

Diseño de un sistema de enfriamiento evaporativo para fines educativos

Estudiante: Juan Andrés Moreno Paladines

Ingeniería Mecatrónica

Asesor: Daniel Sanín Villa

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2019

RESUMEN

Este proyecto buscó realizar el diseño de un prototipo de una torre de enfriamiento de tiro inducido que funcione de forma automática para el laboratorio de fluidos del ITM basado en un modelo analítico e incluyendo un modelo CAD del sistema y los planos mecánicos y eléctricos.

El agua aumentará de temperatura por medio de un sistema de calentamiento con una resistencia eléctrica y en la cual también habrá un sensor tipo termocupla que mida la temperatura de entrada del agua, para después ser distribuida por una motobomba u otro elemento que garantice el flujo de entrada constante que circulará por el proceso cerrado de enfriamiento por medio de aspersión donde se encontrara con el aire frio en contracorriente, debido al extractor de aire en el tope de la torre. Dicho equipo va a permitir observar su funcionamiento interno y modificar algunas variables de entrada de la torre para ver sus diferentes comportamientos a la salida del sistema, mediante instrumentos de medición de temperatura y presión para poder ser comparados con los cálculos teóricos.

Los principales resultados del diseño de la torre son:

La temperatura de entrada y salida del agua de la torre es de 30°C y 25°C respectivamente y su altura es de 1.50 cm (con su mesa o soporte) teniendo un diámetro de 60 cm al igual que su empaque (Kelly Accupac) a una altura de 30 cm y al extractor que está ubicado en la parte superior de la torre, además el equipo cuenta con una moto bomba de 1/2 HP y con 3 aspersores a una altura de 90 cm.

Con dicho proyecto se logró diseñar una torre de enfriamiento de tiro inducido automatizada para el laboratorio de fluidos del ITM con sus respectivos planos mecánicos y eléctricos y un costeo de fabricación de dicha torre.

Palabras clave: Torre de enfriamiento, tiro inducido.

RECONOCIMIENTOS

A mi familia por su apoyo incondicional para la formación de mi carrera profesional.

A los docentes por sus conocimientos y profesionalismo en la unidad curricular, en el cual contribuyeron para la realización de este trabajo.

A los amigos y compañeros más cercanos que aportaron para la realización del proyecto.

ACRÓNIMOS

L_2 Flujo másico de agua en la salida de la torre, expresada en kg/s.

L_1 Flujo másico de agua en la entrada, expresada en kg/s.

G Flujo másico de aire seco, expresado en kg/s.

Y_2 Humedad absoluta en la salida, expresada en (masa de vapor/masa aire seco).

P y P_S Presión parcial del vapor en la mezcla y en la saturación respectivamente en pascales.

Y_S Humedad de la mezcla en la saturación en (%vapor de agua/m³).

V_H Volumen húmedo, expresado en ft^3/Lb de aire seco

H_1 Entalpía de aire de entrada kJ/kg aire seco

H_2 Entalpía de aire de salida kJ/kg aire seco

K Coeficiente de transferencia de masa global kg/(m²h).

A Área específica del empaque por volumen unitario del empaque m²/m³

V Volumen del empaque m³

H^* Entalpía de la mezcla aire – vapor de agua saturado a la temperatura del agua en kcal.

H Entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura del aire en kcal.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	8
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Torre de enfriamiento.....	9
2.2 Balance de materia para flujo de aire y agua en contracorriente.....	10
2.3 Balance de energía en la torre.....	11
2.4 Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo a la entrada y salida	14
2.5 Selección del tipo de torre de enfriamiento.	15
2.6 Selección de la bomba.....	16
2.7 Bases de Diseño.....	18
2.8 Empaque	18
2.9 Selección del extractor de salida.	20
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	21
3.1 Tipo y diseño de la investigación.	21
3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	21
3.3 Fases de la investigación.....	22
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1 Revisión de las propiedades físicas de los flujos de aire y agua.	24

4.2 Dimensionamiento de la torre de enfriamiento empleando diagramas y cálculos	24
4.2.1 Datos de operacion de la torre.	25
4.2.2 Números de Unidades de Difusión.....	31
4.2.3 Características del empaque.....	32
4.2.4 Área del empaque.....	33
4.2.5 Altura del empaque.....	34
4.2.6 Máxima capacidad de la torre para enfriar agua.....	35
4.2.7 Boquillas de la torre de enfriamiento.....	35
4.3 Equipos auxiliares.....	36
4.3.1 Característica del extractor.....	36
4.3.2 Característica de la bomba.....	37
4.4 Hojas de especificaciones técnicas.....	39
CAPITULO 5. PLANOS MECANICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	41
5.1 Diseño CAD de la torre de enfriamiento.....	49
CAPITULO 6. PLANOS ELECTRICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	49
6.1 Establecimiento de estrategias de control eléctrico de la planta.....	49
6.1.1 Funcionamiento del circuito eléctrico de potencia de la torre de enfriamiento.....	49
6.1.2 Funcionamiento del circuito eléctrico de control de la torre de enfriamiento.....	49
6.1.3 De forma automática.....	49
6.1.4 De forma manual.....	50
6.2 Diagrama de potencia eléctrica de la torre de enfriamiento.....	51

6.3 Diagrama de control eléctrico de la torre de enfriamiento.....	52
CAPITULO 7. HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LA COTIZACION DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	53
CAPITULO 8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	56
REFERENCIAS.....	57

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se desarrolló con la finalidad de diseñar un sistema de enfriamiento para fines educativos en el Instituto Tecnológico Metropolitano, para estudiar, analizar y evaluar el comportamiento del proceso, mediante el intercambio de energía entre el flujo de agua y aire a través de una torre de enfriamiento, y por último se reportarán los costos estimados para la construcción de este prototipo. De igual forma, la realización de este proyecto sería importante para el desarrollo del sistema educativo en la institución universitaria mejorando y facilitando la calidad de la enseñanza de los docentes en temas relacionados con el equipo en la facultad de ingeniería. Cabe destacar que uno de los principales problemas es que el laboratorio no cuenta con un sistema de enfriamiento para llevar a cabo las prácticas relacionado con el tema, por lo que se propone realizar un diseño de una torre de enfriamiento con la finalidad de que permita hacer un análisis teórico-práctico del proceso en el mencionado sistema.

Es importante mencionar que el objetivo general del trabajo es realizar el diseño de una torre de enfriamiento de tiro inducido automatizada a pequeña escala para el laboratorio de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano, cuyos objetivos específicos son:

- Realizar los cálculos para el dimensionamiento de la torre en escala de laboratorio.
- Elaborar en un software CAD el modelo, los planos mecánicos y eléctricos (potencia y control) del prototipo a diseñar.
- Realizar un costeo de fabricación.

La tesis se organiza en tres partes; en el marco teórico en el cual se explica los conceptos relacionados a las torres de enfriamiento, la metodología en el que se detalla el procedimiento de la investigación y por último el capítulo de resultados y discusión en el que se realizaron los cálculos matemáticos relacionados con la torre de enfriamiento, basado en las especificaciones técnicas y propiedades físico-química.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Torre de enfriamiento.

Es un equipo en el cual agua caliente es enfriada por contacto directo con una corriente de aire frío. Cuando un cuerpo o una sustancia líquida como el agua aumenta o disminuye su temperatura sin afectar su estructura molecular y por consiguiente su estado, a esto se le llama calor sensible. El enfriamiento en dicha torre ocurre parcialmente por la transferencia de calor sensible del agua hacia la corriente de aire, lo que quiere decir que el agua pierde calor y el aire lo gana, por ende el agua se enfría y el aire se calienta.

Se le llama calor latente cuando por ejemplo a una sustancia líquida como el agua se le agrega la energía requerida para cambiar su estado de la materia, teniendo en cuenta que esta energía en forma de calor se utiliza para el cambio de estado y no para aumentar la temperatura.

En el caso del agua el calor latente de vaporización produce un enfriamiento evaporativo (proceso adiabático) a una entalpía constante, dando lugar a un enfriamiento del aire. Es decir, cuando en la torre de enfriamiento de tiro inducido circula un volumen de aire (a menor temperatura) en sentido contrario a una corriente de agua pulverizada (a mayor temperatura) que confluyen en el relleno de la torre, el aire a su paso evaporará parte de esa agua, cambiando el calor sensible en calor latente, manteniendo constante su temperatura. Esto produce una transferencia de calor entre dos fluidos reduciendo la temperatura del agua de la torre.

En la figura 1 se puede observar el diagrama de una torre de enfriamiento con las corrientes de entrada y de salida tanto del agua como de aire.

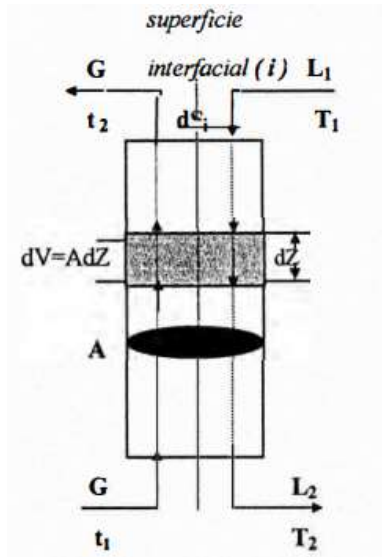


Figura 1. Diagrama de una torre de enfriamiento (Paucar, 1999)

Con base al diagrama, se pueden establecer los balances de materia y energía a través de las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

2.2 Balance de materia para flujo de aire y agua en contracorriente.

$$dL = G * dy \quad (\text{Ec. 1})$$

Integrando la ecuación,

$$L_2 - L_1 = G(Y_2 - Y_1) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

L_2 Es el flujo másico de agua en la salida, expresada en $\frac{Kg}{s}$

L_1 Es el flujo másico de agua en la entrada, expresada en $\frac{Kg}{s}$

G Es el flujo másico de aire seco, expresado en $\frac{Kg}{s}$

Y_2 Es la humedad absoluta en la salida, expresada en $\frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de aire seco}}$

Y_1 Es la humedad absoluta en la entrada, expresada en $\frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de aire seco}}$

Considerando que el flujo másico del aire permanece constante, debido a que predomina el aire seco, y la carga líquida varía debido a la evaporación de agua en el aire seco; entonces se puede considerar que en el proceso existen pérdidas de agua debido a la evaporación, lo cual hace que el aire que sale sea una mezcla de agua y aire, cuyo rango de pérdida es del dos por ciento (2%) del agua circulada; por lo tanto, el flujo de agua circulada en la torre puede ser considerada constante sin introducir un error serio.

2.3 Balance de energía en la torre

$$LC_L d_T = GC_S d_T + G\lambda d_T = Gd_H \quad (\text{Ec. 3})$$

Integrando la ecuación con respecto a las variables de integración d_T que es el diferencial de temperatura y d_H que es el diferencial entálpica.

$$LC_L(T_2 - T_1) = G(H_{G2} - H_{G1}) \quad (\text{Ec. 4})$$

Para calcular la entalpía del aire seco, tanto en la salida como en la entrada es indispensable utilizar las cartas psicométricas para determinar las entalpías con base a las temperaturas, humedad relativa y humedad absoluta. Las cartas psicométricas son una representación gráfica de la fase agua-aire que permite controlar las propiedades higrotérmicas del aire húmedo, y visualizar las variables que intervienen en los cambios térmicos que se producen en distintas situaciones ambientales.

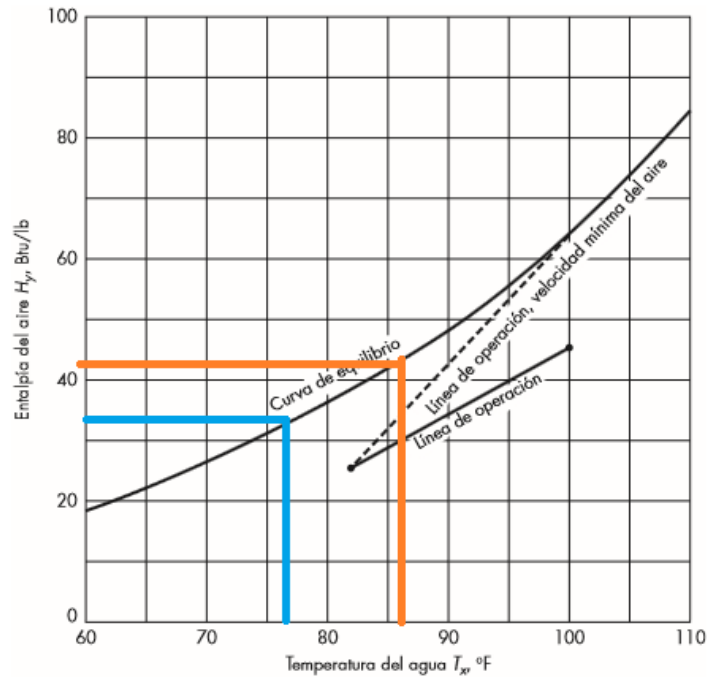


Figura 2. Diagrama de temperatura del agua vs entalpia del aire de operación unitarias en ingeniería química. (McCabe, 1982)

En la figura 2 se puede observar la línea de operación, cuya pendiente está dada por la ecuación LC_L/G . De igual forma se puede observar las curvas de equilibrio, el cual representa las condiciones para el cálculo de las entalpías de aire seco.

En toda torre de enfriamiento de tiro inducido se tiene un relleno, el cual cumple la función de retener por unos instantes cantidades de agua por la cual se va a hacer pasar aire frío, el cual va a absorber parte del calor del agua, haciendo que el agua vaya bajando su temperatura, la altura de este relleno se denomina altura empacada y es la que hace la función de que más superficie del agua tenga contacto directo con el aire y hacer más efectiva la transferencia de calor; en esta altura empacada, se van a ubicar un número de pisos en los cuales se aloja el agua, este número

de pisos se denomina número de unidades de transferencia de la película de aire y cada uno de estos pisos va a tener una altura en la cual va a ser la altura de transferencia de entalpía de aire seco. Para calcular la altura empacada (Z) y el número de unidades de transferencia de la película del aire (N_G), se utilizan las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$Z = H_{tG} * N_G \quad (\text{Ec. 5})$$

“El número de unidades de transferencia y la altura de una unidad de transferencia se definen de la misma manera que en el caso de la absorción de gases”. (McCabe, 1982)

Por esta razón utilizamos las fórmulas de absorción de gases (ec.6 y ec.7) para encontrar el número de unidades y la altura de transferencia del aire seco.

Siendo H_{tG} la altura de una unidad de transferencia de la entalpía de aire seco, cuya ecuación es:

$$H_{tG} = \frac{G}{k'A} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde k' es el coeficiente de transferencia de masa del aire expresada en $\text{Kg}/\text{m}^2 * \text{h}$

La ecuación de N_G se establece de la siguiente forma:

$$N_G = \int_{H_{G1}}^{H_{G2}} \frac{dH}{(H_i - H_G)} = \frac{H_{G2} - H_{G1}}{(H_i - H_G)} \quad (\text{Ec. 7})$$

En base a las ecuaciones matemáticas, se procede a la base del diseño de la torre de enfriamiento.

2.4 Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo a la entrada y salida.

Las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco se refieren a la forma de medir temperaturas del aire. La temperatura de bulbo seco es la temperatura del aire, pero sin entrar en contacto con el agua en evaporación, mientras la temperatura de bulbo húmedo se lleva a cabo una medición en donde se tiene en cuenta la evaporación del agua, entonces por lo general la punta del termómetro se envuelve en material absorbente en contacto con el agua que se está evaporando.

Temperatura del bulbo húmedo: Es la temperatura de equilibrio dinámico que se alcanza en la superficie del agua cuando el flujo del calor transferido a la superficie por convección se iguala con el flujo de masa transferido fuera de la superficie. (Rivera, 2016)

Recirculación: La recirculación en las torres de enfriamiento se define como una adulteración de la atmósfera de entrada a la torre por la atmósfera de salida. El efecto de la recirculación se ve en un inesperado aumento de la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento (por encima de la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente), y un correspondiente incremento en la temperatura del agua que sale de la torre. (Rivera, 2016)

La temperatura de bulbo húmedo va a ser más baja que la temperatura de bulbo seco, ya que el bulbo seco solo estará en contacto con el aire frío y el bulbo húmedo estará en contacto con parte del vapor de agua que viene con una temperatura inferior.

Con la temperatura de bulbo seco y húmedo y utilizando una tabla psicométrica que se puede observar en la figura 3, se encuentra la humedad relativa en el ambiente que se ubica en las líneas curvas, la temperatura de rocío, y los valores de las entalpías, cabe resaltar que dependiendo del lugar de la instalación del equipo la altitud cambiará y por tanto los valores obtenidos.

Para las entalpías de entrada y de salida de la torre de enfriamiento se utiliza esta misma carta psicrométrica y lo único que cambiaría serían las temperaturas de bulbo seco y húmedo en la entrada y la salida en la torre.

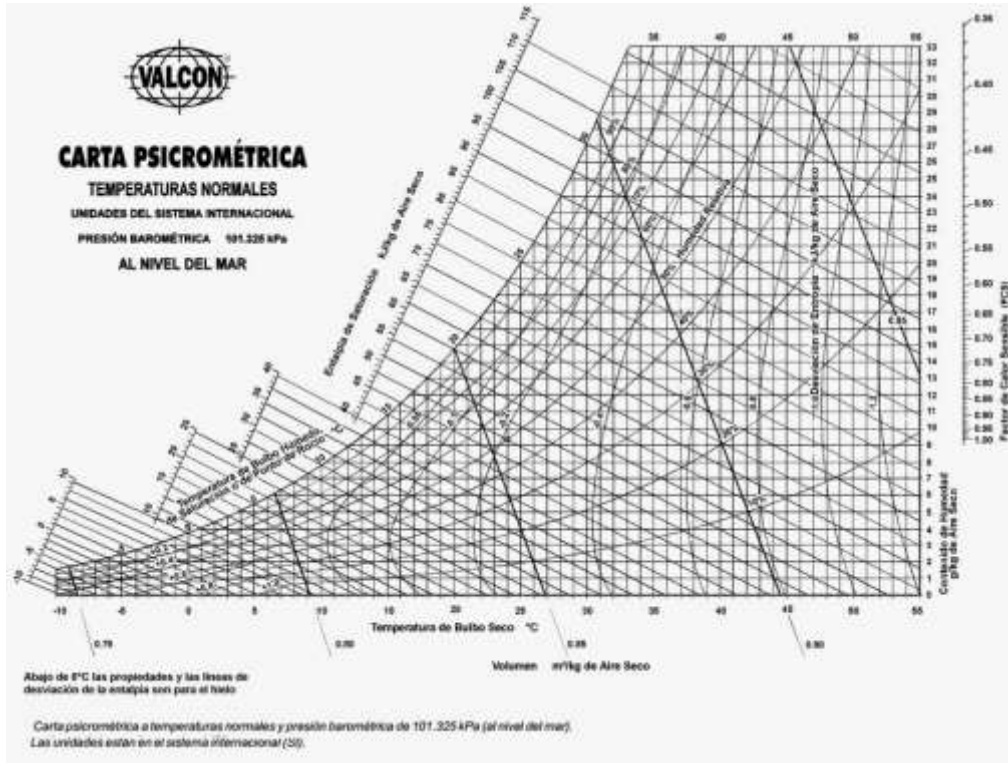


Figura 3. Carta psicrométrica (Boles & Cengel, 2012)

2.5 Selección del tipo de torre de enfriamiento.

Para realizar los cálculos de la torre de enfriamiento se necesitan, los datos básicos como lo es el caudal de agua, la temperatura del agua a enfriar, la temperatura de salida del agua requerida y la temperatura del bulbo húmedo en el ambiente.

El potencial entálpico para el diseño de la torre de enfriamiento, se propone aplicar el método de Merkel, que en 1925 propuso una teoría relacionada con la evaporación y la transferencia de calor sensible que ocurre en un proceso de contacto directo tal como una torre de enfriamiento o

de humidificación de aire, para una diferencia de entalpía del aire. Una representación tal fue establecida a varios tipos de torres de enfriamiento. La derivación fue hecha para el contacto de aire y agua en contracorriente.

2.6 Selección de la bomba

Bomba centrífuga: son máquinas rotativas que son capaces de transformar la energía mecánica por medio de un impulsor en energía de presión de un fluido incompresible, sirven para aumentar la velocidad del fluido para poder transportarlo.

Para la selección de la bomba que va a llevar el agua de la parte inferior de un tanque que se ubica en la base de la torre de enfriamiento, vamos a hallar la potencia necesaria para llevar el fluido del tanque a la parte superior de la torre donde va a ser rociada para ser enfriada finalmente al ir bajando y tener contacto directo con el aire frío en las cámaras de transferencia en la altura empacada.

Para los cálculos de la potencia de la bomba utilizamos las ecuaciones del libro mecánica de fluidos. (Mott, 2006).

$$P = \frac{Q\rho gh_g}{746\epsilon} \quad (\text{ec.8})$$

Donde:

P Potencia de la bomba en HP

Q Caudal de agua en la tubería en L/s

g Gravedad en m/s²

hg Cabeza de la bomba en m

ε Eficiencia de la bomba, entre 0 y 1

Para calcular la cabeza de la bomba, utilizamos un balance de energía entre dos puntos con la ecuación general de la energía, uno en la parte inferior del calentador y otro en la parte superior cuando sale de los aspersores.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} + hg = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} + h_{friccion} \quad (\text{ec. 9})$$

Para reducir los cálculos, no se va a tener en cuenta la pérdida en la cabeza de fuerza por fricción ya que la altura de aspersión y la longitud de la tubería no son significativa en este caso, la velocidad de salida del agua es igual a cero ya que se encuentra en reposo en el tanque ubicado en la parte inferior de la torre, la presión en el tanque es la misma de la atmosfera al igual que en la salida del agua. Entonces tenemos la ecuación:

$$hg = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{ec. 10})$$

Donde:

h_2 Altura de la salida de agua en m

v_2 Velocidad de salida del agua en m/s

La velocidad de salida del agua se encuentra con el flujo másico de salida y el diámetro nominal de la tubería, que en nuestro caso es una tubería en PVC.

Ya teniendo la potencia necesaria para llevar el agua a la parte superior de la torre de enfriamiento, se hace la selección de la bomba adecuada.

2.7 Bases de Diseño

Se considera el aire ingresa y sale saturado con una mezcla de vapor de agua.

La temperatura de salida del aire es el promedio de las temperaturas de entrada y salida del agua.

El cálculo de las propiedades del aire en el sistema de enfriamiento estará con base a las tablas y cartas psicométricas expuestas anteriormente.

El diseño de la torre será de tiro inducido y de flujo contracorriente, ya que la torre de este tipo de flujo es más eficiente, no existen problemas de distribución y recirculación de aire, su diseño es compacto; es decir, se puede instalar en un espacio reducido y de igual forma, hay mayor control del diferencial de enfriamiento, lo que permite un mayor rendimiento óptimo en el proceso (Paucar, 1999)

2.8 Empaque

Es el corazón de la torre de enfriamiento, la función del empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de las gotas a través del aparato. En las torres de enfriamiento debido a los requerimientos de grandes volúmenes de aire y pequeñas caídas de presión permitidas se consideran según la figura 4, dos tipos básicos de empaque: de salpicadura y laminares (de no salpicadura). (Paucar, 1999)

Los primeros están formados por parrillas constituidas por listones de diversos materiales: madera (especialmente tratada), poliestireno, polietileno u otros tipos de plásticos, aunque a veces para casos especiales se utilizan aluminio, materiales cerámicos, entre otros. Estos listones son apilados en plataformas y separados entre sí a distancias variables que rompen al agua en gotas menudas a medida que caen de plataforma en plataforma. Las torres de empaque de salpicadura son los más utilizados en instalaciones industriales.

En los empaques de tipo laminar el agua se extiende en infinidad de láminas delgadas de gran superficie, el empaque ideal, debe tener desniveles que permitan humedecer bien la superficie adsorbente. De lo contrario el agua tiende a fluir en pequeño riachuelo y desde que la película de agua se adhiere a la superficie del empaque no hay gotas de agua que impidan el flujo de aire a través de la torre. De esta forma se favorece el manejo de una mayor velocidad y volumen de aire, así como alturas de empaque y alturas de bombeo menores. Estos empaques tienen alto rendimiento por metro cuadrado de superficie ocupada, pero son caros. Los materiales frecuentemente utilizados en la fabricación de este tipo de empaque deben ser resistentes y ligeros en peso, tales como: celulosa, amianto-cemento, plásticos, acero galvanizado, aluminio, y en formas de chapas onduladas.

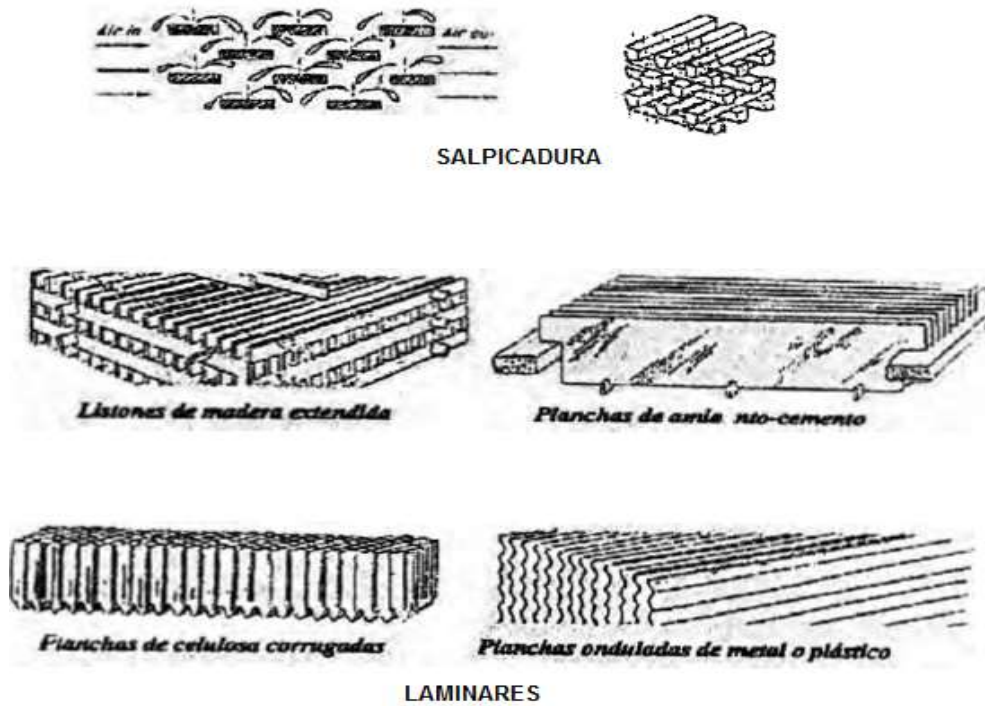


Figura 4. Tipos de empaques de una torre de enfriamiento (Paucar, 1999)

2.9 Selección del extractor de salida.

La selección del extractor de salida se tomó de los cálculos hechos por el fabricante de extractores de aire infhostel.

La potencia del extractor va a depender del diámetro de salida de aire, ya que mientras mayor sea el diámetro de salida, mayor es la salida de aire, por ende, es necesario calcular el diámetro del ducto de salida del extractor de manera detallada incluyendo la velocidad de flujo en la salida de aire.

$$diámetro = \frac{200}{6} \sqrt{\frac{Q}{\pi v}} \text{ (ec 11)}$$

Donde:

Q Caudal del aire en m³/h

V Velocidad de salida del flujo de aire.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de la investigación.

Este trabajo fue desarrollado de forma descriptiva ya que se realizó observando de forma detallada los procedimientos técnicos relacionados con el sistema de la torre de enfriamiento, bomba centrífuga, extractor de aire y de las propiedades físicas de los flujos de fluidos involucrados, como es el agua y el aire. De igual forma, el diseño corresponde al tipo experimental transaccional ya que se recolectaron datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito esencial es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Pueden abarcar varios grupos o subgrupos de personas, objetos o indicadores. (Hernández Sampier, 2004)

3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos se pueden clasificar en información de datos primarios y secundarios. Los datos primarios se recogen directamente de la realidad y a su vez permiten cerciorarse de las verdaderas condiciones en que se han obtenido los datos; y los datos secundarios son aquellas informaciones que son elaborados y procesados de acuerdo con los fines del autor original.

Las técnicas que se utilizaron en el desarrollo de esta evaluación son las siguientes:

Información de datos primarios: esta fue suministrada por el contacto directo con el campo y con la realidad. Esta información se obtuvo visitando y preguntándole al personal que labora en las instituciones y universidades dudas puntuales sobre el desarrollo de este trabajo, aprovechando

que ya han realizado esta clase de proyectos como es el caso de la institución universitaria Pascual Bravo.

Información de datos secundarios: está relacionada con toda la documentación referente a las especificaciones técnicas del sistema operacional de la torre de enfriamiento. Esta información se obtuvo a través de empresas que trabajan con el sistema de la torre de enfriamiento como son Glaciar Ingeniería S.A.S y Gunt Hamburg. En la empresa New Stetic donde laboró actualmente se observó el funcionamiento real de la torre de enfriamiento de tiro inducido con la que cuenta dicha empresa y que sirve para refrigerar un sistema hidráulico, donde se pudo tomar nota de las características técnicas del completo funcionamiento interno y externo del equipo.

3.3 Fases de la investigación

3.3.1 Revisión de las propiedades físicas del fluido de agua y de aire.

Con la finalidad de establecer los valores de la densidad, capacidad calorífica y viscosidad cinemática, las cuales son fundamentales para realizar el diseño de una torre a escala de laboratorio llevando a cabo el proceso de enfriamiento, se consultó el texto bibliográfico. (Boles & Cengel, 2012)

3.3.2 Dimensionamiento de la torre de enfriamiento a través de cálculos matemáticos y de diagramas.

Se realizaron los cálculos matemáticos, determinando la humedad absoluta, la entalpía de entrada y de salida, la carga de calor, el volumen húmedo, la relación entre el flujo líquido y el aire seco, el número de unidades de difusión, la altura del empaque, las características del empaque y el

diámetro de la torre de enfriamiento. Con respecto a los servicios auxiliares, principalmente se determinó la potencia de la bomba centrífuga y del extractor, en éste último también se determinó el diámetro, área flujo de aire y velocidad. De igual forma se estableció las hojas de especificaciones de cada equipo involucrado en el sistema de enfriamiento.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Revisión de las propiedades físicas de los flujos de aire y agua.

En esta fase se procedió a revisar las propiedades de los fluidos del aire y agua a temperatura ambiente, las cuales se presenta en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Propiedades Físicas del aire a temperatura ambiente (25°C)

Densidad Kg/m^3	Calor específico (Cp) $J/Kg K$	Viscosidad Cinemática m^2/s
1,187	1007	$1,562 \times 10^{-5}$

Fuente: (Boles & Cengel, 2012)

Tabla 2 Propiedades Físicas del agua a temperatura ambiente (25°C)

Densidad Kg/m^3	Calor específico (Cp) $J/Kg K$	Viscosidad Cinemática m^2/s
997,0	4180	$8,937 \times 10^{-7}$

Fuente: (Paucar, 1999)

4.2 Dimensionamiento de la torre de enfriamiento empleando diagramas y cálculos matemáticos.

El dimensionamiento de la torre de enfriamiento consta de los siguientes cálculos y diagrama:

4.2.1 Datos de Operación de la torre.

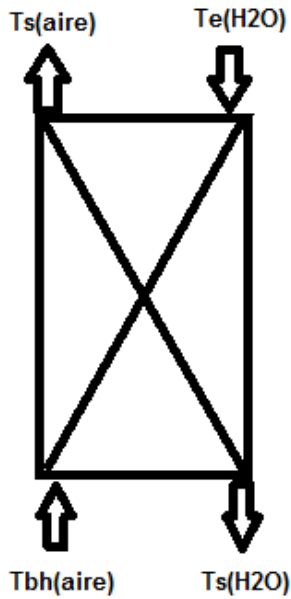


Figura 5. Diagrama de proceso de la torre de enfriamiento (Paucar, 1999)

Tabla 3. Datos de operación de la torre de enfriamiento.

Operación	Valor	Unidad (S. Internacional)	Unidad	Unidad
			Valor	(S. Inglés)
Flujo Volumétrico de agua, L	$9,46 \cdot 10^{-4}$	m^3/s	15	GPM
Temperatura de entrada de agua, Te(H ₂ O)	30	°C	86	°F
Temperatura de Salida de agua, Ts(H ₂ O)	25	°C	77	°F
Temperatura de bulbo de aire de entrada, Tbh(aire)	24	°C	75	°F
Temperatura de Salida de aire, Ts(aire)	27,50	°C	81,50	°F

Ecuación de Entalpía de la mezcla aire – vapor de agua

$$H = (0,24 + 0,45Y)(t_b - 32) + 1075,8Y \quad (\text{Ec. 12})$$

El valor de 1075,8 proviene del calor latente de vaporización, cuya unidad es el Btu/Lb a una temperatura de referencia de 32°F (0°C)

De igual forma Y es la mezcla absoluta de la mezcla, en unidades de $\text{Lb agua} / \text{Lb aire seco}$

Para las condiciones de saturación, la ecuación matemática es la siguiente:

$$H^* = (0,24 + 0,45Y_S)(t_b - 32) + 1075,8Y_S \quad (\text{Ec. 13})$$

Ecuación de humedad absoluta de la mezcla aire – vapor de agua

$$Y = \frac{0,622P}{14,696 - P} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$Y_S = \frac{0,622P_S}{14,696 - P_S} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

P y P_S es la presión parcial del vapor en la mezcla y en la saturación respectivamente

Y_S es la humedad de la mezcla en la saturación

Nota: Las tablas con los valores de P_S se presenta en el apéndice A

P_S del vapor en la mezcla a 24°C (75°F) es de 22,395 mmHg equivalente a 0,433 psi.

Ecuación de volumen húmedo de la mezcla aire – vapor de agua

$$V_H = (0,0252 + 0,0405Y)(T + 460) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

V_H es el volumen húmedo, expresado en $\text{ft}^3 / \text{Lb de aire seco}$

Con base a las ecuaciones matemáticas establecidas anteriormente, se procede a calcular la entalpía de la mezcla de aire – vapor de agua.

Sustituyendo los valores en la ecuación 11 se tiene que:

$$Y_S = \frac{0,622(0,433 \text{ psi})}{14,696 - 0,433 \text{ psi}} = 0,01888 \text{ Lb agua} / \text{Lb aire seco} \quad (\text{Ec. 17})$$

Y Sustituyendo Y_S en la ecuación 9.

$$H^* = (0,24 + 0,45(0,01888))(75 - 32) + 1075,8(0,01888) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$H_{1*} = 30,996 \text{ BTU} / \text{Lb aire seco} = 72,097 \text{ KJ} / \text{Kg aire seco} \quad (\text{Ec. 15})$$

La entalpía de aire entrada (H_1) es de $30,996 \text{ BTU} / \text{Lb aire seco}$ equivalente a $72,097 \text{ KJ} / \text{Kg aire seco}$

Cálculo de entalpía del aire de salida (H_2)

PS del vapor en la mezcla a $27,50^\circ\text{C}$ ($81,50^\circ\text{F}$) es de $27,569 \text{ mmHg}$ equivalente a $0,533 \text{ psi}$.

Sustituyendo los valores en la ecuación 11 se tiene que:

$$Y_S = \frac{0,622(0,533 \text{ psi})}{14,696 - 0,533 \text{ psi}} = 0,02341 \text{ Lb agua} / \text{Lb aire seco} \quad (\text{Ec. 16})$$

Y Sustituyendo Y_s en la ecuación 9.

$$H^* = (0,24 + 0,45(0,02341))(81,50 - 32) + 1075,8(0,02341) \quad (\text{Ec. 17})$$

$$H_2^* = 36,543 \text{ BTU/Lb aire seco} = 84,999 \text{ KJ/Kg aire seco} \quad (\text{Ec. 18})$$

La entalpía de aire salida (H_2) es de $36,543 \text{ BTU/Lb aire seco}$ equivalente a $84,999 \text{ KJ/Kg aire seco}$

Cálculo de Carga de Calor (Q)

$$Q = LC_p\Delta T \quad (\text{Ec. 19})$$

Calculando L, se tiene que:

$$L = 20 \frac{\text{Galón}}{\text{min}} * \frac{3,78 * 10^{-3} \text{m}^3}{1 \text{Galón}} * \frac{996,30 \text{ Kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{Lb}}{0,4536 \text{ Kg}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{h}}$$

$$L = 9963 \text{ Lb/h} \quad (\text{Ec. 20})$$

Se procede a buscar la capacidad calorífica del agua a la temperatura promedio en el Cengel (2012), Anexo B. La capacidad calorífica del agua a $27,5^\circ\text{C}$ es de $4178,50 \text{ J/Kg K}$ equivalente a $0,999 \text{ BTU/Lb }^\circ\text{F}$

Sustituyendo los valores en la Ec. 6

$$Q = 9963 \text{ Lb/h} * 0,999 \text{ BTU/Lb } ^\circ\text{F} (86^\circ\text{F} - 77^\circ\text{F}) \quad (\text{Ec. 21})$$

$$Q = 89577,33 \text{ BTU/h} \text{ equivalente a } 26,235 \text{ KW} \quad (\text{Ec. 22})$$

Cálculo de la relación L/G

Para realizar la relación es indispensable la ecuación del balance de energía, la cual es la siguiente:

$$LC_p\Delta T = G\Delta H \quad (\text{Ec. 23})$$

Despejando L/G, la Ec. 7 queda:

$$\frac{L}{G} = \frac{\Delta H}{C_p\Delta T} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\frac{L}{G} = \frac{36,543 \text{ BTU/Lb aire seco} - 30,996 \text{ BTU/Lb aire seco}}{0,999 \text{ BTU/Lb } ^\circ\text{F} (86^\circ\text{F} - 77^\circ\text{F})}$$

$$\frac{L}{G} = 0,617 \quad \text{Ec. 25}$$

Cálculo del flujo de Aire seco (G).

Se obtiene a partir de lo siguiente:

$$G = \frac{9963 \text{ Lb/h}}{0,617}$$

$$G = 16147,49 \text{ Lb de aire seco/h} = 7324,38 \text{ Kg de Aire seco/h}$$

Se procede a calcular la humedad de salida de la mezcla de aire – vapor de agua (V_H)

La presión parcial del vapor de agua a 27,5°C (81,50°F) es de 27,57 mmHg equivalente a 0,533 psi.

$$Y_s = \frac{0,622(0,533 \text{ psi})}{14,696 - 0,533 \text{ psi}} = 0,02341 \text{ Lb agua/Lb aire seco}$$

Sustituyendo en Ec. 5

$$V_H = (0,0252 + 0,0405(0,02341))(81,50 + 460)$$

$$V_H = 14,159 \text{ ft}^3/\text{Lb de aire seco}$$

Entonces el flujo volumétrico de aire (G) requerido sería:

$$G = 16147,49 \frac{\text{Lb de aire seco}}{\text{h}} * 14,159 \frac{\text{ft}^3}{\text{Lb de aire seco}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}$$

$$G = 3810,54 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

4.2.2 Números de Unidades de Difusión.

$$N_G = \frac{KAV}{L} = \int \frac{dT}{H^* - H}$$

Dónde:

K es el coeficiente de transferencia de masa global

A es el área específica del empaque por volumen unitario del empaque

V es el volumen del empaque

H* es la entalpía de la mezcla aire – vapor de agua saturado a la temperatura del agua.

H es la entalpía de la mezcla aire-vapor de agua a la temperatura del aire.

Aplicando las ecuaciones 3.1 y 4.1 en base a la presión parcial del vapor de agua y sus respectivas temperaturas, se obtiene N_G.

Tabla 4. Número de unidades de difusión.

T(°C)/(°F)	H*	H	H* - H	(H* - H)AV	$\int \frac{dT}{H^* - H}$
24/75	30,996				
25/77	36,546	30,996	5,550	5,325	0,425
28/81,50	37,365	31,356	6,009	5,895	0,416

29/84,20	41,358	34,768	6,590	6,325	0,398
30/86	45,045	39,900	8,145	8,002	0,345
31/87,80	48,351	38,575	9,776	9,650	0,213
Total					1,819

Nota: Las Unidades de entalpía está en el sistema inglés

En función al resultado, se puede establecer que el número de unidades de difusión es de 1,819

4.2.3 Características del empaque.

El empaque que utilizará la torre de enfriamiento es tipo salpiqueo, cuyo modelo es la barra de Kelly Accupac, debido a su historial de rendimiento comprobado por el fabricante Brentwood industries y que es distribuido por la empresa Glaciar Ingeniería S.A.S.

La Superficie superior de 4,25 pulgadas (108 mm) de ancho y el rebote para alambres de 0,125 pulgadas (3 mm) ayudan a reducir la corriente de agua entre las capas de relleno.

Las barras Kelly se acoplan para permitir un apilamiento que ahorra espacio y reduce los costos de envío.

La velocidad promedio del aire para empaques eficientes es de $600 \text{ ft}/\text{min}$

4.2.4 Área del Empaque.

Para las condiciones de diseño establecidas, el flujo de aire es $G = 3810,54 \text{ ft}^3/\text{min}$, entonces el área del empaque requerido será.

$$A_{\text{aire}} = \frac{3810,54 \text{ ft}^3/\text{min}}{600 \text{ ft}/\text{min}} = 6,35 \text{ ft}^2$$

Para las condiciones de diseño establecido, el flujo de agua es de 9963 Lb/h equivalente a 20 GPM . Luego el área del empaque requerido será:

$$A_{\text{agua}_{\text{min}}} = \frac{20 \text{ gal}/\text{min}}{8 \text{ gal}/\text{min ft}^2} = 2,50 \text{ ft}^2$$

De acuerdo a las áreas obtenidas considerando el flujo de aire y agua, se escoge el área del empaque que satisface ambos flujos.

$$A_{\text{empaque}} = 6,35 \text{ ft}^2$$

4.2.5 Altura del empaque.

En las curvas características del empaque se ubica que la relación $\frac{L}{G} = 0,617$

y N_d es igual a 1,819 y una velocidad aproximada de 600 pie/min, la altura que satisface estos requerimientos es de 3,20 pies, equivalente a 1 metro.

Se tiene seis (6) empaques laminares, los cuales forman tres (3) niveles con dos (2) empaques por nivel, la separación entre niveles es de 1,18 pulgadas equivalentes a tres (3) centímetros.

Cada empaque tiene las siguientes dimensiones:

Diámetro = 1,50 ft (45,72 cm)

Altura= 0,98 ft (30 cm)

Entonces, las dimensiones finales de la torre de enfriamiento son:

Diámetro = 1,53 ft (46,72 cm)

Altura = 3,281 ft equivalente a 1 m

Debido a que la torre es de forma cilíndrica, se procede a calcular el área de la torre, tomando en cuenta la sección transversal de la misma.

$$A_{Torre} = \pi r^2$$

$$A_{Torre} = 3,1415 * 0,765^2$$

$$A_{Torre} = 1,838 \text{ ft}^2 (0,1708 \text{ m}^2)$$

4.2.6 Máxima Capacidad de la torre para enfriar agua.

$$L = 20 \frac{\text{Galón}}{\text{min}} * \frac{3,78 * 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ Galón}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * 8 \text{ h} = 36,288 \text{ m}^3$$

La máxima capacidad de la torre para enfriar agua durante 8 horas de funcionamiento es de 36,288 m³ para los rangos de temperatura de diseño entre 30°C a 25°C.

4.2.7 Boquillas de la Torre de Enfriamiento.

Según (Paucar, 1999), las boquillas que se utilizan a escala piloto tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 5. Características de las boquillas de atomización.

Características	Valor	Unidad
Dimensión (L*W*H)	8 x 6	cm
Tamaño (Puede ser modificado en función al diseño)	2,54	cm
Altura	90	cm
Masa	90	g
Aplicación	Contraflujo	---
Ancho	2,35	cm
Número de Boquilla	3	---
Flujo	10-25	GPM

Fuente: (Paucar, 1999)

Cabe destacar que las boquillas de atomización, se establecen mediante catálogo y pueden ser rediseñadas en función a los cálculos de diseño para la torre de enfriamiento, por lo que no es indispensable los cálculos matemáticos para las boquillas de atomización a escala piloto, es importante destacar que, las mismas se utilizan en columnas a presión atmosféricas, cuyo rociador es hueco de forma cónica de gran capacidad, que no obstruye la boquilla.

4.3 Equipos auxiliares.

Los equipos auxiliares son el extractor y la bomba centrífuga.

4.3.1 Característica del extractor.

El flujo del aire del extractor centrífugo no debe exceder de los 2500 pie^3/min , entonces el área mínima del extractor se define mediante la siguiente ecuación:

$$A_{min} = \frac{G}{V_{max}}$$

$$A_{min} = \frac{3810,54 \text{ ft}^3/\text{min}}{2500 \text{ Ft}^3/\text{min}} = 1,524 \text{ ft}^2 = 0,1416 \text{ m}^2$$

Entonces el diámetro a través del cual fluye el aire seco, es de forma circular, por lo tanto:

$$A_{\text{círculo}} = \frac{\pi D^2}{4}$$

Despejando el Diámetro, se obtiene el diámetro mínimo del extractor.

$$D = \sqrt{\frac{4A_{\text{círculo}}}{\pi}}$$

$$D = 1,940 \text{ ft} = 0,591 \text{ m}$$

Debido a que el diámetro del empaque es 45.72 cm para garantizar el área de transferencia de calor del agua con el aire y el área de flujo de aire en el extractor es de 60cm, la torre será de

60cm de diámetro para garantizar el área mínima de transferencia de calor y la velocidad de flujo de aire a la salida del extractor.

4.3.2 Característica de la bomba.

Para el cálculo de la bomba de centrifugado, necesitamos la potencia requerida para llevar el agua del tanque de almacenamiento donde se encuentra la resistencia hasta la parte superior donde se encuentran las boquillas por donde va a salir el agua.

$$P = \frac{Q\rho ghg}{746\epsilon} \quad (\text{ec.8})$$

Donde:

P es la potencia eléctrica de la bomba en HP

ρ Es la densidad del agua 1000 kg/m³

Q es el caudal de agua en la tubería en 9.46x10⁻⁴ L/s

g es la gravedad en 9.8 m/s²

hg es la cabeza de la bomba en m

ϵ Es la eficiencia de la bomba la cual es de 50%

$$hg = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{ec. 10})$$

Donde:

h₂ es la altura de la salida de agua en m

v₂ es la velocidad de salida del agua en 1.866 m/s

$$hg = 1.40 + \frac{(1.866)^2}{2(9.8)} \quad (\text{ec. 10})$$

$$hg = 1.577\text{m}$$

$$P = \frac{Q\rho ghg}{746\epsilon}$$

$$P = \frac{(9.46 \times 10^{-4})(1000)(9.8)(1.577)}{746(0.5)}$$


$$\text{HP} = 0.0391 \text{ Potencia eléctrica} = 29 \text{ WATTS}$$

Por condiciones del diseño de dicha torre se toma una motobomba centrífuga comercial de 1/2 Hp que este por encima de los valores anteriormente dados para que cumpla los requerimientos. Al tratarse de una torre de enfriamiento a escala, la potencia de la bomba es relativamente baja, debido a que la altura y presiones en la tubería no van a ser altas, la potencia de la bomba es una de las más bajas que hay en el mercado, por lo tanto cualquier potencia por encima de 29 Watts podrá servir para garantizar el flujo de agua constante en la salida del agua en la parte superior de la torre.

4.4 Hojas de especificaciones técnicas.


En la tabla 6 se presentan las hojas de especificaciones técnicas de la bomba centrífuga.

Tabla 6. Hojas de especificaciones de la bomba centrífuga.

	Diseño de una Torre de Enfriamiento	Fecha: Abril, 2019	
Hojas de especificaciones de equipos			
Identificación de equipo: Bomba Centrífuga		Modelo:	
Tipo de servicio: Bombear agua.		Número de equipos: 1	
	Sección de Datos Mecánico de Operación		
		Valor	Unidad
	Temperatura de operación	30	°C
	Temperatura de diseño	30	°C
	Altura de elevación máxima	7	m
	Motor de la bomba	0.5	Hp
	Voltaje	220	VAC
	La bomba es de flujo radial		

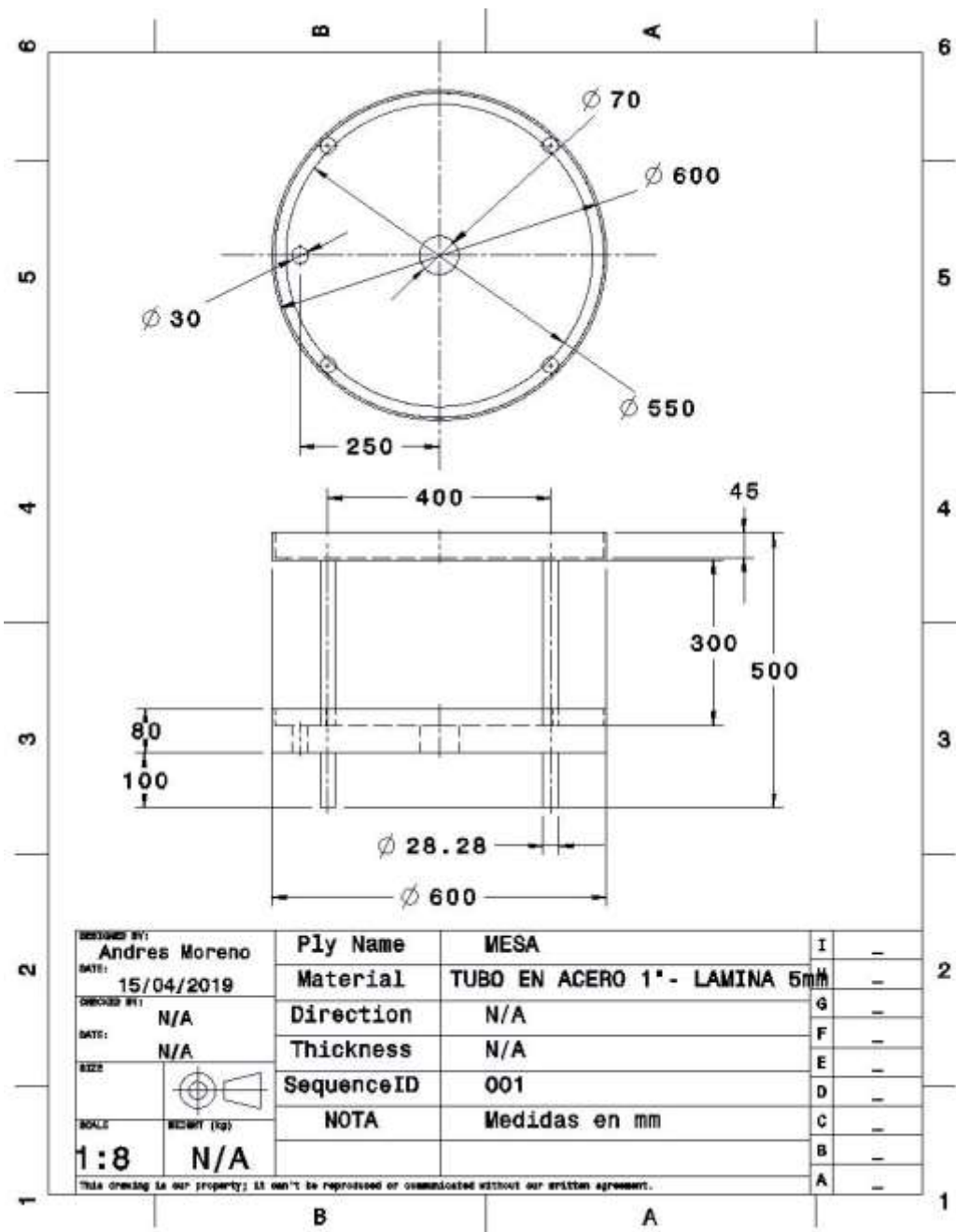
En la tabla 7 se presentan las hojas de especificaciones técnicas del ventilador.

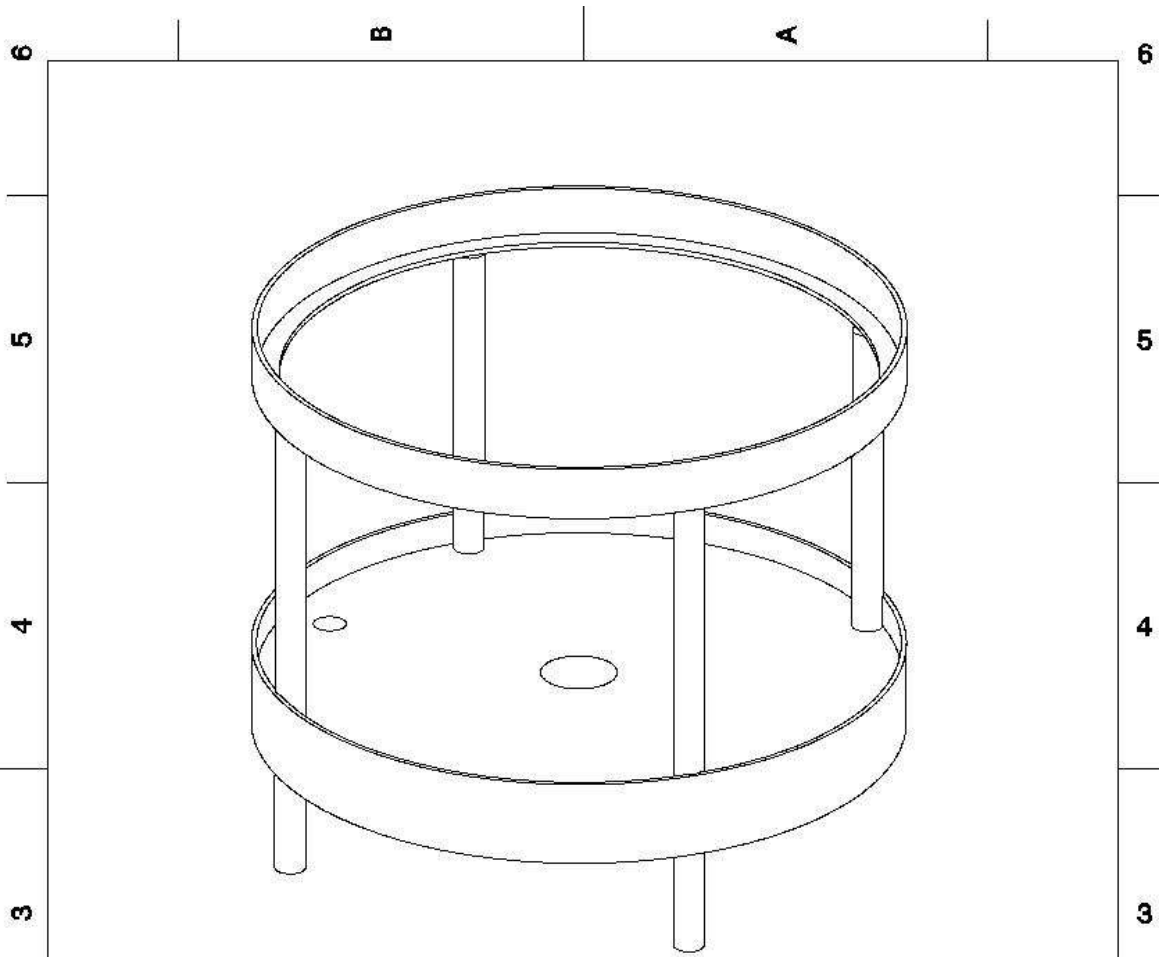
Tabla 7. Hojas de especificaciones del ventilador.

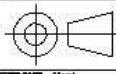
	Diseño de una torre de enfriamiento	Fecha: Abril, 2019	
Hojas de especificaciones de equipos			
Identificación de equipo: Ventilador		Modelo:	
Tipo de servicio: Extracción del Aire		Número de equipos: 1	
	Sección de Datos Mecánico de Operación		
		Valor	Unidad
	Diámetro del Extractor	59,10	cm
	Voltaje	110	VAC

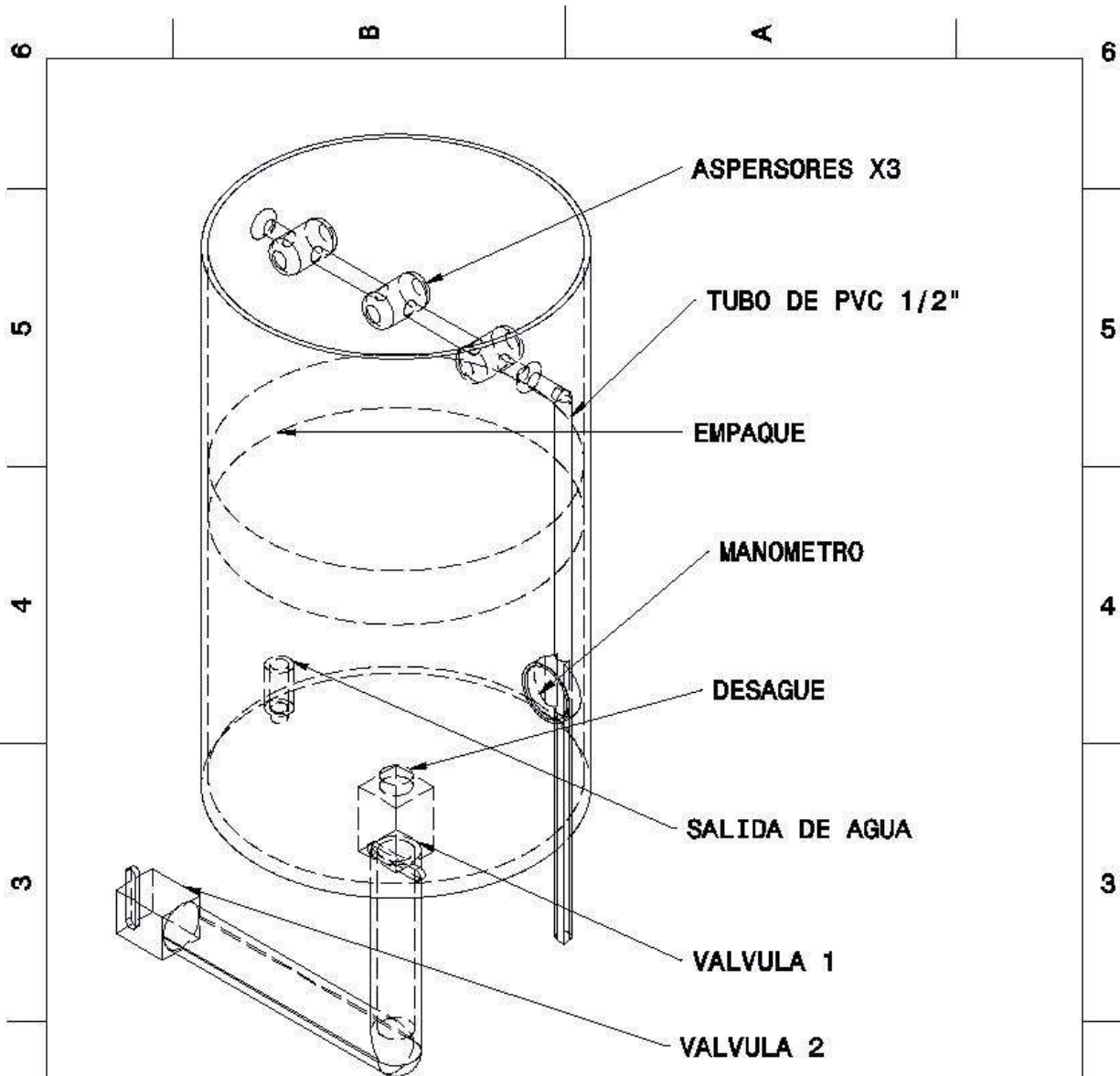
CAPITULO 5. PLANOS MECANICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

5.1 Diseño CAD de la torre de enfriamiento.



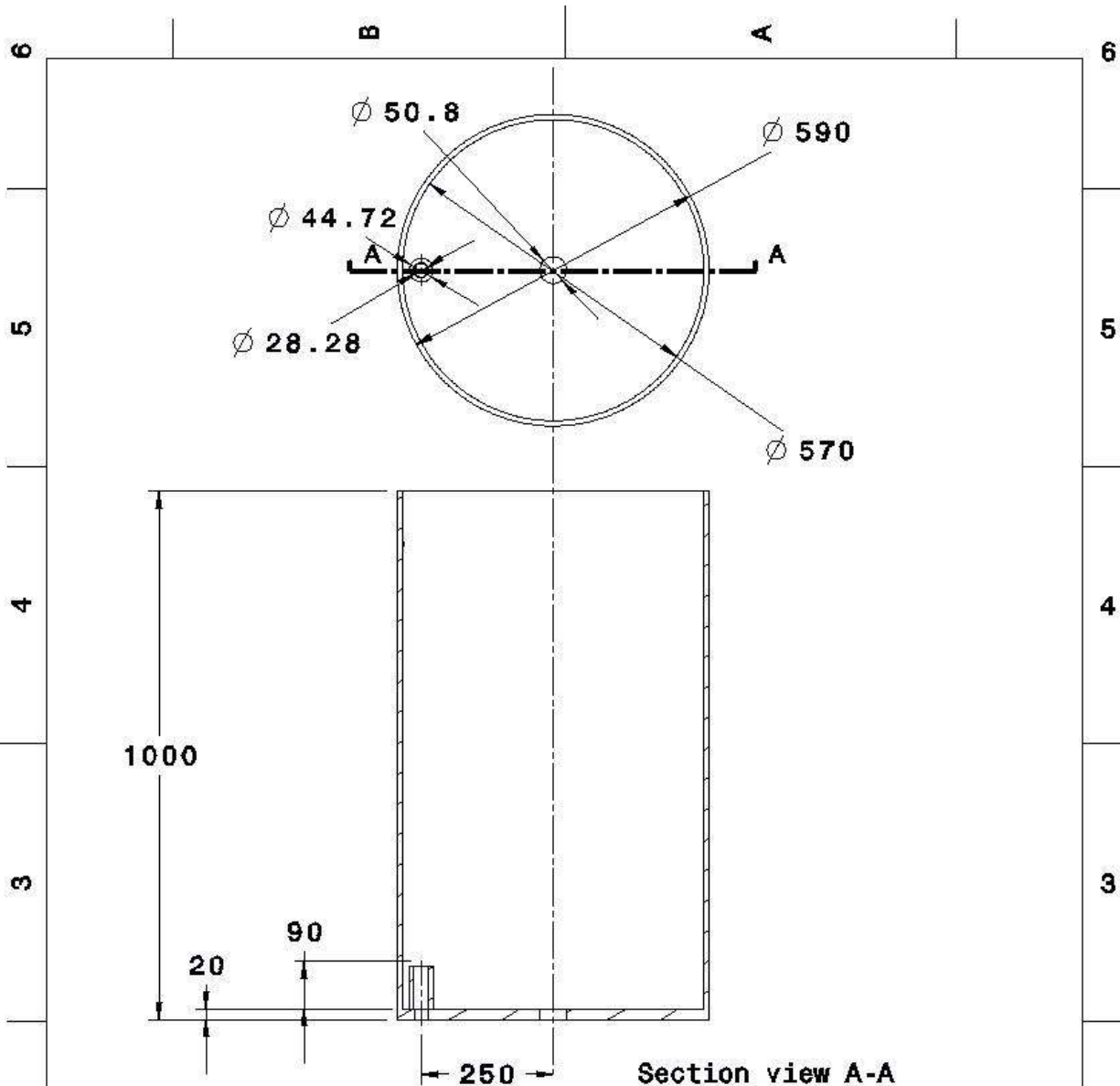


DESIGNED BY: Andres Moreno	DATE: 15/04/2019	Ply Name	ISOMETRICO MESA	I	-
		Material	TUBO EN ACERO 1"- LAMINA 5mm	H	-
CHECKED BY: N/A	DATE: N/A	Direction	N/A	G	-
SIZE		Thickness	N/A	F	-
SCALE 1:5	WEIGHT (KG) N/A	SequenceID	002	E	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		NOTA	Medidas en mm	D	-
				C	-
				B	-
				A	-

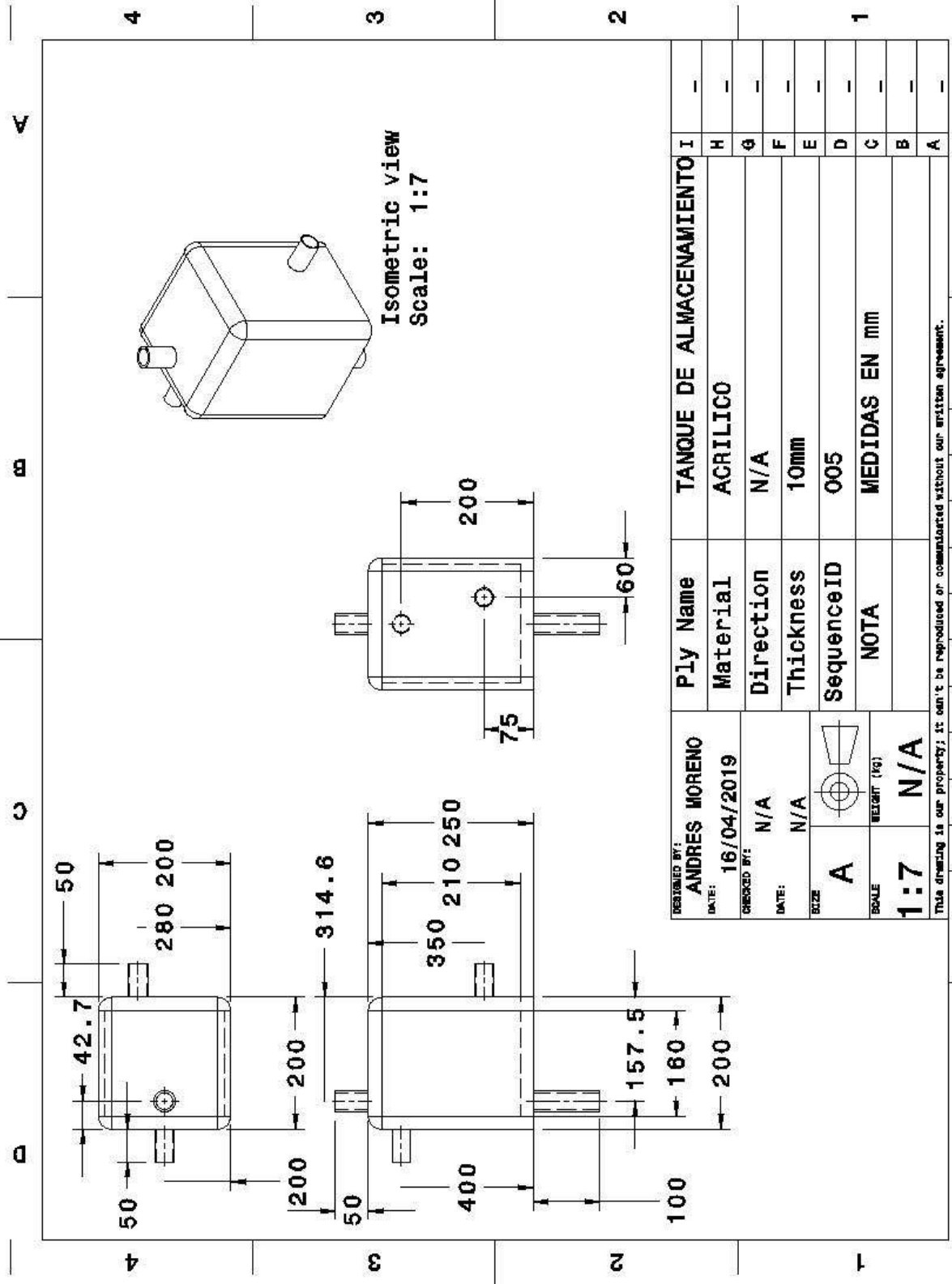


DESIGNED BY: ANDRES MORENO		Ply Name	TANQUE Y ACCESORIOS	I	-
DATE: 15/04/2019		Material	FIBRA DE VIDRIO	H	-
CHECKED BY: N/A		Direction	N/A	G	-
DATE: N/A		Thickness	N/A	F	-
SIZE A		SequenceID	003	E	-
SCALE 1:8	WEIGHT (kg) N/A	GroupID	N/A	D	-
			C	-	
			B	-	
			A	-	

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



DESIGNED BY: ANDRES MORENO	Ply Name	TANQUE	I	-
	DATE: 15/04/2019	Material	FIBRA DE VIDRIO	H
CHECKED BY: N/A	Direction	N/A	G	-
DATE: N/A	Thickness	N/A	F	-
SIZE A	SequenceID	004	E	-
SCALE 1:8	NOTA	MEDIDAS EN mm	D	-
	WEIGHT (KG) N/A		C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			B	-
			A	-

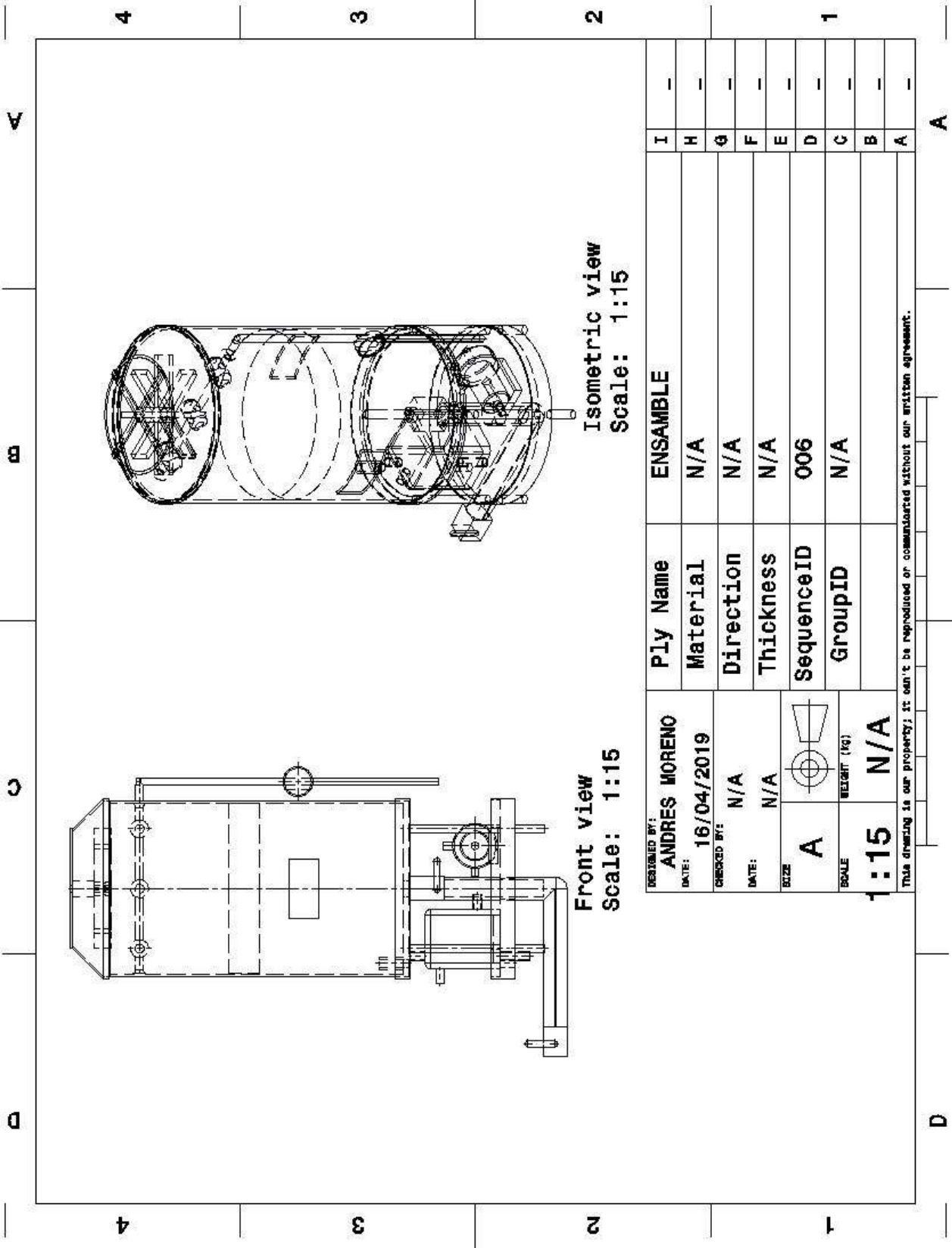


DESIGNED BY: ANDRES MORENO	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	I	-
DATE: 16/04/2019	Material ACRILICO	H	-
CHECKED BY: N/A	Direction N/A	G	-
DATE: N/A	Thickness 10mm	F	-
SIZE A	SequenceID 005	E	-
SCALE 1:7	NOTA MEDIDAS EN mm	D	-
		C	-
		B	-
		A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or commanbarded without our writton agreement.

A

D

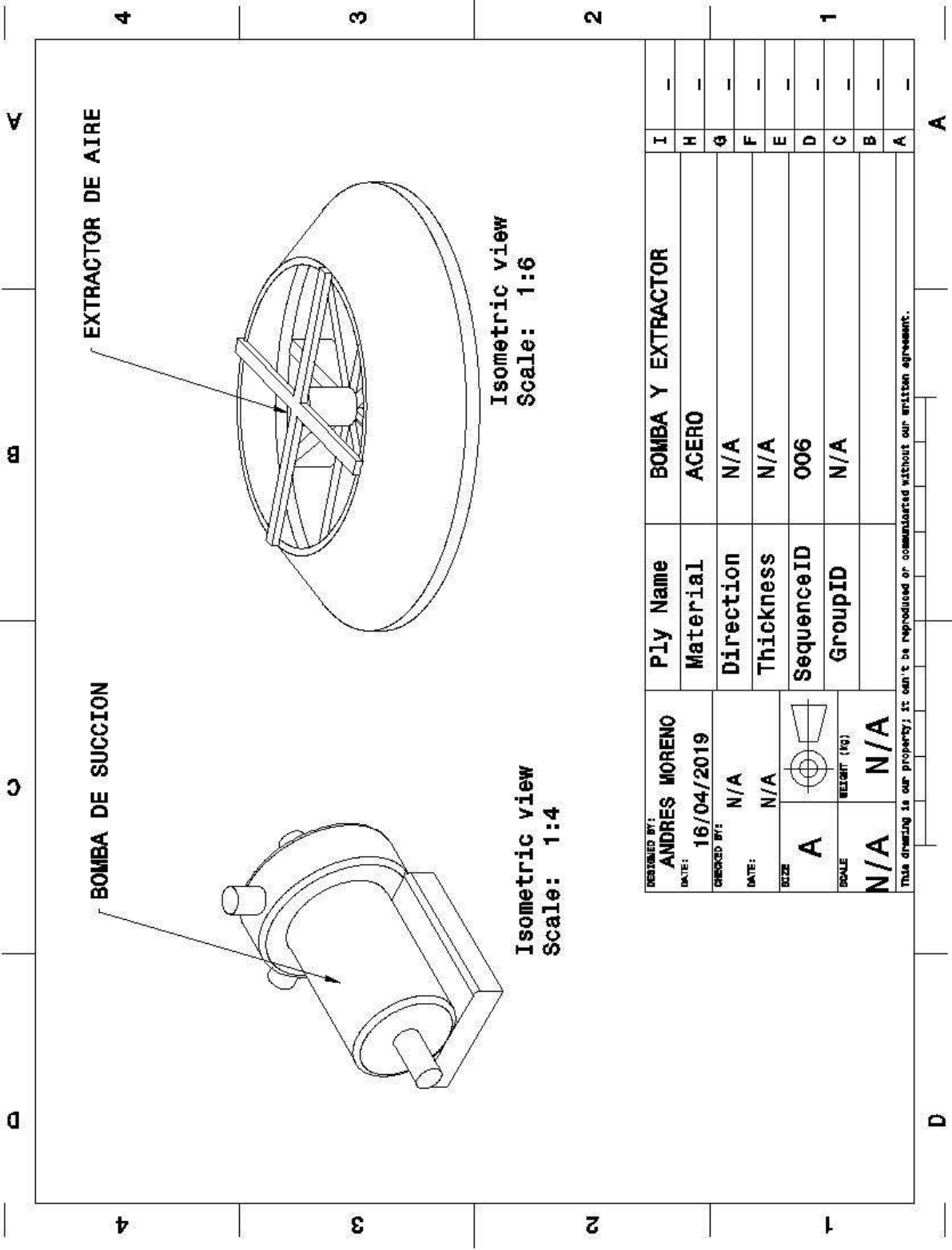


Front view
Scale: 1:15

Isometric view
Scale: 1:15

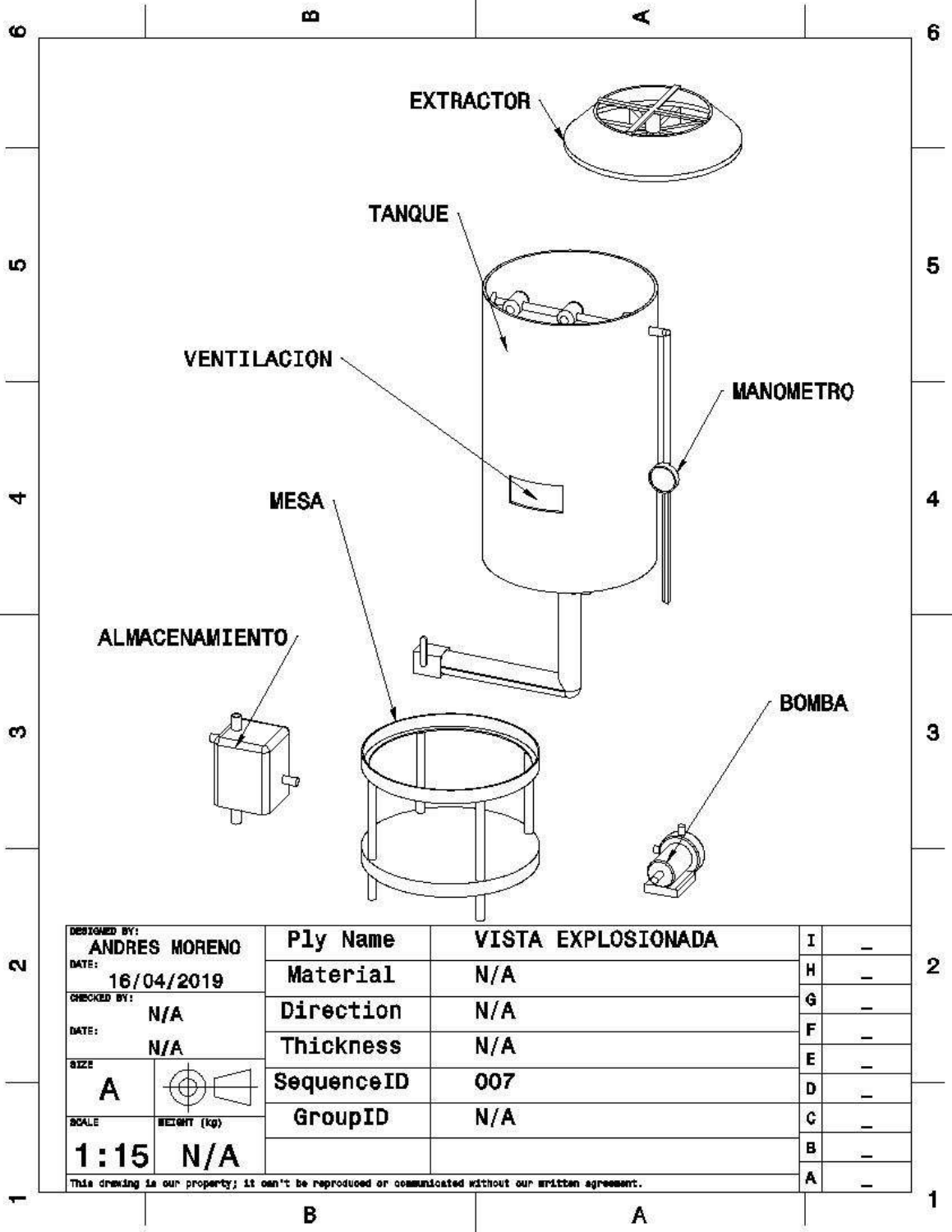
DESIGNED BY: ANDRES MORENO	Ply Name ENSAMBLE	I
DATE: 16/04/2019	Material N/A	H
CHECKED BY: N/A	Direction N/A	G
DATE: N/A	Thickness N/A	F
SIZE: A	SequenceID 006	E
SCALE: 1:15	GroupID N/A	D
WEIGHT (KG): N/A		C
		B
		A

This drawing is our property; it can't be reproduced or commercialized without our written agreement.



DESIGNED BY: ANDRES MORENO		Ply Name	BOMBA Y EXTRACTOR	I	-
DATE: 16/04/2019		Material	ACERO	H	-
CHECKED BY: N/A		Direction	N/A	G	-
DATE: N/A		Thickness	N/A	F	-
SIZE: A		SequenceID	006	E	-
SCALE: N/A		GroupID	N/A	D	-
N/A				G	-
N/A				B	-
N/A				A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or commercialized without our written agreement.



DESIGNED BY: ANDRES MORENO		Ply Name	VISTA EXPLOSIONADA	I	-
DATE: 16/04/2019		Material	N/A	H	-
CHECKED BY: N/A		Direction	N/A	G	-
DATE: N/A		Thickness	N/A	F	-
SIZE A		SequenceID	007	E	-
SCALE 1:15	WEIGHT (kg) N/A	GroupID	N/A	D	-
			C	-	
			B	-	
			A	-	
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					

CAPITULO 6. PLANOS ELECTRICOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

6.1 Establecimiento de estrategias de control eléctrico de la planta.

La planta será automática en todo su sistema de enfriamiento.

A continuación se explican los circuitos eléctricos de potencia y control de la torre de enfriamiento para comprender mejor su lógica cableada.

6.1.1 Funcionamiento del circuito eléctrico de potencia de la torre de enfriamiento.

El circuito de potencia esta alimentado por tres fases eléctricas (AC) que llegan a un interruptor tripolar para proteger el variador de velocidad y que este le suministre la energía eléctrica al motor trifásico cuando reciba la orden del circuito de control eléctrico.

6.1.2 Funcionamiento del circuito eléctrico de control de la torre de enfriamiento.

El circuito de control en forma manual y automática tiene un paro de emergencia y cuando se desee modificar la cantidad de agua que entra a la torre de enfriamiento se puede girar la perilla de control del variador de velocidad.

El tanque de almacenamiento de agua estará ubicado debajo de la torre de enfriamiento.

6.1.3 De forma automática:

Cuando se ubique el selector eléctrico de tres posiciones en estado automático por medio del PLC logo se activará la electroválvula empezando a llenar con agua el tanque hasta tocar el sensor de alto nivel, apagando la electroválvula y encendiendo por medio del relé de estado sólido la resistencia eléctrica que está dentro del tanque permitiendo calentar el agua. El sensor PT100 que está ubicado en el interior del tanque leerá la temperatura del agua por medio del

controlador de temperatura hasta que esta llegue a una temperatura de 30°C de operación, seguidamente dicho controlador le enviará la señal al PLC logo para que este encienda el extractor por medio del relevador y envíe la señal al variador de velocidad de encender la motobomba, y esta envíe el agua a la entrada de dicha torre donde se enfriara el agua y caerá en la parte inferior de la torre, para que el Termómetro LCD digital con sonda que está ubicado en ese punto lea y por medio de un display muestre la temperatura del agua a la salida de la torre de enfriamiento. Luego el agua que está depositada en la parte inferior de dicha torre pasará hacia el tanque, para posteriormente volver a bombear el agua hacia dicha torre si cumple los requerimientos de nivel alto y temperatura, repitiendo nuevamente el ciclo de enfriamiento del agua.

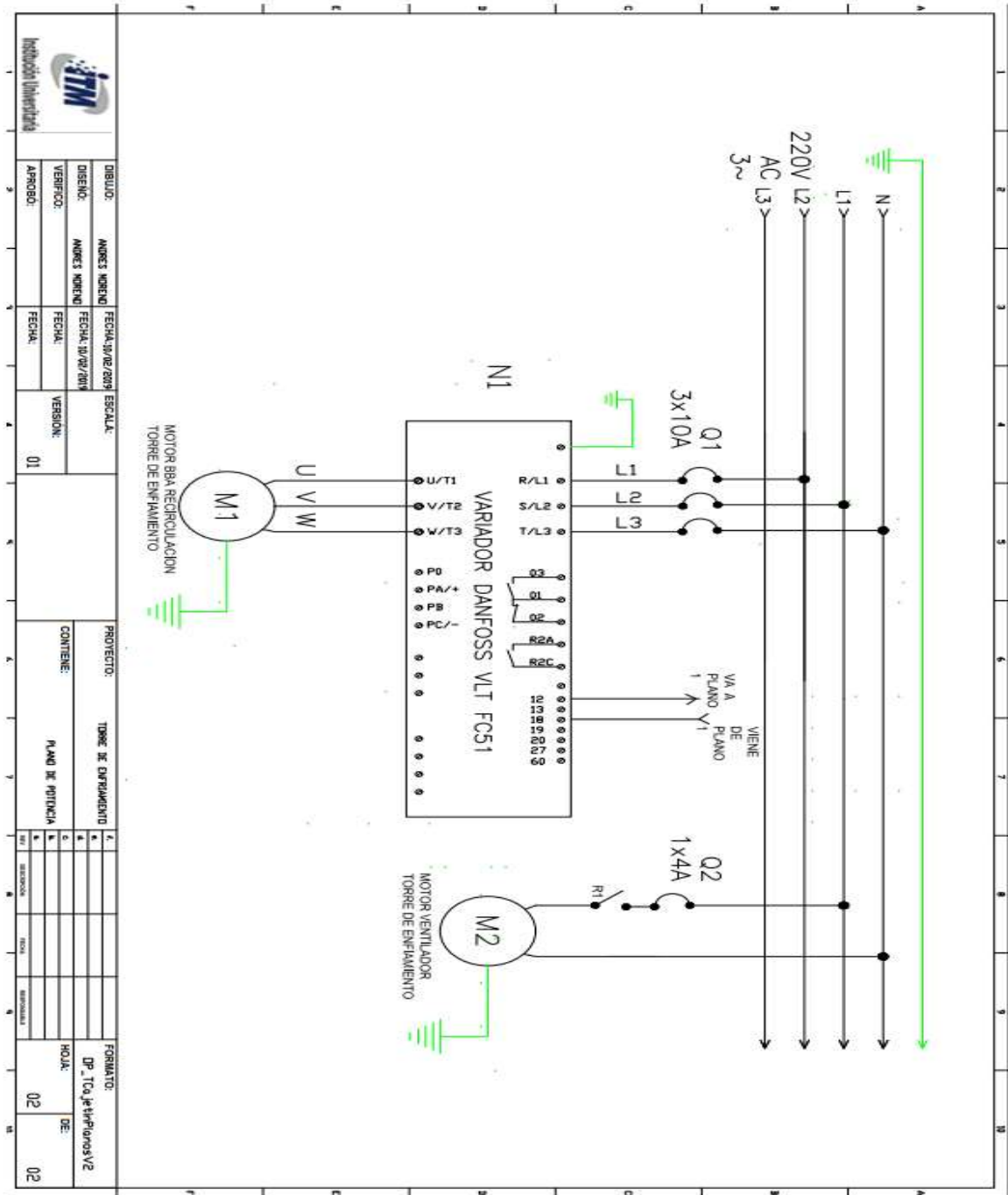
Si por algún motivo el nivel del agua del tanque está por debajo del sensor de nivel bajo de forma inmediata se apagará la resistencia eléctrica, la motobomba y el extractor para que seguidamente se encienda la electroválvula y llene el tanque de agua hasta el sensor de nivel alto.

Si por algún motivo la temperatura del tanque disminuye se apagará la motobomba y el extractor, para que de forma inmediata se encienda la resistencia eléctrica mientras el agua del tanque alcanza una temperatura de 30°C de operación.

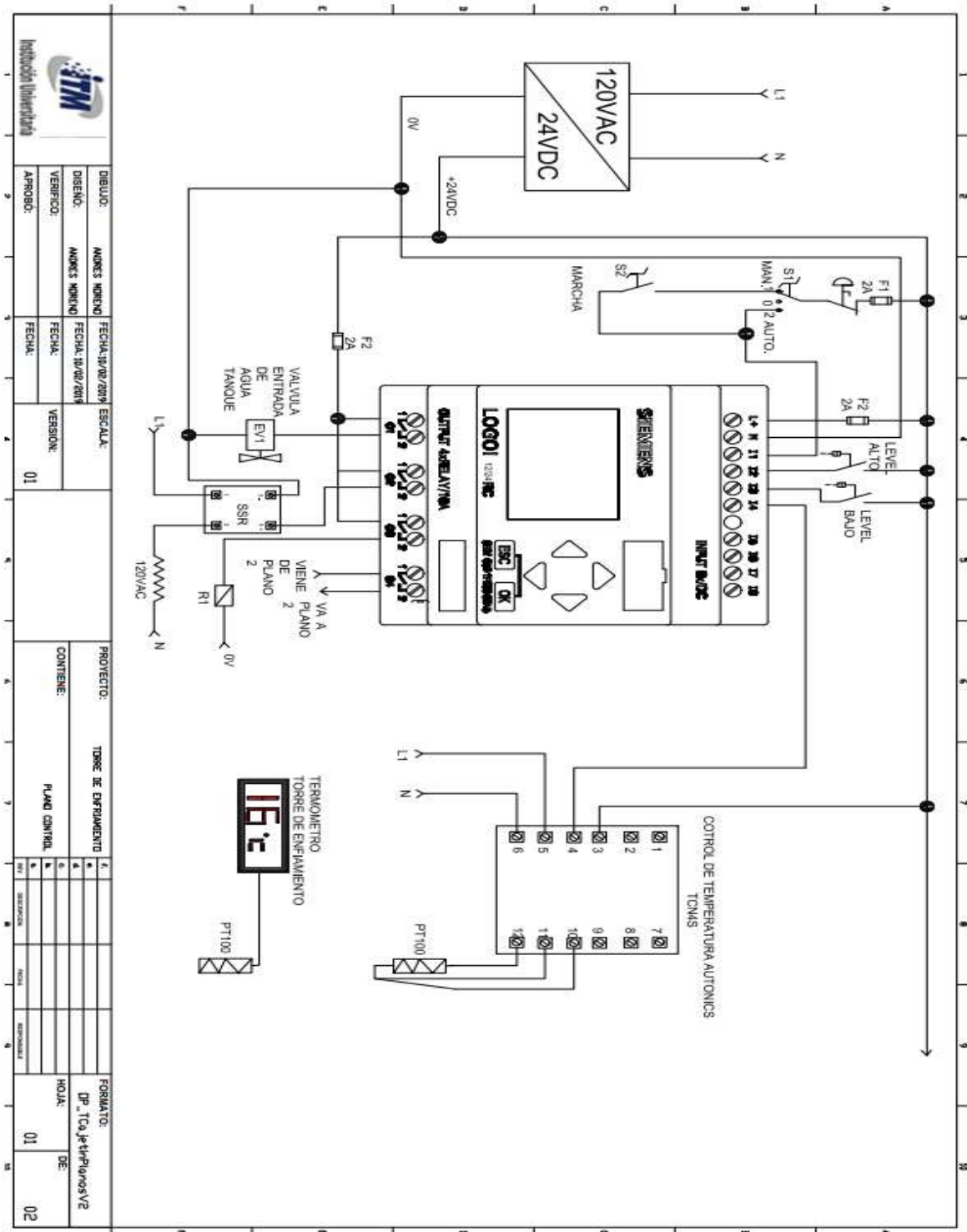
6.1.4 De forma manual:

Se debe colocar el selector eléctrico de tres posiciones en estado manual y con el selector eléctrico de dos posiciones se le puede dar inicio o apagar el funcionamiento de dicha torre. Después de que se le dé inicio al proceso, la torre de enfriamiento funcionará de forma igual que es estado automático.

6.2 Diagrama de potencia eléctrica de la torre de enfriamiento.



6.3 Diagrama de control eléctrico de la torre de enfriamiento.



CAPITULO 7. HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LA COTIZACION DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

En la siguiente tabla se presenta la cotización de la torre de enfriamiento.

Nombre	Empresa	Valor unitario	Cant.	subtotal
PLC logo 8 siemens 12/24 RC	Medir	\$578.000	1	\$578.000
Variador de velocidad danfoss VLT FC51	Medir	\$635.000	1	\$635.000
Fuente de energía eléctrica siemens 120VAC/24VDC	Medir	\$206.000	1	\$206.000
Fusibles cerámicos 5x20mm 2A	Medir	\$2.682	5	\$13.410
Manómetro 15 psi	Distriválvulas	\$30.000	1	\$30.000
Porta fusibles de 5x20mm 2A	Medir	\$7.876	2	\$15.752
Tablero eléctrico de control y potencia metálico 70x50x25	Medir	\$218.000	1	\$218.000
Pulsador tipo hongo NC	Medir	\$9.100	1	\$9.100
Selector eléctrico de 3 posiciones	Medir	\$8.700	1	\$8.700
Selector eléctrico de 2 posiciones	Medir	\$7.100	1	\$7.100
Electroválvula 24VDC 1/2"	Mactronica Bogotá	\$32.000	1	\$32.000

TACO RIEL 3X10A 06K CHINT	Medir	\$23.936	1	\$23.936
Interruptor automático especial de Cc-1p-6A- Curva C	Schneider - Electric	\$57.000	1	\$57.000
Calentador de agua termostático sumergible 110V	Globalmark trading	\$76.990	1	\$76.990
Relé Est Sol 40A DC/AC	Medir	\$53.100	1	\$53.100
Control Temperatur 48x48 TCN4S	Medir	\$152.363	1	\$152.363
Control Nivel Later 1/2x1/2NPT Inox	Medir	\$68.340	1	\$68.340
Termor PT100 1/4"x4"Cabezot 1/2Npt	Medir	\$118.000	1	\$118.000
Termómetro LCD digital con sonda	Importaciones Tripod	\$12.000	1	\$12.000
Relevo 08P 024VDC 2C	Medir	\$18.158	1	\$18.158
Moto Bomba centrifuga trifásica 220VAC,1/2HP,1500RPM	Metro oficial	\$1.549.790	1	\$1.549.790
Extractor 110VAC,1750RPM, diámetro 60cm	Electroviento	\$45.386	1	\$45.386
Boquillas pulverizadoras	Distribuyelo-2	\$54.990	4	\$219.960
Relleno tipo salpiqueo HTP-25	Glaciar ingeniería S.A.S	\$87.000	1	\$87.000
Tanque de fibra de vidrio de	Derpoliester	\$850.000	1	\$850.000

1m(altura), 60cm x 60cm	S.A.S			
Tanque ó recipiente de plástico de 35cm (altura) x 29cm (diámetro)	Homecenter	\$15.900	1	\$15.900
Tubería PVC ½”x6m	Homecenter	\$26.900	3	\$80.700
Válvula de bola ½ ” PVC	Yaxa Colombia S.A.S	\$65.777	1	\$65.777
Codo de 1/2” en PVC	Homecenter	\$1500	4	\$6000
Tee de 1/2” en PVC	Homecenter	\$2500	1	\$2500
			Total	\$5,255.962

CAPITULO 8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.

- Se diseñó una torre de enfriamiento de tiro inducido automatizada con dimensiones apropiadas para el laboratorio de fluidos del Instituto Tecnológico Metropolitano que facilitará a los docentes la explicación y a los estudiantes la comprensión del proceso en el mencionado sistema y en temas relacionados.
- Se estableció un modelo matemático para realizar los cálculos necesarios del dimensionamiento de la torre de enfriamiento.
- Se elaboró mediante un software CAD el modelo de la torre, los planos mecánicos y eléctricos del funcionamiento del equipo.
- Se realizó un costeo de fabricación de la torre de enfriamiento.
- Se recomienda establecer el plan de mantenimiento de la torre de enfriamiento.

REFERENCIAS

Austin, G. (1992). Manual de productos quimicos en la industria. *McGraw-Hill*, 1-871.

Boles, M. A., & Cengel, Y. A. (2012). Termodinámica. MCGRAW-HILL.

Crane, C. (1992). *Flujo de fluido en válvulas, accesorios y tuberías*. Mexico: McGraw-Hill.

Foust, A. (1979). *Principios de operaciones unitarias*. Mexico: Continental S.A.

Glaciar, I. S. (2019). *Torres de enfriamiento*. Obtenido de <https://glaciaringenieria.com.co/>

GreanKoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Mexico: ContinentalS.A.

Hamburg, G. (2019). *Refrigeracion*. Obtenido de <https://www.gunt.de/es/>

Hernández Sampier, R. (2004). Metodología de la investigación. Felix varela.

Holman, J. (1978). *Transferencia de calor*. Mexico: Continental S.A.

inhostel. (27 de Mayo de 2017). *Calculo y tipos de conductos de extraccion*. Obtenido de (<https://www.inhostel.com/calculo-y-tipos-de-conductos-de-extraccion/>).

Kern, D. (1999). *Transferencia de calor*. Mexico: McGraw-Hill.

Martinez de la cuesta, P. (2004). *Operaciones de separación en ingeniería química*. Mexico: Prentice Hall.

McCabe, S. (1982). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mexico: McGraw-Hill.

Mott, L. R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.

Paucar, K. M. Diseño y Construcción de una Torre de Enfriamiento de Tiro inducido con flujo en contracorriente. *Tesis*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Rivera, E. (31 de Octubre de 2016). *Un gran clásico, torres de enfriamiento*. Obtenido de Cero Grados Celsius: <https://0grados.com.mx/gran-clasico-torres-enfriamiento/>

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Juan Andres Moreno</u>

FIRMA ASESOR	<u>Daniel Smith</u> 27/08/19 Informe final completo

	FECHA ENTREGA: <u>27/08/2019</u>

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD	_____	
RECHAZADO _____	ACEPTADO _____	ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____
		ACTA NO. _____
		FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD	_____	
		ACTA NO. _____
		FECHA ENTREGA: _____