibres de cables de la [Figura 20](#) y se determina que el calibre #14 es el correcto porque soporta hasta 15 amperios. Notar que el calibre del cable incrementó debido que toda la corriente se traslada en 1 sola fase.

Tabla 23: Datos eléctricos del motor eléctrico de la bomba hidráulica

Magnitud	Valor	Dimensión
Potencia	2	HP
Voltaje	220	V
Tipo conexión	Monofásico	

Fuente propia. Valores obtenidos de la ficha técnica de la bomba hidráulica.

Figura 20: Relación del amperaje y máxima carga de voltaje para calibre del 6 al 14



Fuente («Calibre de cables», 2021). Amperaje máximo del calibre #6 al #14

El tablero eléctrico monofásico 220V se encuentra a 30 metros de la bomba hidráulica; los cables se encuentran en el aire y protegidos por una parrilla de cables durante 26 metros, los restantes 4 metros los cables están protegidos por tubo metálico flexible, ya que están a la interperie. La cantidad de cable eléctrico calibre #14 será multiplicada por 3 veces para representar a 1 línea de corriente (sistema monofásico), la línea neutro y la línea de tierra. Se seguirá el mismo código de colores para el sistema monofásico que posee la planta de producción el cual se identifica en la [Tabla 24](#).

Las 3 líneas eléctricas saldrán del tablero central 220V y llegarán al tablero auxiliar por medio de la parrilla aérea. En el tablero auxiliar, de la bomba hidráulica, se instalará una botonera eléctrica que accionará y apagará la bomba hidráulica de forma manual y los componentes eléctricos del circuito de potencia. En la [Figura 28](#) se observa el diseño del circuito de potencia para el funcionamiento de la bomba hidráulica. En la figura se representan la mono-fase como L1 que está conectado al contactor C1, seguido se conecta un switch guardanivel S1 el cual se conecta al diyunctor Q1, el último se conecta al contactor

Tabla 24: Código de colores y distancia de cable calibre #14

Línea	Código color	Distancia
Línea de corriente 1	Rojo	30 metros
Neutro	Blanco	30 metros
Tierra	Verde	30 metros
Tubo metálico flexible	—	4 metros

Fuente propia. *Código de colores y distancia de cable calibre #14 para la instalación de la bomba hidráulica.*

K1 que se conecta al guardamotor F1, y por último, al motor eléctrico de 2HP de la bomba hidráulica que está conectada a neutro.

El flipon C1 es utilizado para aislar a el tablero auxiliar de la corriente cuando se necesite realizar trabajos de mantenimiento. El switch guardanivel S1, es utilizado para desconectar la bomba cuando el depósito de agua de la torre de enfriamiento llegue a su nivel mínimo de agua; esto para proteger a la bomba de trabajar en vacío y evitar que se quemé. El magnetotérmico Q1 es utilizado para proteger al resto de componentes de un valor elevado de corriente del cual no fueron diseñados. El contactor K1, es el encargado de controlar el accionar de la bomba hidráulica. El relé térmico F1, es utilizado para proteger a la línea contra cortocircuito, sobrecargas y fallos de fase.

Notar que en el circuito monofásico, el motor de la bomba hidráulica, no aplica la conexión estrella-delta o delta-estrella, ya que sólo aplica para circuitos trifásicos en que se puede combinar las fases.

## 5.7. Validación de requisitos de diseño

El requisito RD1 fue aprobado, ya que la carga térmica a liberar por parte del agua es de 1,153,081.78 BTU/h, mostrado en la [Tabla 27](#) y en la ficha técnica de la torre de enfriamiento dice que es capaz de liberar hasta 1,248,210.00 BTU/h. La diferencia a favor es de 95,128.22 BTU/h.

El requisito RD2 fue aprobado, ya que toda la tubería de enfriamiento será reemplazada por una instalación nueva libre de incrustaciones para garantizar que el diseño de la instalación esté en óptimas condiciones.

El requisito RD3 fue aprobado, ya que el sistema de tubería de agua cuenta con la instalación de 2 válvulas filtro con un sistema bypass para facilitar su limpieza y no detener la operación. Una válvula se encuentra instalada en la tubería de succión y la otra en el tramo de la tubería de descarga. Las mismas se observan en la [Sección 11.8](#).

El requisito RD4 fue aprobado, ya que la instalación cuenta con únicamente una bomba centrífuga de 2 HP modelo HFM/6B que opera con un flujo volumétrico de 72  $m^3/hr$ . La propuesta se encuentra en la [Sección 11.4](#).

El requisito RD5 fue aprobado, ya que la torre de enfriamiento es de diseño de tiro inducido que incorpora la instalación del ventilador en la parte superior de la torre. Se optimiza

el área disponible y se distribuye de forma homogénea el aire por la sección transversal del relleno.

El requisito RD6 fue aprobado, ya que según el fabricante, los planos de la torre seleccionada cuentan con las siguientes dimensiones:

$$Longitud = 1.71\text{metros}$$

$$Anchura = 1.71\text{metros}$$

$$Altura = 3.02\text{metros}$$

El requisito RD7 fue aprobado, ya que se accedió a bibliografía y a manuales de fabricantes para generar un formato propio de mantenimiento de la torre de enfriamiento. Así como de la bomba y los accesorios del diseño de la instalación que puede observarse en la [Sección 11.6](#).

El requisito RD8 fue aprobado, ya que se accedió a bibliografía y a manuales de fabricantes para generar un formato propio del análisis mensual de los parámetros del agua de enfriamiento para evitar contaminación, incrustaciones, crecimiento de microorganismos, entre otros. El formato se encuentra en la [Sección 11.7](#).

El requisito RD9 fue aprobado, ya que se accedió a manuales de fabricantes para generar el formato propio del programa de mantenimiento llamado rutina de inspección y limpieza para torres de enfriamiento ubicado en la [Sección 11.5](#).

El requisito RD10 fue aprobado, ya que fueron realizados planos del diseño de la instalación en *Autodesk Inventor*® considerando los requisitos de diseño y los cálculos del diámetro mínimo de la tubería de agua. Se encuentran disponibles en la [Sección 11.8](#).





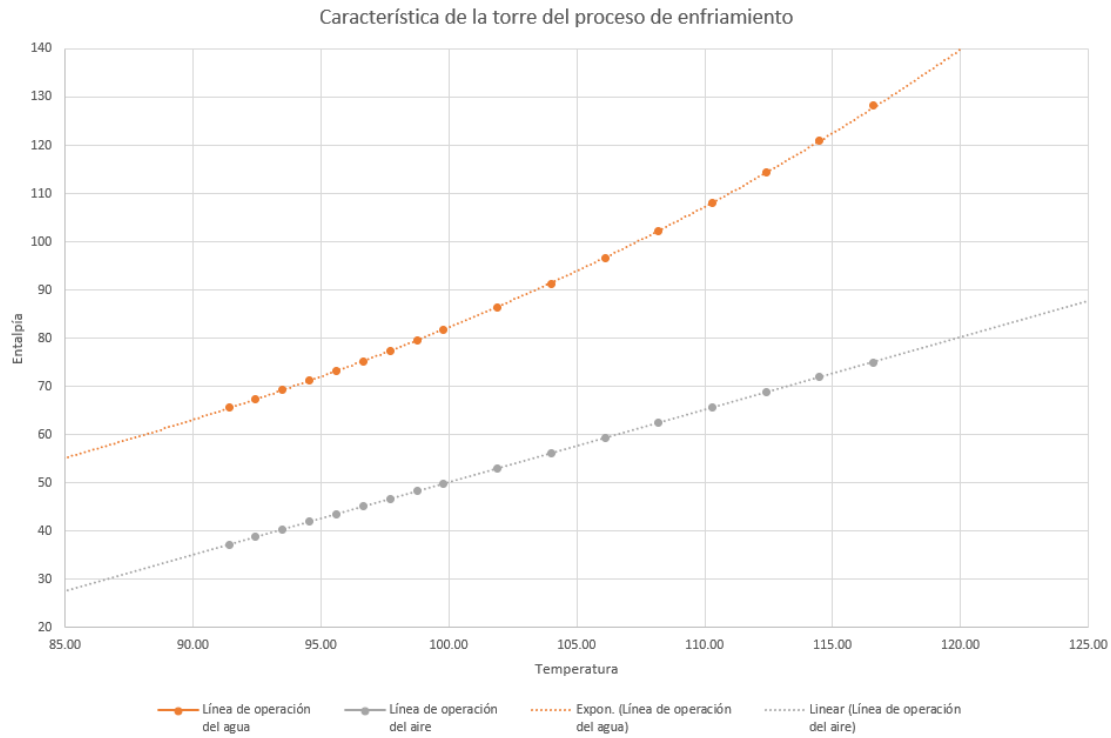
## Resultados

Tabla 25: Validación de requisitos de diseño para la instalación y funcionamiento de la torre de enfriamiento.

Código	Requisitos	Validación
RD1	La torre de enfriamiento debe absorber el calor generado por el compresor de 40 BAR.	Aprobado
RD2	Las incrustaciones de sarro deben ser eliminadas del sistema de enfriamiento.	Aprobado
RD3	El sistema de tubería debe contar con válvulas filtro para retener los sólidos que circulen en el flujo y un sistema de limpieza de purga que no detenga la operación.	Aprobado
RD4	La instalación debe contar con únicamente una bomba centrífuga que recircule el agua de enfriamiento.	Aprobado
RD5	La torre de enfriamiento debe incorporar el ventilador dentro de su estructura para respetar el área disponible.	Aprobado
RD6	La torre de enfriamiento debe medir hasta 1.75 metros de longitud y menos de 1.75 metros de ancho.	Aprobado
RD7	Crear un programa de mantenimiento preventivo de acuerdo a las especificaciones y recomendaciones del fabricante.	Aprobado
RD8	Elaborar el procedimiento para la toma de mediciones de las propiedades químicas del agua.	Aprobado
RD9	Realizar un formato de inspección diaria para evitar obstrucciones en el área de ingreso de aire de la torre de enfriamiento, así como la limpieza del área de instalación.	Aprobado
RD10	Generar planos del diseño de la instalación de la torre de enfriamiento y sus accesorios de acuerdo a la norma ASME Y 14.5M-2009.	Aprobado

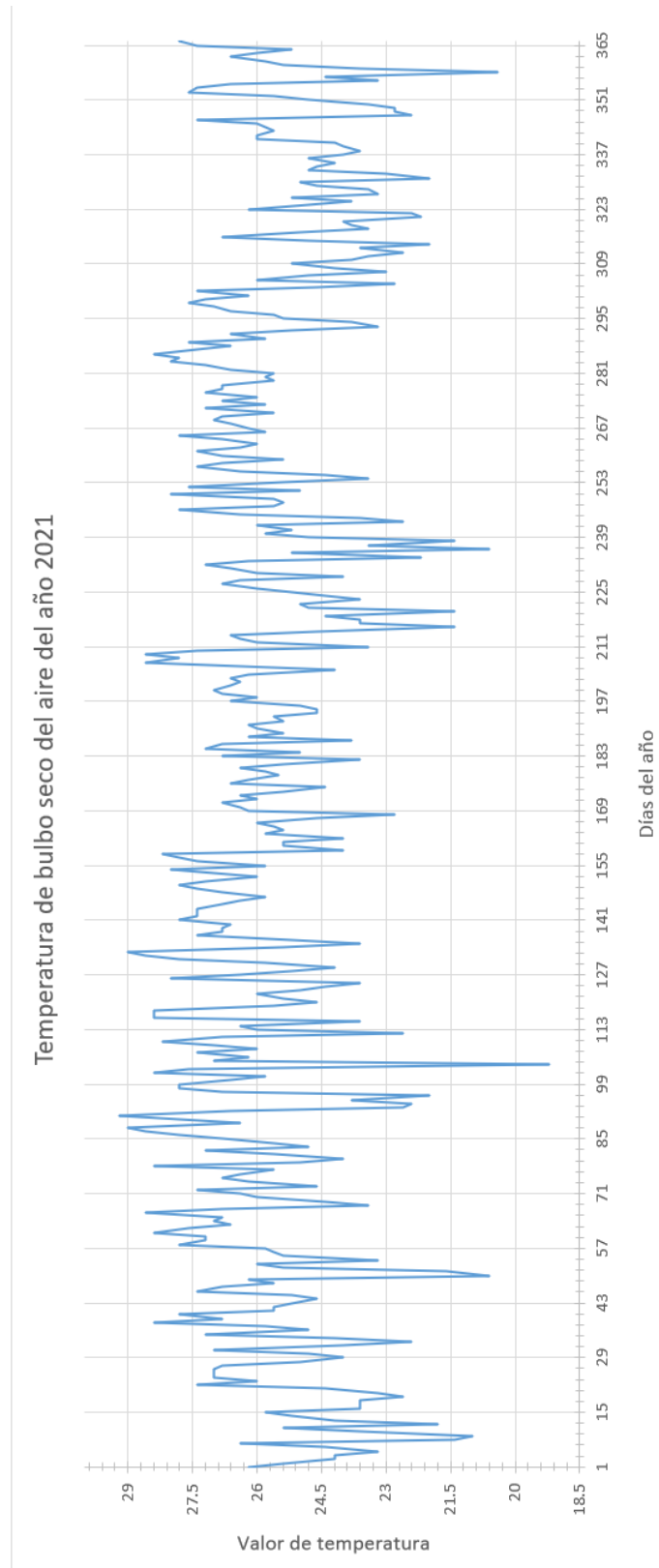
Fuente propia.

Figura 21: Curva característica del proceso de enfriamiento de la torre con valores de diseño del año 2021



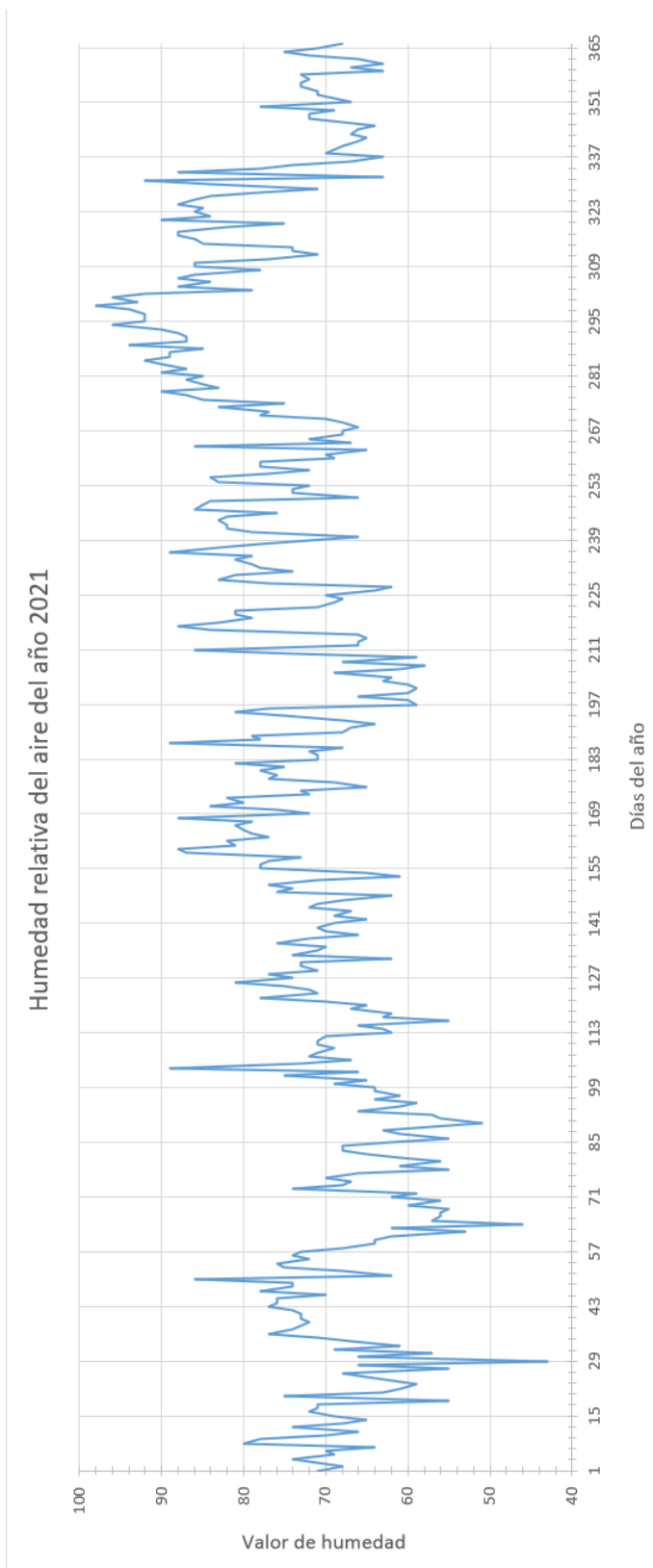
Fuente propia. Gráfica que muestra la curva característica del agua en color naranja y la curva característica del aire en color gris para las condiciones de operación de la torre de enfriamiento con los valores de diseño del año 2021.

Figura 22: Temperatura de bulbo seco del aire del año 2021



Fuente propia.

Figura 23: Humedad relativa del aire del año 2021



Fuente propia.

Tabla 26: Altura del relleno de madera para torres de enfriamiento

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Constante A	A	0.092	-
Constante n	n	0.6	-
Distanciamiento vertical entre pisos	-	1.5	Pies
Valor de N	N	8.786	-
Altura del relleno	Z	10.982	Pies

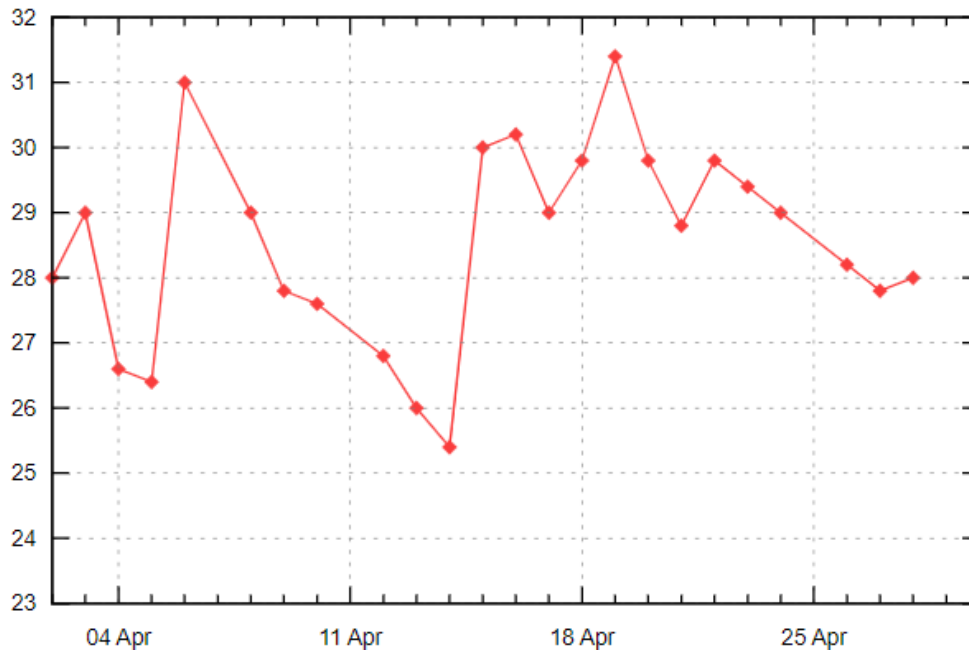
Fuente propia. *Altura del relleno con valores de diseños geométricos para entramados de madera.*

Tabla 27: Carga de refrigeración necesaria por liberar según los valores de diseño

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Carga térmica	$Q_{T,agua}$	1,153,081.78	BTU/h

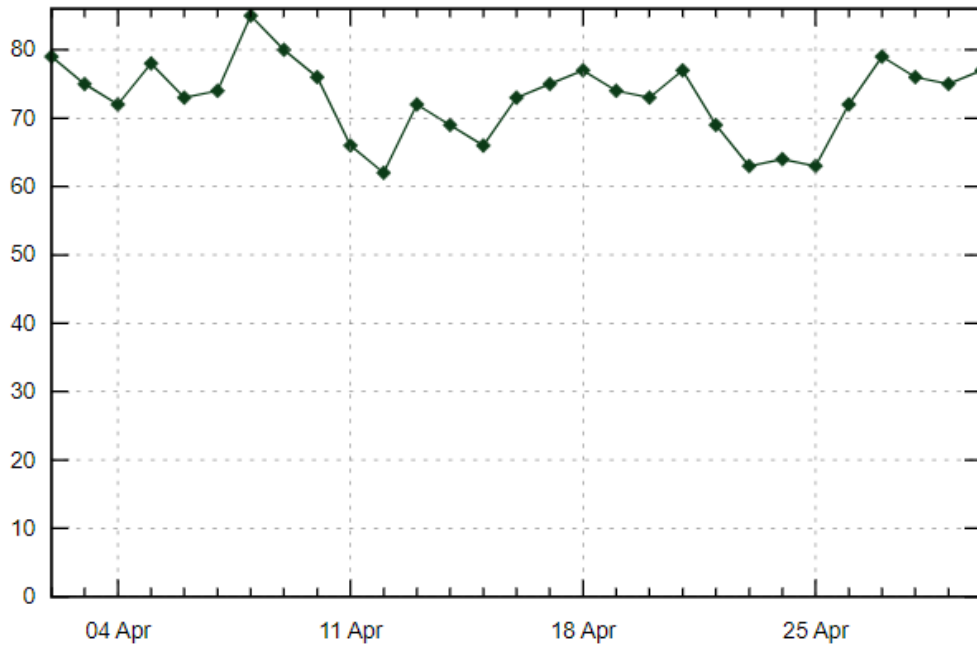
Fuente propia. *Carga térmica generada por el compresor en forma de calor y transferida a la torre de enfriamiento por medio del flujo de agua para ser liberada al medio ambiente.*

Figura 24: Temperatura máxima en la ciudad de Guatemala en época de verano del año 2024



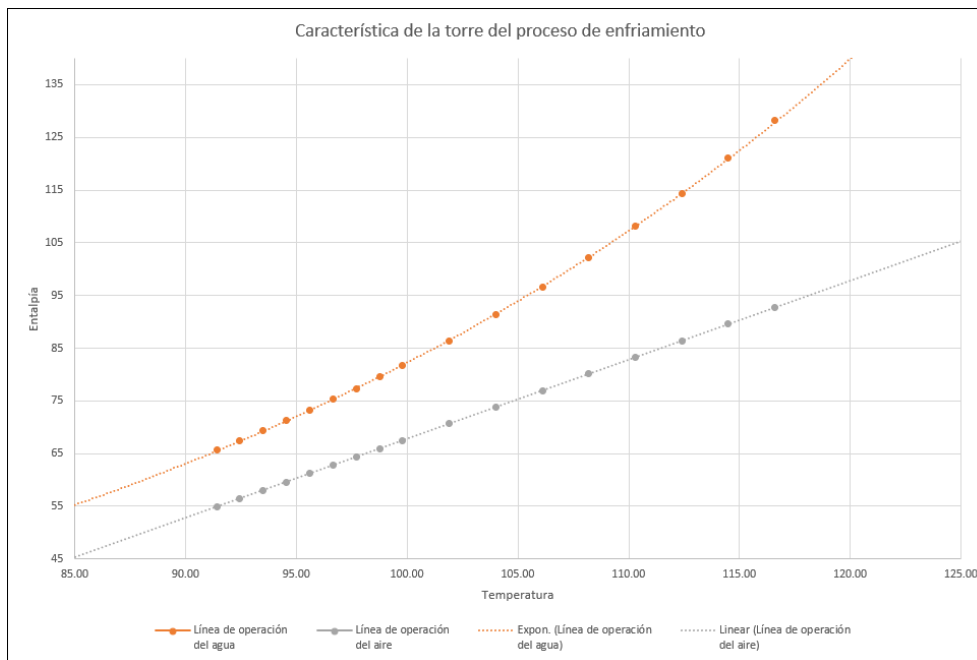
Fuente (Weather Online, [2024b](#)).

Figura 25: Hemedad relativa máxima en la ciudad de Guatemala en época de verano del año 2024



Fuente (Weather Online, 2024a).

Figura 26: Curva característica del proceso de enfriamiento de la torre con valores de diseño del año 2024



Fuente propia. Gráfica que muestra la curva característica del agua en color naranja y la curva característica del aire en color gris para las nuevas condiciones de verano del año 2024.

Tabla 28: Reynolds en la tubería de succión y descarga

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Densidad	$\rho$	62.1032	$Lbm/Pies^3$
Viscosidad dinámica	$\mu$	5.04*10-04	$Lbm/Pies * s$
Viscosidad cinemática	$\nu$	8.12*10-06	$Pies^2/s$
Presión de vapor de agua	Pv	0.73401	Psia
Reynolds de succión	Re	154,025.79	-
Reynolds de descarga	Re	179,668.01	-

Número de Reynolds para flujo turbulento en la tubería de succión y descarga para determinar el diámetro mínimo de operación.

Tabla 29: Factor de fricción en succión y descarga

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Rugosidad equivalente	$\varepsilon$	0.0005	Pies
Factor de fricción succión	$f_{succion}$	0.02455	-
Factor de fricción descarga	$f_{descarga}$	0.02546	-

Fuente propia. Factor de fricción para la tubería de succión y descarga dependiente del coeficiente de rugosidad de la tubería.

Tabla 30: Pérdida de carga total en tubería de succión y descarga

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Pérdida de carga mayor en succión	$h_{L,mayor,succion}$	1.14	Pies
Pérdida de carga mayor en descarga	$h_{L,mayor,descarga}$	15.0	Pies
Pérdida de carga menor en succión	$h_{L,menor,succion}$	5.44	Pies
Pérdida de carga menor en descarga	$h_{L,menor,descarga}$	24.227	Pies
Pérdida de carga total	$h_{L,total}$	45.808	Pies

Fuente propia. Pérdidas de carga menor y mayor en la tuberías de succión y descarga del sistema.

Tabla 31: Diámetro teórico de la tubería de succión

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Diámetro en tubería de succión	$D_{succion}$	0.1710	Pies
Diámetro en tubería de succión preliminar	$D_{succion,preliminar}$	0.2500	Pies
Variación del diámetro de succión preliminar	-	46	%

Fuente propia. Diámetro mínimo para la tubería de succión en base al diámetro preliminar de descarga.

Tabla 32: Diámetro teórico de la tubería de descarga

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Diámetro en tubería de descarga	$D_{descarga}$	0.1678	Pies
Diámetro en tubería de descarga preliminar	$D_{descarga,preliminar}$	0.2083	Pies
Variación del diámetro de descarga preliminar	-	24	%

Fuente propia. *Diámetro mínimo para la tubería de descarga en base al diámetro preliminar de descarga.*

Tabla 33: Carga hidrostática necesaria de la bomba hidráulica

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Factor de corrección de energía cinética	$\alpha$	1	-
Velocidad del agua a la salida de los aspersores	$V_3$	48.99	Pies/s
Altura a la última capa de agua del depósito de la torre	$Z_1$	1.42	Pies
Altura a los aspersores de agua	$Z_3$	5.75	Pies
Carga hidrostática necesaria de la bomba	$H_{necesaria}$	87.46	Pies

Fuente propia. *Carga hidrostática a vencer por la bomba hidráulica de 2 HP según las condiciones de operación del sistema y las pérdidas de carga generadas por accesorios.*

Tabla 34: Potencia útil de la bomba hidráulica

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Potencia útil	$\dot{W}_{bomba}$	2.03	HP

Fuente propia. *Potencia necesaria para que la bomba recircule el agua de enfriamiento venciendo las pérdidas de carga total.*

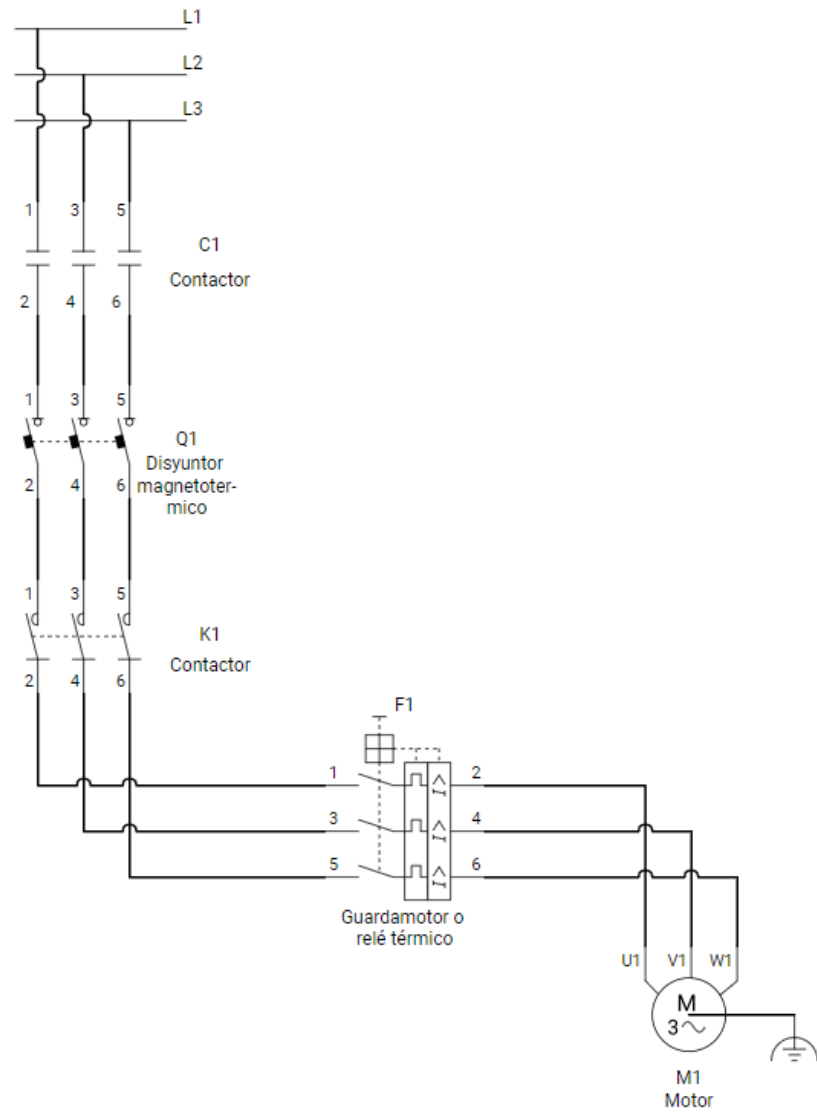
Tabla 35: Altura neta positiva de aspiración NPSH

Magnitud	Variable	Valor	Dimensión
Altura neta positiva de aspiración	NPSH	21.41	Pies

Fuente propia. *Valor máximo generado por la bomba hidráulica para evitar cavitación en la tubería de succión.*

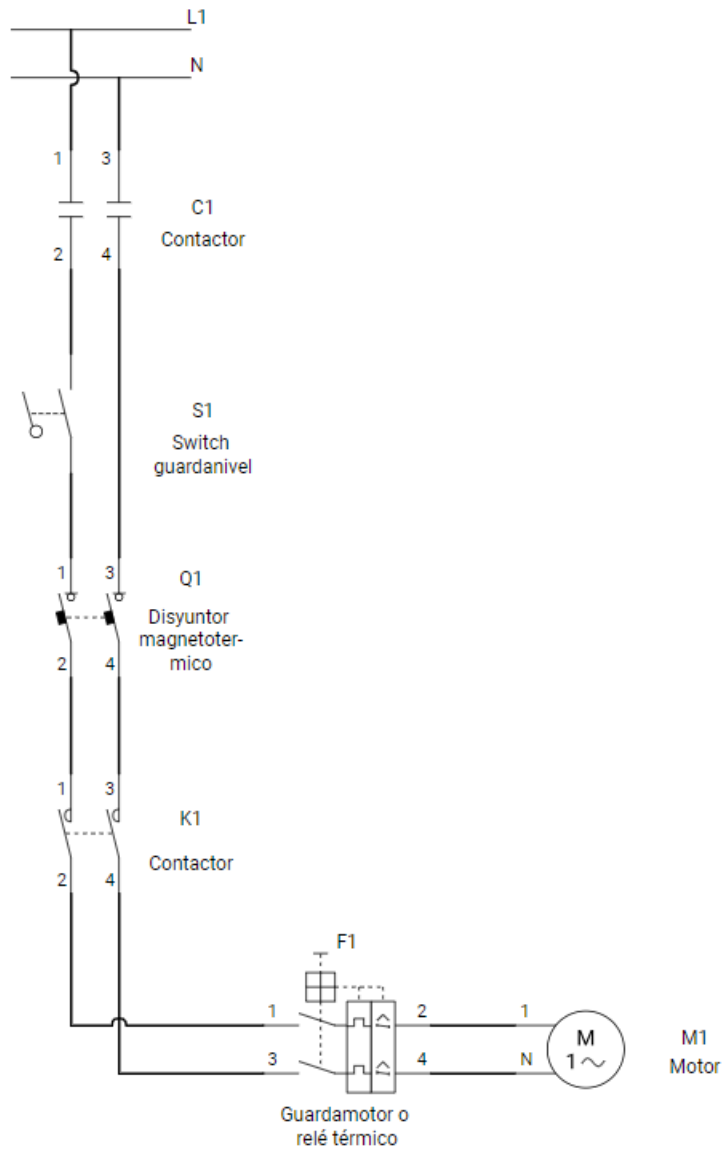


Figura 27: Circuito de fuerza para el motor de la torre de enfriamiento



Fuente propia. *Circuito eléctrico del motor trifásico de 440 voltios que acciona el ventilador de la torre de enfriamiento.*

Figura 28: Circuito de fuerza para la bomba hidráulica



Fuente propia. *Circuito eléctrico del motor monofásico de 220 voltios de la bomba hidráulica.*

---

## Discusión de resultados

---

El propósito principal del diseño de la instalación de la torre de enfriamiento para el proceso de soplado de botellas *PET* en el año 2024, consiste en mejorar la eficiencia del sistema de enfriamiento causado por la falta de implementación de programas de mantenimiento a los equipos de enfriamiento y la falta de implementación del mantenimiento químico al agua de refrigeración. Se menciona el año de elaboración de este documento debido a que más adelante será necesario saberlo.

La falta de implementación de dichos programas, han causado daños irreparables a equipos críticos, como la torre de enfriamiento que es la encargada de liberar la carga térmica del agua proveniente del compresor y a equipos auxiliares como la bomba hidráulica que es la encargada de inyectarle velocidad y presión al flujo de agua de refrigeración. Además, el compresor *Francois* de 40 BAR y la máquina sopladora *SIDEL* están reportando alta temperatura de operación por la disminución de refrigeración y aumento de temperatura del aire comprimido proveniente del compresor.

Dicho esto, se analizaron las combinaciones de los valores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa del año 2013 al 2022, solicitados previamente al INSIVUMEH, para determinar el valor más alto de temperatura de bulbo húmedo con el cual el compresor *Francois* pueda operar aún con el aumento de temperatura de verano. Las combinaciones de los valores del intervalo de los años 2013 al 2022 se muestran en la [Tabla 10](#) y se observa que el valor más alto de temperatura de bulbo húmedo es del año 2021.

En la [Tabla 9](#) se muestran los valores seleccionados de temperatura de bulbo seco y humedad relativa del año 2021. El comportamiento de la temperatura de bulbo seco del aire en el año 2021 fue graficado en la [Figura 22](#) en donde se observó un incremento de temperatura entre el día 70 al 130 que corresponde a la época de verano que es cuando la torre de enfriamiento operará con más esfuerzo. En la [Figura 23](#) se observa el comportamiento de humedad relativa del año 2021 en donde a partir del día 170 al 300 existe un incremento

de humedad relativa en el ambiente debido a la época de invierno.

La razón por la cual se eligió la combinación del promedio de temperatura máxima con el promedio de la humedad relativa fue porque determinan el valor más alto de temperatura de bulbo húmedo. La relación entre el valor de temperatura de bulbo húmedo del aire con el valor de temperatura del agua fría se conoce como aproximación. La aproximación es inversamente proporcional a la capacidad de enfriamiento de la torre; es decir, entre menor sea el valor de aproximación, mayor deberá ser el rendimiento de enfriamiento de la torre.

La curva característica del proceso de enfriamiento de la torre se muestra en la [Figura 21](#) en donde la curva de color naranja representa la línea de operación del flujo de agua y la curva de color gris representa la línea de operación del flujo de aire. Se observa que el valor de aproximación es de 21.78°F y los fabricantes recomiendan que dicho valor sea mayor a 5°F para que la torre de enfriamiento opere sin complicaciones.

La altura del relleno de la torre de enfriamiento se muestra en la [Tabla 26](#) con un valor de 10.982 pies. Es un valor exageradamente alto para torres de enfriamiento de tiro mecánico con rellenos de polímeros y/o metálicos. La razón se debe a que se utilizaron diseños de entramados de madera debido a que el coeficiente de transferencia de masa, sólo se obtiene de forma experimental porque depende del valor del flujo de agua, del flujo de aire, del material del relleno y del diseño de la geometría del relleno. Dichos valores son protegidos bajo propiedad intelectual.

Notar que independiente de la selección del tipo de diseño de entramados de madera mostrados en la [Figura 16](#) no intervendrá en el diseño de la curva característica del proceso de enfriamiento sino que únicamente variará la altura del relleno de la torre de enfriamiento.

La carga térmica mínima que el compresor debe liberar es de 96.09 toneladas de refrigeración que equivalen a 1,153,081.78 BTU/h, mostrados en la [Tabla 27](#). Conociendo la carga térmica y la condiciones del aire ambiente, se procedió a cotizar la torre de enfriamiento con 3 proveedores distintos que cumpliera con las condiciones determinadas. Las 3 distintas propuestas se encuentran en el [Capítulo 11](#), fueron analizadas y se seleccionó la torre de enfriamiento con capacidad de refrigerar 104.02 toneladas de refrigeración que equivalen a 1,248,210.00 BTU/h. Por consiguiente, la torre de enfriamiento seleccionada estaría trabajando al 92% de carga máxima.

Además de cumplir con las condiciones de operación, la torre de *Industrial Mexicana* Modelo IM-FCF-2000-063 fue seleccionada debido a que cumplió con los requisitos y disponibilidad de área para una torre de tiro inducido, debido a que dentro de su estructura se incorpora el ventilador que induce el flujo de aire a lo largo del relleno de la torre para enfriar el agua proveniente del compresor. Esta torre de enfriamiento a contraflujo de tiro inducido libera más carga térmica que la demandada y el valor económico está en la media comparada con las otras propuestas. La oferta de *Reymsa* fue descartada debido al limitado volumen de almacenamiento de agua fría, aunque cumplía con el resto de condiciones. La oferta de *BAC* fue descartada debido a que presentó la oferta económica más elevada y no cumple con los límites de área disponible, ya que el equipo debe estar 3 pies alejado de cada pared como mínimo.

Como se mencionó al inicio de esta sección, los cálculos fueron realizados con los valores del año 2021 y para el año 2024, los valores de diseño incrementaron significativamente

en época de verano. Por lo que se vió obligado a confirmar que la torre de enfriamiento seleccionada pueda operar con los valores de verano del año 2024. Para ello, se obtuvo el valor máximo de temperatura de bulbo seco y humedad relativa registrado en el mes de abril de la estación del Aeropuerto Internacional La Aurora por medio de la página *Weather online*. Se registró un valor de 88.70°F que equivale a 31.5°C de temperatura de bulbo seco y un valor de 85 % de humedad relativa mostrados en la [Figura 24](#) y [Figura 25](#).

Utilizando la carta psicométrica, se determinó el valor de entalpía de bulbo seco de 54.9 BTU/Lb y el valor de temperatura de bulbo húmedo de 84.6°F. El valor de entalpía de bulbo seco fue utilizado para graficar la nueva curva característica del proceso de enfriamiento mostrada en la [Figura 26](#) y la única diferencia, comparada con la curva del año 2021, fue que la línea de operación del flujo de agua se ve más cercana a la línea de operación del flujo de aire. El valor de bulbo húmedo fue utilizado para determinar el valor de aproximación equivalente a 6.80°F, hubo una reducción de 14.98°F comparado con el valor del año 2021. Con estos resultados se concluye que la torre de enfriamiento puede operar con los valores de verano debido a que la carga térmica del compresor sigue siendo la misma, más su desempeño se vería afectado debido a que los fabricantes no recomiendan operar torres de enfriamiento en climas que determinen un valor de aproximación igual o menor a 5°F. Se recomienda cotizar una nueva torre de enfriamiento para los valores de verano del año 2024.

El cálculo del diámetro teórico comparado con el cálculo del diámetro preliminar de la tubería de succión obtuvo un porcentaje de error del 46 % y el cálculo del diámetro teórico comparado con el cálculo del diámetro preliminar de la tubería de descarga obtuvo un porcentaje de error del 24 %. El porcentaje de error para la tubería de descarga no podría mejorarse cambiando el valor del diámetro preliminar porque no existe otro valor comercial próximo, pero se podría asumir una velocidad del fluido menor. Los datos de velocidad de la [Tabla 17](#) fueron asumidos bajo la [Figura 17](#). En caso se quisiera reducir o ampliar los diámetros preliminares de la tubería, se debe volver a determinar el número de *Reynolds*, el factor de fricción de *Colebrook*, la pérdida de carga mayor, la pérdida de carga menor provocada por los accesorios y volver a calcular el valor teórico del diámetro de la tubería.

La bomba centrífuga seleccionada fue el modelo HFM/6B que suministra hasta 49 pies de altura máxima, opera con un flujo volumétrico máximo de 72  $m^3/hr$  y entrega una potencia de 2HP. La misma es centrífuga debido a que el diseño de la instalación exige mayor caudal que altura de suministro. La ficha técnica se encuentra en la [Sección 11.4](#).

Para evitar los mismos daños en el sistema de enfriamiento, se generó una rutina de inspección y limpieza diaria, mensual y anual para las partes de la torre de enfriamiento, el área de instalación y para los componentes auxiliares que se muestra en la [Sección 11.5](#). También se creó un plan de mantenimiento preventivo con enfoque en el área eléctrica, mecánica, soldadura y pintura para las distintas partes de la torre de enfriamiento y los equipos auxiliares en la [Sección 11.6](#). Así mismo, se creó un programa de mantenimiento químico con enfoque en los principales parámetros a medir con su respectivo nivel de referencia para el cuidado del agua de enfriamiento del depósito de la torre en la [Sección 11.7](#).

Por último, se incluyen los planos del diseño de la instalación de la torre de enfriamiento con el objetivo que el lector pueda visualizar los distintos accesorios considerados en la tubería de succión y la tubería de descarga en la [Sección 11.8](#). Se induce al lector en darle la continuidad a las recomendaciones en caso quisiera aportar mejoras al diseño de la instalación

de la torre de enfriamiento con sus distintos accesorios y equipos auxiliares.

---

### Conclusiones

---

1. Se seleccionó la torre de enfriamiento modelo IM-FCF-2000-063 de tiro mecánico inducido a contraflujo de la empresa Industrial Mexicana capaz de liberar 104 toneladas de refrigeración con un incremento del 58 % de eficiencia de enfriamiento.
2. La torre de enfriamiento seleccionada cumple con las dimensiones del área disponible y número de ventiladores integrados en su estructura.
3. La torre de enfriamiento modelo IM-FCF-2000-063 de tiro mecánico inducido a contraflujo de la empresa Industrial Mexicana es capaz de liberar los 1,153,081 BTU/h de carga térmica del compresor trabajando al 92 % de su capacidad de enfriamiento.
4. El sistema opera con un caudal de 94 GPM gracias a la instalación de la válvula balance que es capaz de regularlo.
5. Se seleccionó la bomba centrífuga modelo HFM/6B de la empresa AISA con una potencia de 2HP capaz de recircular el agua entre la torre de enfriamiento y el compresor.
6. Se elaboraron planos del diseño de la instalación de la torre de enfriamiento con sus accesorios de acuerdo a la norma ASME Y 14.5M-2009, que se encuentran en la [Sección 11.8](#).
7. Se elaboró un programa de mantenimiento de rutina en el cual se inspecciona y se limpian las partes de la torre de enfriamiento así como los equipos auxiliares y el área de instalación que se encuentran en la [Sección 11.5](#).
8. Se elaboró un plan de mantenimiento preventivo para torres de enfriamiento con enfoque en el área eléctrica, mecánica, soldadura y pintura que se encuentran en la [Sección 11.6](#).
9. Se elaboró un programa de mantenimiento químico para el agua de enfriamiento de torres de refrigeración considerando parámetros como dureza, sólidos disueltos, pH, nivel de cloro, entre otros que se encuentran en la [Sección 11.7](#).

10. Se pueden operar dos líneas de producción en consecutivo siempre y cuando la carga de aire comprimido no supere los 40 BAR que el compresor puede entregar en su máxima operación. Podrían producir presentaciones de botella distintas en cada línea de operación para compartir la carga neumática.



---

### Recomendaciones

---

- Diseñar un prototipo de laboratorio de torre de enfriamiento, para determinar los valores experimentales del coeficiente de transferencia de masa y así determinar la altura del relleno fabricado de polímeros y/o metales. En esta ocasión se utilizó bibliografía para diseño de rellenos con entramados de madera.
- Aislar las tuberías de agua fría con un aislamiento térmico flexible de espuma como el *armaflex* a la medida del diámetro exterior para evitar que el agua fría que sale de la torre de enfriamiento gane calor.
- Diseñar y fabricar una estructura que soporte y que absorba las vibraciones generadas por el funcionamiento de la bomba hidráulica, así como incluirla dentro del área de máquinas o diseñar una estructura que la proteja contra la intemperie.



- AISA. (2023). *Bombas de alto caudal* (inf. téc.).
- Arnabat C., I. (2018). *¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? Funcionamiento y seguridad* (inf. téc.). Portal sectorial de las instalaciones, Calor y frío.
- Baker, Donald R. & Shryock, Howard A. (2016). A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance. *SPX corporation*.
- Calculating cooling loads. (2004). [https://www.engineeringtoolbox.com/cooling-loads-d\\_665.html](https://www.engineeringtoolbox.com/cooling-loads-d_665.html)
- Calibre de cables. (2021). <https://celasa.com.gt/>
- Cengel, Yunus A. & Cimbala, John M. (2006). *Fluid mechanics: fundamentals and applications* (1st). Mc Graw Hill Education.
- Cofrico. (2022). *¿Que es una torre de enfriamiento industrial?* (Inf. téc.).
- Don W., Green & Marylee Z., Southard. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th). Mc Graw Hill Education.
- Flow in pipes and valves and fittings. (2023). [https://www.gunt.de/images/download/flow-in-pipes-and-fittings\\_english.pdf](https://www.gunt.de/images/download/flow-in-pipes-and-fittings_english.pdf)
- Fraas, Arthur P. & Ozisik, Necati. (1965). *Heat exchanger design*. John Wiley; Sons Inc.
- Goshayshi, Hamid R. (2006). How to design compact mass transfer packing for maximum efficiency. *WIT Transactions on Engineering Sciences*.
- Gratacós, Jordi M., Costa, Martí S., Zorraquino Martín J, Pérez, Paulino P. & Tarodo, Rodríguez J. (s.f.). Guía técnica para la Prevención y Control de la Legionelosis en instalaciones. Ministerio de salud de España.
- Industries, B. (2011). *Film fill media* (inf. téc.). Brentwood Industries, Inc.
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, I. (2007). *Guía técnica de torres de refrigeración* (inf. téc.). Madrid, España.
- IntegraMarkets. (2018). *Gestión y Planificación del Mantenimiento Industrial* (2nd).
- Lacovic, Mirjana S., Banjac, Milos J., Lacovic, Slobodan V. & Jovic, Milica M. (2016). Industrial cooling tower design and operation in The Moderate-Continental climate conditions. *Thermal Science*, 20. <https://doi.org/10.2298/TSCI16S5203L>
- McCabe, Warren L., Smith, Julian C. & Harriot, Peter. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7.ª ed.). Mc Graw Hill Education.

- Meneceur, N., Boulahrouz, S., Khounfais, K. & Bouthari, A. (2018). Theoretical and experimental study of thermal performance within a counterflow wet cooling tower. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13, No. 11.
- Mobley, R. Keith, Higgins, Lindley R. & Wikoff, Darrin J. (2008). *Maintenance engineering handbook* (7.<sup>a</sup> ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc. <https://doi.org/10.1036/0071546464>
- Positive displacement pumps. (2022). <https://dienerprecisionpumps.com/positive-displacement-pumps/>
- Psychrometrics. (2019). <https://daytonashrae.org/psychrometrics/psychrometrics.shtml>
- Qué es la eficiencia de la producción y cómo se alcanza. (2021). <https://www.sicma21.com/que-es-la-eficiencia-de-la-produccion/>
- Qué es y cómo se calcula el NPSH disponible de una bomba centrífuga. (2017). <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-y-como-se-calcula-npsdisp-bomba-centrifuga>
- SPX Cooling Technologies, S. (2009). *Cooling Tower Fundamentals* (2.<sup>a</sup> ed.). SPX Cooling Technologies, Inc.
- Steady flow of incompressible fluids. (2023). [https://www.gunt.de/images/download/intro\\_steady-flow-incompressible-fluids\\_english.pdf](https://www.gunt.de/images/download/intro_steady-flow-incompressible-fluids_english.pdf)
- The American Society of Heating, R., & Engineers, A. C. (2000). Cooling towers. *ASHRAE Towers*, D. C. (2016). *Determining proper cooling tower size* (inf. téc.). Delta Cooling Towers, Inc.
- Water velocities in pipes and tubes should not exceed certain limits. (2003). [https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-water-pipes-d\\_385.html](https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-water-pipes-d_385.html)
- Weather Online, L. (2024a). *Humedad relativa de la estación de medición La Aurora aeropuerto de Guatemala* (inf. téc.). Weather Online, Ltd.
- Weather Online, L. (2024b). *Temperatura máxima de la estación de medición La Aurora aeropuerto de Guatemala* (inf. téc.). Weather Online, Ltd.
- What is a centrifugal pump? (2023). <https://www.rotechpumps.com/what-is-a-centrifugal-pump/>

# CAPÍTULO 11

---

Anexos

---

## 11.1. Propuesta torre de enfriamiento - Industrial Mexicana

**Universidad de Guatemala**  
zona 15, Ciudad de Guatemala,  
Guatemala.

[chi13495@uvq.edu.gt](mailto:chi13495@uvq.edu.gt)  
Tel. +502 55431221

### Atención: Jonathan Abraham Chicoj Tocoy

Atendiendo su amable solicitud, nos permitimos presentar a su consideración nuestra cotización por la siguiente torre de enfriamiento marca **Industrial Mexicana**, modelo IM-FCF-2000-063, seleccionada de acuerdo a las condiciones de operación proporcionadas por usted y anotadas en nuestras hojas de especificaciones técnicas adjuntas.

#### Precios y condiciones de venta

Modelo de la unidad	IM-FCF-2000-063
Cantidad de unidades	1
Precio unitario en Dólares Americanos	11,875.78 USD
Valor total del equipo en Dólares Americanos EXW nuestra planta en Santa Catarina, N.L.	11,875.78 USD

#### Nota importante:

1. La torre aquí cotizada contiene todos los accesorios standard y está completa para operar de acuerdo a las condiciones solicitadas.
2. Los precios de venta son EXW nuestra planta en Santa Catarina, N.L., entendiéndose en Dólares Americanos pagaderos al tipo de cambio a la venta de la fecha de pago, más el Impuesto al Valor Agregado.
3. La hoja de *Términos y condiciones de venta* adjunta forma parte integral de esta oferta.

**Vigencia:**

15 días a partir de esta fecha y quedará sujeta a los Términos y Condiciones de Venta de nuestra forma adjunta.

**Condiciones de pago:**

50% anticipo con su pedido

Saldo contra aviso de que el equipo esté listo para embarque

**Tiempo de entrega:**

10 semanas una vez recibido su pedido y anticipo correspondiente de conformidad. Tiempos de entrega diferentes a los plasmados en esta cotización deben ser de mutuo acuerdo entre el Representante de Ventas IM y el Cliente durante la negociación comercial.

El catálogo de la torre de enfriamiento seleccionada lo puede acceder en la siguiente dirección electrónica:

**Catálogo Serie 2000:** [http://www.industrialmexicana.com/wp-content/uploads/2016/02/IM\\_OneSheet\\_2000\\_v2-1.pdf](http://www.industrialmexicana.com/wp-content/uploads/2016/02/IM_OneSheet_2000_v2-1.pdf)

**Ficha Técnica:** <http://www.industrialmexicana.com/dft/2000/IM-FCF-2000-063-G.pdf>

Sin otro particular y en espera de su pedido, quedamos de ustedes como sus más atentos y seguros servidores.

Atentamente,

**Ing. Daniel Gil Romero**

Vendedor

Móvil: +52 (81) 1544 9307

Email: [daniel.gil@industrialmexicana.com](mailto:daniel.gil@industrialmexicana.com)

Industrial Mexicana S.A. de C.V.



**Marca:** Industrial Mexicana  
**Modelo:** IM-FCF-2000-063  
**Tipo:** Contraflujo de Tiro Inducido en Fibra de Vidrio

<b>1. Condiciones de Diseño</b>	Sistema Ingles	Sistema Métrico
Flujo Total	92.46 GPM	21 m3/hr
Flujo por Unidad	92.46 GPM	21 m3/hr
Temp. Agua entrada	116.60°F	47.00 °C
Temp. Agua salida	89.60°F	32.00 °C
Temp. Bulbo Húmedo	77.00°F	15.00 °C
Rango de Enfriamiento	27.00°F	5.56°C
Carga Térmica Total BTU/H	1,248,210 BTU /Hr	
Altura estática de bombeo	69 pulgadas	

<b>2. Especificaciones Generales por Unidad</b>		
Número de unidades	1	
Largo	67.25 pulg.	1.71 m
Ancho	67.25 pulg.	1.71 m
Altura	119.00pulg.	3.02m
Peso de embarque	1,323.00 lbs.	600.10 kg
Peso de operación	1,984.00lbs.	899.93 kg
Diseño de carga al viento	100 MPH	161 KPH

<b>3. Dimensiones del depósito por unidad</b>		
Largo	67.25 pulg.	1.71m
Ancho	67.25 pulg.	1.71m
Profundidad	17 pulg.	0.43 m
Extensión de Columnas	No Requiere	

#### 4. Equipo mecánico por unidad

Número de ventiladores / aspas	1	
Diámetro de ventiladores	42.00 pulg.	1.07 m
Marca / Modelo	WING FAN / IM-FCF-2000-063V	
Material de fabricación Maza / Aspas	PAG/ PAG	
Capacidad	11,740.00 C.F.M.	
R.P.M.	900.00	
Tipo de motor	TOTALMENTE CERRADO	
Número de motores	1	
Tamaño de cada motor	3.00 HP	2.24 Kw
Marca / Modelo	Westinghouse para operar con VFD	
Velocidad nominal	900.00 RPM	
Caract. Eléctricas (Fases/Ciclos/Volts)	3/60/220-440	
Clase de aislamiento	F	
Tipo de Transmisión	Acoplamiento directo al motor	
<i>Nota: Si el reductor de velocidad trabaja por debajo de 450 RPM de entrada (con variador de frecuencia en el motor) se requiere instalar accesorio para lubricación interna de reductor, con un cargo adicional.</i>		
Flecha de acoplamiento	Directo	
Soporte de equipo mecánico	Acero galvanizado por inmersión en caliente.	

#### 5. Conexiones de agua por unidad

Número de conexiones	4
Uso	Alimentación / Succión / Drenaje / Reposición
Diámetros conex. Aliment. / Succión	4 pulg.
Diámetros conex. Drenaje / Reposición	4 pulg.
Altura aprox. conexión alimentación	69 pulg.

## 6. Materiales de construcción

Depósito de agua fría	De una sola pieza con esquinas redondeadas, fabricado con resina polyester reforzada con fibra de vidrio con marco estructural de lámina de acero galvanizado por inmersión en caliente
Soporte exterior del depósito	Lamina de acero galvanizada por inmersión en caliente
Estructura	Autosoportante en Lámina de Acero Galvanizada por Inmersión
Cubierta de ventiladores	Resina de poliéster isoftálica moldeada, reforzada con fibra de vidrio
Redondel	Resina de poliéster isoftálica moldeada, reforzada con fibra de vidrio
Relleno	Paquetes de PVC laminar rígido con inhibidor UV y antinflama, Modelo CF-1200
Eliminadores de rocío	PVC rígido con inhibidor UV, antinflama, modelo DE-080
Soportes de relleno y eliminadores	Perfiles estructurales de fibra de vidrio poltruida anti UV resistente a la intemperie y antinflama
Louvers	Paquetes removibles de PVC laminar con inhibidor UV y antinflama
Forros	Lámina plana extruida de fibra de vidrio anti UV resistente a la intemperie con puerta de acceso por inspección
Tornillería, tuercas y arandelas	Acero Cadminizado
Sistema de distribución	Fijo de baja presión (2 a 5 psi) formado por un cabezal con brazos rociadores de PVC y espaldas de ABS
Tuberías de distribución externas	Por cuenta del cliente
Válvulas externas	Por cuenta del cliente
Accesorios del depósito de agua fría	Conexión para succión, drenaje y sobreflujo en acero galvanizado por inmersión
Acceso al interior de la unidad	Puerta de acceso a eliminadores de Rocío y plenum del ventilador
Soporte para la unidad	Vigas de acero o concreto diseñadas por otros
Tomas de aire por unidad	Tomas de aire por unidad Por sus cuatro lados



## **SOBRE IM**

**Desde 1962** en Industrial Mexicana nos dedicamos a la fabricación, comercialización e instalación de torres de enfriamiento, tanto abiertas como de circuito cerrado. Buscamos estar siempre a la vanguardia y en contacto continuo con nuestros clientes para una mejor comprensión de sus necesidades técnicas y comerciales. El resultado de tantos años de investigación y experiencia nos permite ofrecer grandes ventajas al consumidor a través de nuestras soluciones.

## **MISIÓN**

Ser la opción de mejor valor para nuestros clientes ofreciéndoles sistemas innovadores de disipación térmica optimizando sus procesos con productos y servicios de calidad superior, actuando con responsabilidad social y financiera ante las partes interesadas.

## **VISIÓN**

Incrementar nuestra participación en el mercado nacional e incursionar en el mercado internacional, colocándonos entre los principales proveedores de torres de enfriamiento y sistemas de refrigeración, además de potenciar nuestra línea de productos IM Acero, garantizando a nuestros clientes la funcionalidad, calidad y entrega a tiempo en todos nuestros productos a través del cumplimiento de los estándares de CTI e ISO, fomentando el compromiso con nuestra gente y la sociedad siendo una Empresa Socialmente Responsable

## **PILARES /**

### **DISEÑO E INNOVACIÓN**

Estamos en investigación continua y desarrollamos soluciones únicas para torres de enfriamiento. Nuestros esfuerzos están siempre orientados a eficiencia, desempeño y ahorro. Esa determinación es lo que nos ha llevado lejos.

### **SERVICIO Y EXPERIENCIA**

60 años de experiencia lo dicen todo, hemos trabajado exitosamente en todas las industrias y tenemos la capacidad para solucionar cualquier situación. Nuestra misión es fabricar las mejores torres y mantenerlas trabajando eficientemente.

### **AUTOMATIZACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA**

La automatización es el futuro y en IM hemos desarrollado controladores de punta para que tus torres funcionen de la manera más eficiente todo el tiempo, aportando así ahorros energéticos que benefician a todos.

### **INGENIERÍA APLICADA**

Con apoyo del departamento de ingeniería desarrollamos proyectos llave en mano, integrando nuestros equipos de disipación térmica a los distintos equipos o procesos del cliente.

#### **MONTERREY**

**T. 811 158-5300**  
ventas@industrialmexicana.com  
www.industrialmexicana.com

Galeana 601 Ote.  
El Lechugal, Sta. Catarina  
N.L. México - 66376

#### **Ingeniería y diseño**

Desarrollamos proyectos *llave en mano*, integrando nuestros equipos a distintos equipos o procesos.



SERIE **2000**

**TORRE DE ENFRIAMIENTO CONTRAFLUJO**

*La Serie 2000 ofrece las ventajas de la fibra de vidrio, es ligera, inoxidable y fácil de transportar e instalar.*



**Bajo nivel de sonido y vibración**

- Capacidad: 13 a 381 toneladas (38 a 1,142 GPM @ 95°F / 85°F / 78°F)
- Estructura y paredes de fibra de vidrio
- Bajo costo de instalación y operación
- Bajo nivel de sonido y vibración
- Baja potencia de consumo por tonelada
- Fácil mantenimiento
- Sistema de distribución
- Reductor de velocidad
- Soporte de equipo mecánico
- Charola de agua fría
- Paredes de fibra de vidrio
- Estructura de fibra de vidrio
- Louvers de entrada de aire
- Relleno
- Eliminadores de rocío

**VENTAJAS IM**



**Bajo costo de envío**

Los modelos IM Serie 2000 son embarcados totalmente ensamblados ya que su diseño permite que la estructura se deslice hacia abajo y el cuerpo de la torre se apoye en el interior de la charola de agua fría, reduciendo su altura durante la transportación. El montaje en el sitio es rápido porque el izaje a su altura estándar es sencillo y práctico, con la ayuda de las guías ubicadas en las columnas.



# Una solución para cada situación



Nuestro departamento de Ingeniería Aplicada desarrolla proyectos llave en mano, integrando nuestros equipos de disipación térmica a los distintos equipos y/o procesos del cliente.

- Suministro e instalación de equipos
- Obra mecánica y obra eléctrica
- Automatización y control
- Capacitación

## SERVICIOS DE INGENIERÍA, PROYECTOS E INSTALACIÓN DE:

- Sistemas de enfriamiento
- Balance de energía y materia
- Sistemas hidráulicos
- Disipación de calor
- Sistemas HVAC
- Generación, cogeneración y trigeneración de energía
- Sistemas de vapor
- Análisis de materiales
- Cálculo de tuberías
- Estructuras
- Sistemas de control automático de procesos
- Proyectos de agua helada

# INDUSTRIAL MEXICANA, S.A. DE C.V.

## TERMINOS Y CONDICIONES DE VENTA

### **1.- VIGENCIA**

La Relación contractual entre Industrial Mexicana, S.A. de C.V. y el cliente, se considerará en vigor a partir de que el cliente estampe su firma de aceptación, ya sea en el presupuesto mismo ó en la Orden de Compra expedida directamente por el cliente, y a su vez Industrial Mexicana, S.A. de C.V., acepte por medio de su Departamento de Crédito el pedido y reciba a satisfacción el anticipo correspondiente que sea estipulado.

### **2.- RESPONSABILIDADES DE INDUSTRIAL MEXICANA, S.A. DE C.V.**

a) Industrial Mexicana, S.A. de C.V., será responsable de hacer la entrega del equipo, de acuerdo a las especificaciones de materiales indicados en la oferta, tanto en cantidades como en calidad, quedando fuera de toda responsabilidad el suministro de materiales ó equipos que expresamente no se encuentren indicados en dicha oferta. Industrial Mexicana, S.A. de C.V., quedará en libertad de substituir marcas ó materiales por otros de igual calidad, sin que por este motivo sea responsable de incumplimiento a lo especificado en la oferta base, a menos de que específicamente se indique lo contrario.

### **3.- RESPONSABILIDADES DEL CLIENTE**

a) Será responsabilidad del cliente, cubrir oportunamente el anticipo pactado y liquidar las estimaciones parciales ó facturas dentro del plazo contratado. El incumplimiento por parte del cliente a las condiciones de pago, será causa de suspensión de actividades, y no podrá responsabilizarse a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., por el cumplimiento de la obra, hasta en tanto queden cubiertos los pagos pendientes a satisfacción de Industrial Mexicana, S.A. de C.V., y ajustándose consecuentemente los plazos de entrega.

b) En caso de que Industrial Mexicana, S.A. de C.V. no pueda ejecutar la obra en el plazo pactado por falta de información que debe suministrar el cliente, los plazos de entrega se prorrogarán en un tanto igual al que sean suspendidas las obras por este concepto.

### **4.- PROPIEDAD DE LOS MATERIALES**

Industrial Mexicana, S.A. de C.V., será propietaria de todos los materiales objeto del contrato y será responsable de su embarque Libre a Bordo en Planta en Santa Catarina, N.L., pasando a ser propiedad y responsabilidad absoluta del cliente, los materiales que hayan quedado cubiertos por la nota de remisión y talón de embarque respectivos aún cuando éstos no hayan sido facturados.

### **4.1 IDENTIFICACION DE MATERIALES**

Industrial Mexicana, S.A. de C.V., identificará con su número de parte, descripción y cantidad los materiales que embarcará, anexando a éstos las Listas de Empaque correspondientes.

### **5. PLAZOS DE ENTREGA**

Industrial Mexicana, S.A. de C.V., se compromete a entregar los materiales objeto de la obra contratada en el plazo estipulado, sin embargo no podrá hacerse responsable por demoras en la entrega debido a escasez de materiales, incumplimiento de terceras personas, atrasos por trámites aduanales, rotura de maquinaria y por causas de fuerza mayor fuera de su control.

### **6. RECLAMACIONES**

Todos los materiales viajarán con seguro por cuenta del cliente y toda reclamación por materiales faltantes deberá hacerse a la compañía transportista, ó hacer aplicable el seguro por daños y faltantes a la compañía aseguradora responsable, en caso de que ésta sea una entidad moral distinta a la de la transportista. De esta reclamación deberá enviarse una copia a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., con objeto de fabricar y enviar de nuevo los faltantes con cargo al cliente. Posteriormente, el cliente deberá hacer su pedido por los materiales faltantes.

En caso de reclamaciones por desperfectos ó materiales fuera de especificación, deberá notificarse por escrito a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., en un plazo no mayor de 10 días. Industrial Mexicana, S.A. de C.V., no se hace responsable por reclamaciones formuladas después de este plazo entendiéndose que al transcurrir el mismo, el cliente acepta como buenos los materiales, objeto del embarque recibido.

### **7.- ALMACENAJE**

Industrial Mexicana, S.A. de C.V., almacenará en su bodega todos los materiales objeto de la obra contratada y los mismos permanecerán bajo su responsabilidad hasta el momento de embarque. En caso de que el cliente no acepte el embarque de los materiales por causas ajenas a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., éstos quedarán almacenados a disposición del cliente en las bodegas de Industrial Mexicana, S.A. de C.V., bajo la absoluta responsabilidad del cliente en cuanto a riesgos de incendio y deterioro, para lo cual el cliente deberá obtener una póliza específica de riesgos que cubra el valor de los materiales almacenados por su cuenta y orden. Adicionalmente el cliente deberá cubrir a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., por concepto de almacenaje, la cantidad de 8% del valor de los materiales mensualmente, sin que por esto se prorroguen ó se atrasen los pagos del equipo ó servicio contratados.

Ver forma FVET-06 para Instrucciones de Almacenamiento de Materiales ó Refacciones Varias.

Ver instrucciones de Instalación e Izaje correspondientes al Equipo ó Unidad completa que se ésta cotizando.

### **8.- INSPECCIONES O RECHAZOS**

El cliente tendrá derecho a inspeccionar los materiales objeto del contrato en forma previa a su embarque. Los materiales rechazados serán inspeccionados por Industrial Mexicana, S.A. de C.V., y en caso de ser aceptado el rechazo se procederá a reparar ó a cambiar la pieza a criterio del fabricante. En caso de conflicto, se recurrirá a un perito en la materia de que se trate, para que actúe como tercero para emitir su fallo, que será inapelable y aceptado por ambas partes.

### **9.- CANCELACIONES**

Una vez aceptada la Orden de Compra del cliente ó su aceptación en copia de la oferta, la obra objeto del contrato no podrá ser cancelada. En caso de que Industrial Mexicana, S.A. de C.V., en forma extraordinaria aceptase una cancelación, el cliente deberá liquidar a la misma el valor de todos los materiales fabricados a la fecha de la cancelación, así como también las obligaciones contraídas con otros proveedores que no puedan ser canceladas.

## **10.- INSTALACION**

a) La Instalación del equipo objeto del contrato incluye la mano de obra, así como gastos de viaje redondo por una sola vez y hospedaje y viáticos del personal.

b) El monto de la instalación está calculado tomando como base el salario mínimo existente en Monterrey, N.L., a la fecha de la cotización. Queda expresamente aceptado por el cliente, que cualquier cambio en el salario mínimo que surja después de la fecha de la cotización, modificará el monto de la parte no ejecutada de la instalación, en la misma proporción en que aumenten los salarios mínimos.

c) Instalaciones que se efectúen en Compañías ó Instituciones que por obligaciones sindicales exijan la contratación del personal sindicalizado ó personal independiente, pero contratado sobre las bases del tabulador sindical, serán objeto de cargos adicionales calculados sobre la base diferencial de precio de mano de obra, entre el salario mínimo legal y el contractual con base en semana de 48 hrs. laborables. Este porcentaje de diferencia deberá ser liquidado como extra por el cliente.

d) Todas las cuotas sindicales ó municipales que Industrial Mexicana, S.A. de C.V., tenga que cubrir al Sindicato de la empresa ó al municipio del lugar de la obra, deberán ser cubiertas en forma extraordinaria por el cliente a Industrial Mexicana, S.A. de C.V.

e) El cliente deberá notificar por escrito a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., la fecha aproximada de la ejecución de la instalación con una anticipación de 30 días, con el objeto de que Industrial Mexicana, S.A., de C.V. pueda programar el envío del personal necesario.

Si al arribo del personal de instalación, no fuera posible ejecutar la misma, debido a que el cliente no ha terminado la cimentación de la torre, o habiéndola terminado, ésta no se encuentra de acuerdo a los planos previamente proporcionados al cliente para su construcción y exista la necesidad de hacer cambios que demoren la instalación de la torre, el cliente se obliga a liquidar a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., el doble del salario mínimo más gastos de hospedaje y viáticos a todo el personal contratado y durante el tiempo que permanezcan inactivos por este motivo, de lo contrario liquidará los gastos de viaje redondo del personal contratado más el doble del salario mínimo diario por el tiempo perdido.

f) Diez días antes del inicio de la instalación, el cliente deberá de colocar por su cuenta, todos los materiales que forman parte de la torre a una distancia horizontal libre de obstáculos no mayor de 50 m. del sitio de la obra. Todos los acarreos y maniobras necesarios para cumplir este requisito serán por cuenta del cliente.

g) El precio de la instalación ha sido calculado tomando en consideración un desplante de obra con una altura no mayor de 2 m. En caso de que la instalación deba ejecutarse desplantando de la torre a una altura superior a la previamente señalada, el cliente deberá notificar por escrito a Industrial Mexicana, S.A. de C.V., la altura de desplante con el objeto de modificar el precio de la instalación, de acuerdo al grado de dificultad y de tiempo adicional necesario. El cliente estará de acuerdo en aceptar una modificación justificada en el precio de la instalación por este motivo.

h) El cliente deberá proporcionar por su cuenta energía eléctrica en 220 V, 60 Hz para una capacidad aproximada de 25 Amps. por medio de un interruptor de navajas con fusible de 3 x 30 Amps. colocado a una distancia no mayor de 2 mts. del borde longitudinal del basín al centro del mismo.

i) El cliente deberá proporcionar por su cuenta agua potable para nuestro personal de Instalación, así como Servicios Sanitarios.

## **11.- IMPUESTOS, FIANZAS Y SEGUROS:**

a) El cliente liquidará el 16% del I.V.A., por todos aquellos conceptos que sean facturados por Industrial Mexicana, S.A. de C.V., ó sus Sub-Contratistas.

b) En caso de que el cliente requiera fianzas de garantía para cualquier concepto, éstas serán gestionadas por Industrial Mexicana, S.A. de C.V., a favor del cliente, pero su monto será cubierto directamente por el beneficiario.

c) Industrial Mexicana, S.A. de C.V., será responsable por daños a terceros, derivados de la instalación del equipo en el sitio de la obra, hasta por una cantidad igual al valor de la mano de obra utilizada en dicha instalación, siempre y cuando ésta sea ejecutada directamente por Industrial Mexicana, S.A. de C.V. Si el comprador requiriese un seguro de obra mayor, éste será cubierto directamente por el beneficiario.

## **12.- GARANTIA**

Los Equipos y Refacciones suministradas por Industrial Mexicana, S.A. de C.V. están Garantizados contra defectos de materiales y mano de obra por un período de 12 meses contados a partir de la fecha de inicio de operación del equipo o 18 meses a partir de la fecha de embarque; lo que suceda primero. Sin embargo, se garantizan contra defectos en materiales por 3 años contados a partir de la fecha de embarque o inicio de operación del equipo, únicamente los siguientes componentes originales del equipo: ventiladores, reductores de velocidad, coples, motores eléctricos y soportes de equipo mecánico.

Las piezas que se suministren en garantía del equipo original, se garantizarán contra defectos en materiales por un período de 12 meses a partir de la fecha de embarque o hasta la expiración de su garantía original; lo que ocurra primero.

Las Garantías descritas, aplicarán cuando los equipos se hayan registrado en Industrial Mexicana, S.A. de C.V., operen bajo condiciones normales de trabajo, se operen con los voltajes especificados, conforme a lo establecido en los manuales de operación y mantenimiento y efectuado por personal autorizado por Industrial Mexicana, S.A. de C.V. Industrial Mexicana, S.A. de C.V. reparará ó repondrá cualquier parte ó partes que al ser devueltas a nuestra fábrica, junto con copia de su bitácora de mantenimiento, resulten defectuosas al pasar nuestra inspección. El envío del componente original hasta nuestra fábrica, deberá ser flete pagado y los fletes de devolución, serán por cobrar.

La Garantía se hace nula en caso de que se intercambien piezas o utilicen refacciones no autorizadas por Industrial Mexicana, S.A. de C.V.

No quedan comprendidas dentro de esta garantía, partes ó materiales, que no forman en sí el conjunto de la unidad.

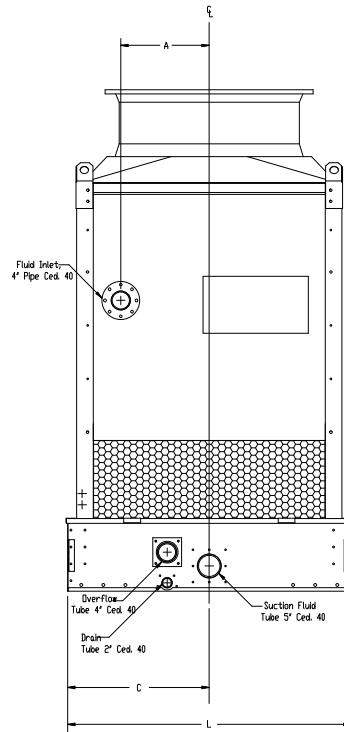
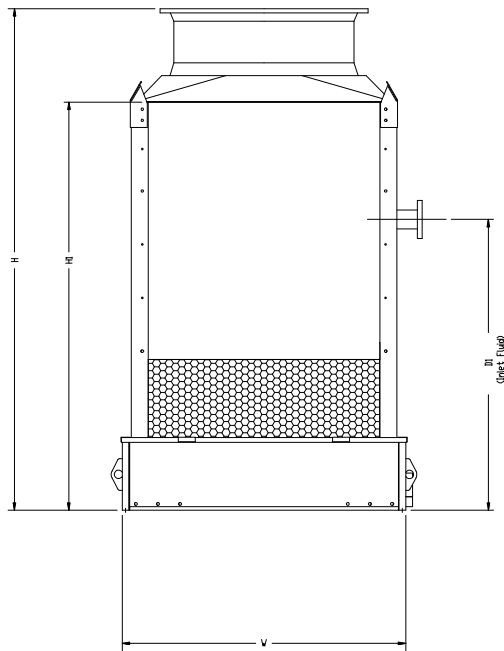
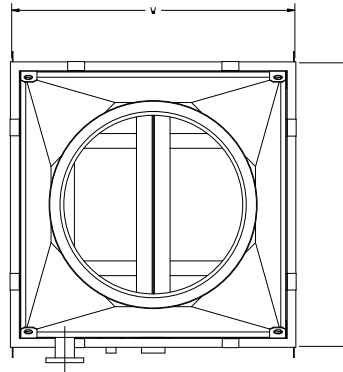
## **13.- CAUSAS DE FUERZAS MAYOR**

Serán causas de fuerza mayor, huelgas, motines, actos de la naturaleza no controlables como huracanes, incendios, terremotos, inundaciones y cualquier otro que impida el cumplimiento del contrato por causas no directamente imputables al fabricante.


## **14.- LEYES APLICABLES**

Tanto Industrial Mexicana, S.A. de C.V., como el cliente, convienen en zanjar cualquier diferencia resultante de este convenio, ante las autoridades correspondientes con sede en Monterrey, N.L.



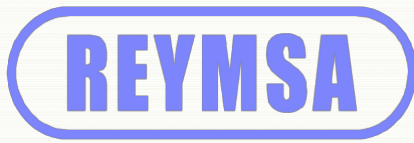


Model	Dimensions (Inches)							Weight (Lbs.)	
	W	L	H	H1	Dt	A	C	Shipping	Operation
IM-FCF-2000-063-G	67.25"	67.25"	119.00"	97.00"	69.00"	21.00"	33.62"	1323	1984



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: All Dimensions are in inches		Date	INDUSTRIAL MEXICANA S.A. de C.V.	
TOLERANCES: Fractional: ± 1/8" Angular: ± 1° Two Places Decimal: ± 0.06		Drawn By:		
MATERIAL: N.A.		Date	Product Model Number: <b>IM-FCF-2000-063-G</b>	
WEIGHT:		Date		
SHEET 1 OF 1		PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF INDUSTRIAL MEXICANA S.A. DE C.V. ANY USE OR REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF INDUSTRIAL MEXICANA S.A. DE C.V. IS PROHIBITED.		Part Description: Backflow Tower, Model 063-GS
SCALE: 1:48		SIZE	Imp. / Part No.	REV.
		C	IM-FCF-2000-063-G	00

## 11.2. Propuesta torre de enfriamiento - Reymsa



## TORRES DE ENFRIAMIENTO

No. Cotización	CGUAT-080923-7994-1	Fecha	Septiembre 08, 2023
----------------	---------------------	-------	---------------------

CLIENTE	
Nombre	Universidad del Valle de Guatemala
Atención	Abraham Chicoj
Dirección	Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Teléfono	502 55431221
E mail	chil3495@uvg.edu.gt
Referencia	Universidad del Valle de Guatemala

Atendiendo su amable solicitud ponemos a su disposición nuestra cotización por el suministro de torres de enfriamiento Marca REYMSA bajo las siguientes características:

Equipo	Torre de Enfriamiento
Marca	REYMSA
Modelo	RT-303102-A
Potencia Unitaria	Un (01) Motor de 2 Hp
No. de Torres	Una (01) Torre de Enfriamiento.
Certificación	Capacidad Térmica Certificada por el COOLING TECHNOLOGY INSTITUTE (CTI), De acuerdo al Standard de Certificación para Torres de Enfriamiento STD-201
Datos Técnicos Unitarios	
Flujo	93 gpm
Temp de entrada	116 °F
Temperatura de salida	89.6 °F
Temp. De bulbo húmedo	68.5 °F
Lugar de Operación	Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Precio por el Suministro de una (01) Torre de Enfriamiento REYMSA Modelo RT-303102-A.	\$ 7,500.00 USD
---	-----------------



## TORRES DE ENFRIAMIENTO

Servicio de Transporte Terrestre para una (01) Torre de Enfriamiento REYMSA Modelo RT-303102-A. Condición LAB Ciudad Hidalgo, Chiapas México.

Precio Flete Terrestre	\$ 3,500.00 USD
------------------------	-----------------

Precio Total	\$ 11,000.00 USD
--------------	------------------

### NOTAS GENERALES:

- 1.- Precios en Dólares Americanos USD
- 2.- Condiciones de Entrega: LAB Ciudad Hidalgo, Chiapas México, en caso de contratar el flete. De lo contrario, EXWORK en Planta REYMSA, Monterrey, N.L. México.
- 3.- Tiempo de entrega: 20 a 22 semanas a partir del pago por el anticipo.
- 4.- Condiciones de pago: 50 % Anticipo, 50 % Contra aviso de embarque.
- 5.- No Incluye instalación.
- 6.- Incluye un (01) juego de Dibujos Técnicos y Hojas de Especificaciones.
- 7.- Precios sujetos a cambio sin previo aviso.

Agradecemos de antemano la oportunidad de servirles y quedamos de Ustedes para cualquier aclaración a la presente.

Lic. Rodrigo Caceres  
Gerente Regional

Date: September 11th, 2023

Project Name	Model	Quantity	HP Total
Universidad del Valle de Guatemala	RT-303102-A	1	2

Performance Data	
EWT (F)	116
LWT (F)	89.6
WBT (F)	68.5
Total Required Flow Rate (gpm)	93.0
Total Nominal Flow Rate (gpm)	97.2
Nominal Flow Rate per Unit (gpm)	97.2
Total Required Heat Load (Btu/h)	1,228,582

Water Data Per Unit	
Evaporated Water Rate (gpm)	2.09

Unit Data	
Quantity of Motors	1
Motor HP	2.0
Quantity of Fans	1
Air Flow (cfm)	6,370
Basin Capacity (gal)	19
Shipping Weight (lb)	845
Operating Weight (lb)	1,147
Tower Configuration	SINGLE FAN
Free-field S.P.L. at 5 ft(dBA)	76
Free-field S.P.L. at 30 ft(dBA)	61
Free-field S.P.L. at 50 ft(dBA)	56

Dimensions	
Length (in)	44.00
Width (in)	38.00
Height (in)	134.00

Connection Diameters	
Hot Water Inlet (in)	2 1/2
Cold Water Outlet (in)	2 1/2
Overflow (in)	3/4
Water make-up (in)	1/2
Drain (in)	1
Purge (in)	1/2

**Notes:**

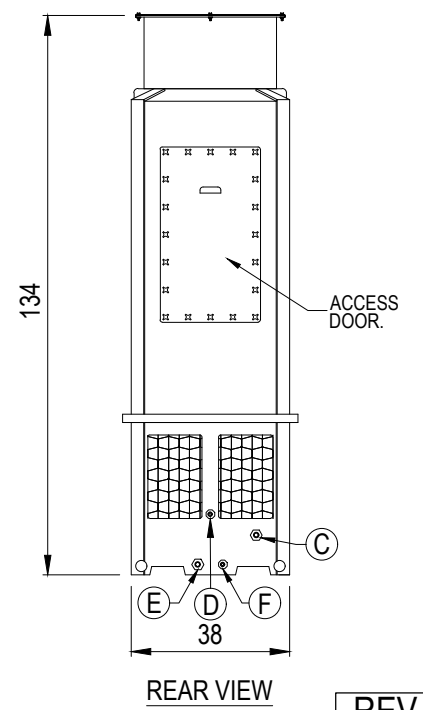
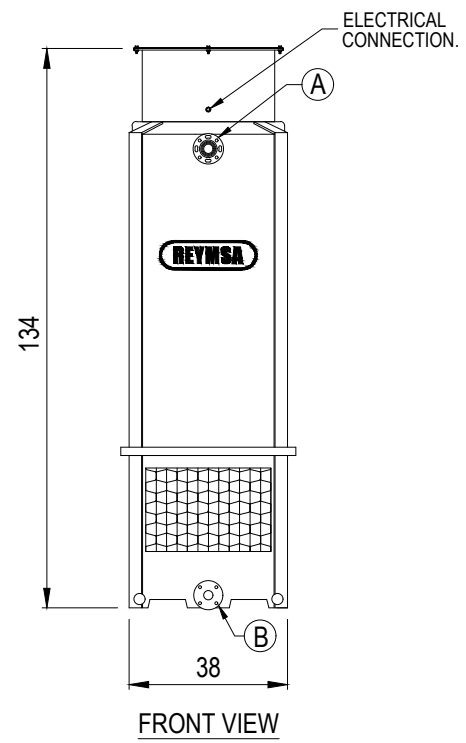
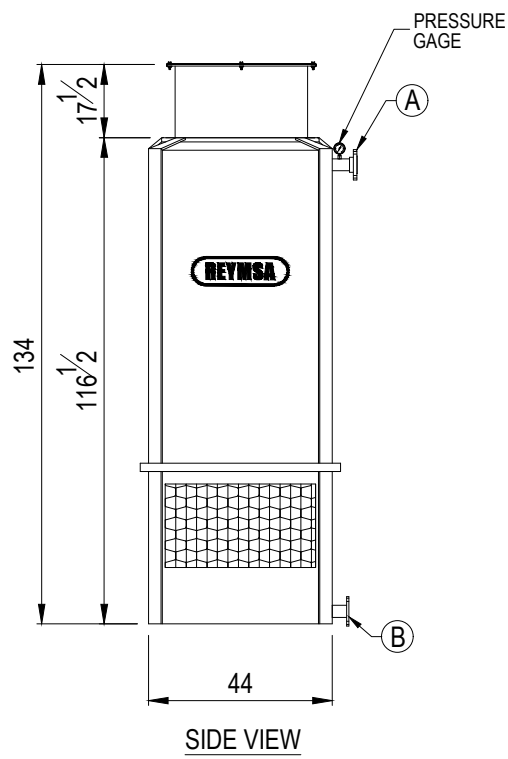
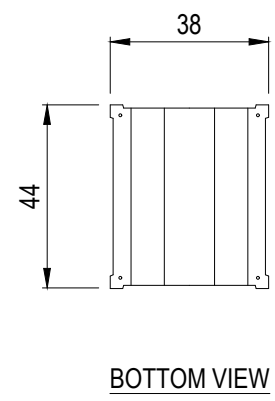
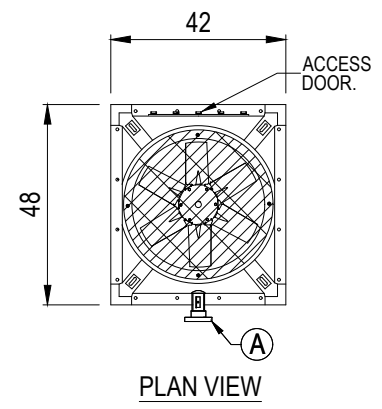
- (3)Ft Fill Type CF-1200
- Standard Fan Selection
- Motor 2.0 HP, 230/460 V, 6.0/3.0 Amp, 3ph, 60Hz, 1200 RPM
- No Noise Neither Space Restrictions
- **Sound data is calculated under Free field conditions, not taking into account any reflections. This sound data should be used as guide line only**
- **Approximate dimensions and weights. Refer to Factory for more information.**
- **Exceed the Energy Efficiency per ASHRAE Standard 90.1-2016**

Location: Guatemala	From:
Attention: Abraham Chicoj	Company:
Company: Universidad del Valle de Guatemala	Phone:
Date: September 11th, 2023	E-mail:

CONNECTION DIAMETER		INCL.
(A) Hot Water Inlet:	1 FLANGE:	2-1/2"Ø
(B) Cold Water Outlet:	1 FLANGE:	2-1/2"Ø
(C) Overflow:	1 FPT:	3/4"Ø
(D) Water make-up:	1 FPT:	1/2"Ø
(E) Drain:	1 FPT:	1"Ø
(F) Purge:	1 FPT:	1/2"Ø

- NOTES:
- DO NOT USE FOR CONSTRUCTION. REFER TO FACTORY CERTIFIED DIMENSIONS.
  - ALL PIPING AND PIPING SUPPORT TO BE SUPPLIED AND FABRICATED AT TIME OF INSTALLATION BY OTHERS.
  - DO NOT SUPPORT PIPING FROM UNIT CONNECTIONS.
  - MAKE-UP WATER PRESURRE: 20 - 50 psi.
  - MAXIMUM TOWER OPERATION PRESSURE: 10 PSIG.
  - HARDWARE & ACCESORIES SHIP INSIDE IN THE BASIN.
  - REFER TO CERTIFIED DRAWINGS FROM THE FACTORY FOR BOLT HOLE LOCATIONS.

### MODEL RT-303102-A



**PRODUCT DRAWING**  
 MODEL RT-303102-A  
 MOTOR 2 HP  
 SHIPPING WEIGHT: 845 LB.  
 OPERATING WEIGHT: 1,265 LB.

**REYMSA COOLING TOWERS, INC.**  
[www.reymrsa.com](http://www.reymrsa.com)

Date: NOVEMBER, 2019  
 Revised: A.R./D.G.  
 Dwg. Scale: None  
 Dimensions: Inches  
 # Dwg.: RT-303-A-002



REV.1



### 11.3. Propuesta torre de enfriamiento - BAC

STRONG INTERNACIONAL CENTRO AMERICA S.A: Guatemala | wgarzaro@stronglatam.com | www.stronglatam.com | +(502) 4519-2467 | Calzada La Paz; 18-40 zona 5, Ofibodegas "CENTRO 5"; Bodega #122; Ciudad de Guatemala

**Cliente:** Universidad del Valle de Guatemala

**Términos de Pago:** 50% OC / 50% Contra entrega

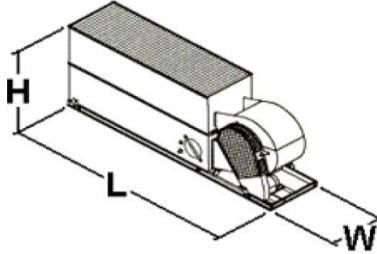
**Atención:** Jonathan Chicoy

**Término de Entrega:** Exworks (EXW)

**Correo:** chi13495@uvg.edu.gt

**Tiempo de Entrega:** 12-14 Semanas

**Proyecto:** UVG TORRE

Línea	Cant.	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
A1	1	<p>Torre de enfriamiento de circuito abierto Modelo VTL-027-F</p> <p>Flujo: Temp ent: 116.6°F Temp Sal: 89.6°F Temp Bulbo Húmedo: 69°F Motor del ventilador: 2HP</p>  <p><b>Engineering Data, per Unit</b></p> <p>Unit Length: 07' 00.75" Unit Width: 04' 01.25" Unit Height: 06' 06.25"</p>	\$ 15,496.56	\$ 15,496.56

Notas: -Precio en dólares estadounidenses

- Forma de pago: A convenir

- Plazos de Entrega Estimados : Los Arriba Mostrados

-Los tiempos de entrega ofrecidos, son definidos por Los fabricantes y podrán ser modificados por ellos sin previo aviso, sin que esto implique ninguna responsabilidad para Strong Internacional.

- Oferta Valida por las cantidades arriba mostradas, cualquier cambio en ella quedara sujeta a una revisión de precios.

- Favor de leer detenidamente los Términos y condiciones de Venta en la siguiente Pagina

Para agilizar su pedido toda Orden de Compra debe ser enviada a alguno de estos correos: [jmatheu@stronglatam.com](mailto:jmatheu@stronglatam.com), [vsolorzano@stronglatam.com](mailto:vsolorzano@stronglatam.com),

**Total** \$ 15,496.56



## TERMINOS Y CONDICIONES DE VENTA

- 1. Productos:** Los productos incluidos cumplen con los estándares del fabricante. Es responsabilidad del comprador determinar si estos productos son satisfactorios de acuerdo a las especificaciones suministradas de los equipos.
- 2. Uso final:** STRONG no es responsable de la aplicación o uso que se haga de los productos incluidos, ni tampoco de la instalación o costos operacionales que se incurran con estos productos.
- 3. Cotizaciones:** Tienen una validez de 15 días, después de este lapso están sujetas a cambios sin previo aviso. Los precios serán ajustados ante cualquier variación en cantidades u omisión de alguno de los artículos presentados en la cotización. STRONG no es responsable por cualquier error tipográfico o de reproducción que haga incurrir en una mala de interpretación por parte del cliente de la oferta presentada.
- 4. Orden de compra y aceptación:** Las órdenes de compra deben ser enviadas al correo: ordenes.hn@stronglatam.com, mediante el cual se dará la revisión y aprobación. Cualquier término(s), condición(es) o previsión(es) incluida(s) en la orden de compra del cliente y la (s) cual(es) no sea (n) consistente(s) con las condiciones indicadas en la cotización respectiva no serán aplicados a la venta o entrega de los productos. La aceptación será comunicada por un e-mail incluyendo un documento denominado "Order Acknowledgement". El cliente tiene 24 horas después de recibir el "Order Acknowledgement" para aceptar o rechazar las condiciones de venta, de no darse el comunicado por parte del cliente se darán como aceptadas las condiciones indicadas en la cotización.
- 5. Especificaciones técnicas:** Si el cliente lo requiere le serán suministrados boletines de productos, datos técnicos, curvas de rendimiento y diagramas de instalación para aprobación, correcciones o rechazo por parte del cliente final. Los pesos y dimensiones presentados en estos documentos son aproximados a menos que sean certificados por el propio fabricante. Cualquier disputa entre STRONG y el Comprador por equipos que no cumplan con las expectativas del proyecto, dará derecho tanto a STRONG como al Comprador para cancelar cualquier orden de compra sin ninguna penalidad económica para ambas partes, pero con excepción de aquellos casos en los que el Comprador haya consentido enviar a producción los equipos y estos ya estén en una etapa avanzada o fuera de las puertas de la fábrica, en cuyo caso el Comprador deberá cumplir con todos los gastos aceptados en la respectiva orden de compra.
- 6. Tiempo de entrega:** Los tiempos de entrega son aproximados y son definidos por los fabricantes, STRONG no será sujeto a ningún tipo de castigo por retrasos en la entrega por cualquier razón. El comprador acepta renunciar a cualquier reclamo por dichos retrasos, esto por cuanto el tiempo de entrega depende de las condiciones de producción en la fábrica al momento de la orden y de las disposiciones del mercado de materias primas del momento.
- 7. Forma de pago:** El cliente deberá cancelar el 100% al momento de la orden de compra, según las condiciones de venta establecidas en la respectiva cotización. Otras condiciones de pago podrán ser establecidas previo acuerdo entre STRONG y el Comprador.
- 8. Garantía:** STRONG, como representante directo de los fabricantes de los productos ofertados, extiende completa garantía contra defectos de fabricación por el período de 12 meses a partir de la fecha de arranque, ó, 18 meses después de la facturación de los equipos, aplica cualquiera de las dos situaciones que ocurra primero. Cualquier incumplimiento de pago anula la garantía de los equipos o servicios vendidos.
- 9. Servicios:** NO se incluye ningún equipo especial como grúa o montacargas para la descarga de los equipos en proyecto. Tampoco se incluye el servicio de instalación o mantenimiento de los equipos, a excepción de que el servicio sea ofrecido explícitamente en el cuerpo de la respectiva cotización.



**Baltimore Aircoil Company**  
**Cooling Tower Selection Report**

Version: 8.11.19 NA  
 Product data correct as of: May 17, 2023

Project Name:  
 Selection Name:  
 Project State/Province: Guatemala  
 Project Country/Region: Guatemala  
 Date: September 13, 2023

**Model Information**

Product Line: Low Profile Series V (VTL)  
 Model: VTL-027-F  
 Number of Units: 1  
 Fan Type: Standard Fan  
 Fan Motor: (1) 2.00 = 2.00 HP/Unit  
 Total Standard Fan Power: Full Speed, 2.00 BHP/Unit  
 Intake Option: None  
 Internal Option: None  
 Discharge Option: None  
 External Static Pressure: 0.00 in. H2O

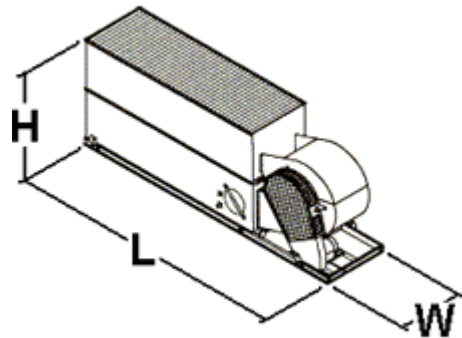
**Design Conditions**

Flow Rate: 93.00 USGPM  
 Hot Water Temp.: 116.60 °F  
 Cold Water Temp.: 89.60 °F  
 Wet Bulb Temp.: 69.00 °F  
 Heat Rejection: 1,254,998 BTUH  
 Tower Pumping Head: 5.60 psi  
 Static Lift: 2.42 psi  
 Spray Pressure: 3.18 psi  
 Tower Heat Rejection: 1,295,887 BTUH  
 Reserve Capability: 3.25 %

**Thermal performance at design conditions and standard total fan motor power is certified by the Cooling Technology Institute (CTI).**

**Engineering Data, per Unit**

Unit Length: 07' 00.75"  
 Unit Width: 04' 01.25"  
 Unit Height: 06' 06.25"  
 Air Flow: 7,370 CFM  
 Approximate Shipping Weight: 1,220 pounds  
 Heaviest Section: 1,220 pounds  
 Approximate Operating Weight: 1,740 pounds  
 Heater kW Data (Optional)  
     0°F (-17.8°C) Ambient Heaters: (1) 2 kW  
     -20°F (-28.9°C) Ambient Heaters: (1) 2 kW



Minimum Distance Required for Single Unit:  
 (For multiple units, refer to Layout Guidelines)

From Solid Wall: 3 ft.  
 From 50% Open Wall: 3 ft.

Energy Rating:  
 49.00 USGPM/HP per ASHRAE 90.1, ASHRAE 189 and CA Title 24.

Note: These unit weights and dimensions account for the selected fan type for the standard cataloged drive configuration, but they do not account for other options/accessories. Please contact your local BAC sales representative for weights and dimensions of units with other options/accessories.



# Baltimore Aircoil Company Cooling Tower Selection Report

Version: 8.11.19 NA  
Product data correct as of: May 17, 2023

Project Name:  
Selection Name:  
Project State/Province: Guatemala  
Project Country/Region: Guatemala  
Date: September 13, 2023

## Model & Fan Motor

Product Line: Low Profile Series V (VTL)  
Model: VTL-027-F  
Number of Units: 1  
Fan Motor: (1) 2.00 = 2.00 HP/Unit  
Total Standard Fan Power: Full Speed, 2.00 BHP/Unit

## Model Accessories

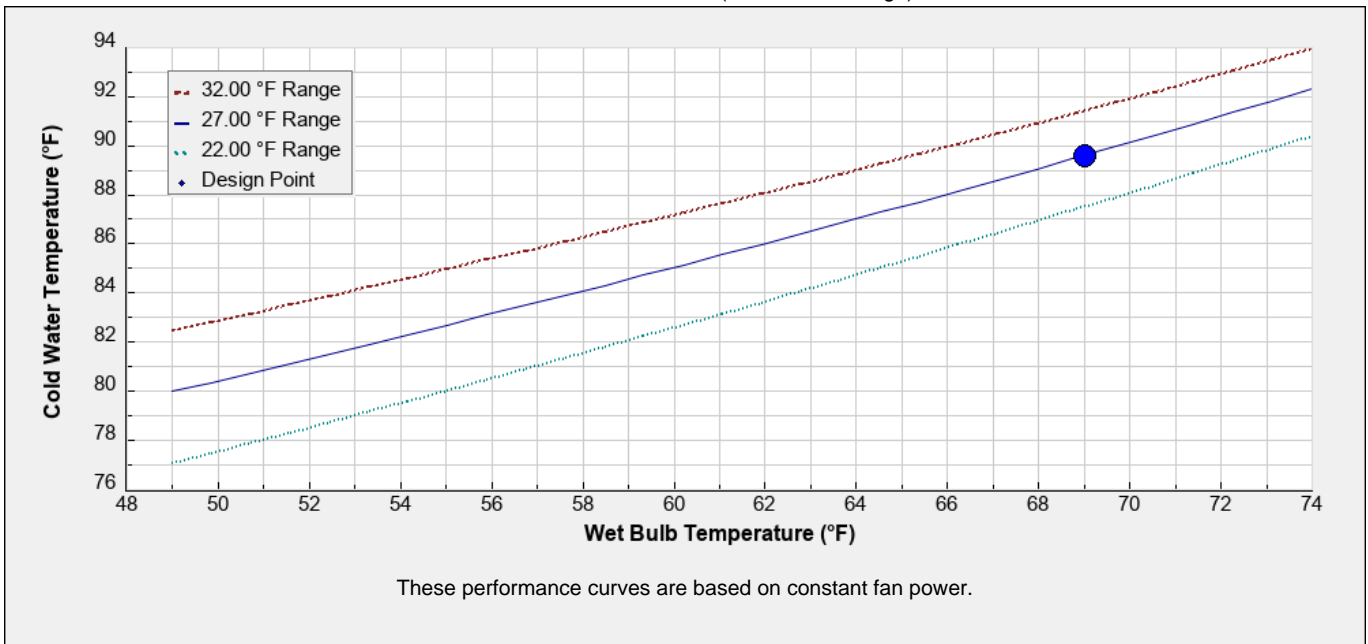
Intake Option: None  
Internal Option: None  
Discharge Option: None  
Fan Type: Standard Fan  
External Static Pressure: 0.00 in. H2O

## Design Conditions @ Standard Total Fan Motor Power per Unit (2.00 HP)

Thermal performance at design conditions and standard total fan motor power is certified by the Cooling Technology Institute (CTI).

Flow Rate: 93.00 USGPM  
Hot Water Temp.: 116.60 °F  
Cold Water Temp.: 89.60 °F  
Wet Bulb Temp.: 69.00 °F  
Heat Rejection: 1,254,998 BTUH

Predicted Performance  
Fan Motor Alternative = Full Speed, 2.00 BHP  
Flow Rate = 93.00 USGPM (100.00% of Design)



Warning	Applies to Design Conditions	Applies to OffDesign Conditions
1. One or more selection parameters are outside of CTI Certification limits.	No	Yes



# Baltimore Aircoil Company Cooling Tower Selection Report

Version: 8.11.19 NA  
Product data correct as of: May 17, 2023

Project Name:  
Selection Name:  
Project State/Province: Guatemala  
Project Country/Region: Guatemala  
Date: September 13, 2023

### Model Information

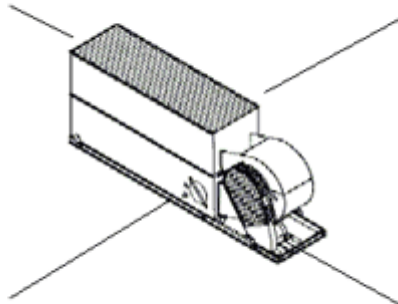
Product Line: Low Profile Series V (VTL)      Intake Option: None  
Model: VTL-027-F      Internal Option: None  
Number of Units: 1      Discharge Option: None  
Fan Type: Standard Fan      External Static Pressure: 0.00 in. H2O  
Fan Motor: (1) 2.00 = 2.00 HP/Unit  
Total Standard Fan Power: Full Speed, 2.00 BHP/Unit

Octave band and A-weighted sound pressure levels (Lp) are expressed in decibels (dB) reference 0.0002 microbar. Sound power levels (Lw) are expressed in decibels (dB) reference one picowatt. Octave band 1 has a center frequency of 63 Hertz.

Top Sound Pressure (dB)		
Octave Band	Distance	
	5 ft.	50 ft.
1	75	61
2	73	59
3	68	58
4	70	59
5	68	52
6	67	53
7	64	50
8	61	42
A-wgtd	<b>74</b>	<b>60</b>

Back Sound Pressure (dB)		
Octave Band	Distance	
	5 ft.	50 ft.
1	69	55
2	65	56
3	64	55
4	64	54
5	56	46
6	54	39
7	49	43
8	41	32
A-wgtd	<b>64</b>	<b>54</b>

End Sound Pressure (dB)		
Octave Band	Distance	
	5 ft.	50 ft.
1	71	59
2	63	57
3	65	56
4	65	57
5	65	50
6	66	51
7	58	48
8	53	40
A-wgtd	<b>71</b>	<b>58</b>



End Sound Pressure (dB)		
Octave Band	Distance	
	5 ft.	50 ft.
1	71	59
2	63	57
3	65	56
4	65	57
5	65	50
6	66	51
7	58	48
8	53	40
A-wgtd	<b>71</b>	<b>58</b>

Fan Side Sound Pressure (dB)		
Octave Band	Distance	
	5 ft.	50 ft.
1	70	60
2	65	55
3	66	51
4	66	50
5	62	45
6	62	46
7	57	45
8	48	35
A-wgtd	<b>68</b>	<b>53</b>

Total Sound Power (dB)		
Octave Band	Center Frequency (Hertz)	Lw
1	63	93
2	125	91
3	250	90
4	500	91
5	1000	84
6	2000	85
7	4000	82
8	8000	74
A-wgtd		<b>92</b>

**Note:** The use of frequency inverters (variable frequency drives) can increase sound levels.  
**Extra Notes:** Sound data provided by CTI ATC-128 sound test code revision 2019

## 11.4. Propuesta bomba centrífuga

**Buen día**

Por este medio tenemos el agrado de presentarle nuestra siguiente cotización:

Nit	101412800	Teléfono	55431221
Nombre	JONATHAN ABRAHAM CHIC	Dirección	
Correo	abraham.chicoj@outlook.com		
<b>Nota</b>	No vendemos tubería de ningún tipo.		

No.	Cant.	SKU	Descripción	Precio unid.	-%	Total
1	1	HFM/6A	BOMB. C/ALTO CAUDAL 3X3	Q3,000.00	10 %	Q2,700.00
2						Q0.00
3						Q0.00
4						Q0.00
5						Q0.00
6						Q0.00
7						Q0.00
8						Q0.00
9						Q0.00
10						Q0.00
11						Q0.00
	1	<b>TOTAL</b>		<b>Q3,000.00</b>		<b>Q2,700.00</b>

- Tiempo de entrega: inmediato
- **Forma de pago: Contado en efectivo o bien ofrecemos visacuotas con tarjetas del BAC**
- El precio ya incluye I.V.A.
- Repuestos y taller de servicio
- Descuentos se aplican unicamente si el pago es en efectivo no al credito
- Garantía: 6 meses contra defectos de fabricación, no incluye las partes eléctricas sujetas a variaciones de voltaje externas o mala instalación

**Asesor: Alejandro Calderón**

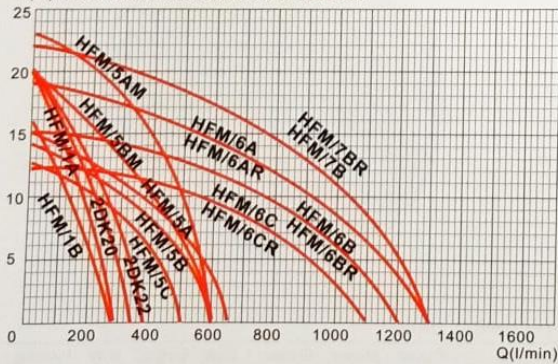
<b>ACCESORIOS INDUSTRIALES, S.A.</b>	
<b>A I S A</b>	
 <b>40 calle "A" 5-60 zona 8</b>	<b>+502 30864828</b> 
 <b>PBX : 2209 4444</b>	<b>Accesorios Industriales, S. A.</b> 
 <b>www.aisa.gt</b>	<b>_aisagt</b> 



#### TECHNICAL DATA

TYPE	Power		H.max (m)	Q.max (L/min)	Size (inch)	S.Head (m)	G.W (kg)	Packing QTY.
	KW	HP						
HFM/1B	0.6	0.8	16	275	1.5"X1.5"	8	12.5	1630
HFM/1A	0.75	1	20	275	1.5"X1.5"	8	13.5	1630
HFM/5C	0.6	0.8	12.5	500	2"X2"	8	14.8	1500
HFM/5B	0.75	1	14	600	2"X2"	8	15.7	1500
HFM/5A	1.1	1.5	15	650	2"X2"	8	16.3	1500
HFM/5BM	1.1	1.5	20	600	2"X2"	8	21.2	950
HFM/5AM	1.5	2	23	600	2"X2"	8	23.6	950
HFM/6C	1.1	1.5	12	1100	3"X3"	8	28.6	720
HFM/6CR	1.1	1.5	12	1100	4"X4"	8	30	720
HFM/6B	1.5	2	15	1200	3"X3"	8	29.8	720
HFM/6BR	1.5	2	15	1200	4"X4"	8	31	720
HFM/6A	2.2	3	19	1300	3"X3"	8	39.6	605
HFM/6AR	2.2	3	19	1300	4"X4"	8	40.5	605
HFM/7B	3	4	22	1300	3"X3"	8	41	605
HFM/7BR	3	4	22	1300	4"X4"	8	42	605

H(m) PERFORMANCE CHART AT  $n=2850\text{min}^{-1}$



## 11.5. Formato de la rutina de inspección y limpieza



Logo de la empresa

Programa de mantenimiento  
de rutina de inspección y limpieza  
para torres de mantenimiento  
de tiro mecánico

Elaborado por: Jonathan Chicoj  
Carné: 13495

Logo de la empresa

Rutina de inspección y  
limpieza

No. Hoja: 1 de 3

Torre de  
Enfriamiento

Fecha de  
emisión: sep. 2023

Equipo	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual	Al inicio de cada turno
<b>Área de instalación</b>					
Comprobar iluminación	X				
Revisión de acometidas eléctricas				X	
Inspección en busca de fugas de agua					X
Limpieza por acumulación de basura					X
Limpieza por acumulación de hojas secas					X
<b>Estructura interna y externa</b>					
Limpieza de persianas por acumulación de basura					X
Inspección en busca de fugas de agua					X
Revisión del estado de la pintura	X				
Revisión por oxidación	X				
Revisión y ajuste de tornillos			X		
Revisión por vibración y ruidos anormales					X
Mantenimiento preventivo de estructura				X	
<b>Separador de gotas</b>					
Inspección general			X		
Limpieza y desinfección			X		
Verificar que no exista crecimiento de alga					X
Verificar que no exista sarro					X
Verificar que no exista acumulación de lodos					X
Asegurarse de la correcta instalación			X		
Mantenimiento preventivo de SDA			X		
<b>Aspersores de agua</b>					
Inspección general			X		
Limpieza y desinfección			X		
Verificar el correcto funcionamiento de cada aspersor					X
Verificar el buen estado de cada aspersor					X
Verificar que no exista sarro					X
Verificar que no exista crecimiento de alga					X
Mantenimiento preventivo de SDA			X		

Logo de la empresa

Rutina de inspección y  
limpieza

No. Hoja: 2 de 3

Torre de  
Enfriamiento

Fecha de  
emisión: sep. 2023

Equipo	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual	Al inicio de cada turno
<b>Relleno</b>					
Inspección general			X		
Limpieza para retirar crecimiento de alga			X		
Limpieza para retirar acumulación de lodos			X		
Inspeccionar el estado de las láminas de transferencia					X
Inspeccionar que no haya presencia de óxido					X
Verificar que no exista sarro adherido a las láminas					X
Revisión por vibración y ruidos anormales					X
Mantenimiento preventivo de SDA			X		
<b>Depósito de agua fría</b>					
Limpieza de residuos y desinfección	X				
Inspección y limpieza de filtro	X				
Limpieza de la válvula del flotador	X				
Verificar que no existan fugas de agua					X
Inspeccionar por acumulación de sólidos					X
Verificar que no exista acumulación de lodos					X
Verificar que no exista zonas con óxido					X
Verificar que no exista crecimiento de alga					X
Mantenimiento preventivo de SDA			X		
<b>Motor eléctrico</b>					
Medición de voltaje y corriente	X				
Detectar signos de desgaste			X		
Revisión por vibración y ruidos anormales					X
Revisión de empalmes eléctricos				X	
Verificar que no exista sobrecalentamiento durante operación					X
Revisión en búsqueda de oxidación					X
Verificar que no exista fugas de agua en acople con bomba					X
Mantenimiento preventivo motor eléctrico		X			

Logo de la empresa

Rutina de inspección y  
limpieza

No. Hoja: 3 de 3

Torre de  
Enfriamiento

Fecha de  
emisión: sep. 2023

Equipo	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual	Al inicio de cada turno
<b>Ventilador</b>					
Limpieza del rodete y los álabes			X		
Comprobar el giro libre					X
Detectar signos de desgaste			X		
Revisión por vibración y ruidos anormales					X
Revisión de conexiones eléctricas				X	
Revisión en búsqueda de oxidación					X
Limpieza por acumulación de basura					X
Limpieza por acumulación de hoja seca					X
Verificar que no exista sobrecalentamiento durante operación					X
Mantenimiento preventivo de ventilador		X			
<b>Bomba de agua</b>					
Revisión en busca de corrosión					X
Revisión en busca de fugas de agua en acople al motor					X
Revisión en busca de fugas de agua en uniones de brida					X
Revisión de la correcta sujeción a base		X			
Revisión por vibración y ruidos anormales					X
Revisión de empalmes eléctricos				X	
Cambio se sello mecánico				X	
Mantenimiento preventivo de bomba de agua		X			

Fuente: capítulo 4. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos y Manuales de mantenimiento para torres de refrigeración.

## 11.6. Formato del plan de mantenimiento preventivo

Logo de la empresa

## Plan de mantenimiento preventivo para torres de mantenimiento

Logo de la empresa

Mantenimiento Preventivo

No. Hoja: 1 de 3

Torre de Enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

Marca:  
Modelo:  
Tipo: Contraflujo de tiro inducido

Fecha última inspección: sep. 2023  
Inspeccionado por: Jonathan Chicoj  
Código trabajador: 256

CÓDIGO del Tipo de Trabajo			
EL	Electricidad	MC	Mecánica
SL	Soldadura	PN	Pintura

EQUIPO	ACTIVIDAD	TIPO DE TRABAJO				OBSERVACIONES POR PERSONAL TÉCNICO
		EL	SL	MC	PN	

Estructura	Reparación de estructura (grieta/óxido)		✓			
	Tratamiento de estructura (lijar/pintura)				✓	
	Reparación de persinas de flujo de aire (rajadura/óxido)		✓			
	Tratamiento a persianas de flujo de aire (lijar/puntura)				✓	
	Reparación de fuga de agua (perforación/cambio de pieza)		✓	✓		

Sistema distribución de agua (SDA)	Reparación de elimandores de rocío (oxido/rajadura)		✓			
	Cambio he instalación de aspersor de agua			✓		
	Reparación de relleno (deformación/fractura/óxido)		✓			
	Desarmado y limpieza de sedimentos del relleno			✓	✓	
	Ajuste válvula del flotador del depósito de agua fría					
	Limpieza de sedimentos del depósito de agua fría				✓	
	Reparación de fuga/grieta/oxido del depósito de agua fría		✓			
	Aplicación de pintura para evitar oxidación				✓	

Bomba de agua	Cambio de sello mecánico (cada año)			✓		
	Cambio de junta y o-ring			✓		
	Revisión del eje en busca de desgaste y desbalance		✓			
	Cambio de cojinetes			✓		
	Revisión/repación/cambio de impulsor		✓	✓		
	Revisión por cavitación en los álabes		✓	✓		
	Reparación de grieta/rajadura/fractura de voluta		✓			
	Tratamiento de estructura (lijar/pintar)				✓	
	Revisión/repación de bridas		✓			

Logo de la empresa

Mantenimiento Preventivo

No. Hoja: 2 de 3

Torre de Enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

Marca:	0
Modelo:	0
Tipo:	Contraflujo de tiro inducido

Fecha última inspección:	sep. 2023
Inspeccionado por:	Jonathan Chicoj
Código trabajador:	256

CÓDIGO del Tipo de Trabajo			
EL	Electricidad	MC	Mecánica
SL	Soldadura	PN	Pintura

EQUIPO	ACTIVIDAD	TIPO DE TRABAJO				OBSERVACIONES POR PERSONAL TÉCNICO
		EL	SL	MC	PN	

Motor eléctrico de bomba	Medición de voltaje y amperaje	✓				
	Revisión/repación/cambio de cables en circuito eléctrico	✓				
	Cambio de cojinetes			✓		
	Revisión de continuidad en boninado	✓				
	Aplicación de barniz en bobinado	✓				
	Revisión y reparación del estator	✓	✓			
	Reparación de grieta/rajadura/fractura de estructura		✓			
	Tratamiento de estructura (lijar/pintura)				✓	
	Limpieza y balance del ventilador			✓		
	Revisión del eje en busca de desgaste y desbalance		✓	✓		
	Ajuste correcto de estructura a base para evitar vibración			✓		

Ventilador	Medición de voltaje y amperaje	✓				
	Revisión/repación/cambio de cables en circuito eléctrico	✓				
	Cambio de cojete			✓		
	Limpieza de álabes				✓	
	Reparación de grieta/rajadura/fractura de estructura		✓			
	Tratamiento a estructura (lijar/pintar)				✓	
	Revisión/cambio de soportes antivibratorios			✓		
	Ajuste correcto de estructura a base para evitar vibración			✓		



Logo de la empresa

Mantenimiento Preventivo

No. Hoja: 3 de 3

Torre de Enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

Marca:	0
Modelo:	0
Tipo:	Contraflujo de tiro inducido

Fecha última inspección:	sep. 2023
Inspeccionado por:	Jonathan Chicoj
Código trabajador:	256

CÓDIGO del Tipo de Trabajo			
EL	Electricidad	MC	Mecánica
SL	Soldadura	PN	Pintura

EQUIPO	ACTIVIDAD	TIPO DE TRABAJO				OBSERVACIONES POR PERSONAL TÉCNICO
		EL	SL	MC	PN	

Motor eléctrico del ventilador (hermético)	Medición de voltaje y amperaje	✓				
	Revisión/repación/cambio de cables en circuito eléctrico	✓				
	Cambio de cojinetes			✓		
	Revisión de continuidad en bobinado	✓				
	Aplicación de barniz en bobinado	✓				
	Revisión y reparación del estator	✓	✓			
	Reparación de grieta/rajadura/fractura de estructura		✓			
	Asegurar la hermeticidad por la interperie			✓		

Fuente: Manuales de mantenimiento para torres de refrigeración y experiencia laboral.

## 11.7. Programa de mantenimiento químico del agua

Logo de la empresa

# Programa de mantenimiento químico para el agua de enfriamiento de torres de refrigeración

Elaborado por: Jonathan Chicoj  
Carné: 13495

Logo de la empresa

Mantenimiento Químico

No. Hoja: 1 de 3

Agua de enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

<b>Datos de visita</b>	Fecha:
	Nombre del técnico:

<b>Producto I</b>	Nombre:
	No. De registro:
	Dosis aplicada:
	Tiempo de actuación:

<b>Producto II</b>	Nombre:
	No. De registro:
	Dosis aplicada:
	Tiempo de actuación:

<b>Producto III</b>	Nombre:
	No. De registro:
	Dosis aplicada:
	Tiempo de actuación:

<b>Nombre del laboratorio</b>	
<b>Última fecha de análisis</b>	
<b>Próxima fecha de análisis</b>	

Logo de la empresa

Mantenimiento Químico

No. Hoja: 2 de 3

Agua de enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

Parámetro	Nivel de referencia	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Nivel de cloro	< 2 mg/l						
Nivel de biocida	Según fabricante						
pH	6.5 - 9.0						
Dureza o alcalinidad	< 500 mg/l						
Turbidez	< 15 NTU						
Hierro total	< 2 mg/l						
Conductividad	1800 $\mu$ S/cm						
Aerobios totales	< 10,000 Ufc/ml						
Sólidos disueltos	< 1000 mg/l						
Legionella sp	< 100 Ufc/l						
Inspección de depósito	Limpia						

Logo de la empresa

Mantenimiento Químico

No. Hoja: 2 de 3

Agua de enfriamiento

Fecha de emisión: sep. 2023

Parámetro	Nivel de referencia	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Nivel de cloro	< 2 mg/l						
Nivel de biocida	Según fabricante						
pH	6.5 - 9.0						
Dureza o alcalinidad	< 500 mg/l						
Turbidez	< 15 NTU						
Hierro total	< 2 mg/l						
Conductividad	1800 $\mu$ S/cm						
Aerobios totales	< 10,000 Ufc/ml						
Sólidos disueltos	< 1000 mg/l						
Legionella sp	< 100 Ufc/l						
Inspección de depósito	Limpia						

De ser necesario, se deberán de incluir otros parámetros que se consideren útiles en la determinación de la calidad del agua y la efectividad del programa de mantenimiento de

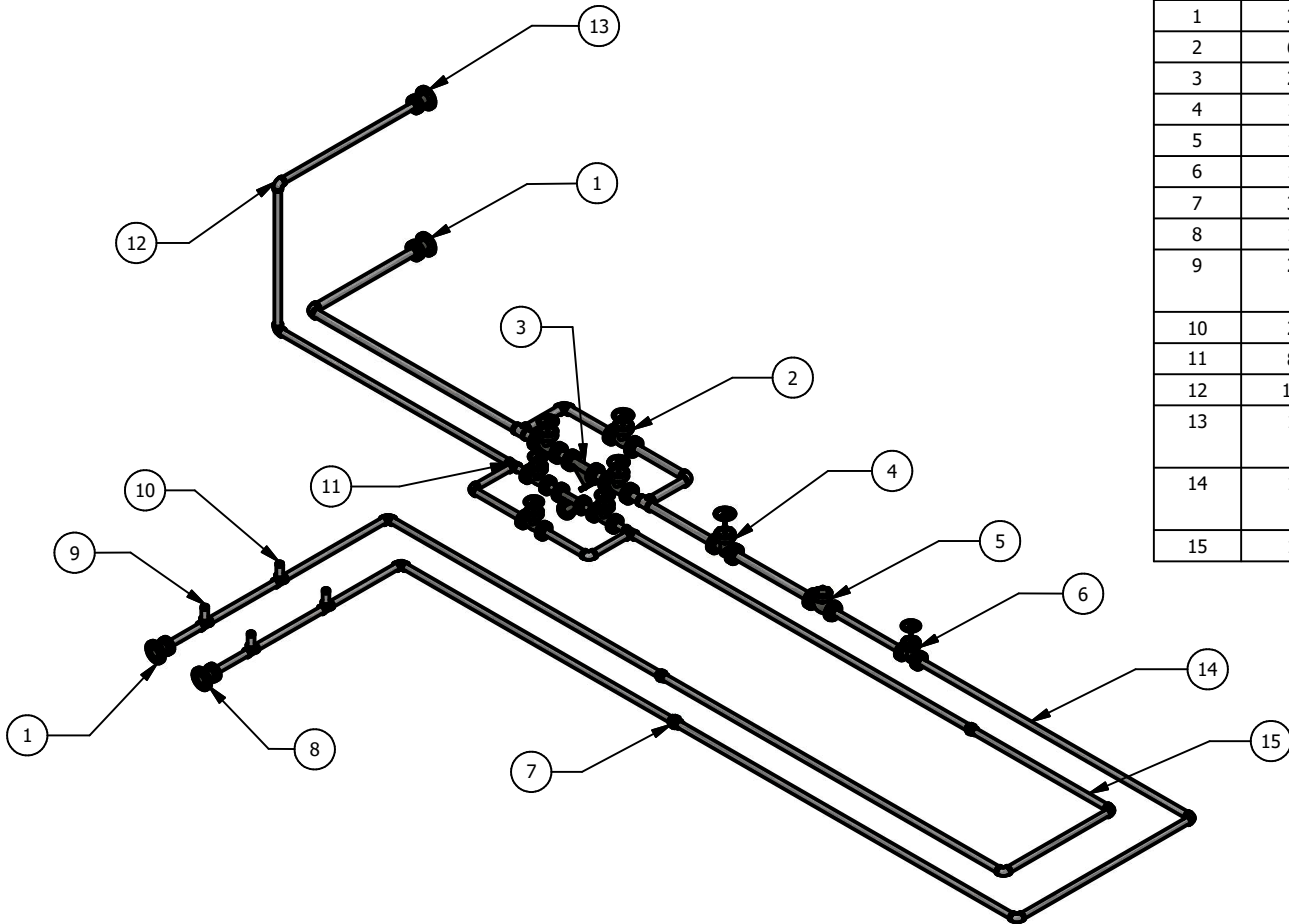
Fuente: Capítulo 4. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.

## 11.8. Diseño de planos

2

1

LISTADO DE COMPONENTES				
NUMERO	CANTIDAD	NUMERO DE PARTE	DESCRIPTION	MATERIAL
1	2	N/A	REDUCCION DE 4" A 3"	HIERRO GALVANIZADO
2	6	N/A	VALVULA DE BOLA	BRONCE
3	2	N/A	VALVULA FILTRO	HIERRO DUCTIL
4	1	N/A	VALVULA BALANCE	HIERRO GALVANIZADO
5	1	N/A	BOMBA DE AGUA	HIERRO FUNDIDO
6	1	N/A	VALVULA CHEQUE	ACERO AL CARBONO
7	3	N/A	UNION TUBERIA	HIERRO GALVANIZADO
8	1	N/A	EXPANSION DE 2"-1/2 A 4"	HIERRO GALVANIZADO
9	2	N/A	MEDIDOR DE TEMPERATURA	LATON
10	2	N/A	MEDIDOR DE FLUJO	LATON
11	8	N/A	UNION TEE	HIERRO GALVANIZADO
12	13	N/A	CODO 90 GRADOS	HIERRO GALVANIZADO
13	1	N/A	EXPANSION DE 2"-1/2" A 4"	HIERRO GALVANIZADO
14	1	TUB-001	TUBERIA SUCCION Y DESCARGA	HIERRO GALVANIZADO
15	1	TUB-002	TUBERIA DESCARGA	HIERRO GALVANIZADO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES  
 LINEAL .X ± N/A  
 .XX ± N/A  
 .XXX ± N/A  
 ANGULAR ± N/A

DIBUJADO POR J CHICOJ FECHA 28/03/2024

DISEÑADO POR J CHICOJ FECHA 28/03/2024

REVISADO POR R HERRARTE FECHA 23/04/2024

APROBADO POR R HERRARTE FECHA 20/05/2024

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
 Cálculo y diseño de la instalación de una torre de enfriamiento para el proceso de soplado de botellas PET en una industria de envases plásticos ubicada dentro de la ciudad de Guatemala

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

**UVG** UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 DE GUATEMALA chi13495@uvg.edu.gt

TÍTULO: Ensamble del diseño de la instalación de la tubería de agua

NÚMERO DE DIBUJO: ENS-001

FORMATO A ESCALA: 1:35 UNIDADES: in  
 PÁGINA 1 DE 3 REV 0

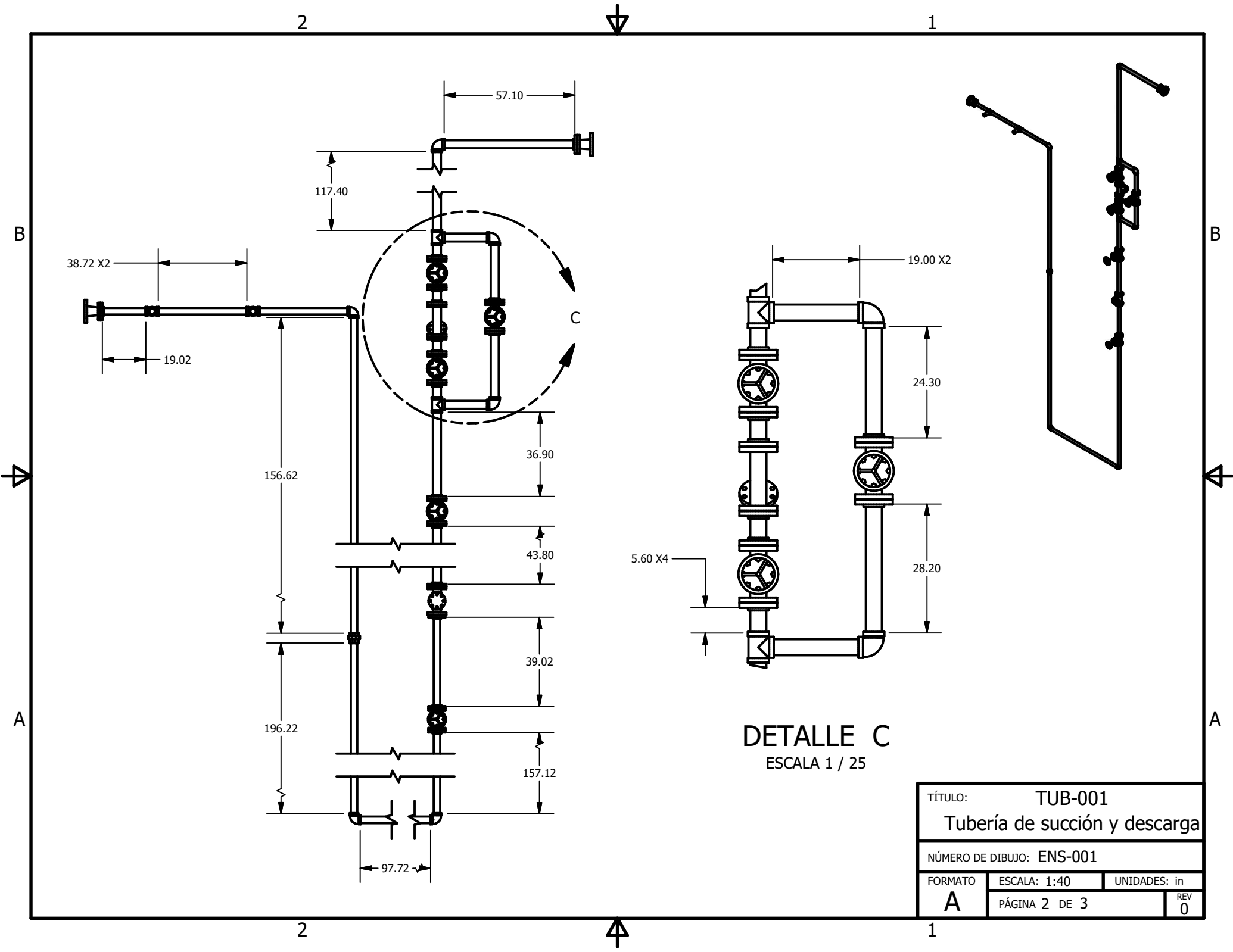
MATERIAL Acero galvanizado  
 TRATAMIENTO N/A  
 MASA: 2701.111 lbmass



2

1





2

1

B

B

A

A

38.72 X2

19.02

156.62

196.22

2

36.90

43.80

39.02

157.12

97.72

57.10

117.40

C

5.60 X4

19.00 X2

24.30

28.20

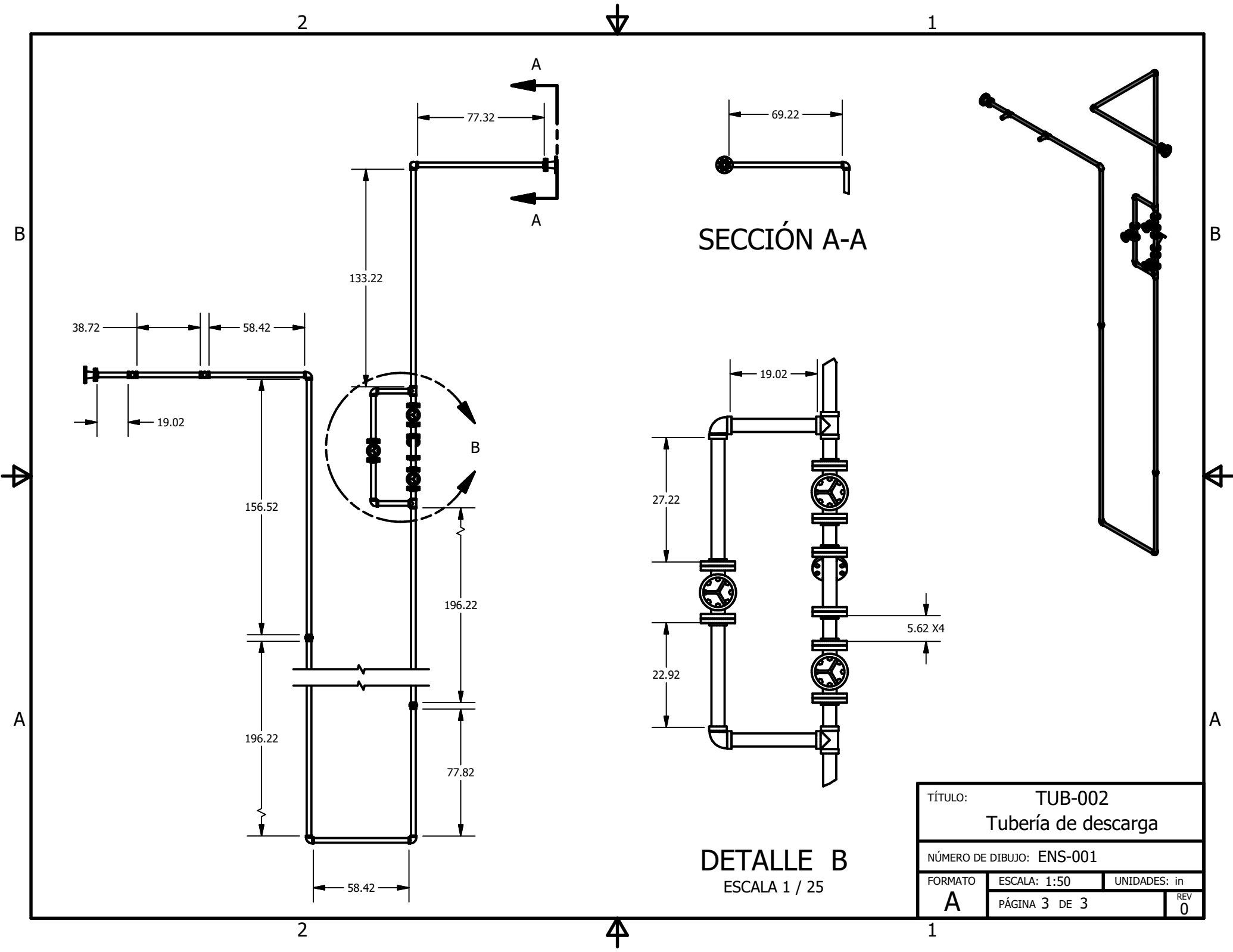
DETALLE C

ESCALA 1 / 25

TÍTULO: TUB-001		
Tubería de succión y descarga		
NÚMERO DE DIBUJO: ENS-001		
FORMATO	ESCALA: 1:40	UNIDADES: in
A	PÁGINA 2 DE 3	REV 0

2

1



SECCIÓN A-A

DETALLE B  
ESCALA 1 / 25

TÍTULO: TUB-002		
Tubería de descarga		
NÚMERO DE DIBUJO: ENS-001		
FORMATO	ESCALA: 1:50	UNIDADES: in
A	PÁGINA 3 DE 3	REV 0



**Entalpía:** calor contenido a una temperatura dada de una unidad de masa de aire seco y de la humedad que contiene en relación con una temperatura de referencia, normalmente 0°. [21](#)

**Humedad específica:** se define como la masa del vapor de agua contenida en una unidad de vapor de aire seco. [21](#)

**Humedad relativa:** se define como la presión parcial del vapor de agua en el aire dividida entre la presión del vapor de agua a la temperatura dada. [21](#)

**Temperatura de bulbo húmedo:** es la temperatura de equilibrio dinámico por una superficie de agua cuando se iguala la velocidad de transferencia de calor por convección con la velocidad de transferencia de masa. En otras palabras, es la temperatura medida con un termómetro de bulbo húmedo. [21](#)

**Temperatura de bulbo seco:** temperatura medida con un termómetro ordinario. [21](#)

**Temperatura de punto de rocío:** es la temperatura a la cual una mezcla de vapor de agua y aire se satura e inicia el proceso de condensación de la humedad sobre una superficie. [21](#)

**Volumen específico:** se define como la relación entre el volumen y su masa. También es conocido como el recíproco de su densidad. [21](#)