

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MECÁNICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA
PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO**

PRESENTADO POR:

RENÉ ARMANDO BELTRÁN ROMERO

CARLOS EDUARDO PALOMO SOSA

JORGE GUSTAVO PINO ESCOBAR

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA
PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO**

Presentado por:

RENÉ ARMANDO BELTRÁN ROMERO

CARLOS EDUARDO PALOMO SOSA

JORGE GUSTAVO PINO ESCOBAR

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

SAN SALVADOR, OCTUBRE DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

AGRADECIMIENTOS GRUPAL

A nuestras familias por ser nuestro soporte y aliento en momentos de dificultad a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A nuestros amigos por su apoyo incondicional en una etapa tan crucial como es la vida universitaria.

A nuestro asesor, por aportar de su conocimiento para la finalización del presente trabajo de grado, por sus incansables consejos profesionales, académicos y de vida.

Finalmente, a nuestra Universidad y Facultad, por formar en cada uno de nosotros un sentido crítico, de lucha y sobre todo de investigación.

Hacia la libertad por la cultura.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO	2
1.1. REFRIGERACIÓN	2
1.2. MÁQUINAS DE REFRIGERACIÓN	4
1.2.1. EFICIENCIA DE LOS REFRIGERADORES	5
1.2.2. SISTEMAS Y CICLOS DE REFRIGERACIÓN	5
1.3. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR	6
1.4. REFRIGERANTES	9
1.4.1. FACTORES A CONSIDERAR EN REFRIGERANTES	11
1.4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES	12
1.4.3. REFRIGERANTES MÁS UTILIZADOS	14
1.5. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	14
1.5.1. COMPRESORES	15
1.5.2. CONDENSADORES	18
1.5.3. EVAPORADORES	19
1.5.4. VÁLVULAS DE EXPANSIÓN	21
1.6. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	25
1.6.1. CONDUCCIÓN	26
1.6.2. CONVECCIÓN	27
1.6.3. RADIACIÓN	28
1.7. ANÁLISIS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	30
CAPÍTULO II: DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA PRODUCTORA DE TUBOS DE HIELO	33
2.1. DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE REFRIGERACIÓN	33
2.1.1. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD FRIGORÍFICA DE LA MÁQUINA	33
2.1.2. CARGA DE TRANSMISIÓN	34
2.1.3. CARGA DEL PRODUCTO	35
2.1.4. CARGA INTERNA	35
2.1.5. CARGA POR INFILTRACIÓN DE AIRE	35

2.1.6. CARGA DEL EQUIPO.....	36
2.1.7. CARGA FRIGORÍFICA TOTAL.....	36
2.2. DISEÑO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN.....	37
2.3. DISEÑO DEL EVAPORADOR	38
2.3.1. FIJACIÓN DE VARIABLES DE DISEÑO	38
2.3.2. MODELO ANALÍTICO.....	39
2.3.3. CÁLCULO DE RESISTENCIA UNO Y DOS.....	39
2.3.5. DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA DE REFRIGERANTE EN EVAPORADOR	42
2.4. CONDENSADOR.....	42
2.5. FILTRO	43
2.6. BOTELLA DE ASPIRACIÓN	44
2.7. TUBO CAPILAR	46
CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN.....	48
3.1. SISTEMAS DE LA MÁQUINA.....	48
3.2. CONTENEDOR DEL EQUIPO PRODUCTOR DE HIELO.....	48
3.2.1. DISPOSICIÓN INTERNA DENTRO DEL EQUIPO.....	50
3.3 FUNCIONAMIENTO DE LOS CICLOS SELECCIONABLES.....	57
CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DIDÁCTICO	58
4.1. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	58
4.2. SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA.....	65
4.3. SISTEMA ELECTRÓNICO	67
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	76

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN [1].	4
FIGURA 2. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR [1].	7
FIGURA 3. COMPRESOR HERMÉTICO. [8].	16
FIGURA 4. COMPRESO ESQUEMÁTICO PARA ANÁLISIS. [2]	17
FIGURA 5. CONDENSADOR DE CORAZA Y TUBOS [4].	18
FIGURA 6. CONDENSADOR DE SERPENTÍN DE TUBO [4].	19
FIGURA 7. EVAPORADOR TÍPICO DE UN CHILLER [4].	20
FIGURA 8. EVAPORADOR DE SUPERFICIE DE PLACA [6].	21
FIGURA 9. VÁLVULA DE EXPANSIÓN TÉRMICA [6].	22
FIGURA 10. TUBO CAPILAR [6].	22
FIGURA 11. GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO DEL REFRIGERANTE DENTRO DEL TUBO CAPILAR. [6]	23
FIGURA 12. GRÁFICA PARA FLUJO MÁSICO EN TUBO CAPILAR. [6]	24
FIGURA 13. GRÁFICA PARA FACTOR DE CORRECCIÓN DEL FLUJO MÁSICO. [6].	25
FIGURA 14. DIAGRAMA T-S DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN IDEAL.	37
FIGURA 15. DISEÑO DE EVAPORADOR. ELABORACIÓN PROPIA.	38
FIGURA 16. ESQUEMA DE RESISTENCIAS TÉRMICAS.	39
FIGURA 17. CONDENSADOR PARA ¼ DE HP.	43
FIGURA 18. FILTRO UBICADO EN LA LÍNEA DE LÍQUIDO.	44
FIGURA 19. BOTELLA DE ASPIRACIÓN PARA REFRIGERANTE 134 ^a .	45
FIGURA 20. BOTELLA DE ASPIRACIÓN DE EJEMPLO INSTALADA.	45
FIGURA 21. TUBO CAPILAR DE EJEMPLO.	47
FIGURA 22. ISOMÉTRICO DEL EQUIPO ENSAMBLADO	49
FIGURA 23. ESQUEMA ACOTADO CON VISTAS.	51
FIGURA 24. UBICACIÓN DE PARTES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.	52
FIGURA 25. DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS DE SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA.	53
FIGURA 26. DIAGRAMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE FLUJO DE AGUA.	54
FIGURA 27. BANDEJA DE AGUA PARA CONGELACIÓN, UBICADA DEBAJO.	54
FIGURA 28. DISPOSICIÓN, PRELIMINAR, DE INTERFAZ.	55
FIGURA 29. CIRCUITO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE CONTROL ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO	56
FIGURA 30 EVAPORADOR CONSTRUIDO FUENTE: IMAGEN PROPIA	58
FIGURA 31 APLICACIÓN DE SOLDADURA OXIACETILÉNICA. FUENTE: IMAGEN PROPIA.	59
FIGURA 32 SISTEMA PROVISIONAL PARA PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	60
FIGURA 33 MANIFOLD CREADO PARA SOLVENTAR PROBLEMA.	62
FIGURA 34 PROCESO DE ENSAMBLE DE BASE METÁLICA. FUENTE: IMAGEN PROPIA	63

FIGURA 35 BANDEJA DE CONGELAMIENTO CONSTRUIDA. FUENTE: IMAGEN PROPIA	64
FIGURA 36 EVAPORADOR Y DEMÁS ELEMENTOS.....	65
FIGURA 37 CONSTITUYENTES DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA. FUENTE: IMAGEN PROPIA.....	66
FIGURA 38 SISTEMA ARDUINO CENTRAL. FUENTE: IMAGEN PROPIA.....	67
FIGURA 39. . MONTAJE PROVISIONAL DE PANTALLA Y BOTONES DE CONTROL DEL SISTEMA. FUENTE: IMAGEN PROPIA	68
FIGURA 40 PANTALLA DE MEDICIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: IMAGEN PROPIA.....	69

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES DE LOS PUNTOS DE LA FIGURA 14. ELABORACIÓN PROPIA.....	37
TABLA 2. VALORES DE RESISTENCIAS RESULTADO DE LA CAPA DE HIELO	40
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DE CONDENSADOR DE CATÁLOGO.	43
TABLA 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE FILTRO.....	44
TABLA 5. SELECCIÓN DE TUBO CAPILAR. FUENTE: WWW.RPARTS.COM.....	46
TABLA 6. ESPECIFICACIONES DE TUBO CAPILAR. FUENTE: WWW.RPARTS.COM	47
TABLA 7. SISTEMAS Y COMPONENTES DE TALEL DENTRO DEL EQUIPO	50

INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 EFICIENCIA ENERGÉTICA	5
ECUACIÓN 2 FLUJOS MÁXICOS DE COMPRESORES	17
ECUACIÓN 3 ANÁLISIS ENERGÉTICO DE COMPRESORES.....	17
ECUACIÓN 4 CONDUCCIÓN DE CALOR	27
ECUACIÓN 5 CONVECCIÓN DE CALOR	28
ECUACIÓN 6 RADIACIÓN DEL CALOR	30
ECUACIÓN 7 TRANSFERENCIA DE CALOR	32
ECUACIÓN 8 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	34
ECUACIÓN 9 FLUJO DE CALOR.....	35
ECUACIÓN 10 TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR	35
ECUACIÓN 11 CARGA DEL EQUIPO.....	36
ECUACIÓN 12 CARGA FRIGORÍFICA TOTAL.....	36
ECUACIÓN 13 RESISTENCIA TÉRMICA	41
ECUACIÓN 14 TEMPERATURA REFRIGERANTE	42

INTRODUCCIÓN

Pilar esencial en la formación de los ingenieros mecánicos es el conocimiento de la termodinámica, la transferencia de calor y la refrigeración. Actualmente, la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador busca diversificar su equipo de prácticas para facilitar el aprendizaje de los estudiantes actuales y futuros.

Una de las áreas prioritarias para adquirir nuevos equipos, es la de refrigeración, pues es una de las que tiene aplicaciones más ampliamente difundidas en El Salvador, así como un campo laboral más extenso.

Por lo anterior, la Facultad de Ingeniería y Arquitectura asignó el diseño y construcción de un equipo didáctica para producción de tubos de hielo, con la finalidad que los estudiantes cuenten con una máquina que les ayude a entender mejor el fenómeno de la congelación y la refrigeración.

En consecuencia, dentro del presente documento se plasma un marco de referencia que permite conocer la teoría indispensable que rige el funcionamiento de los equipos de refrigeración, así como parte de los componentes esenciales de estos.

Luego se aborda el diseño conceptual del equipo, es decir, se caracterizan los estados del ciclo de refrigeración, así como los consumos energéticos y de refrigeración teóricos. Se prosigue con el diseño mecánico del mismo, hasta narrar su proceso constructivo.

Por último, dentro de los anexos se coloca una guía sugerida y el manual de operaciones y mantenimiento para el aprovechamiento de este.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se sintetizarán aquellos conceptos imprescindibles para proceder al diseño de una máquina productora de tubos de hielo de bajo costo, de igual manera, se plasmará información relativa a los componentes y equipos propios de los sistemas de refrigeración.

1.1. Refrigeración

La refrigeración es el proceso de remover calor de la materia, que puede encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. La remoción de calor deriva en una disminución de la temperatura del cuerpo del que se extrajo [1].

Para lograr la refrigeración, se requieren dispositivos denominados como refrigeradores. El refrigerador es un dispositivo cíclico utilizado para transferir calor de un medio de baja temperatura a uno de alta [1].

La refrigeración consiste en extraer la energía térmica de un cuerpo para reducir su temperatura. Por las propiedades termodinámicas, dicha energía es transferida hacia otro cuerpo. Cabe destacar que el frío propiamente dicho no existe, sino que la temperatura es el reflejo de la cantidad de energía que posee un cuerpo [1].

Uno de los métodos de refrigeración más conocido y utilizado es el mecánico. En este, se tiene una sustancia llamada refrigerante, misma que es capaz de transferir calor que se absorbe a bajas temperaturas y presiones. A través de expansiones, compresiones y medios de refrigeración tales como el aire o agua, el refrigerante remueve calor de una sustancia y la transfiere al medio de enfriamiento [1].

Los alimentos, las vacunas y distintos productos médicos requieren de un adecuado sistema de refrigeración para ser conservados. De lo contrario, podrían ocasionar un serio daño a la salud de la población. Por ejemplo: la carne cruda debe guardarse en heladeras o neveras; de lo contrario, se pudre.

Aplicación

Las aplicaciones de la refrigeración son entre muchas:

- La Climatización, para alcanzar un grado de confort térmico adecuado para la habitabilidad de un edificio.
- La Conservación de alimentos, medicamentos u otros productos que se degraden con el calor. Como por ejemplo la producción de hielo o nieve, la mejor conservación de órganos en medicina o el transporte de alimentos perecederos.
- Los Procesos industriales que requieren reducir la temperatura de maquinarias o materiales para su correcto desarrollo. Algunos ejemplos son el mecanizado, la fabricación de plásticos, la producción de energía nuclear.
- La Criogénesis o enfriamiento a muy bajas temperaturas' empleada para licuar algunos gases o para algunas investigaciones científicas.
- Motores de combustión interna: en la zona de las paredes de los cilindros y en las culatas de los motores se producen temperaturas muy altas que es necesario refrigerar mediante un circuito cerrado donde una bomba envía el líquido refrigerante a las galerías que hay en el bloque motor y la culata y de allí pasa un radiador de enfriamiento y un depósito de compensación. el líquido refrigerante que se utiliza es agua destilada con unos aditivos que rebajan sensiblemente el punto de congelación para preservar al motor de sufrir averías cuando se producen temperaturas bajo cero.
- Máquinas-herramientas: las máquinas herramientas también llevan incorporado un circuito de refrigeración y lubricación para bombear el

líquido refrigerante que utilizan que se llama taladrina o aceite de corte sobre el filo de la herramienta para evitar un calentamiento excesivo que la pudiese deteriorar rápidamente.

1.2. Máquinas de refrigeración

El objetivo principal de un sistema de refrigeración es la transferencia de calor de un ambiente a una temperatura determinada, hacia otro de mayor temperatura [1]. En la figura 1 se observa el ciclo termodinámico esquemático de una máquina refrigerante.

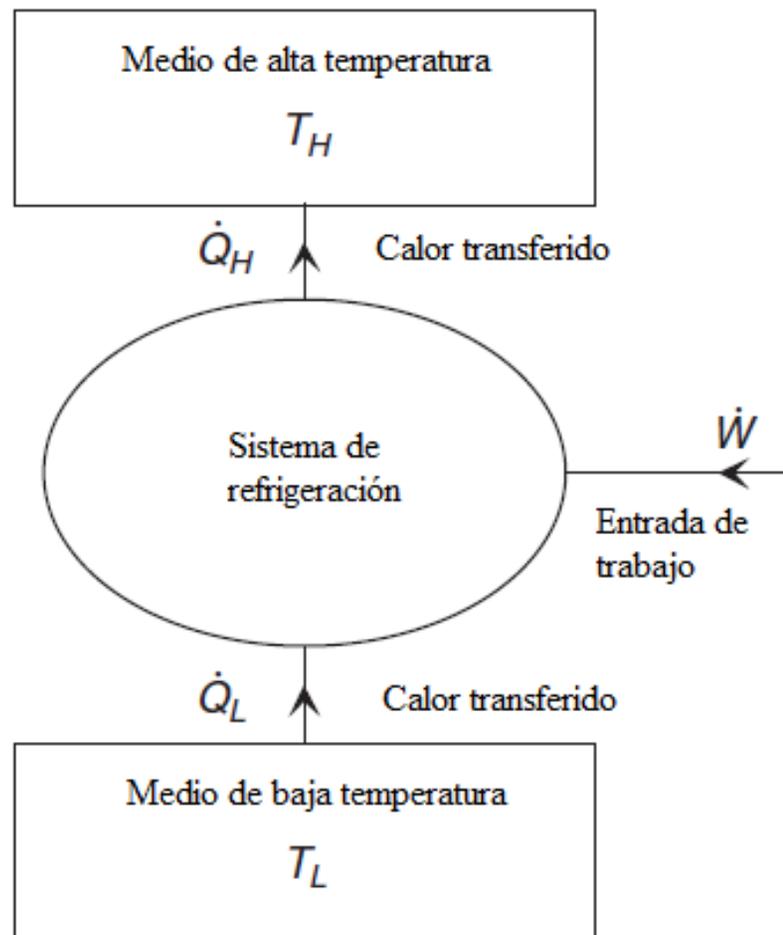


Figura 1. Esquema de un sistema de refrigeración [1].

El sistema de refrigeración, extrae calor \dot{Q}_L del medio que se pretende refrigerar, mismo que se encuentra a la temperatura T_L . Para esto, se requiere

la entrada de energía al sistema en forma de trabajo, \dot{W} , porque así lo demanda el segundo principio de la termodinámica [1].

Por último, el refrigerador libera calor \dot{Q}_H a un medio a temperatura T_H , que es mayor que la temperatura T_L . Habrá una operación continua en tanto haya una entrada energética al sistema, representada por \dot{W} [1].

1.2.1. Eficiencia de los refrigeradores

El parámetro que dicta que tan eficiente es un refrigerador, se conoce como Coeficiente de Desempeño (COP, por sus siglas en ingles). En términos simples, el COP es la razón del efecto de refrigeración obtenido entre la entrada de trabajo necesaria para ello [2]. La ecuación 1 expresa matemáticamente el concepto precedente.

$$COP = \frac{\text{Efecto de enfriamiento (kW)}}{\text{Entrada de trabajo (kW)}} \quad \text{Ecuación 1. Eficiencia Energética.}$$

La capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración (la rapidez del calor extraído del espacio refrigerado) con frecuencia se expresa en toneladas de refrigeración equivalentes a 12.000 Btu/h o 12660 KJ/h. Esto tiene su base en la capacidad que tiene un sistema de refrigeración en convertir 1 tonelada de agua líquida a 0 °C (32 °F) en hielo a 0°C (32 °F) en 24 horas.

1.2.2. Sistemas y ciclos de refrigeración

Existen múltiples sistemas de refrigeración, atendiendo a las diferentes tecnologías y ciclos termodinámicos que subyacen conceptualmente. Algunos de estos sistemas son [1]:

- Sistema de refrigeración por compresión de vapor
- Sistema de refrigeración por absorción
- Sistema de refrigeración de aire estándar
- Refrigeración termoeléctrica

- Refrigeración termo acústica

El ciclo o sistema más ampliamente utilizado, es el de compresión de vapor. Con este se desarrollará el presente trabajo de graduación, por razones que se identificarán más adelante.

1.3. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Dentro de algunas de las razones por las que el ciclo de compresión de vapor es tan popular, tenemos: bajo costo de componentes, tecnología madura, alta eficiencia y facilidad de mantenimiento. Por ello se ha decidido utilizar este ciclo en el diseño de este trabajo.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en refrigeradores, sistemas de acondicionamiento de aire y bombas de calor. Se compone de cuatro procesos [2]:

1. Compresión
2. Condensación
3. Expansión
4. Evaporación

Con la figura 2 se explicará con mejor detalle las fases inherentes a este ciclo.

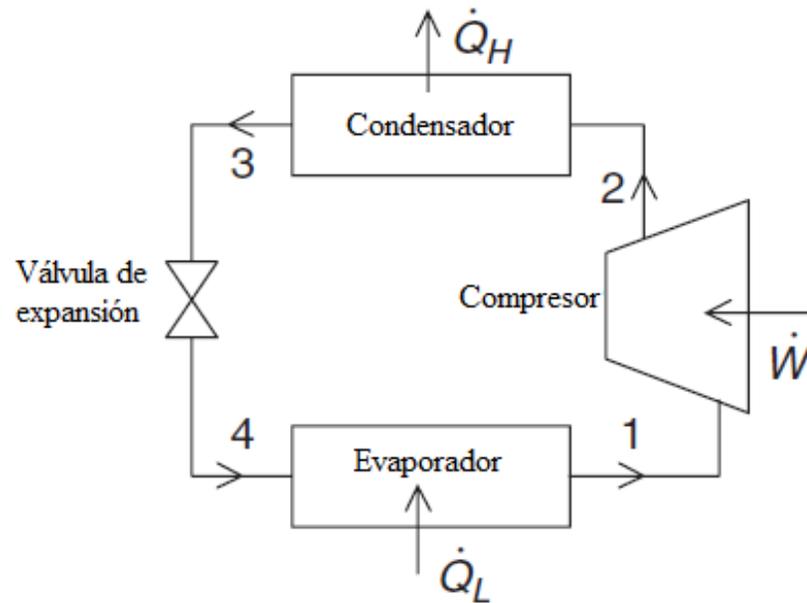


Figura 2. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor [1].

El proceso de evaporación se da entre los puntos 4 y 1, donde el refrigerante entra a baja presión y temperatura, absorbiendo energía del ambiente en que se pretende refrigerar. Luego, entre 1 y 2 se comprime el vapor, aumentando considerablemente su presión [1].

El ciclo continúa cuando entre los puntos 2 y 3, el vapor sobrecalentado libera su energía a un medio a temperatura mayor que la del espacio refrigerado, hasta llegar a líquido saturado. Por último, este se hace pasar por la válvula de expansión disminuyendo así su presión y consecuentemente, su temperatura hasta una inferior a la del medio refrigerado [1].

En el ciclo ideal por compresión de vapor se tienen en cuenta algunas idealizaciones, como son: compresión adiabática entre 1 y 2, nula transferencia de calor a excepción de la que se da en el evaporador y condensador a presión constante, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado y sale del condensador como líquido saturado [2].

El ciclo real de refrigeración por compresión, difiere del ideal por las irreversibilidades que se presentan a lo largo del mismo, siendo dos de las fuentes principales la fricción del fluido y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores en todos los puntos de este [2].

Para el diseño de un ciclo real de compresión de vapor se debe tener en cuenta lo siguiente [2]:

- El refrigerante debe entrar como vapor con un ligero sobrecalentamiento al compresor.
- El refrigerante debe enfriarse durante el proceso de compresión siempre que sea práctico y económico hacerlo.
- El refrigerante debe entrar al tubo capilar o válvula de expansión con un ligero subenfriamiento, pues es indeseable la entrada de vapor.

Influencia de las irreversibilidades en el compresor.

- El proceso de compresión en el ciclo ideal es internamente reversible y adiabático y, en consecuencia, isentrópico. Sin embargo, el proceso de compresión real incluirá efectos friccionantes los cuales incrementan la entropía y la transferencia de calor que puede aumentar o disminuir la entropía, dependiendo de la dirección. En el caso adiabático e irreversible la salida real puede determinarse a partir del rendimiento adiabático del compresor.

Influencia de las irreversibilidades en el evaporador.

- En los ciclos ideales de refrigeración, el fluido de trabajo sale del evaporador y entra al compresor como vapor saturado. Pero esta condición es imposible de mantener el estado del refrigerante con tanta precisión. En lugar de eso se procura diseñar el sistema de manera de sobrecalentar ligeramente al refrigerante a la entrada del compresor para así garantizar evaporación completa al momento de ingresar al

compresor. Asimismo, en línea que conecta al evaporador al compresor suele producirse caídas de presión del refrigerante y cierta ganancia de calor no deseable, trayendo como resultado un aumento en el volumen específico del refrigerante y por ende un incremento en los requerimientos de potencia de entrada al compresor, basado en el criterio de $W_{\text{neto}} = \int v dp$

Influencia de las irreversibilidades en el condensador.

- En los ciclos ideales de refrigeración, el fluido de trabajo sale del condensador como líquido saturado a la presión de salida del compresor. Sin embargo, es inevitable que se produzcan caídas de presión en el condensador así como en las líneas que conectan al compresor y a la válvula de estrangulamiento, además de la imposibilidad de mantener con precisión la regulación del condensador para tener a la salida líquido saturado, y es indeseable enviar refrigerante a la válvula de estrangulamiento sin condensar en su totalidad, debido a que reduce la capacidad de absorción de calor, por lo que se considera el subenfriamiento como alternativa para disminuir la entalpía de entrada a la válvula de estrangulamiento y en consecuencia aumentar la capacidad de absorción de calor (efecto refrigerante)

1.4. Refrigerantes

Refrigerante es cualquier sustancia capaz de absorber calor de otra [3]. En la refrigeración mecánica, el refrigerante debe poseer las características físicas adecuadas, así como las propiedades termodinámicas, químicas, de seguridad y económicas pertinentes para la operación eficiente de los equipos [3].

Para cada refrigerante existe una temperatura específica de vaporización asociada con cada presión, por lo que basta controlar la presión del evaporador para obtener la temperatura deseada. En el condensador existe una relación similar entre la presión y la temperatura. Durante muchos años, uno de los

refrigerantes más utilizados fue el diclorodifluorometano, conocido como refrigerante-12. Este compuesto clorofluorocarbonado (CFC) sintético se transformaba en vapor a $-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una presión de 246,2 kPa (kilopascales), y después de comprimirse a 909,2 kPa se condensaba a $37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En los refrigeradores pequeños empleados en las viviendas para almacenar comida, el calor del condensador se disipa a la habitación donde se sitúa. En los acondicionadores de aire, el calor del condensador debe disiparse al exterior o directamente al agua de refrigeración. En un sistema doméstico de refrigeración, el evaporador siempre se sitúa en un espacio aislado térmicamente. A veces, este espacio constituye todo el refrigerador. El compresor suele tener una capacidad excesiva, de forma que si funcionara continuamente produciría temperaturas más bajas de las deseadas. Para mantener el refrigerador a la temperatura adecuada, el motor que impulsa el compresor está controlado por un termostato o regulador. Los congeladores para alimentos ultracongelados son similares a los anteriores, sólo que su compresor y motor tienen que tener la potencia y tamaño suficientes para manejar un mayor volumen de refrigerante con una presión menor en el evaporador. Por ejemplo, para mantener una temperatura de $-23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ con refrigerante-12 se necesitaría una presión de 132,3 kPa en el evaporador. El refrigerante-12 y otros dos CFC, el refrigerante-11 y el refrigerante-22, eran los principales compuestos empleados en los sistemas de enfriamiento y aislamiento de los refrigeradores domésticos. Sin embargo, se ha descubierto que los CFC suponen una grave amenaza para el medio ambiente del planeta por su papel en la destrucción de la capa de ozono. Según el Protocolo de Montreal, la fabricación de CFC debía finalizar al final de 1995. Los hidroclorofluorocarbonos, HCFC, y el metilbromuro no dañan la capa de ozono pero producen gases de efecto invernadero [3].

Aunque en los comienzos del desarrollo de los sistemas de refrigeración se utilizaron sustancias químicas como el dióxido de azufre, amoníaco y éter

etélico, desde la década de los treinta, el campo ha sido denominado por la clase general de sustancias denominados compuestos clofluorocarbonados (CFC). Los más importantes se designan R-11, R-12, R-22 y R-502 (mezcla del R-22 y R115). Al final de la década de los ochenta se tomaron medidas internacionales para restringir el uso de ciertos CFC, ya que se encontró que reduce la capa protectora del ozono de la atmósfera y contribuye al efecto invernadero. Así en la década de los noventa se inicia un periodo en el que se investiga nuevos refrigerantes, como los compuestos hidrofluorocarbonados (HFC). El problema radica en el hecho de la reducción en el COP cuando simplemente se hace el cambio del refrigerante al sistema, sin modificaciones para adaptarlo. Cuando se selecciona un nuevo refrigerante generalmente es necesario rediseñar el compresor.

1.4.1. Factores a considerar en refrigerantes

A continuación, se listan una serie de factores que deben considerarse para cada refrigerante en la etapa de diseño, según sea la operación deseada en su respectivo contexto [3]:

- Efecto de refrigeración: este se mide por la cantidad de calor absorbida durante el proceso de evaporación. Se le conoce como calor latente de vaporización y, entre mayor sea, mejores resultados.
- Punto de ebullición: el punto en que ebullicirá el refrigerante a presión atmosférica es básico para su selección, pues la presión dentro del evaporador no deberá ser nunca inferior a la atmosférica para evitar filtraciones de aire al sistema.
- Temperatura y presión de condensación.
- Relación de compresión: altas relaciones entre la presión de compresión y la de evaporación, requieren potencias altas en el compresor.

- Coeficiente de comportamiento: es la medida de la eficiencia del refrigerante en utilizar la energía gastada en el compresor, en relación con la energía absorbida durante la evaporación.
- Densidad: a mayor densidad mayor resistencia al flujo en tuberías y consecuentemente, mayores caídas de presión.
- Estabilidad química y efecto de la humedad: los refrigerantes deben ser de tal naturaleza que los continuos cambios de presión y temperatura no afecten sus propiedades, también deben resistir cualquier descomposición química ocasionada por contaminación con el aire, el aceite o el agua.
- Relación refrigerante aceite: el refrigerante y el aceite deben ser compatibles física y químicamente, siendo el ideal aquel que permanece químicamente estable en presencia de aceite lubricante a la vez que no influye en las características químicas del lubricante.
- Toxicidad: deben procurarse refrigerantes que no sean tóxicos para los humanos o el medio ambiente ante un caso de fuga.
- Inflamabilidad: desde la óptima de la seguridad, los refrigerantes deben ser inflamables y no explosivos. No obstante, lo anterior, bajo algunas aplicaciones pueden utilizarse flamables y explosivos con las precauciones del caso.
- Detección de fugas: los refrigerantes deben poseer en la medida de lo posible, buenas características para poder detectar una fuga.
- Costo: este se debe analizar bajo el punto de vista de la eficiencia térmica y no simplemente del costo por peso.

1.4.2. Clasificación de los refrigerantes

De forma general, son cinco grupos principales en que se clasifican, siendo estos [1]:

- Halocarbonos
- Hidrocarburos

- Inorgánicos
- Mezclas zeotrópicas
- Mezclas azeotrópicas

1.4.2.1. Halocarbonos

Estos refrigerantes son aquellos que poseen uno o más de estos halógenos: cloro, flúor, bromo. Dentro de este grupo está el popular y comercialmente conocido freón. Se ha procurado discontinuar su uso, por el alto impacto medioambiental negativo de ellos. Son peligrosos si no se manejan con las medidas pertinentes de seguridad [1].

1.4.2.2. Hidrocarburos

Se componen principalmente de carbono e hidrógeno. Los más populares son el metano, propano, butano. Poseen la gran desventaja de ser altamente inflamables empero que son muy baratos y no dañan la capa de ozono [1].

1.4.2.3. Inorgánicos

Los compuestos inorgánicos son aquellos que no poseen como elemento central al carbono. En materia de refrigeración, los tres más sobresalientes son: el amoniaco, el aire y el dióxido de carbono [1].

1.4.2.4. Mezclas azeotrópicas

Son mezclas de dos o más sustancias que, teniendo propiedades diferentes, se comportan como una sola sustancia, siendo que estas no pueden separarse mediante destilación [1].

1.4.2.5. Mezclas zeotrópicas

Son mezclas de diferentes sustancias, al igual que las azeotrópicas, salvo que se pueden separar por destilación. Lo anterior implica que la composición de la mezcla varía según se tengan procesos de evaporación o condensación en el ciclo de refrigeración. Han sido usados principalmente por un

mejoramiento en el consumo energético en los sistemas de refrigeración, a costa de una mayor complejidad de diseño [1].

1.4.3. Refrigerantes más utilizados

En los inicios de la refrigeración, se utilizaban principalmente refrigerantes como el amoniaco, el propano y el dióxido de carbono. Sin embargo, surgieron preocupaciones sobre los mismos. Luego, surgieron los CFC, hasta que por cuestiones medioambientales se ha migrado a los populares HFC, que afectan en menor medida al medio ambiente [4].

1.4.3.1. Consideraciones adicionales para selección de refrigerante

Propiedades especialmente importantes de prever son las de saturación del refrigerante. Como una regla rápida, lo normal es que la diferencia de temperatura del refrigerante y del medio en que se pretende la transferencia de calor, debe ser de 10° C ya que esto asegura un flujo de calor significativo. Adicionalmente, en el evaporador se debe tener una presión de saturación mayor que la atmosférica, para evitar cualquier entrada de aire al sistema [2].

1.5. Componentes de los sistemas de refrigeración

Por último, se abordarán en detalle los componentes de los sistemas de refrigeración. De apartados precedentes se sabe que los cuatro componentes más representativos son:

- Compresor
- Evaporador
- Condensador
- Válvula de estrangulamiento o tubo capilar.

1.5.1. Compresores

Los compresores, como se habrá visto, elevan la presión y la temperatura del vapor obtenido en el evaporador, hasta una temperatura y presión definida, para luego ser pasado al condensador. A través de estos dispositivos es que entra el trabajo al ciclo, por lo que es un proceso crítico de diseño si se quiere tener un sistema de bajo consumo y alta eficiencia. Existen dos grandes categorías que agrupan a estos dispositivos, y son: compresores de desplazamiento y compresores dinámicos [1].

Para su selección, se atiende a cuatro parámetros centrales [1]:

- Capacidad de refrigeración
- Flujo volumétrico
- Razón de compresión y;
- Propiedades del refrigerante a utilizar

Lo anterior nos permite visualizar que, la selección de un refrigerante lleva implícita la selección de determinados tipos o esquemas de compresión que, al ser evaluadas, sino se adaptan a los requerimientos funcionales, deriva en la necesidad de iterar bien sea escogiendo otro compresor o cambiando refrigerante [1].

1.5.1.1. Compresores herméticos

Este tipo de compresores está disponible para pequeñas capacidades de refrigeración, estando el motor sellado dentro del mismo, así como el refrigerante y el lubricante [2].

Casi la totalidad de compresores pequeños utilizados en refrigeración son herméticos. Estos compresores van desde 1/12 de HP hasta 30 BG, con revoluciones entre las 1450 a las 2800 rpm [2].

Además, estos pueden trabajar durante largos periodos de tiempo sin ningún mantenimiento y sin fugas de refrigerante, teniendo como desventaja su gran sensibilidad a las variaciones de voltaje [2].



Figura 3. Compresor hermético [8].

1.5.1.2. Análisis energético en compresores

Existen algunas presunciones que se hacen para poder analizar los compresores, siendo estas [2]:

- Los flujos máscicos de entrada y salida son iguales.
- La energía de entrada es igual a la de salida.
- El intercambio de calor entre el refrigerante y el ambiente mientras se comprime se desprecia.

Para expresar matemáticamente lo anterior, se toma una imagen de referencia como se indica en la figura 4:

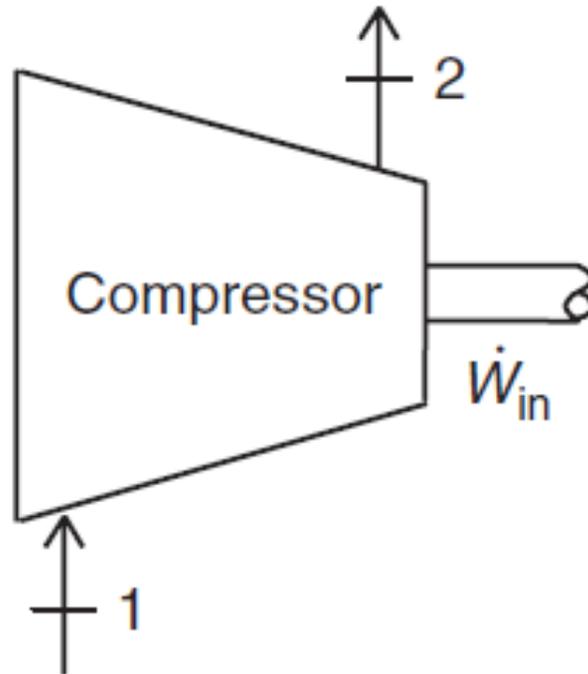


Figura 4. Compresor esquemático para análisis [2].

Y posteriormente, atendiendo a la conservación de la masa y la energía:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \text{Ecuación 2. Flujos Másicos de compresores.}$$

$$\dot{W}_{in} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 \quad \text{Ecuación 3. Análisis energético de compresores.}$$

Donde:

\dot{m} : flujo másico en (m³/s)

\dot{W} : flujo de trabajo (kW)

h : entalpía (kJ/kg)

1.5.2. Condensadores

Hay una amplia variedad de condensadores disponibles y el dominio de uno sobre otro depende de factores tales como [1]:

- Temperaturas y presiones de condensación
- Tamaño, peso y ubicación
- Razones de flujo de refrigerante
- Condiciones climáticas, periodos de operación, disponibilidad de insumos como agua o electricidad

Existen tres tipos generales de condensadores, que son: enfriados por agua, enfriados por aire y los evaporativos [1].

1.5.2.1. Condensadores enfriados por agua

El principal modelo usado es el conocido como condensador de coraza y tubos, tal como se aprecia en la imagen que prosigue [1]:

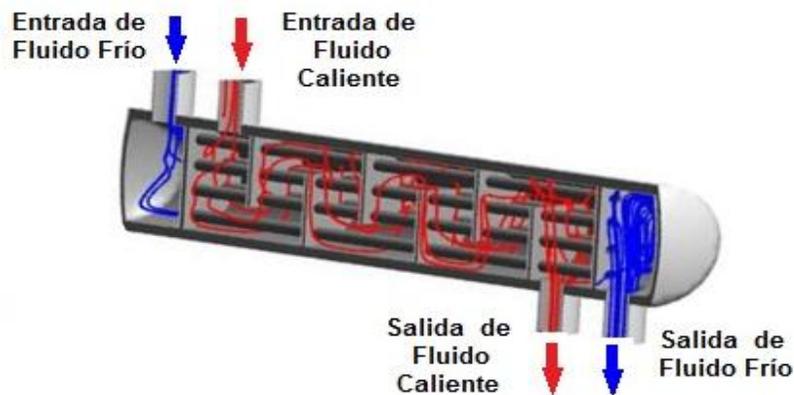


Figura 5. Condensador de coraza y tubos [4].

La pauta a seguir en caso de utilizar los condensadores enfriados por agua, es como sigue [1]:

- Requerimiento de agua para enfriamiento
- Requerimiento de tratamiento de agua
- Requerimiento de espacio
- Consideraciones de bombas y abastecimiento de agua

1.5.2.2. Condensadores enfriados por aire

Este tipo es usado más a menudo en aplicaciones residenciales o no industriales. Pueden ser de refrigeración natural o forzada, según se utilicen ventiladores o no para mover corrientes de aire. Presentan varias ventajas, la principal es que el aire es un recurso virtualmente ilimitado y gratuito, son de bajo costo y casi no requieren manteniendo ni tratamientos especiales como sí los requiere el agua. Este tipo se usa en los refrigeradores domésticos [1].



Figura 6. Condensador de serpentin de tubo [4].

1.5.3. Evaporadores

Se clasifican en dos rangos principales, a saber: evaporadores de enfriamiento directo y evaporadores de enfriamiento indirecto [1].

Principalmente, los de enfriamiento indirecto implican enfriar un líquido como el agua –típicamente – y luego, esa agua enfriará el producto final; los de enfriamiento directo, son aquellos que enfrían bien aire o un gas que está en contacto directo con el producto final del que se pretende extraer calor [1].

El refrigerante líquido que entra al evaporador está a su temperatura de saturación (ebullición). Por consiguiente, hervirá gradualmente a medida que

recibe calor del aire, al pasar por el evaporador. En la mayoría de los tipos de evaporadores, el refrigerante ya hirvió en su totalidad al llegar a la salida del evaporador, y en muchos casos, puede ser hasta un vapor sobrecalentado, dependiendo de cuánto calor recibe y de cuánto refrigerante fluye [1].

La capacidad de un evaporador es la cantidad que este absorbe para evaporar el refrigerante, siendo que este calor es absorbido a través de tres posibles mecanismos de transferencia de calor: conducción, radiación y convección [3].

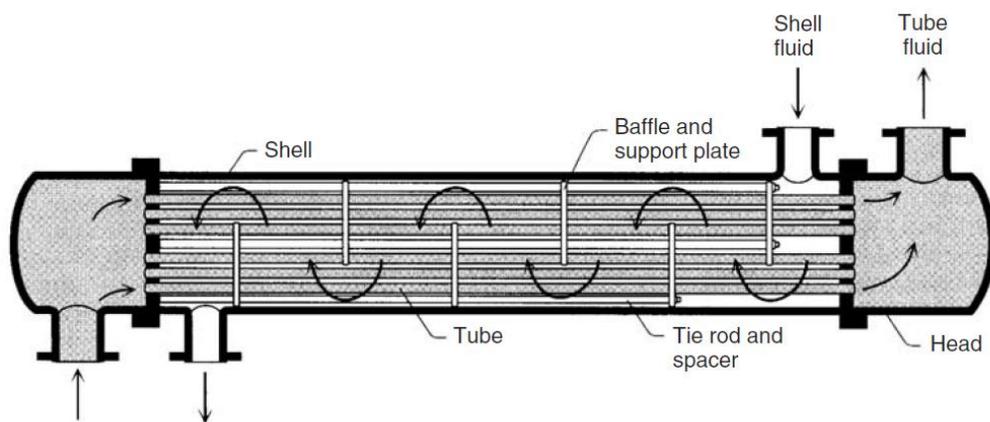


Figura 7. Evaporador típico de un chiller [4].

1.5.3.1. Evaporador de Superficie de Placa

Existen varios tipos de estos evaporadores. Uno de ellos consta de dos placas acanaladas y asimétricas las cuales son soldadas herméticamente una contra la otra de manera tal que el gas refrigerante pueda fluir por entre ellas; son ampliamente usados en refrigeradores y congeladores debido a su economía, fácil limpieza y modulación de fabricación.



Evaporadores de Superficie de Placa

Figura 8. Evaporador de superficie de placa [6].

1.5.3.2. Evaporadores de tubos con aletas

Este tipo de evaporadores consisten en una serie de tubos desnudos a los que se instalan placas o aletas, que tienen por finalidad aumentar el área del evaporador, mejorando su proceso de transferencia [3].

En algunos casos, las aletas van soldadas al serpentín y en otros hay un acople a presión, siempre cuidando de haber un buen contacto entre la aleta y la tubería [3].

Cuando la distancia entre las aletas es demasiado reducida, se forma mucho hielo, debiendo cuidarse de espaciarlas lo suficiente, sobre todo cuando se manejan bajas temperaturas en el refrigerante [3].

1.5.4. Válvulas de expansión

La función primordial es la de reducir la presión del refrigerante y disminuir su temperatura, hasta generar una mezcla bifásica que entre con las condiciones necesarias u óptimas al evaporador y así reiniciar el ciclo refrigerante. Hay cuatro tipos que son: válvulas de expansión termostáticas, válvulas de expansión de presión constante, válvulas flotantes y tubos capilares [1].

Dado que comercialmente en nuestro país, mayor y casi exclusivamente se utilizan los tubos capilares, serán los únicos que se abordarán, dejando de lado el resto de clasificaciones comentadas por no ser de interés [1].



Figura 9. Válvula de expansión térmica [6].

1.5.4.1. Tubos capilares

Son tubos normalmente de cobre, de muy pequeños diámetros, del orden de la décima de milímetro hasta no más de 3 milímetros. Son efectivos en sistemas de baja capacidad de refrigeración [1].



Figura 10. Tubo capilar [6].

Las condiciones normales de operación de estos dispositivos, implican tener líquido subenfriado a la entrada. La descripción de su funcionamiento se hace considerando la siguiente gráfica [6].

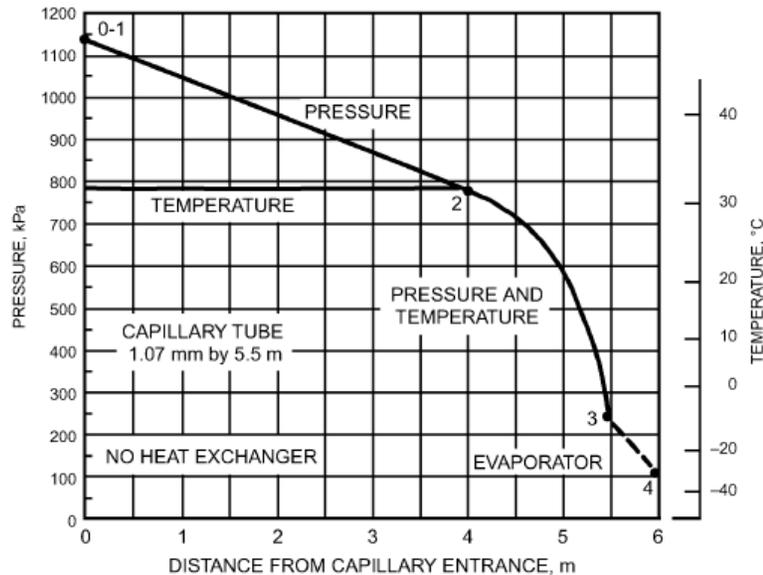


Figura 11. Gráfica de comportamiento del refrigerante dentro del tubo capilar [6].

- A la entrada entre 0 y 1, hay una pequeña caída de presión que no es detectable por los medidores.
- Entre el punto 1 y 2, la caída de presión es lineal.
- Entre 0 y 2 el refrigerante se encuentra en fase líquida, siendo en el punto 2 donde se forma la primera burbuja de vapor.
- A partir del punto 2 la caída de presión deja de ser lineal, siendo que en esta sección del tubo conviven las fases vapor y líquida.
- La temperatura entre 0 y 2 es constante
- A partir del punto 2, cada caída de presión se acompaña de una caída de temperatura, siendo esta la de saturación correspondiente a cada presión en cada punto.

Existen dos métodos para seleccionar los tubos capilares, uno analítico y otro mediante gráficas [6]. A continuación, se abordará el método gráfico por ser el más práctico.

Esta metodología involucra la determinación de dos cantidades: el flujo másico a través de un tubo capilar de referencia y un factor de flujo, que es un factor de corrección geométrico. Esos dos valores deben de multiplicarse para obtener el flujo que soportará el tubo [6].

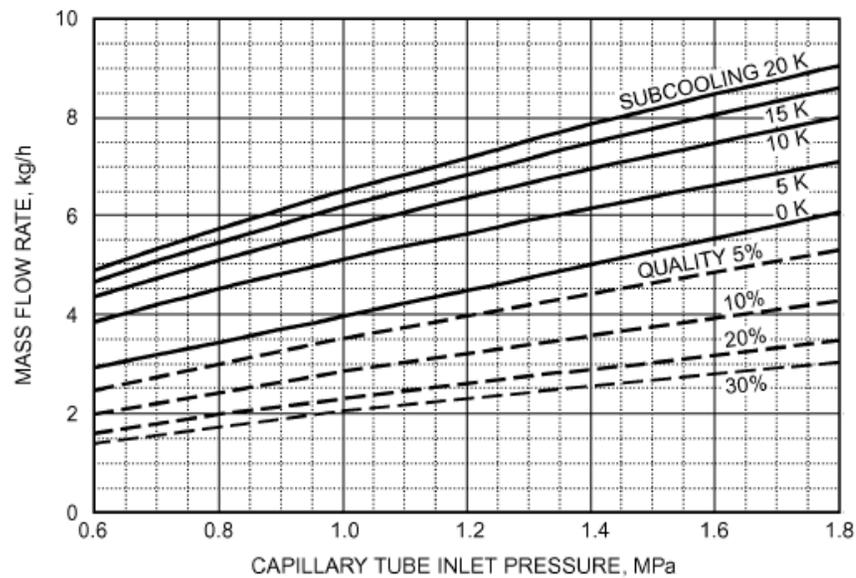


Figura 12. Gráfica para flujo másico en tubo capilar [6].

Primero, se determina la presión de entrada al tubo capilar en MPa y la temperatura subenfriada (por debajo de la de saturación), de forma que con eso se selecciona el flujo másico.

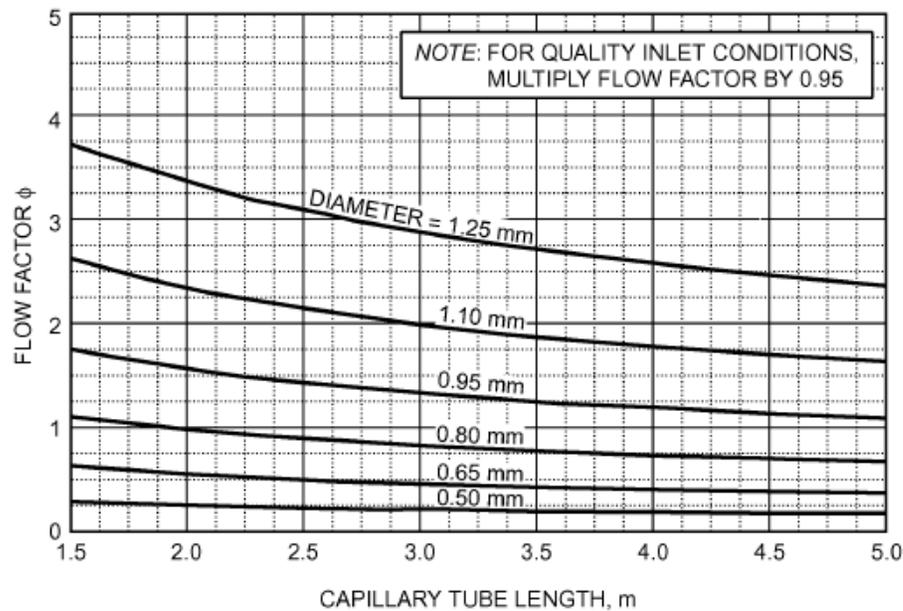


Figura 13. Gráfica para factor de corrección del flujo másico [6].

Finalmente, para una longitud y diámetro determinado de tubos capilares, se obtiene el factor de corrección y, multiplicando este por el flujo másico del párrafo anterior, se obtiene la capacidad del tubo analizado, lo que nos dirá si es o no pertinente para los usos planteados [6].

Es importante señalar que, en caso de no serlo, debe repetirse el proceso hasta encontrar el tubo indicado. No obstante, esta selección nunca es completamente precisa, debiendo sobre la práctica en base a ensayo y error lograr el tubo ideal para la aplicación.

1.6. Fundamentos de transferencia de calor

Como parte inherente del proceso de diseño, es necesario conocer los fundamentos de la transferencia de calor, para su posterior uso en el diseño de los elementos del refrigerador.

La transferencia de calor es el proceso de transferencia energética en razón de las diferencias de temperaturas de distintas regiones o sustancias. A

mayores diferencias de temperatura, mayores serán las tasas de transferencia [5].

Si bien la termodinámica y la transferencia de calor analizan intercambios energéticos, la primera solo analiza estados de equilibrio, siendo que el segundo proceso surge por desequilibrios de energía térmica [5].

Es por ello que los teóricos, formularon un conjunto de herramientas matemáticas para el análisis de los fenómenos de la transferencia de calor [5], mismas que se detallan en los siguientes apartados.

La transferencia de calor, se da a través de tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

1.6.1. Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos malos conductores como el aire o plásticos se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor Δx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$, el calor ΔQ transferido en un tiempo Δt fluye del extremo caliente al frío

Se rige por la Ley de Fourier, que en esencia establece: el flujo de calor es proporcional a la magnitud del gradiente de temperatura y opuesto en signo, e inversamente proporcional a la longitud a través de la cual se transmite [5].

Matemáticamente, se expresa así.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 4. Conducción de calor.}$$

Donde:

- q: flujo de calor (kW).
- k: constante de proporcionalidad ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).
- x: dirección de flujo de calor analizado (m).
- T: temperatura (K).

1.6.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba.

Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio. En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección.

Es la transferencia que se da por el movimiento relativo de fluidos respecto de otros o bien, de elementos estáticos. Principalmente se tienen procesos de transferencia de masa que derivan en transferencia de calor [5].

Se idealiza mediante la ecuación de transferencia de Newton.

$$\frac{dT_{\text{cuerpo}}}{dt} \propto T_{\text{cuerpo}} - T_{\infty} \quad \text{Ecuación 5. Convección de calor.}$$

Donde:

- T_{cuerpo} : es la temperatura del cuerpo de análisis (K).
- t : es la variable tiempo (s).
- T_{∞} : temperatura del ambiente lejano al cuerpo (K).

1.6.3. Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. (La trayectoria descrita por un fotón se llama rayo). La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas

electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda v = c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío con una rapidez constante $c = 299792 \text{ km/s}$, llamada velocidad de la luz.

Atendiendo a su longitud de onda, la radiación electromagnética recibe diferentes nombres, y varía desde los energéticos rayos gamma, con una longitud de onda muy corta del orden de picómetros (frecuencias muy altas) hasta las ondas de radio con longitudes de onda muy largas del orden de kilómetros (frecuencias muy bajas), pasando por la luz visible, cuya longitud de onda está en el rango de las décimas de micrómetro. El rango completo de longitudes de onda es lo que se denomina el espectro electromagnético. Esta variación es porque las fuentes que producen las ondas son completamente diferentes. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior.

La luz, llamada también luz visible o luz blanca, es uno de los componentes del espectro electromagnético, y se define como aquella parte del espectro de radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano. La luz visible es un minúsculo intervalo que va desde la longitud de onda correspondiente al color violeta (aproximadamente 400 nm) hasta la longitud de onda correspondiente al color rojo (aproximadamente 700 nm).

La radiación es la única forma de transferencia de calor que no requiere de un medio físico para darse, de forma que lo puede hacer perfectamente a través del vacío. Este fenómeno se da a través de las ondas electromagnéticas. Matemáticamente, se expresa por medio de la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$e_b(T) = \sigma T^4 \quad \text{Ecuación 6. Radiación del calor.}$$

Donde:

- T: es la temperatura de la fuente de radiación térmica (K).
- σ : es la constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W/m}^2\text{K}^4$).

1.7. Análisis de intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo usado para transferir energía térmica (entalpía) entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido, o entre partículas sólidas y un fluido a diferentes temperaturas y en contacto térmico. Las aplicaciones típicas involucran calentamiento o enfriamiento de una corriente de fluido que puede involucrar evaporación o condensación de corrientes de fluidos simples o multicomponente. En otras aplicaciones, el objetivo podría ser recuperar o rechazar calor, pasteurizar, destilar, concentrar, cristalizar o controlar un fluido de proceso.

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de acuerdo a su construcción, el proceso de transferencia, el grado de compacidad de la superficie, la disposición de los flujos, disposición de los pasos, la fase de los fluidos involucrados en el proceso y el mecanismo de transferencia de calor. De los diferentes tipos de intercambiadores de calor que hay, el más simple es uno en el cual los fluidos calientes y frío se mueven en la misma u opuesta dirección en una construcción de tubo concéntrico o doble tubo.

Como hemos mencionado, un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.

- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío. 2
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere en una sola dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan.

Es importante resaltar que tanto los evaporadores como los condensadores son intercambiadores de calor con funciones específicas, por lo cual la teoría básica de análisis es aplicable a ambos.

Los intercambiadores de calor operan durante largos periodos de tiempo sin cambios en sus condiciones de operación, por lo que se clasifican como dispositivos de flujo estacionario [1]. Las principales suposiciones para análisis son las siguientes [1]:

- El flujo másico de cada fluido se mantiene constante, así como las propiedades de los fluidos.
- Los cambios en velocidades y elevaciones son despreciables.
- El calor específico se considera constante en un valor promedio a las temperaturas de los flujos

- La conducción axial es despreciable
- Cualquier transferencia de calor solo ocurre entre los fluidos, es decir, se considera aislamiento perfecto.

La ecuación que cuantifica el intercambio de calor en un intercambiador se puede escribir en consonancia con la Ley de Newton del Enfriamiento:

$$Q = UA_s\Delta T_m \quad \text{Ecuación 7. Transferencia de calor.}$$

Donde tenemos que:

- Q: es la transferencia de calor (kW).
- U: coeficiente total de transferencia de calor (W/m²K).
- A_s: área total de transferencia de calor (m²).
- ΔT_m : que es una temperatura media acorde al tipo de intercambio (K).

En el coeficiente global de transferencia de calor se incluyen los efectos de los tres mecanismos de transferencia de calor o solo de aquellos que concurren en el proceso a analizar, que generalmente, son la conducción y la convección, despreciándose la radiación cuando se trabaja en aplicaciones de refrigeración a baja temperatura [1].

Para la determinación de U, se hace uso de la analogía de las resistencias térmicas que son un símil de la Ley de Ohm para el flujo de corriente, siendo la corriente equivalente al flujo de calor, el voltaje a la diferencia de temperaturas y la resistencia a un arreglo de los coeficientes convectivos o conductivos.

CAPÍTULO II: DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MÁQUINA PRODUCTORA DE TUBOS DE HIELO

En este apartado se diseña el sistema de refrigeración de la máquina productora, partiendo de la determinación de las correspondientes cargas de refrigeración, transitando por el diseño del evaporador y la caracterización de los estados del ciclo de refrigeración, así como la selección de las partes del mismo tal como el tubo capilar y su condensador. Los detalles relativos al suministro del agua y la automatización se desarrollarán en apartados subsiguientes.

2.1. Determinación de la carga de refrigeración

2.1.1. Cálculo de la capacidad frigorífica de la máquina

El diseño de partes, selección de accesorios y los cálculos de esta máquina se basa en una capacidad de hielo por hora. Asumiendo que un día de trabajo consta de 8 horas, el flujo de masa de hielo por segundo es:

Se inicia con el cálculo de la demanda de hielo por segundo:

$$\dot{m} = \frac{M}{t} = \frac{0.144 \text{ kg}}{240 \text{ s}} = 0.0006 \text{ kg/s}$$

Donde:

- \dot{m} : Flujo de masa de hielo (kg/s).
- M: masa de hielo a ser enfriada por día (kg).
- t: horas para la obtención de hielo (s).

Para determinar la carga frigorífica total se necesita calcular: la carga por transmisión de calor, la carga del producto, la carga interna, la carga por infiltración de aire y la carga del equipo.

2.1.2. Carga de transmisión

Esta carga está dada por la transmisión de calor a través de las paredes desde el exterior y la ganancia debido a la exposición al sol. Esta máquina no estará expuesta al sol, por tanto, solo se calcula el calor transmitido del medio ambiente. El coeficiente global de transmisión de calor es un valor muy importante para este cálculo, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{f_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{f_o}} \quad \text{Ecuación 8. Coeficiente global de transferencia de calor.}$$

Donde:

- U: coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).
- f_i : coeficiente de convección interno ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).
- f_o : coeficiente de convección externo ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).
- k: coeficiente de conducción ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).
- x: espesor de pared de transferencia de calor (m).

El aire en el interior y exterior de la cámara del evaporador se asume quieto, por tanto, se asigna el valor de $1.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})^2$ a las conductancias interna y externa.

La cámara está hecha por plancha de hierro galvanizada y poliuretano expandido, la conductancia del hierro al ser muy alta es despreciada en los cálculos, no así el poliuretano cuya conductancia es de $0.92 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Para los valores presentados anteriormente, tenemos un coeficiente $U = 0.88 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. El área de las paredes de la cámara es de 1.00 m^2 . Con estos dos valores y la diferencia de temperatura del ambiente exterior (35° C) con el interno (0° C), y de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 9. Flujo de calor.}$$

Donde:

- \dot{Q} : Flujo de calor (kW).
- U: coeficiente global de transferencia de calor (W/m²K).
- ΔT : Diferencia de temperatura entre el exterior e interior (K).

Obtenemos una carga de transmisión de 41 W ó 0.041 kw.

2.1.3. Carga del producto

La carga de congelación necesaria para producir hielo a -10° C de agua a temperatura ambiente a 35° C, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{teórico} = \dot{m}(Cp_{agua} \cdot \Delta T_{>0^{\circ}C} + C_{latente} + Cp_{hielo} \cdot \Delta T_{<0^{\circ}C})$$

Ecuación 10 Tasa de transferencia de calor

Donde:

- $\dot{Q}_{teórico}$: Tasa de transferencia de calor para obtener hielo (kW).
- Cp_{agua} : Calor específico del agua (kJ/kg).
- $C_{latente}$: Calor latente del agua (kJ/kg).
- Cp_{hielo} : Calor específico del hielo (kJ/kg).
- $\Delta T_{<0^{\circ}C}$: Diferencia de temperatura (K).

$$\dot{Q}_{teórico} = (0.0012 \text{ kg/s}) \cdot \left[\left(4.2 \frac{\text{KJ}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}} \right) (35^{\circ}\text{C}) + 333.61 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} + \left(2 \frac{\text{KJ}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}} \right) \cdot (10^{\circ}\text{C}) \right]$$

$$\dot{Q}_{teórico} = (0.0006 \text{ kg/s}) \left(500.61 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \right) = 0.30 \text{ kW}$$

2.1.4. Carga interna

Esta se debe a los motores o partes eléctricas que disipan calor en el interior de la cámara. En esta máquina no existen tales cargas internas.

2.1.5. Carga por infiltración de aire

Para el caso, dado que la extracción de hielo es una vez ha concluido el proceso de congelación, se asume cero. Esta carga tiene fuerte importancia en dispositivos como los refrigeradores caseros, en donde se abren continuamente las puertas del refrigerador.

2.1.6. Carga del equipo

Esta carga suele ser dada por los ventiladores cuando existe circulación forzada de aire, recalentamiento para control de humedad, operación de desescarche cuando esta existe y evaporación de la humedad cuando el proceso de desescarche se expone al aire refrigerado. Esta carga de calor suele ser alrededor del 5% de las cuatro cargas anteriores a temperaturas ambiente por encima de -1°C . Así tenemos:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{carga_{equipo}} &= 0.05(\dot{Q}_{transmisión} + \dot{Q}_{producto} + \dot{Q}_{interior} + \dot{Q}_{infiltración}) \\ &= \mathbf{0.01705\text{ kW}} \quad \text{Ecuación 11. Carga del equipo.}\end{aligned}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{carga_{equipo}}$: Tasa de transferencia de calor para obtener hielo (kW).
- $\dot{Q}_{transmisión}$: Calor específico del agua (kW).
- $\dot{Q}_{producto}$: Calor latente del agua (kW).
- $\dot{Q}_{infiltración}$: Calor específico del hielo (kW).
- $\dot{Q}_{infiltración}$: Calor específico del hielo (kW).

2.1.7. Carga frigorífica total

Para el cálculo total de la carga frigorífica se utiliza factor de seguridad del 10% en las cuatro primeras cargas sin afectar la carga de equipo, este valor utilizado es para tener en cuenta las posibles discrepancias entre los criterios de diseño y el funcionamiento real.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{carga_{equipo}} &= \mathbf{1.10}(\dot{Q}_{transmisión} + \dot{Q}_{producto} + \dot{Q}_{interior} + \dot{Q}_{infiltración}) \\ \dot{Q}_{equipo} &= \mathbf{0.3922\text{ kW.}} \quad \text{Ecuación 12. Carga frigorífica total.}\end{aligned}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{carga_{equipo}}$: Tasa de transferencia de calor para obtener hielo (kW).
- $\dot{Q}_{transmisión}$: Calor específico del agua (kW).
- $\dot{Q}_{producto}$: Calor latente del agua (kW).
- $\dot{Q}_{infiltración}$: Calor específico del hielo (kW).
- $\dot{Q}_{infiltración}$: Calor específico del hielo (kW).

2.2. Diseño del ciclo de refrigeración

Una vez que se tienen el consumo energético en la parte de refrigeración, se debe caracterizar todos los puntos del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, de forma que, sobre estos datos, se haga la selección de distintos componentes tales como el tubo capilar, el condensador y otros.

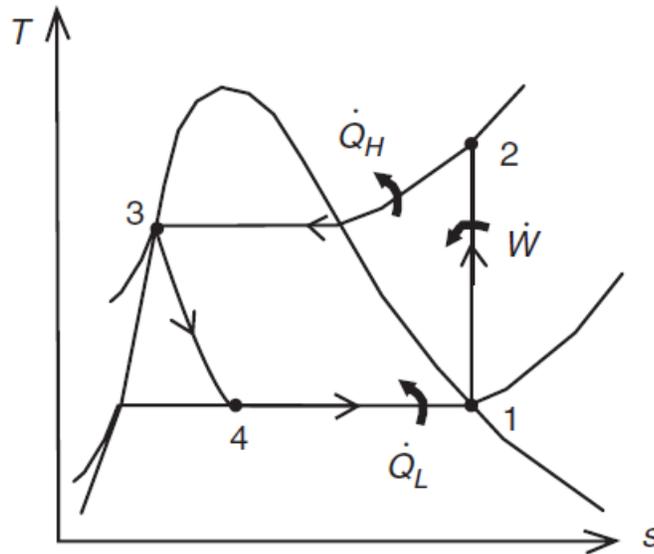


Figura 14. Diagrama T-S del ciclo de refrigeración ideal [11].

Para iniciar el diseño, se asumirá el ciclo ideal, haciendo posteriormente algunas adaptaciones para asemejar más a un ciclo real de compresión de vapor. Haciendo uso de la librería CoolProp para el refrigerante R-134^a en el lenguaje de programación Python, se obtienen los valores para cada punto.

Tabla 1. Valores de los puntos de la figura 14.

PARAMETRO	TEMPERATURA (°C)	ENTALPÍA (KJ/KG)	ENTROPIA (KJ/KG.K)	PRESION (KPA)	CALIDAD
PUNTO 1	-20	386.55	1.74	132.73	1
PUNTO 2	48.23	428.61	1.74	1016.59	N/A
PUNTO 3	40	256.41	1.19	1016.59	0
PUNTO 4	-20	205.57	1.03	132.73	0.15

Fuente: elaboración propia.

A partir de tales, se obtiene dos parámetros importantes, como son la potencia que entregará, idealmente, el compresor, así como el flujo másico del sistema.

$$m_{134a} = \frac{\dot{Q}}{h_1 - h_4} = 0.002167 \text{ kg/s}$$
$$W_{com} = (h_2 - h_1)\dot{m}_{134a} = 0.0911 \text{ kW} = 0.1207 \text{ HP}$$

2.3. Diseño del evaporador

Conociendo la carga térmica del sistema, el paso que corresponde es el diseño del evaporador, que es la parte más esencial del sistema pues en este se generan los tubos de hielo. Primero se mostrará el bosquejo general para luego dimensionar y proceder a cuantificar la transferencia de calor.

2.3.1. Fijación de variables de diseño

El evaporador consta de un tubo de cobre horizontal sobre el que circulará el refrigerante R134a, mismo del que se extiende un total de 10 tubos de cobre también, que estarán sumergidos en agua, de la que se formará el hielo demandado. Dichos tubos serán de un radio 0.0075 m (0.75 cm), siendo alrededor de tales que se formarán tubos de hielo hasta alcanzar un radio externo de 0.0125 m (1.25 cm) y una altura de 0.1 m (10 cm). A continuación, se muestra una imagen que clarifica el modelo descrito:

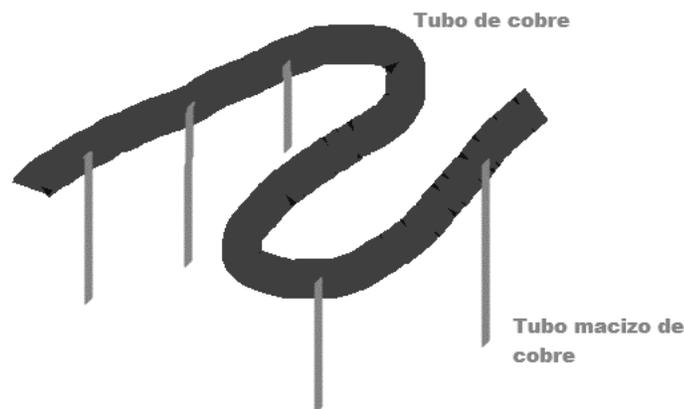


Figura 15. Diseño de evaporador.
Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Modelo analítico

Para cuantificar el calor que transita en el modelo, es necesario plantear algunas suposiciones, que se listan como siguen:

- Se despreciará el estado transitorio, limitándose a un análisis de flujo estacionario: esto es así pues el diseño se sobredimensiona y consecuentemente, indirectamente se incluye el consumo energético de esta fase omitida.
- Se asumirá flujo unidimensional en todos los cálculos: esto se hace en virtud de disminuir la complejidad analítica del modelo teórico, cuidándose en cada instancia de mantener la validez del planteamiento.
- Se hará uso del símil termoeléctrico: básicamente este sostiene que la transferencia de calor se puede moldear con ecuaciones similares a la Ley de Ohm y en razón de ello se adoptaron los considerandos precedentes.
- Se desprecia en el análisis la transferencia a través de cualquier material metálico, como los tubos de cobre por poseer una conductividad tan alta, que la resistencia es casi nula.
- La resistencia de contacto entre materiales se desprecia.

Sobre lo anterior, el diagrama termoeléctrico es como se muestra:



Figura 16. Esquema de resistencias térmicas.
Fuente: elaboración propia.

Del esquema se desprende que:

- R1: es la resistencia térmica proveniente del proceso convectivo entre el agua a temperatura ambiente y la capa de hielo más externa ($m^2.K.W^{-1}$).
- R2: es la resistencia de la conductividad propia sobre el espesor del hielo formado ($m^2.K.W^{-1}$).
- R3: es la resistencia por la transferencia de calor convectiva en el fluido refrigerante dentro del tubo del evaporador ($m^2.K.W^{-1}$).

2.3.3. Cálculo de resistencia uno y dos

Antes de obtener números, es menester hacer palpable la dificultad que esto supone y, como derivación de ello, las simplificaciones asumidas. Dado que la

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

capa de hielo varía con el tiempo y con ello igualmente la resistencia térmica, se tomará el promedio a lo largo del tiempo de su resistencia y con ello se hará el cálculo como si de una transferencia de calor estacionara se tratara: esto aplica tanto para la resistencia uno como para la dos, pues ambas son dependientes del área superficial de tubo de hielo en formación.

Tabla 2. Valores de resistencias resultado de la capa de hielo alrededor del evaporador.

Radio de cilindro	Área superficial	Resistencia convectiva	Resistencia conductiva
0.0075	0.00235619	0.65294336	0
0.0077	0.00241903	0.63598379	0.01835457
0.0079	0.00248186	0.61988293	0.03623847
0.0081	0.00254469	0.60457718	0.05367521
0.0083	0.00260752	0.59000906	0.07068663
0.0085	0.00267035	0.57612649	0.08729298
0.0087	0.00273319	0.5628822	0.10351309
0.0089	0.00279602	0.55023317	0.11936454
0.0091	0.00285885	0.53814013	0.1348637
0.0093	0.00292168	0.52656722	0.1500259
0.0095	0.00298451	0.5154816	0.16486547
0.0097	0.00304734	0.50485311	0.17939586
0.0099	0.00311018	0.49465406	0.19362969
0.0101	0.00317301	0.48485893	0.20757883
0.0103	0.00323584	0.47544419	0.22125444
0.0105	0.00329867	0.46638811	0.23466703
0.0107	0.0033615	0.45767058	0.24782655
0.0109	0.00342434	0.44927295	0.26074235
0.0111	0.00348717	0.44117794	0.27342331
0.0113	0.00355	0.43336948	0.28587781
0.0115	0.00361283	0.42583262	0.2981138
0.0117	0.00367566	0.41855343	0.31013882
0.0119	0.0037385	0.41151892	0.32196001
0.0121	0.00380133	0.40471696	0.33358417
0.0123	0.00386416	0.39813619	0.34501777
0.0125	0.00392699	0.39176601	0.35626694
PROMEDIO		0.50119387	0.19262915

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de la resistencia térmica se hizo con las formulas:

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{\pi \cdot D \cdot L \cdot K} \quad \text{Ecuación 13. Resistencia térmica}$$

$$R_c = \frac{1}{H \cdot A}$$

De esa tabla se denota que $R_1 = 0.501 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ y $R_2 = 0.193 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

2.3.4. Cálculo de resistencia térmica de flujo bifásico

La tercera resistencia de la figura 16 representa una gran dificultad analítica de cálculo, por fortuna, diversos autores han trabajado ecuaciones que permiten obtener los valores, aunque con un margen de error elevado (de hasta 19% para refrigerante R134a), sin embargo, son las que mejores resultados ofrecen a día de hoy.

Dado que la temperatura a la que se pretende arribar es de -10°C y teniendo en cuenta los criterios anotados en el primer capítulo de este documento, la temperatura del refrigerante debe ser al menos de 10°C inferiores, seleccionando al final una temperatura tentativa de -20°C .

Las entalpías para el estado de vapor saturado y fluido saturado son, respectivamente, 386.55 kJ/kg y 205.57 kJ/kg , lo que se usará para aplicar el procedimiento de cálculo:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 0.002167 \text{ kg/s} \\ G &= \frac{\dot{m}}{A_{tuberia}} = \frac{(0.002167 \text{ kg/s})}{\pi((0.00435 \text{ m})^2)/4} = 145.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \\ Re &= \frac{G \cdot D_h}{\mu_f} = \frac{\left(145.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right)(0.00435 \text{ m})}{0.0003718 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 1705.95 \end{aligned}$$

$$f = \frac{1}{(1.82 \log_{10} Re_D - 1.64)^2} = 0.0556$$

De donde tenemos por datos del EES Software: Pr = 1.61

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\left(\frac{f}{8}\right)} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = 16.84$$

$$h_{liq} = \frac{\overline{Nu} \cdot k}{D_h} = \frac{(16.84) \cdot (0.1)}{0.00435} = 387.13 \frac{W}{m^2 \cdot k}$$

Al final: R3 = 0.01368 °C/W.

2.3.5. Determinación de temperatura de refrigerante en evaporador

Teniendo las resistencias térmicas y la temperatura del agua en su estado inicial, fácilmente podemos determinar la temperatura a que debe circular el líquido en el evaporador:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{TOT}} \quad \text{Ecuación 14. Temperatura refrigerante}$$

$$\dot{Q} = \frac{30 - (-20)}{(0.01368 + 0.193 + 0.501)} = 70.65 \text{ W}$$

Con el valor obtenido, podemos ver que el resultado real de la transferencia de calor está por encima de los 39.22 W requeridos, de forma que el hielo estará listo en menos tiempo del presupuestado. Esto se verificará con las pruebas físicas una vez construido el equipo.

2.4. Condensador

El condensador se encuentra fabricado con tubo de cobre, los cabezales o soportes en lámina galvanizada, las aletas fabricadas en aluminio, probadas con nitrógeno seco a 500 psi, con el fin de garantizar la ausencia de fugas. El condensador se encuentra montado con su aspa y motor de 10W, 115V y 0.62A.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

En la siguiente figura se muestra el arreglo de tubos del condensador, vemos que el arrollamiento forma un patrón escalonado, se muestra el paso longitudinal (SL), el paso transversal (ST), número de filas (F), y diámetro exterior del tubo (D).

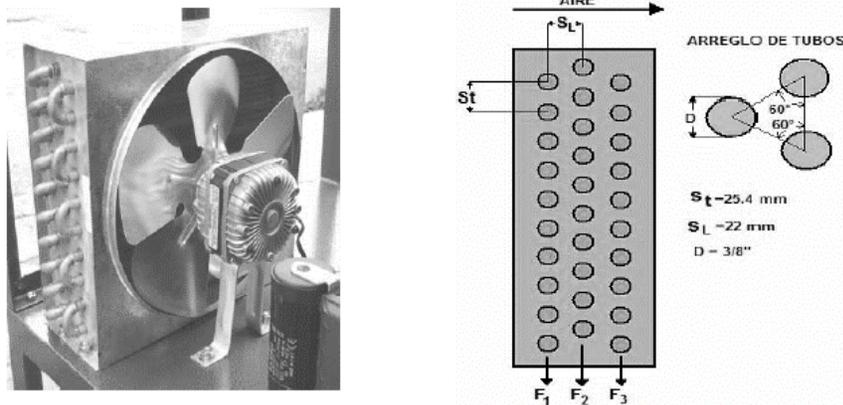


Figura 17. Condensador para ¼ de HP [11].

Tabla 3. Especificaciones de condensador de catálogo.

ESPECIFICACIONES DEL CONDENSADOR	
Número de filas	3
Capacidad nominal	1.4 KW
Área de transferencia	0.242 m ²
Temperatura ambiente	33°C
Diferencia de temperaturas	15°C
Número de aletas por pulgada	8

Fuente: elaboración propia.

2.5. Filtro

El filtro tiene como fin proteger el sistema reteniendo las partículas sólidas y reduciendo la humedad al mínimo.



Figura 18. Filtro ubicado en la línea de líquido [11].

Tabla 4. Especificaciones técnicas de filtro.

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
MARCA	Danfoss
TIPO	DML 032S
TIPO DE RELLENO	Núcleo sólido de moléculas
DIÁMETRO DE CONEXIÓN	¼

Fuente: elaboración propia.

2.6. Botella de aspiración

Se encuentra instalada en la tubería de aspiración y tiene como fin impedir la admisión de líquido en el compresor en los momentos en que la carga impuesta por el sistema es mínima y se evapora menos cantidad de refrigerante.

En la siguiente figura se ilustra el funcionamiento de la botella, se aprecia como el refrigerante llega a la botella y por efecto de la gravedad, no es succionado por el compresor.

La botella de aspiración de la máquina tiene una capacidad de retención de un litro de refrigerante en estado líquido.

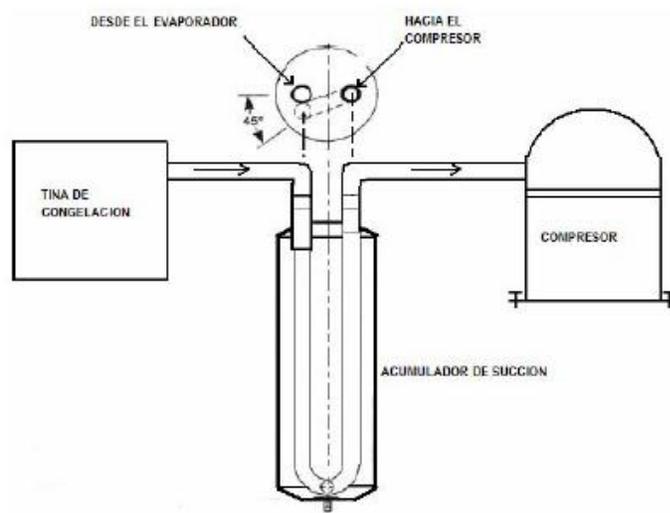


Figura 19. Botella de aspiración para refrigerante 134^a [9].



Figura 20. Botella de aspiración de ejemplo instalada [9].

2.7. Tubo capilar

Debido a que no existen longitudes exactas del capilar para determinadas temperaturas de evaporación y tipo de refrigerante, se utilizó una primera referencia dada por la tabla X, en la cual se muestra la referencia y longitud del capilar requerido para aplicaciones de baja, media y alta temperatura, como función del refrigerante y la potencia del compresor.

- Temperatura de evaporación= (baja temperatura)
- Tipo de refrigerante= 134^a
- Referencia del compresor= 1/4 HP

Tabla 5. Selección de tubo capilar.

Refrigerante	HP	Temperatura baja		Temperatura media		Temperatura alta	
		RPS PN	Distancia requerida	RPS PN	Distancia requerida	RPS PN	Distancia requerida
R134A	"1/8"	096-0030	121"	096-0030	92"	096-0030	53"
R401A	"1/6"	096-0030	78"	096-0026	106"	096-0026	79"
R401B	"1/5"	096-0026	59"	096-0026	36"	096-0026	26"
R409A	"1/4"	096-0026	47"	096-0027	99"	096-0027	66"
R500	"1/3"	096-0027	102"	096-0027	79"	096-0027	39"
R500	"1/2"	096-0032	105"	096-0032	52"	096-0028	99"
R500	"3/2"	096-0032	66"	096-0028	101"	096-0028	79"
R500	"1"	096-0032	39"	096-0028	92"	096-0028	59"

Fuente: [8]

La referencia del capilar se encuentra bajo la columna RPS PN y sus propiedades geométricas, como diámetros interno y externo se muestran en la tabla siguiente. De acuerdo a nuestros requerimientos se selecciona un tubo capilar de 118.11 pulg (3.0 m) y diámetro interno 0.028 pulg.

Tabla 6. Especificaciones de tubo capilar.

Número de parte	Precio	Descripción
096-0030	14.95	#5-10 tubo capilar - .028" DI x .071" OD x 10'
096-0026	14.95	#5-10 tubo capilar - .028" DI x .071" OD x 10'
096-0027	16.95	#5-10 tubo capilar - .028" DI x .071" OD x 10'
096-0032	16.95	#5-10 tubo capilar - .028" DI x .071" OD x 10'
096-0028	15.95	#5-10 tubo capilar - .028" DI x .071" OD x 10'

Fuente: [12].



Figura 21. Tubo capilar de ejemplo [13].

CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

Habiéndose abordado el diseño conceptual de la máquina productora de tubos de hielo, se procederá a identificar y caracterizar el resto de sistemas que componen el equipo.

3.1. Sistemas de la máquina

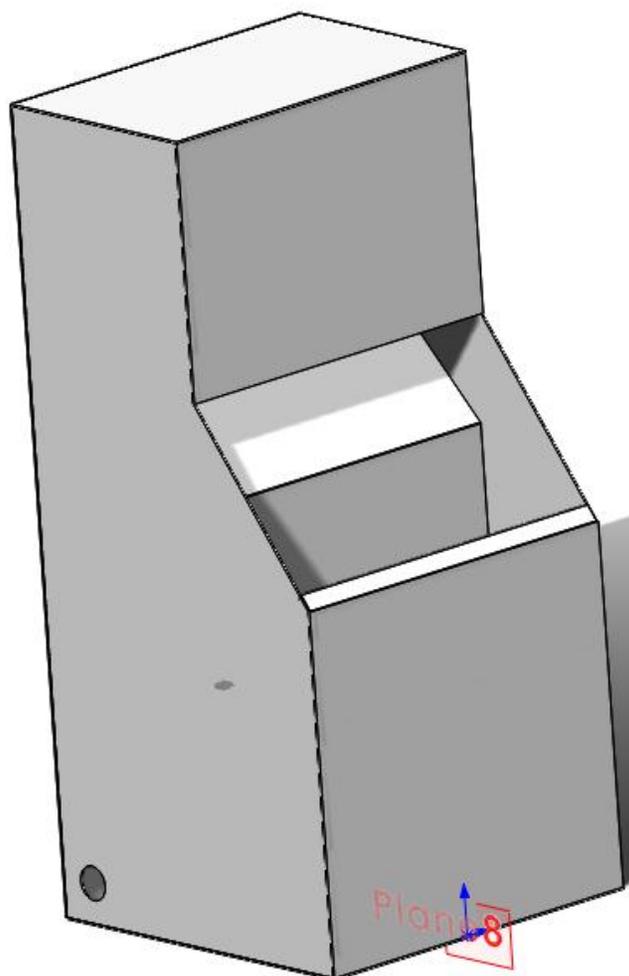
A efectos de lograr lo planteado en los objetivos del trabajo de graduación, el equipo contará con los sistemas mencionados:

- Sistema de refrigeración: este es el encargado de la formación de los tubos de hielo a través de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, tal como fue descrito en el capítulo 2.
- Sistema de control electrónico: tiene por finalidad automatizar el funcionamiento del resto de sistemas de acuerdo a los requerimientos de servicio impuestos.
- Sistema de suministro de agua: este se encarga de hacer circular el agua hacia el sistema de refrigeración para la producción del hielo.

Cada uno de estos se diseña armónicamente con el resto de sistemas, distribuyéndose físicamente en un contenedor donde se almacenarán en conjunto con el hielo producido.

3.2. Contenedor del equipo productor de hielo

Para ello, se ha propuesto un cajón metálico como el de la figura 22, el cual tendrá 65 cm de ancho, 140 de alto y 65 de profundidad.



**Figura 22. Isométrico del equipo ensamblado.
Fuente: elaboración propia.**

La carcasa se fabricará con base en lámina lisa de 3 mm de espesor, por haber amplia disponibilidad en el mercado de ella y para garantizar la rigidez externa necesaria para el equipo. Para su ensamble, se dispondrán de remaches, y ciertas secciones de tornillos, pues estos permitirán su desarme posterior en caso de necesidad de mantenimiento.

3.2.1. Disposición interna dentro del equipo

Previo a considerar las dimensiones externas del equipo, debe tenerse en cuenta aquellos componentes de mayor tamaño que este contendrá para dimensionar adecuadamente. A continuación, se coloca una tabla en que se especifican las principales partes de los diferentes sistemas.

Tabla 7. Sistemas y componentes de tales dentro del equipo

SISTEMA	COMPONENTE
REFRIGERACIÓN	Condensador
	Tuberías de acarreo de refrigerante
	Evaporador
	Válvula de expansión
	Compresor
ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO	Motor DC
	Caja de control electrónica
	Resistencias eléctricas
	Bomba de agua
	Ventilador
SUMINISTRO DE AGUA	Tuberías PVC de acarreo
	Contenedor de agua
	Acometida de agua

Fuente: elaboración propia.

Producto de la tabla anterior y atendiendo a consideraciones de diseño de capítulos precedentes, se identifica al condensador, el evaporador, el contenedor de agua, el ventilador y el compresor como los componentes de mayor tamaño y peso, de forma que estos determinan las dimensiones tanto externas como internas.

Producto de la consideración del tamaño de los citados componentes, se dimensiona y estructura el cajón metálico tal como se detalla en la siguiente imagen.

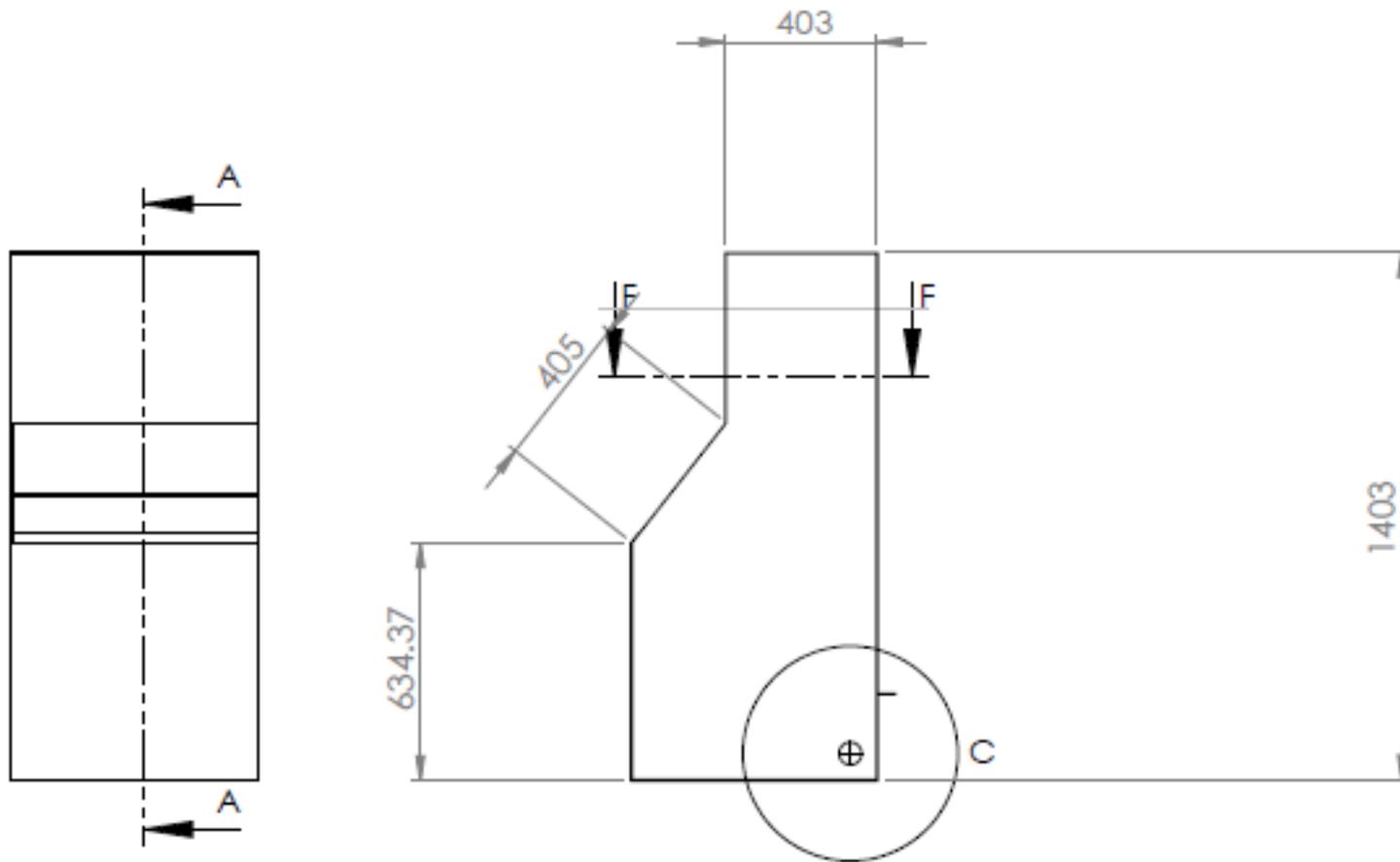


Figura 23. Esquema acotado con vistas.
Fuente: elaboración propia.

Considerando las dimensiones externas del equipo, se procede a ubicar cada uno de los componentes que a continuación se detallan, según pertenecen a cada uno de los sistemas mencionados en el apartado 3.1.

3.2.1.1. Ubicación del equipo de refrigeración

Tal como se puede observar en la figura 24, la mayoría de elementos del sistema de refrigeración se colocarán en la base de la carcasa, salvo el evaporador que se pondrá en la parte superior de la estructura metálica. Las tuberías de conducción del refrigerante en el circuito, se colocarán en las paredes, y se harán circular por los orificios respectivos dispuestos para tal fin.

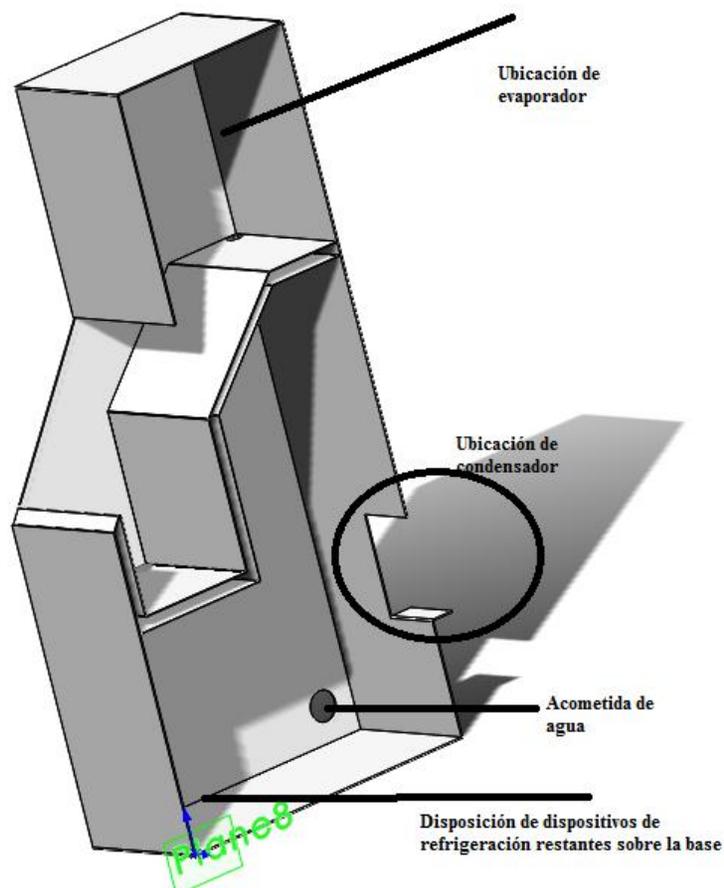


Figura 24. Ubicación de partes del sistema de refrigeración.
Fuente: elaboración propia.

Es importante recalcar que el ventilador que funcionará conjunto con el condensador, se colocará en la parte inferior al depósito de hielo, con varillas dispuestas para tal fin.

3.2.1.2. Ubicación de elementos de suministro de agua

Tal como se puede observar en la figura 25, la mayoría de elementos de este sistema se encuentran en la base de la estructura. Las tuberías subirán a través de las paredes hacia el recipiente de agua. La bomba estará en la parte inferior, justo a la salida del tanque de agua. También habrá una tubería de purga en el contenedor de hielo, de donde saldrá el agua hacia el contenedor.

Por último, habrá una acometida y un flotador que regulará la entrada de agua al sistema según sean los requerimientos, que serán controlados por un mando electrónico centralizado.

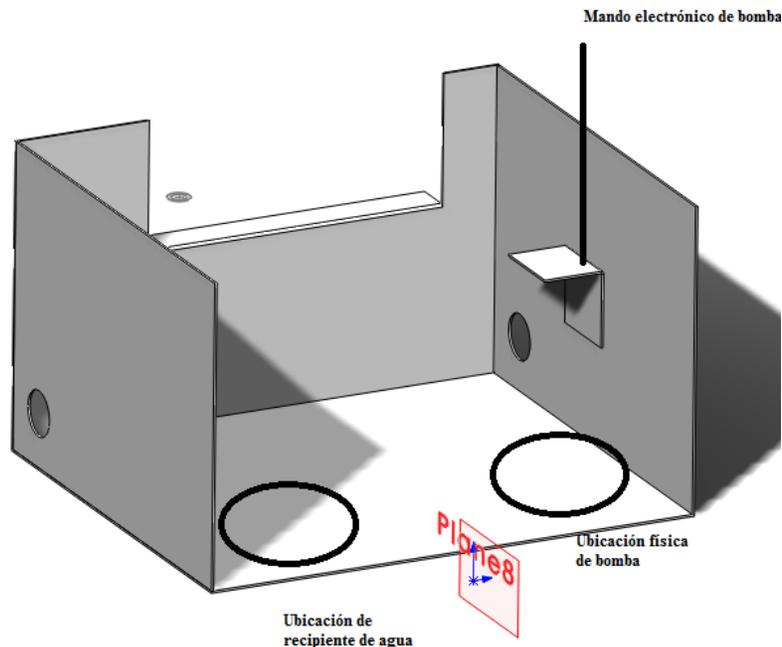


Figura 25. Disposición de elementos de sistema de suministro de agua.
Fuente: elaboración propia.

A manera de resumen, se coloca el esquema de circulación hidráulico del sistema completo. Las dimensiones no se encuentran a escala.

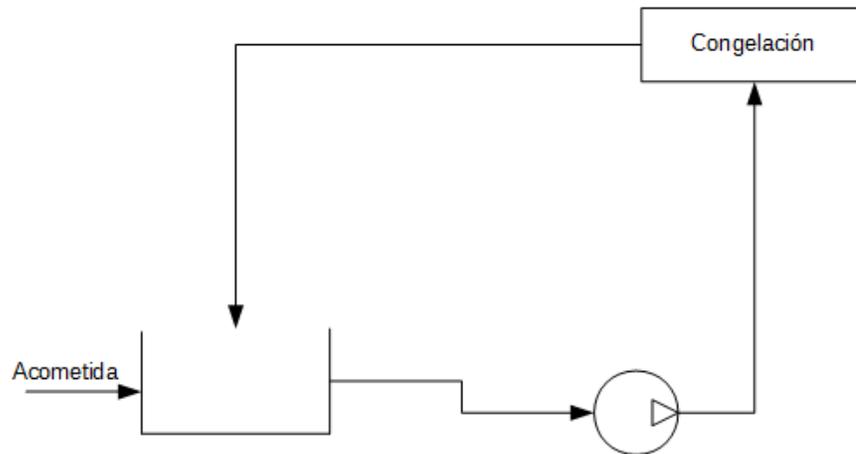


Figura 26. Diagrama hidráulico del sistema de flujo de agua.
Fuente: elaboración propia.

Por último, se detalla con un esquema la forma del recipiente que sostiene el agua debajo del evaporador, mismo que será movido por un sistema de motor controlador por un mando electrónico, como se describe en el siguiente apartado.

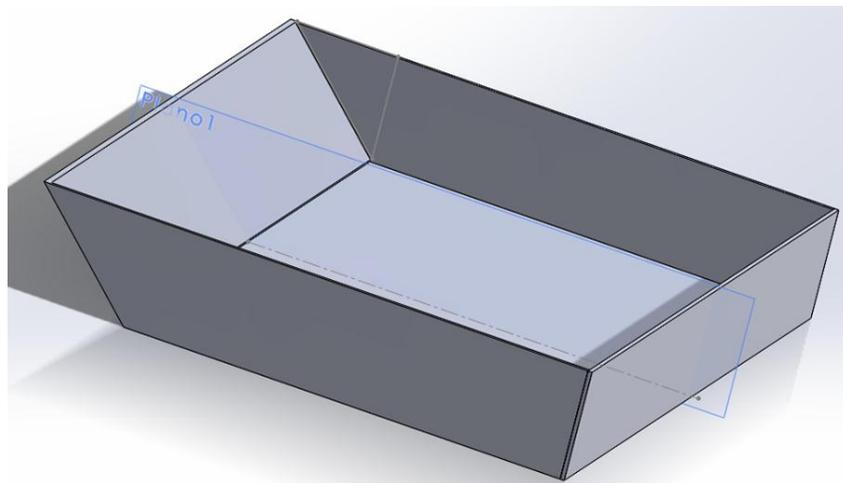


Figura 27. Bandeja de agua para congelación, ubicada debajo del evaporador.
Fuente: elaboración propia.

3.2.1.3. Ubicación del sistema eléctrico/electrónico

Respecto del sistema eléctrico/electrónico, este se encargará de controlar el encendido y apagado tanto del compresor del sistema de refrigeración, la bomba de circulación del agua y las resistencias eléctricas para liberar el hielo formado en el evaporador. Este mando también será el encargado de accionar el motor que subirá y bajará la bandeja de la figura 27, que es donde se almacena el agua que entra en contacto con las aletas del evaporador, con la finalidad de facilitar la bajada del hielo al compartimiento de guardado.

Se colocará una interfaz para que el usuario active la maquinaria de acuerdo a sus necesidades, a la vez que se afinará a través de modelos matemáticos y datos empíricos los tiempos de funcionamiento y sincronización de cada uno de los componentes para facilitar el proceso integral de producción de hielo.

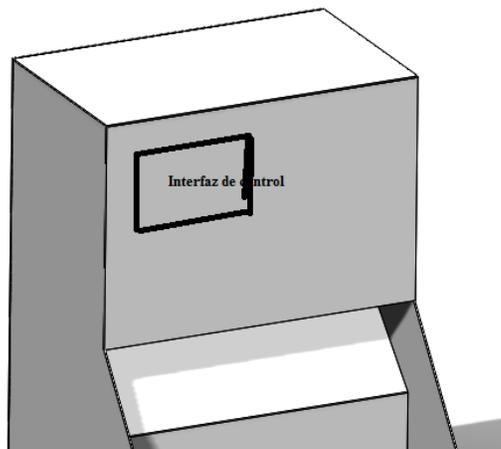


Figura 28. Disposición, preliminar, de interfaz de control electrónico
Fuente: elaboración propia.

Por último, se coloca el diagrama eléctrico del sistema global. El mando electrónico, que se pretende sea un Arduino programable, controlará cinco sistemas, a saber: las resistencias para descongelamiento del hielo, la bomba hidráulica, circuito de refrigeración, ventilador de condensador y motor para subida y bajada de bandeja de congelación.

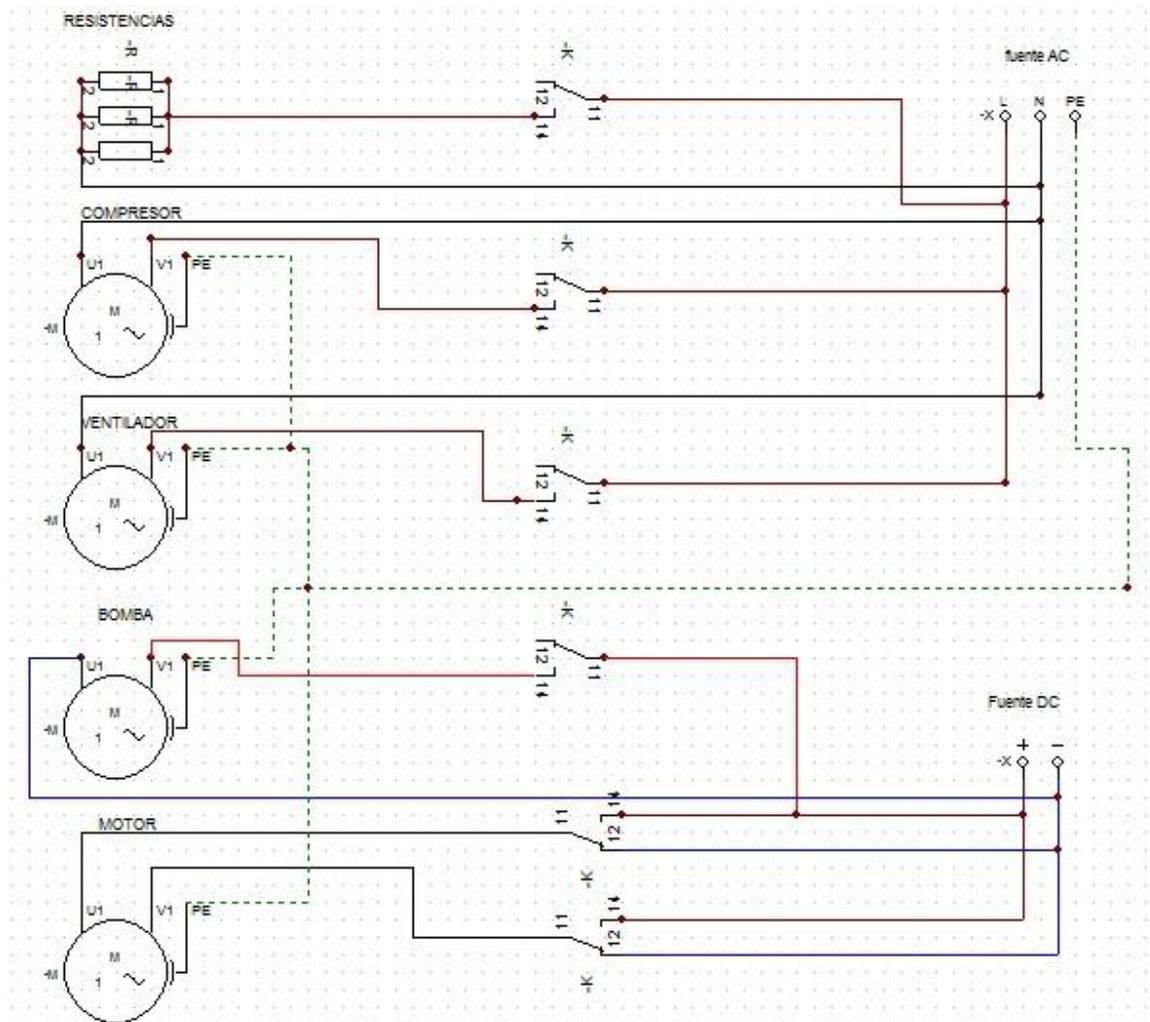


Figura 29. Circuito electrónico del sistema de control eléctrico/electrónico.
Fuente: elaboración propia.

3.3 Funcionamiento de los ciclos seleccionables.

La máquina muestra en su pantalla la opción de seleccionar el ciclo que uno desee:

- 1 Ciclo: Al seleccionar esta opción el dispositivo solamente realizará 1 ciclo de trabajo y luego se detendrá a la espera de nuevas órdenes.
- 2 Ciclos: Al seleccionar esta opción el dispositivo realizará el primer ciclo, luego como si iniciara de cero seguirá con la realización del segundo ciclo y al finalizar esperará nuevas órdenes.
- 3 Ciclos: Esta opción es parecida a la anterior con la única diferencia que el dispositivo realizará 1 ciclo más, es decir 3 ciclos en total, y luego quedará a la espera de nuevas órdenes de trabajo.
- Ciclo infinito: Con esta opción se permite al usuario poner a trabajar el dispositivo de manera continua e ininterrumpida (a menos que haya un corte de energía o el nivel de agua en el reservorio sea inferior al mínimo requerido) es decir la máquina realizará todos los ciclos posibles continuamente hasta que el usuario dé la orden de realizar el último ciclo en curso, esto es posible a través de mantener presionado el botón de enter durante 2 segundos.

En capítulos posteriores se describe el proceso del cual consta un ciclo de trabajo.

CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DIDÁCTICO

En el presente capítulo se detallará el proceso constructivo llevado a cabo para el ensamble del diseño mecánico del capítulo III. Primero se detallará lo relativo al sistema de refrigeración, tanto la fabricación como su acople; segundo, se abordará la distribución del sistema de acarreo de agua; finalmente, se termina con la descripción del sistema electrónico implementado.

4.1. Sistema de refrigeración

Se inició con la construcción de aquellos componentes del sistema que no pueden ser seleccionados de catálogos comerciales y, por tanto, se elaboró un diseño propio para estos. Para el caso del evaporador cuyo diseño conceptual consta en el capítulo II de este documento, se procedió a colocar 10 tubos de cobre de 7 cm de largo, unidos con conectores T al tubo principal del evaporador. Toda la tubería utilizada para el diseño del evaporador y los tubos que de este sobresalen, se construyeron haciendo uso de tubo de cobre de media pulgada de diámetro externo.

Como refrigerante se utilizó R-134^a, tal como se estableció en apartados anteriores de este documento.



Figura 30. Evaporador construido
Fuente: imagen propia.

El proceso de unión se realizó con técnica de soldadura oxiacetilénica con aporte de plata el 6%. El evaporador lleva dos curvas, que son los dos dobleces

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

para formar el serpentín y aprovechar al máximo el espacio disponible. Para esto, se utilizó una dobladora de tubería de cobre manual y convencional. El radio de curvatura utilizado fue de 7 cm dadas las limitantes de la maquinaria utilizada para el doblado.



Figura 31. Aplicación de soldadura oxiacetilénica.
Fuente: imagen propia.

Una vez concluida la fabricación del evaporador, se construyó un sistema provisional de refrigeración para verificar un funcionamiento óptimo y adecuado de acuerdo a los parámetros de diseño fijados en apartados anteriores. Por ello, se colocaron los componentes básicos del sistema tal como el compresor, el tubo capilar, el condensador y toda la tubería de conexión. También se cargó de gas el compresor y se realizó la prueba.



Figura 32. Sistema provisional para pruebas de funcionamiento y calidad del evaporador.
Fuente: imagen propia

En un inicio, el sistema funcionó generando el hielo que se previó en la fase de diseño. No obstante, lo anterior, en subsiguientes ciclos el sistema dejó de producir de forma uniforme, siendo que en algunos tubos no se generaba la capa congelada.

Luego de un proceso de revisión del sistema, se identificó que la acumulación de lubricante dentro de la cavidad de la parte sobresaliente del

evaporador impidió el flujo de calor en la cantidad correcta, razón por la que hubo necesidad de rediseñar la conexión entre el tubo capilar y el evaporador.

A efecto de solucionar este problema, se construyó y diseñó un manifold difusor cuya función es la de inyectar flujos independientes de refrigerante directamente al fondo de cada cilindro sobresaliente del evaporador. Con la presión del flujo del refrigerante, se previno la acumulación, obligando al desalojo del lubricante de forma que el congelamiento fue finalmente satisfactorio.

El manifold se construyó a partir de un cilindro de bronce macizo (1 x 1.25 pulgadas), el cual fue torneado en una de sus caras generándole un chaflán a 45 grados. Luego se perforó el centro que no fue trabajado en torno, logrando una profundidad de 0.75 pulgadas haciendo uso de una broca de 2 mm. A continuación, se trabajó en una fresa con cabezal angulado a 45 grados y se perforaron 10 agujeros, todos con una separación de 36 grados, esto último sobre el chaflán. Cada agujero tuvo una profundidad de 13 mm, con lo cual se logró la intercepción del agujero de la otra cara.

Luego se procedió a colocar el tubo capilar principal a la entrada del manifold cuyo diámetro es equivalente a 0.028 pulgadas y los de salida hacia los tubos de los evaporadores, tienen medidas de 0.05 pulgadas. Estos se unieron perforando sobre cada T un agujero equivalente a 2 mm de diámetro. Todas las uniones se realizaron soldadura oxiacetilénica con aporte de plata al 6%.



**Figura 33. Manifold creado para solventar problema de estancamiento.
Fuente: imagen propia.**

Cuando se confirmó el adecuado funcionamiento del sistema refrigerante, se procedió a ensamblar la estructura metálica haciendo uso de tubería cuadrada de tres cuartos de pulgada chapa 16. Se hicieron los cortes respectivos de acuerdo a las medidas establecidas en el diseño dentro de los planos y se unieron haciendo uso de soldadura arco eléctrico – electrodo revestido (OKE 6013)

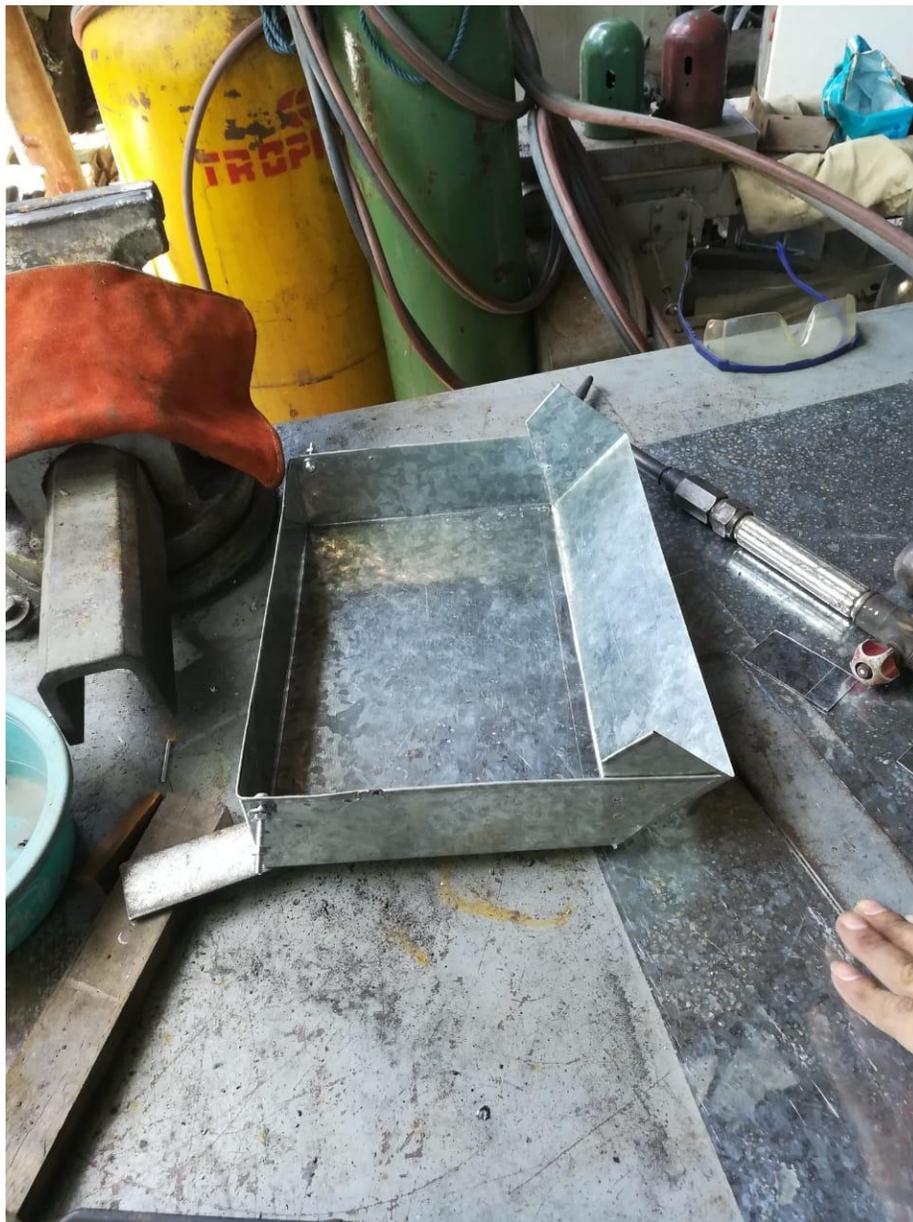
La base en la que va el compresor y demás componentes principales es de hierro negro pintado de espesor de 1.8 mm, asegurando así la capacidad de soportar el compresor, condensador y bandeja de agua, que son los componentes que mayor peso dentro del sistema tienen.

El resto de la estructura está compuesta por lámina lisa galvanizada calibre 28, aislándose el cajón superior en dónde se almacenan los tubos de hielo, con fibra de vidrio de 1 pulgada de espesor, tal como se muestra en la ilustración siguiente:



**Figura 34. Proceso de ensamble de base metálica.
Fuente: imagen propia**

Luego se procedió a la construcción de la bandeja de almacenamiento temporal de agua, construida a base de lámina galvanizada calibre 28, la cual se conformó mediante una dobladora de lámina y se unió con máquina de soldadura de puntos. Se utilizaron las medidas colocadas en el plano correspondiente.



**Figura 35. Bandeja de congelamiento construida.
Fuente: imagen propia.**

Luego se distribuyeron los componentes del sistema de refrigeración en las ubicaciones señaladas para ello dentro de la estructura.



Figura 36. Evaporador y demás elementos colocados.
Fuente: imagen propia.

Luego, se dispuso la bandeja para pivotar sobre dos soportes que sobresalen de la pared superior, uniéndose a través de pernos de 3/16 de pulgada por 1 ½ pulgadas. Una vez que el mecanismo habilitó el giro de subida y bajada, se coloca un eje fabricado de tubo de aluminio de 3/8 de pulgada, soportado mediante dos cojinetes de lámina. Este eje sirve para el enrollamiento de los cables de nylon que accionan la bandeja en un sentido u otro. El eje está acoplado a un motor DC de 12 V que permite el giro en ambas direcciones.

4.2. SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA

El suministro de agua proviene del abastecimiento regular del lugar en que se esté utilizando y para ello se dispuso una toma para acoplar una manguera de media pulgada que permite la conexión de mangueras convencionales de jardinería.

El reservorio es de plástico con dimensiones de 15 cm de ancho por 20 cm de alto; se ubica debajo del contenedor de acumulación de hielo. Dentro de este reservorio hay un control de nivel de agua mecánico (válvula controlada por flotador, de las que se utilizan para cisternas tradicionales). Dentro del mismo reservorio se colocó una bomba sumergible con capacidad de bombear caudal hasta alturas de 2 m.

Luego se colocaron y distribuyeron apropiadamente las tuberías de acarreo de agua dentro de la carcasa del equipo. A su vez, se hicieron los orificios correspondientes para la evacuación y purga de agua tanto de la bandeja de congelamiento de agua como del reservorio mismo.



Figura 37. Constituyentes del sistema de suministro de agua.
Fuente: imagen propia.

El drenaje de agua de la bandeja de congelamiento se controla mediante el uso de una válvula solenoide activada por el sistema de control electrónico.

4.3. SISTEMA ELECTRÓNICO

Este sistema se compone de un Arduino uno nano, mismo que es hardware libre y tiene por finalidad albergar el programa de control del funcionamiento del sistema, además de la emisión de pulsos electrónicos para la activación de relés y demás componentes.



Figura 38. Sistema Arduino central.
Fuente: imagen propia.

El sistema tiene un interruptor principal eléctrico, así como una pantalla LED (de 20 caracteres en cuatro líneas) contando además con tres botones pulsadores que permiten la navegación en la interfaz, facilitando el seleccionar el número de ciclos, parar el ciclo y ejecutar y detener el equipo.



Figura 39. Montaje provisional de pantalla y botones de control del sistema.
Fuente: imagen propia.

Los botones negros permiten la selección del número de ciclos y el botón azul permite ejecutar la instrucción requerida, además tiene la función de eliminar la repetición de ciclos, facultando a concluir el ciclo en curso y finalizando ahí, esto es así si se tiene al menos dos segundos como mínimo presionado.

Para ello, se diseñó un programa en lenguaje de programación C para controlar los pulsos electrónicos. Al encenderlo, se muestra el menú principal. Luego, el programa queda a la espera las instrucciones del usuario para iniciar el proceso ordenado por el usuario.



Figura 40. Pantalla de medición del sistema.
Fuente: imagen propia.

Una vez que se ejecuta el proceso, el programar inicia a verificar:

El nivel de agua del reservorio. Si no se tiene un mínimo de 6.5 cm de altura de agua, el programa envía el nivel de agua y no permite la operación hasta que se tenga el mínimo requerido para garantizar que la bomba trabaje en vacío.

Luego verifica que la bandeja esté en posición horizontal, lo cual se logra a través de un micro switch de final de carrera. Cuando hace contacto, lo cierra y, en consecuencia, si no se está horizontal, activa el motor para llevarla a la posición correcta para el almacenamiento de agua.

Al superar las pruebas de verificación, el sistema inicia el sistema de suministro de agua, comenzando con el llenado de la bandeja de congelamiento. Este proceso se controla por tiempo ya previamente establecido durante 45 segundos lo que permite el llenado completo.

Finalizado el llenado, el mando activa el sistema de refrigeración durante 15 minutos para congelar. Finalizado el tiempo, activa las resistencias de congelamiento y a la vez activa la válvula solenoide para drenar el agua sobrante y la envía al tanque de almacenamiento.

Las resistencias se activan durante 65 segundos. El drenaje dura 40 segundos y finalizado este, se activa el motor para bajar la bandeja, provocando la caída del agua y estando las resistencias activas, se caen los hielos para ello se dan 65 segundos.

Por último, al finalizar los tiempos, la bandeja vuelve a subir y culmina el ciclo. Si no se programó con más de un ciclo el sistema, finaliza el funcionamiento de este.

El sistema cuenta con cinco sensores de temperatura:

- A. A la salida del condensador**
- B. Sobre el punto medio del evaporador**
- C. Entrada al compresor**
- D. A la salida del compresor**
- E. Depósito de agua**

Durante todo el proceso de congelamiento y descongelamiento, se muestra en pantalla las temperaturas en tiempo real actualizadas cada 2 segundos de los puntos especificados anteriormente, lo cual facilita el proceso de enseñanza aprendizaje en las prácticas de laboratorio.

También se aterrizó a tierra la totalidad de la carcasa mediante la línea de tierra, evitando así accidentes indeseables. Todo el sistema está aterrizado a tierra.

La verificación del nivel del agua se realiza mediante un sonar que es un emisor y receptor de ondas de sonido. A través del rebote de la onda sonora, se calcula el nivel del agua.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Las resistencias son resistencias cilíndricas de vidrio de 100 w. Son cuatro resistencias cilíndricas a 110 V, conectadas en duplas en serie.

Por último, se agrega la foto del equipo concluido:



**Figura 41. Máquina de producción de hielo finalizada.
Fuente: imagen propia.**

CONCLUSIONES

Al terminar el desarrollo de este Trabajo de Graduación se ha obtenido la información necesaria para concluir:

Que cualquier diseño de evaporador de tubos con aletas para aplicaciones de congelamiento deben considerar mecanismos que eviten el estancamiento de lubricante dentro de las aletas para facilitar el proceso de congelamiento.

Que el proceso de cálculo de congelamiento se simplifica sustancialmente al despreciar el estado transitorio de transferencia de calor, limitándose el análisis a flujo estacionario.

Que aún hoy día existen serias dificultades analíticas para calcular resistencias térmicas en flujo bifásico, existiendo modelos analíticos con altos márgenes de error que deben ser utilizados con cautela.

Que los principales problemas en el proceso constructivo de las máquinas de producción de hielo se encuentran en el evaporador pues este debe ser cuidadosamente diseñado para facilitar el proceso de la forma más eficiente posible.

Que son necesarios el sistema de control electrónico puede diseñarse haciendo uso de tiempos calculados en base a ensayo y error en ausencia de sensores adecuados para establecer un circuito de medición permanente.

RECOMENDACIONES

Al terminar el Trabajo de Graduación, recomendamos lo siguiente para aplicaciones en el futuro mediato:

Que se potencie el sistema de control electrónico para incluir un sistema de almacenamiento de datos de forma que las mediciones de los sensores de temperatura puedan guardarse digitalmente para su posterior análisis en asignaturas como Termodinámica o Transferencia de Calor.

Que se incluyan más sensores de temperatura dentro del sistema de control electrónico de forma que se pueda hacer una lectura más completa del funcionamiento del sistema lo cual devendrá en una aplicación didáctica mucho más rica para los estudiantes del área termo mecánica.

Que el actual sistema de subida y bajada de la bandeja de congelamiento puede ser un caso de análisis para la asignatura diseño de elementos de máquinas, siendo posible incluso su rediseño para facilitar el proceso constructivo.

Que dentro de la asignatura de electrónica se puede plantear el rediseño del sistema de control electrónico a nivel de programación pues el sistema puede cambiarse a uno de control retroalimentado, haciéndolo más eficiente en el manejo del compresor y las resistencias eléctricas, que son las que más energía consumen.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Heating, R. a.-C. (2010). *REFRIGERATION HANDBOOK*. Atlanta.
- Ariza Gamero, R. E., & Florez Villamizar, N. F. (2008). *DISEÑO Y MONTAJE DE UNA MAQUINA PRODUCTORA DE HIELO EN BLOQUE PARA DEMOSTRACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN APLICADO EN EL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Caicedo Amaranto, Y., & Ardila Sierra, O. (2016). *Diseño y construcción del prototipo de una máquina productora de hielo tubular*. Universidad Nacional de Colombia.
- Cano Solache, C. D. (2015). *Diseño conceptual de una máquina de hielo rápido*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- ÇENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2012). *TERMODINÁMICA*. MCGRAW-HILL.
- DINÇER, I., & KANOGLU, M. (2010). *REFRIGERATION SYSTEMS AND APPLICATIONS*. WILEY.
- Energy, D. o. (1992). *Handbook of thermodynamics, heat transfer, and fluid flow*. Washington: Department of Energy.
- Hernández Goríbar, E. (2011). *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. México: Editorial Limusa.
- LIENHARD, J. H. (2001). *A HEAT TRANSFER HANDBOOK*. Cambridge, Massachusetts.
- Nelson, C., Reis, C., Nelson, E., Armer, J., Arthur, R., Heath, R., & Rono, J. (2015). *Refrigeration Playbook: Natural Refrigerants*. National Renewable Energy Laboratory.
- Ochoa Guaman, S. L. (2005). *Construcción de una máquina para producir 1/2 tonelada de hielo troceado diario*. Guayaquil: Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- The American Society of Heating, R. a.-C. (2008). *COOLING AND HEATING LOAD CALCULATION MANUAL*. New York City: ASHRAE.

The American Society of Heating, R. a.-C. (2017). *Fundamentals Handbook*.
New York City: ASHRAE.

Valdés Aguilar, C. M., & Rozas Roa, C. B. (2014). *FABRICACIÓN DE HIELO Y
ANÁLISIS DE CICLOS DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE
VAPOR*. Universidad del Bio-Bio.

Villanueva Manresa, R. (2004). *REFRIGERANTE PARA AIRE
ACONDICIONADO Y REFRIGERACIÓN*. Alicante: Editorial Club
Universitario.

Zegarra Reveggino, D. A. (2010). *DISEÑO DE UN PRODUCTOR DE HIELO
FLUIDO DE 14 kg/h*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.



ANEXOS

ANEXO 1. PRESUPUESTO DEL EQUIPO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Cantidad	Material	Precio unitario	Precio total
Sistema de refrigeración			
1	Compresor	\$90.00	\$90.00
1	Evaporador	\$15.00	\$15.00
3m	Tubo capilar principal	\$3.50	\$10.50
1	Condensador	\$25.00	\$25.00
1	ventilador	\$10.00	\$10.00
1	Lata de Refrigerante	\$5.00	\$5.00
2m	Tubos capilares secundarios	\$3.50	\$7.00
1	Manifold divisor	\$5.00	\$5.00
3	Aporte de plata	\$1.50	\$4.50
Suministro de agua			
1	Depósito de agua	\$7.00	\$7.00
1	Bomba de agua	\$21.00	\$21.00
1	Válvula solenoide de drenaje	\$5.00	\$5.00
2m	Manguera de suministro principal	\$2.00	\$2.00
1m	Manguera de retorno	\$1.00	\$1.00
1	Acople hembra para manguera	\$2.50	\$2.50
1	Flotador	\$9.00	\$9.00

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Estructura			
4	Tubo cuadrado 3/4	\$5.00	\$20.00
5	Lámina galvanizada calibre 28	\$8.00	\$40.00
1	Lámina lisa 2mm	\$12.00	\$12.00
10	Fibra de vidrio	\$2.00	\$20.00
150	Remaches de 1/8	\$0.03	\$4.50
100	Remaches de 3/16	\$0.03	\$3.00
22	Pernos de 1/4x1 1/2	\$0.10	\$2.20
10	Pernos de 1/8x1	\$0.08	\$0.80
25	Pernos punta broca 1"	\$0.05	\$1.25
3	Disco de corte	\$2.00	\$6.00
1	Disco de esmerilar	\$2.00	\$2.00
1	Electrodo	\$1.00	\$1.00
1	Eje de aluminio	\$2.00	\$2.00
1	Acople motor-eje	\$0.50	\$0.50
1m	Cables de giro de la bandeja	\$1.00	\$1.00
1	Silicón	\$2.50	\$2.50
2	Bisagras 2"	\$1.00	\$2.00
2	Bisagras 3"	\$1.25	\$2.50
1	Agarradero	\$1.75	\$1.75
1/4	Pintura Galvite	\$15.50	\$15.50

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Sistema eléctrico/electrónico			
1	Pantalla de 20x4 caracteres	\$5.50	\$5.50
1	Arduino uno mega nano	\$15.00	\$15.00
1	Tableta de 8 relés optacoplados	\$10.00	\$10.00
1	Sensor sonar de nivel	\$8.00	\$8.00
5	Sensor de temperatura	\$4.50	\$22.50
1	Interruptores pulsadores	\$0.30	\$0.30
1	Interruptor principal	\$0.50	\$0.50
1	Final de carrera	\$0.50	\$0.50
1	Fuente de poder DC	\$12.00	\$12.00
2m	Cable TSJ 3x12	\$1.50	\$3.00
2m	Termoencogible 3/8	\$0.75	\$1.50
2	Resistencias eléctricas	\$8.00	\$16.00
1	Motor DC	\$20.00	\$20.00
TOTAL:	\$474.8		

ANEXO 2. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Manual de operación de equipo didáctico para la producción de tubos de hielo

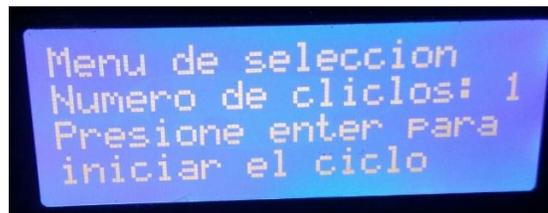
- Encendido del equipo

Para el encendido del equipo conectamos la línea de alimentación eléctrica a una toma corriente a 110v, luego presionamos el interruptor de encendido general.

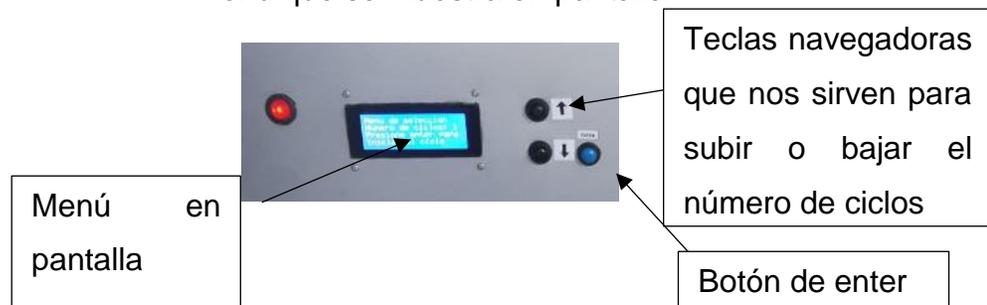


- Puesta en marcha

En pantalla se muestra un menú que permite seleccionar el número de ciclos que desea realizar: 1 ciclo, 2 ciclos, 3 ciclos y ciclo continuo. Para estos usamos los botones navegadores de color negro para subir o bajar el número de ciclos. Para dar inicio a la operación presionamos el botón color azul (enter) para comenzar el proceso.



Menú que se muestra en pantalla



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Durante todo el proceso de trabajo se muestra en tiempo real (actualizado cada 2 segundos) las temperaturas de cinco puntos del sistema. Las cuales en pantalla se pueden identificar mediante una letra:

- A: temperatura a la salida del condensador
- B: Temperatura del evaporador
- C: Temperatura a la salida del condensador
- D: Temperatura a la salida compresor
- E: Temperatura del depósito de agua



Temperaturas durante el ciclo de trabajo

- Parar el ciclo de trabajo

Para poder detener el proceso de producción de hielo se tienen las siguientes opciones: si se escogió un solo ciclo al finalizar el proceso vuelve al menú de espera para nueva orden. Si se selecciona más de un ciclo en proceso podemos detenerlo presionando durante 3 segundos el botón de enter, esto lo que hace es poner el ciclo restante a cero, el ciclo que está en proceso se finaliza y vuelve a la pantalla de espera de nueva orden.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

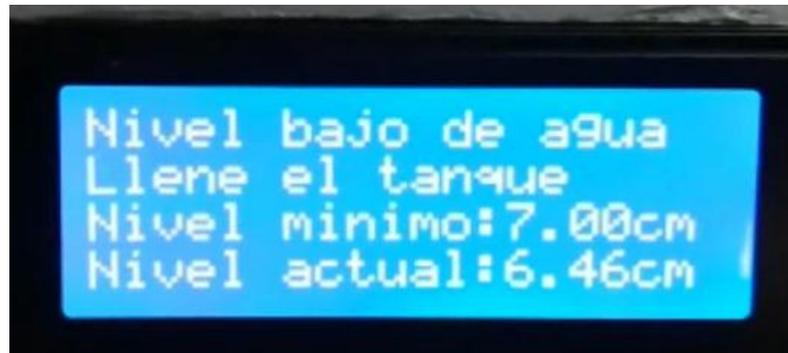


Presionando enter durante 3 segundos podemos poner los ciclos restantes a cero

Al finalizar cortamos la alimentación eléctrica y está listo para otro día de trabajo.

- Suministro de agua

Para la generación del hielo la máquina requiere un suministro de agua el cual se le proporciona mediante una manguera estándar de jardinería, esta debe ser acoplada a la toma para su funcionamiento, el equipo almacena una cantidad en un depósito en su interior, si no se coloca el abastecimiento de agua necesario el equipo es capaz de trabajar con la reserva de agua, cuando esta se agota envía un mensaje en pantalla mostrando el nivel mínimo requerido y el nivel actual y no permite que el ciclo inicie hasta sobrepasar la cantidad mínima de agua.



Mantenimiento.

El mejor mantenimiento de una instalación se realiza cuando se conocen a fondo todos y cada uno de los elementos que la componen, y la función que realizan en ella. De ese modo se prestará mayor atención a los componentes esenciales y en caso de aparecer, las averías siempre serán de menor gravedad.

Es necesario también conocer los parámetros de diseño de la instalación y el ciclo frigorífico que atraviesa el refrigerante para proceder a una rápida localización y reparación de las averías.

El único modo de comprender los distintos elementos del sistema es conociendo los fundamentos teóricos del ciclo de refrigeración, conocer los aparatos de medida que permiten concretar el estado de las magnitudes físicas de los fluidos en distintos puntos del ciclo y aprender todos los elementos que componen una instalación frigorífica; en este caso de absorción.

Los programas de mantenimiento básicamente tienen como objetivo reducir la frecuencia y duración de reparaciones, así como la de obtener la máxima eficiencia y economía en el funcionamiento y conservación de equipos e instalaciones.

Mantenimiento. Es el conjunto de actividades que es necesario desarrollar para conservar edificios, equipos, instalaciones, etc., en condiciones óptimas de servicio y prolongar la vida útil y su operación al máximo nivel de eficiencia.

Las actividades de mantenimiento tienen dos aspectos:

El técnico y el económico. El objetivo inmediato del mantenimiento es conservar en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y confiable las instalaciones y equipos, para no demorar ni interrumpir sus servicios.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

El objetivo básico del mantenimiento es contribuir por los medios disponibles a sostener lo más bajo posible el costo de operación de equipos e instalaciones. El análisis de los múltiples problemas que se han presentado al personal de conservación en las instalaciones e industrias ha determinado la aplicación de los sistemas de mantenimiento.

Item	OPERACIÓN DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA			
		D	S	M	T
1	Limpieza general		X		
2	Revisión de fugas				X
3	Revisión de tuberías			X	
4	Revisión de presiones de trabajo				X
5	Revisión de temperaturas y sensores de temperatura			X	
6	Revisión de gabinete y estructura de soporte				X
7	Revisión de bisagras y pernos (estado físico)				X
8	Limpieza de depósito de agua		X		
9	Limpieza de bomba de agua		X		
10	Revisión de cable de la bandeja			X	
11	Revisión de resistencias de deshielo			X	

D= Diario S=Semanal Q= Quincenal M= Mensual T= Trimestral

Descripción de ítem que se proponen en el programa de Mantenimiento.

1. Limpieza general

Comprende todas las actividades relacionadas con retirar del área o banco de Laboratorio todo objeto extraño, líquidos y cualquier cuerpo que dificulte la movilidad dentro del área de manipulación por parte del personal instructor o estudiantes en sus prácticas.

2. Revisión de fugas

Los acoples, así como también las uniones de tubería, deben ser inspeccionadas para garantizar que no exista pérdida de agua o refrigerante. Las fugas se presentan con mayor frecuencia en aquellos puntos donde la presión en el sistema es más alta; por lo tanto, la salida de la bomba y del compresor, así como las mangueras de acarreo de agua.

3. Revisión de tuberías.

La tubería de cobre correspondiente al sistema de refrigeración.

4. Revisión de presiones de trabajo

Para garantizar el buen funcionamiento del sistema, manteniendo así las temperaturas de saturaciones necesarias, censar a periodos frecuentes la presión del compresor, para eso se instala el manómetro a la entrada de la válvula de servicio y se mide la presión de baja, esto se compara con la presión dada por el fabricante para dicho compresor.

5. Revisión de temperaturas y funcionamiento de sensores de temperatura.

Las temperaturas del sistema tendrán que ser censadas cada dos semanas y los sensores deben de limpiarse en su base de instalación. Idealmente estos equipos son de acero inoxidable, lo que reduce la necesidad de un mantenimiento más estricto. Una medición importante es la temperatura del evaporador.

6. Revisión de gabinete y estructuras de soporte

Se debe de revisar la estructura del gabinete en su totalidad, empezando minuciosamente con la revisión de las uniones de la lámina a la estructura, esto es decir revisar los remaches de cada sección de la lámina, así como los pernos que están en las secciones previstas para realizar el mantenimiento respectivo, de debe de revisar el estado físico de las llantas sobre las que está montado el gabinete, asegurándose que estas se encuentren en buen estado, así como que estén sujetadas correctamente.

7. Revisión de bisagras y pernos (estado físico)

Las partes o segmentos sostenidos con bisagra son dos, a saber, la puerta trasera y el acceso al depósito de agua, se debe inspeccionar que estos elementos estén sujetos correctamente a las bisagras, así como la correcta lubricación de estas, además de constatar el estado de los pernos.

8. Limpieza de depósito de agua

Es importante la correcta limpieza del depósito de agua para evitar posibles obstrucciones en el suministro de agua debido a impurezas o suciedad contenida en el agua.

9. Limpieza de bomba de agua

La bomba de agua debe de extraerse del depósito de agua y ser limpiada manualmente con el fin de constatar su correcto funcionamiento y evitar la obstrucción de su toma debido a la suciedad.

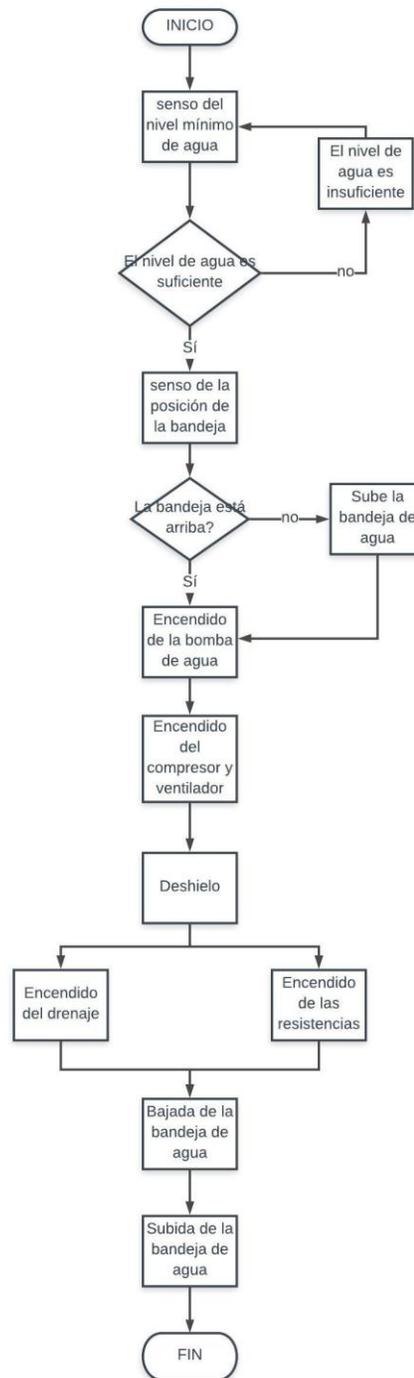
10. Revisión de cables de la bandeja

Es importante constatar el buen estado de los cables que sostienen la bandeja superior de agua, ya que estos se encargan tanto de la bajada como de la subida de ella, además que soportan el peso del agua durante el ciclo de refrigeración.

11. Revisión de resistencias de deshielo

Estas están colocadas arriba del evaporador, se deben limpiar con un paño húmedo con suma precaución ya estas son de vidrio.

Diagrama de flujo de un ciclo de trabajo



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO PARA PRODUCCIÓN DE TUBOS DE HIELO

Tabla de selección de los componentes del Sistema de refrigeración

Compresores LBP (Baja Presion de Retorno)						60Hz	R-134a									
REFRIGERADORAS																
VOLUMEN DEL SISTEMA (litros)		COMPRESOR				CAPACITOR DE ARRANQUE		TUBO CAPILAR				Temperatura de Evaporación				
Temperatura Ambiente		Modelo	Capacidad Frigorífica Btu/h	Eficiencia Btu/W _h	Referencia Comercial HP	Capacitancia μ F		Diametro Interno		Largo			Caudal de N ₂ a 10 atm /min			
32°C	43°C					115V	220V	pul	mm	pul	mm					
Hasta 100	Hasta 80	EM 20HR	200	3,03	1/12	124 a 149 90 VAC	70 a 84 150 VAC	0,025	0,63	128	3250	3,15				
		EMIS 20HR	200	3,02		161 a 193 150 VAC	72 a 88 180 VAC	0,028	0,71	173	4400					
100 a 300	80 a 250	EM 30HR	310	3,20	1/10	145 a 175 115 VAC	38 a 46 220 VAC	0,025	0,63	59	1500	7,6				
		EM 30HR	305	3,60		88 a 108 115 VAC	38 a 46 230 VAC	0,028	0,71	102	2600					
		EMI 30HER	305	3,65		64 a 77 140 VAC	53 a 64 180 VAC	0,031	0,80	181	4600					
170 a 360	140 a 300	EM 45HR	420	3,93	1/8	145 a 175 110 VAC	-	0,025	0,63	45	1150	8,4				
		EM 45HR	420	3,90		145 a 175 110 VAC	38 a 46 220 VAC	0,028	0,71	79	2000					
		EMI 45HER	420	4,18		-	53 a 64 190 VAC	0,031	0,80	140	3550					
250 a 400	220 a 370	EM 55HR	510	4,05	1/6	170 a 200 115 VAC	50 a 80 190 VAC	0,028	0,71	61	1550	9,4				
		EMI 55HER	510	4,45		233 a 280 115 VAC	108 a 130 220 VAC						0,031	0,80	110	2800
		EMI 60HER	570	4,19	1/6+	158 a 190 120 VAC	70 a 84 210 VAC	0,035	0,90	197	5000					
		EM 65HR	650	3,88		189 a 227 130 VAC	-									
280 a 480	240 a 400	EMI 70HER	705	4,58	1/5+	270 a 324 115 VAC	-	0,028	0,71	61	1550	9,4				
		FF 7,5HBK	695	3,90		270 a 324 115 VAC	108 a 130 140 VAC						0,031	0,80	110	2800
		FFI 6HAK	680	4,25		158 a 190 120 VAC	64 a 77 220 VAC						0,035	0,90	197	5000
		EGAS 70HLR	695	5,40		233 a 280 115 VAC	88 a 108 180 VAC						0,028	0,71	61	1550
350 a 570	275 a 450	FF 8,5HBK	740	3,74	1/4	270 a 324 115 VAC	88 a 108 220 VAC	0,028	0,71	49	1250	10,5				
		FFI 7,5HAK	765	4,60		175 a 228 100 VAC	64 a 77 180 VAC						0,031	0,80	87	2200
		EMI 70HAK	700	4,00		189 a 227	64 a 77						0,035	0,90	197	5000
		EMI 70HAK	700	4,00		189 a 227	64 a 77						0,035	0,90	197	5000

-20°C
a
-10°C

ANEXO 3. GUÍA DE LABORATORIO

1. Objetivos de la Práctica

1.1. General

Evaluar el ciclo de Refrigeración por compresión de Vapor con el refrigerante R134a.

1.2. Objetivos Específicos

- Visualizar el proceso de Refrigeración por compresión de refrigerante R134a bajo condiciones reales de funcionamiento.
- Determinar la capacidad de Refrigeración.
- Determinar el trabajo del Compresor.
- Determinar el coeficiente de operación del ciclo de refrigeración ideal.
- Determinar el coeficiente de operación del ciclo de refrigeración experimental o real.
- Representar de forma gráfica las condiciones de funcionamiento del ciclo.

2. Equipos y Materiales a Utilizar:

- a. Banco didáctico de Refrigeración por compresión de Vapor con Refrigerante R134a.
- b. Tabla de Refrigerante R 134a.
- c. Diagrama P-h del Refrigerante 134a.
- d. Textos relacionados con ciclos de Refrigeración.

3. Procedimiento Experimental.

3.1. Pre-laboratorio: identificación de equipos, revisión de la teoría, evaluación preliminar de la práctica.

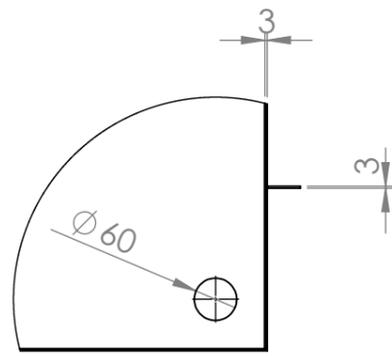
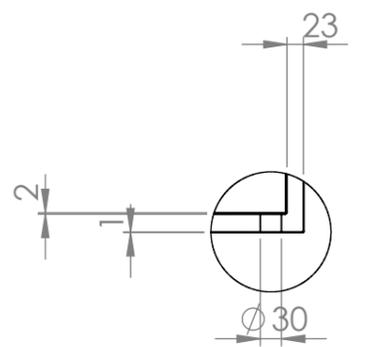
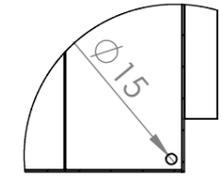
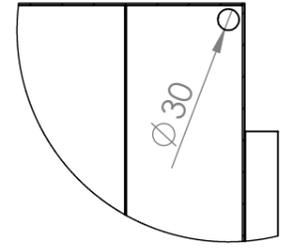
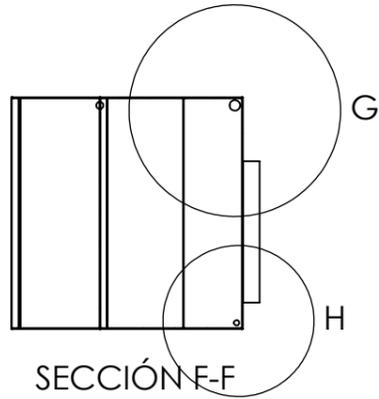
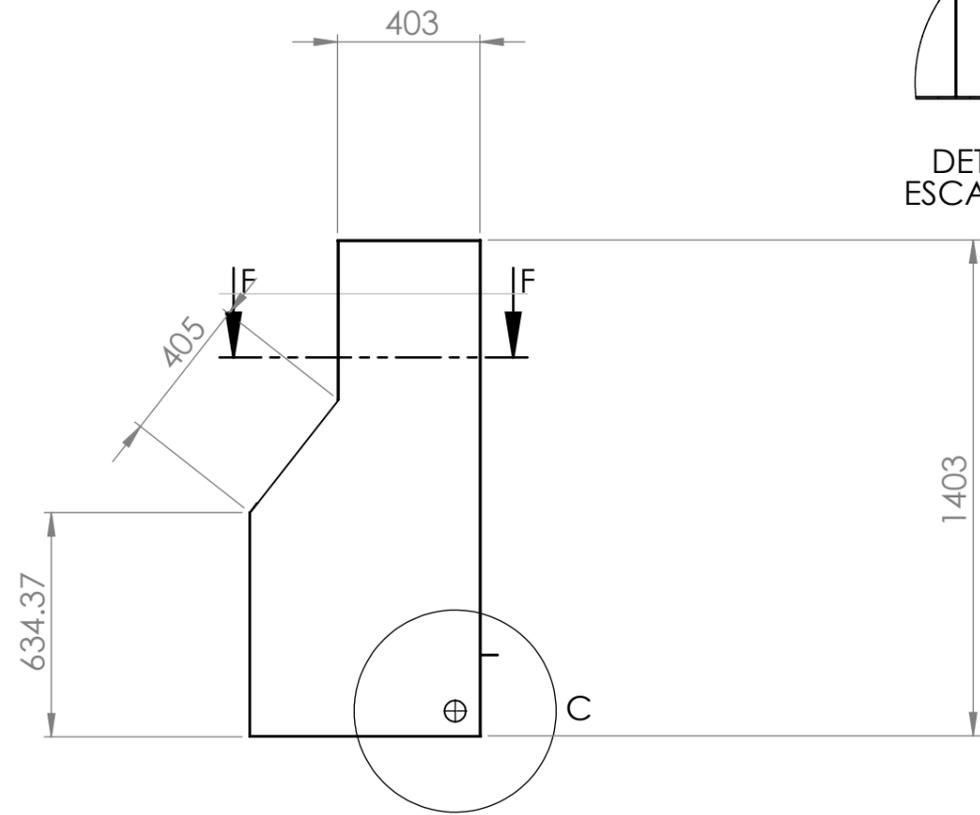
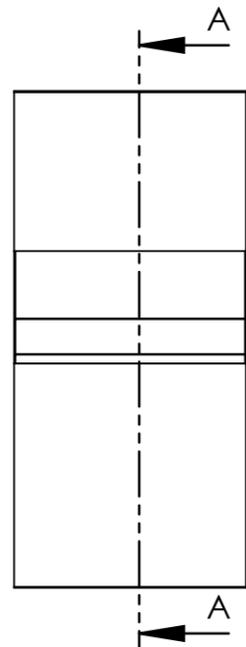
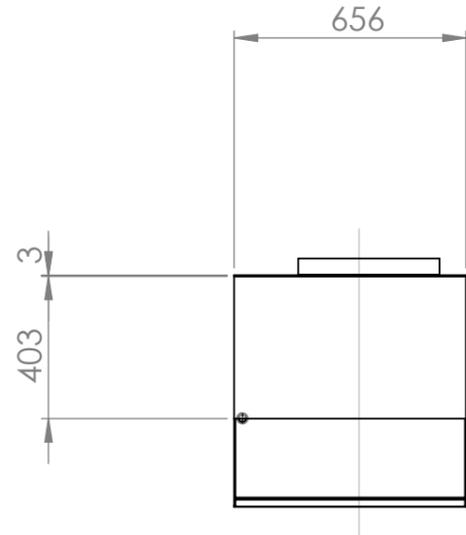
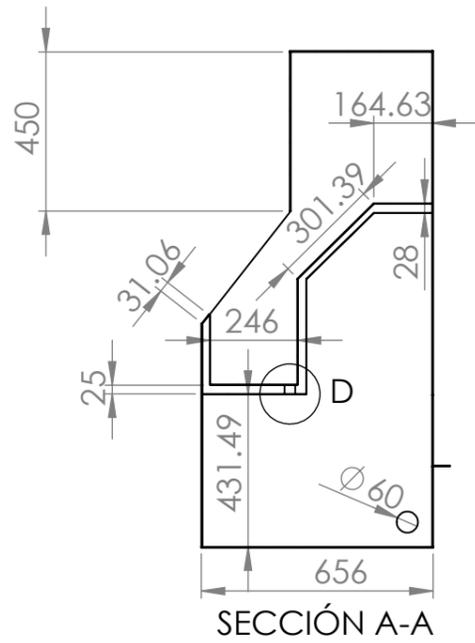
3.2. Práctica, cuya ejecución consiste en:

1. Arranque del banco didáctico de refrigeración por compresión de vapor de la EIM, esperar tiempo de estabilización.
2. Toma de muestra de las temperaturas mostradas en la pantalla cada 5 minutos
3. Toma de presiones de las líneas de alta y de baja presión.

3.3. Reporte: debe contener:

1. Datos experimentales obtenidos de la práctica.
2. Cálculos relacionados con la obtención de los resultados.
3. Resultados obtenidos.
4. Graficar el ciclo de refrigeración para el refrigerante empleado basado en las condiciones de funcionamiento del banco, en el respectivo diagrama $P-h$.
5. Graficar en el mismo diagrama el ciclo de refrigeración ideal, haciendo las suposiciones teóricas que sean necesarias, bajo las condiciones de funcionamiento del banco. Analizar las diferencias representadas en los gráficos.
6. Calcular los coeficientes de operación en los ciclos real e ideal; basados en las condiciones plantadas en la práctica. Analizar las diferencias o similitudes.
7. Calcular el Máximo coeficiente de operación de un equipo frigorífico que opere entre estos dos focos.
8. Discusión de resultados
9. Conclusiones
10. incluir diagramas de flujo para operaciones en cada uno de los posibles ciclos de trabajo del equipo

ANEXO 4. PLANOS CONSTRUCTIVOS



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.	PINO E.	FIRMA	FECHA			TÍTULO: CARCASA METÁLICA			
VERIF.	DE LEÓN T.								
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		PLANO UNO	
				PESO:		ESCALA: 1:20		HOJA 1 DE 1	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

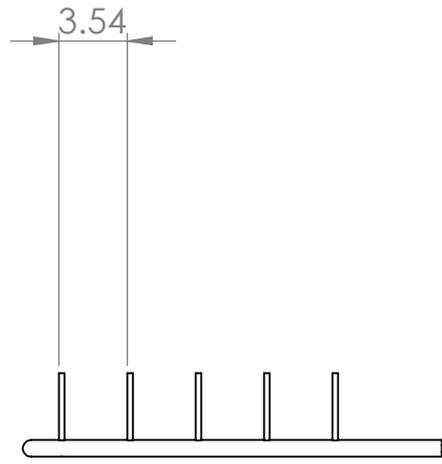
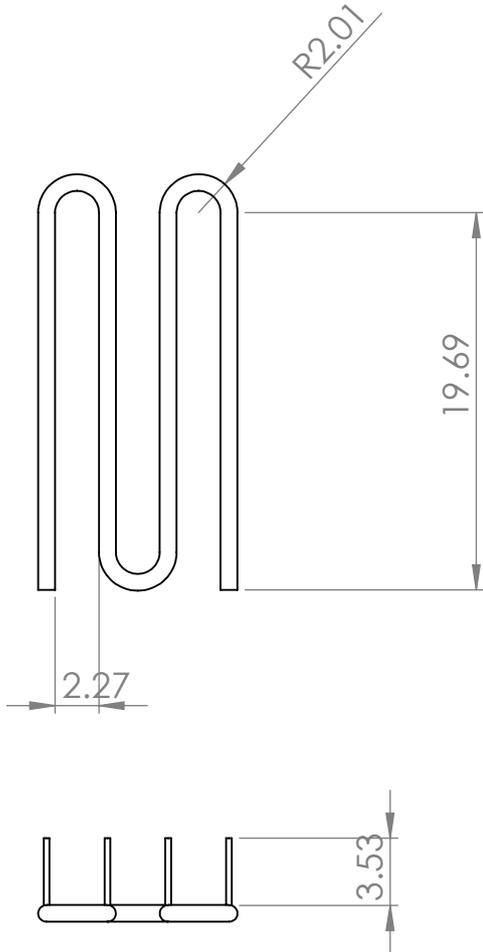
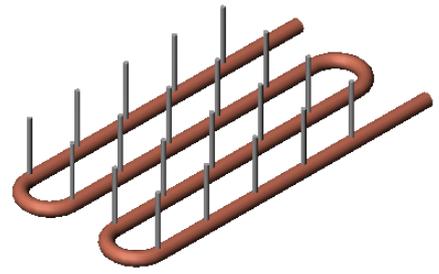
C

B

B

A

A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

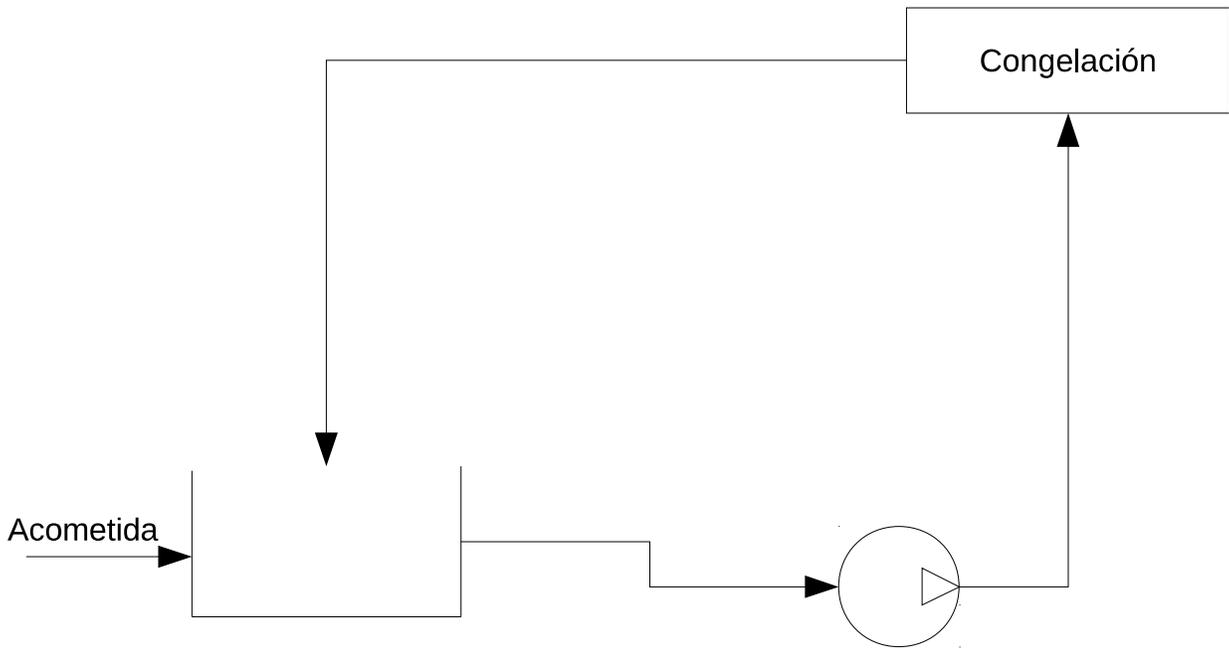
DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	PINO E.		
CHK'D	DE LEÓN T.		
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	EVAPORADOR	
DWG NO.	PLANO TRES	A4
WEIGHT:	SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIBUJADO	06 FEB 2018	PINO E.		
COMPROBADO	06 FEB 2018	DE LEÓN TORRES		
ESCALA 1:1	DIAGRAMA DE SISTEMA HIDRÁULICO			NÚMERO:
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR: