

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Fabricación de un prototipo de bajo costo de un sistema de refrigeración
por compresión de vapor

Trabajo de graduación en la modalidad de trabajo profesional presentado por
Luis Alfonso Martínez Solís
para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2017

Fabricación de un prototipo de bajo costo de un sistema de refrigeración
por compresión de vapor

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



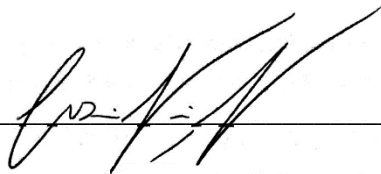
Fabricación de un prototipo de bajo costo de un sistema de refrigeración
por compresión de vapor

Trabajo de graduación en la modalidad de trabajo profesional presentado por
Luis Alfonso Martínez Solís
para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

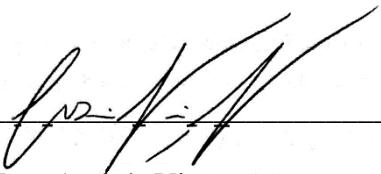
Guatemala

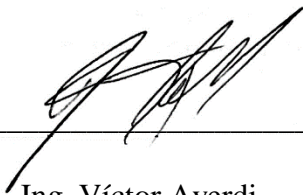
2017


Vo. Bo.:

(f) _____

Ing. Andrés Viau

Tribunal Examinador:

(f) _____

Ing. Andrés Viau

(f) _____

Ing. Víctor Ayerdi

(f) _____

Ing. Rony Herrarte

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre de 2017

PREFACIO

Existen miles de hogares en el país que aún no cuentan con una refrigeradora, quizá sea por factores económicos o en pocos casos, no les es necesaria. Pero en lo personal, ¿qué haría sin refrigeradora?

Existen grandes empresas dedicadas al ensamblaje de refrigeradoras para comercialización a nivel regional y mundial, ver el éxito que han tenido y saber que también tengo la capacidad y puedo diseñar un sistema de refrigeración del mismo orden, marca un deseo y reto para iniciar el proyecto. Quizá este proyecto sea el inicio de un emprendimiento o sea de ayuda para que técnicos de refrigeración no solo sepan soldar o reparar, sino también armar sus propios sistemas de refrigeración a un bajo costo.

Agradezco al Ingeniero, profesor y asesor, Andrés Viau quien me ha brindado apoyo en termodinámica desde la definición de “calor” en mis primeros años de universidad, hasta juntos resolver un sistema de refrigeración real. Agradezco al Ingeniero y profesor Manuel Ruano, por sus opiniones y recomendaciones en temas de transferencia de calor. Agradezco al Ingeniero, profesor y director de carrera, Víctor Ayerdi por motivarnos y orientándonos a realizar proyectos innovadores enfocados en solucionar problemáticas con soluciones prácticas.

Agradezco a los técnicos de la empresa Refriprom, quienes abiertamente creyeron en que finalmente mi diseño funcionaría, respetando todos los requerimientos y dimensiones de este. Además, a la empresa *Oreplast S.A.* por brindarme prestada la herramienta adecuada para realizar pruebas termográficas al sistema.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	v
LISTADO DE CUADROS	ix
LISTADO DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
A. GENERAL DEL PROYECTO.....	2
B. ESPECÍFICOS DEL PROYECTO.....	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
A. REFRIGERACIÓN EN GUATEMALA	4
B. REFRIGERADORAS DE USO DOMÉSTICO.....	4
C. REFRIGERANTES PARA SISTEMAS DOMÉSTICOS	5
1. Medidas de seguridad.	6
a. En caso de inhalación.	6
b. En caso de contacto con la piel.	6
c. En caso de contacto con los ojos.	6
d. En caso de ingerir	7
D. COMPRESORES HERMÉTICOS Y SU SELECCIÓN	7
1. Funcionamiento del compresor.	8
E. CONDENSADORES DE CONVECCIÓN NATURAL Y SU SELECCIÓN	9
1. Capacidad de un condensador.	9
2. Selección de condensador	10
F. EVAPORADORES DE CONVECCIÓN NATURAL Y SU DISEÑO	11
1. Capacidad de evaporador	12
2. Selección del evaporador	12
G. CICLO INVERTIDO DE CARNOT	13
V. METODOLOGÍA	15
A. OBTENCIÓN DE REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES	15
B. EVALUACIÓN DE POSIBLES CONCEPTOS	17
1. Primer concepto.....	17
2. Segundo concepto.....	18
3. Evaluación mediante ponderación directa	19
4. Evaluación refrigerante R134a.....	20

C.	ANÁLISIS Y CÁLCULOS.....	21
1.	Datos y condiciones iniciales del sistema.....	21
2.	Selección de compresor.....	21
3.	Capacidad nominal del evaporador.....	23
4.	Capacidad nominal del condensador.....	25
5.	Selección de dispositivo de expansión.....	27
6.	Diseño de evaporador.....	28
7.	Selección y ajuste de condensador.....	28
D.	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS Y PLAN DE MITIGACIÓN.....	31
E.	PRESUPUESTO Y COMPRA DE MATERIALES.....	32
1.	Mercado local.....	32
2.	Mercado internacional.....	35
3.	Costo final del sistema de refrigeración.....	37
F.	FABRICACIÓN DEL SISTEMA INTERNO DE REFRIGERACIÓN.....	37
1.	Fabricación de evaporador.....	37
2.	Ajuste de condensador.....	39
3.	Soldadura de tubo capilar a evaporador y a filtro deshidratante.....	40
4.	Abocardados para unión de tubería.....	41
5.	Unión de evaporador a compresor.....	43
6.	Instalación de la válvula de carga.....	44
7.	Instalación de condensador.....	44
8.	Presurizado de sistema de refrigeración.....	45
9.	Vacío de sistema.....	46
10.	Carga de refrigerante.....	47
G.	INSTALACIÓN EN UN ESPACIO REFRIGERADO.....	48
H.	PRUEBAS Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO.....	51
1.	Pruebas termográficas.....	52
2.	Pruebas de enfriamiento.....	53
a.	Rampa de descenso inicial.....	54
b.	Rampa de ascenso posterior a desconexión.....	56
c.	Rampa de descenso en reconexión.....	58
d.	Gráfica de ciclos de ascenso y descenso.....	59
3.	Obtención de datos para definir estados en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	60
a.	Ciclo real de refrigeración.....	62
b.	Ciclo ideal de refrigeración con condiciones de trabajo.....	63
c.	Análisis de coeficiente de desempeño real y trabajo.....	65
d.	Coeficiente de desempeño máximo.....	66

e.	Eficiencia de la Segunda ley de la termodinámica.....	66
f.	Consumo eléctrico máximo mensual del sistema.	66
VI.	CONCLUSIONES	68
VII.	RECOMENDACIONES	70
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	71
IX.	ANEXOS.....	72

LISTADO DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Propiedades principales del refrigerante R134a.....	6
Cuadro 2. Factor de corrección por tipo de refrigerante.....	11
Cuadro 3. Factor de corrección por altitud.	11
Cuadro 4. Requerimientos del sistema de refrigeración.	15
Cuadro 5. Requerimientos del compresor.....	16
Cuadro 6. Requerimientos de evaporador.....	16
Cuadro 7. Requerimientos de condensador.....	17
Cuadro 8. Requerimientos de condensador.....	17
Cuadro 9. Primer concepto en orden eventos.....	18
Cuadro 10. Segundo concepto en orden eventos.....	19
Cuadro 11. Ponderación directa de conceptos.	20
Cuadro 12. Condiciones iniciales del sistema.	21
Cuadro 13. Capacidad de enfriamiento y nominal del evaporador.	25
Cuadro 14. Capacidad de condensador en condiciones de trabajo.....	27
Cuadro 15. Tubos capilares recomendados para compresor Marca <i>Embraco</i> , Modelo EMI 45HER.....	27
Cuadro 16. Longitud del evaporador de cobre.	28
Cuadro 17. Configuración recomendada para condensador.	30
Cuadro 18. Identificación de riesgos y plan de mitigación en el desarrollo del proyecto.	31
Cuadro 19. Proveedores cotizados en Guatemala.	32
Cuadro 20. Cuadro comparativo de costos.	32
Cuadro 21. Costo de accesorios para el prototipo con IVA incluido.	34
Cuadro 22. Componentes y accesorios adquiridos en el mercado local.	35
Cuadro 23. Proveedores internacionales cotizados.	35
Cuadro 24. Costo de accesorios FOB.	36
Cuadro 25. Costo en Guatemala de 500 sistemas en partes.....	36
Cuadro 26. Costo del prototipo final del sistema de refrigeración.....	37
Cuadro 27. Costo final del sistema de refrigeración con base en la producción de 500 sistemas.	37
Cuadro 28. Pruebas realizadas al sistema de refrigeración.	51
Cuadro 29. Capturas termográficas realizadas a los intercambiadores de calor.	53
Cuadro 30. Moda de temperaturas en la entrada y salida del evaporador.	61
Cuadro 31. Moda de temperaturas en la entrada y salida del evaporador.	61
Cuadro 32. Voltaje, corriente de consumo y factor de potencia del compresor en trabajo.	61
Cuadro 33. Suposiciones para un ciclo por compresión de vapor ideal.	63
Cuadro 34. Comparación de capacidad del fabricante y el diseño propio.....	65
Cuadro 35. Panoramas de consumo eléctrico.	67
Cuadro 36. Pruebas termográficas a evaporador.....	73
Cuadro 37. Pruebas termográficas al condensador.....	74
Cuadro 38. Proceso de fabricación del sistema interno por compresión de vapor.....	76

LISTADO DE FIGURAS

Página

Figura 1. Principales componentes de una refrigeradora.....	5
Figura 2. Presentación comercial de refrigerantes.	7
Figura 3. Compresor hermético.....	8
Figura 4. Interior de compresor hermético.....	8
Figura 5. Condensador de convección natural.	9
Figura 6. Factor de corrección por compresión.....	10
Figura 7. Evaporador de convección natural.....	11
Figura 8. Factor de corrección de evaporador por salto térmico.....	13
Figura 9. Ciclo de refrigeración de Carnot.	14
Figura 10. Ejemplo de carga de refrigeración de un hogar promedio.	18
Figura 11. Refrigeradoras con volúmenes promedio.....	19
Figura 12. Refrigeradoras de distintas marcas reconocidas con compresores marca <i>Embraco</i>	21
Figura 13. Compresor EMI 45HER marca <i>Embraco</i>	22
Figura 14. Curva característica de capacidad de enfriamiento del compresor EMI 45HER.	23
Figura 15. Capacidad de refrigeración de compresor EMI 45HER a condiciones de trabajo definidas.	24
Figura 16. Curva característica de EMI 45HER a condiciones de trabajo definidas.	24
Figura 17. Factor de corrección a condiciones de trabajo establecidas.	25
Figura 18. Factor de corrección por compresor.	26
Figura 19. Selección de factor de corrección por refrigerante.	26
Figura 20. Interpolación en factor de corrección por refrigerante.	26
Figura 21. Visita a <i>Congelsa</i>	33
Figura 22. Visita a <i>Distribuidora Granada</i>	33
Figura 23. Rollo Tubería de cobre flexible de 1/4".	38
Figura 24. Dobladora de tubo manual	38
Figura 25. Ejemplo de evaporador de 4.7 metros.....	39
Figura 26. Re ajuste de condensador a longitud calculada.	39
Figura 27. Equipo de protección y herramienta utilizada para re acondicionamiento del condensador.	40
Figura 28. Sujeción de tubo capilar previo a soldar.	40
Figura 29. Sujeción de tubo capilar previo a soldar.	41
Figura 30. Soldadura de tubo capilar a filtro deshidratante.	41
Figura 31. Ejemplo de tubería con abocardado.	42
Figura 32. Herramienta para realizar abocardados en tubería de refrigeración.	42
Figura 33. Inserto de guía para abocardado.	42
Figura 34. Unión de evaporador a compresor.....	43
Figura 35. Compresor con tubería de succión instalada.	43
Figura 36. Compresor con tubería de succión instalada.	44
Figura 37. Aplicación de fundente para soldar acero con cobre.	44
Figura 38. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 2 horas.	45
Figura 39. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 4 horas.	45
Figura 40. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 4 horas.	46
Figura 41. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 8 horas.	46
Figura 42. Bomba de vacío.	47
Figura 43. Corriente de consumo del sistema de refrigeración.	47
Figura 44. Bomba de vacío.	48
Figura 45. Modelo propuesto por Enrique Juárez.	48
Figura 46. Prototipo del sistema de refrigeración interno, instalado en el espacio refrigerado.	49
Figura 47. Prototipo del sistema de refrigeración interno, instalado en el espacio refrigerado.	49

Figura 48. Compresor del prototipo, instalado en la refrigeradora.	50
Figura 49. Termostato instalado en refrigeradora, parte trasera.	50
Figura 50. Termostato instalado en refrigeradora, parte delantera.....	51
Figura 51. Cámara termográfica <i>FLUKE TIS65</i>	53
Figura 52. Circuito de sensor de temperatura.	54
Figura 53. Sensor de temperatura instalado en el espacio refrigerado.	54
Figura 54. Rampa de descenso inicial de la refrigeradora.	55
Figura 55. Rampa de descenso inicial de la refrigeradora y temperatura deseada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).	56
Figura 56. Rampa de ascenso de la refrigeradora con sistema apagado y puerta cerrada.	57
Figura 57. Ecuación de la rampa de ascenso de la refrigeradora con sistema apagado y puerta cerrada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).	57
Figura 58. Rampa de descenso con sistema apagado y puerta cerrada.	58
Figura 59. Rampa de descenso con sistema apagado y puerta cerrada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).	59
Figura 60. Ciclos de ascenso y descenso de la refrigeradora, Temperatura (°C) – Tiempo (s).	60
Figura 61. Instalación de sensor en la entrada del evaporador.	60
Figura 62. Instalación de sensor en la entrada del evaporador.	61
Figura 63. Estados 1 y 4 del ciclo por compresión de vapor.	62
Figura 64. Diagrama T-S del ciclo de refrigeración operando fuera de la campana de enfriamiento.....	62
Figura 65. Estados del ciclo de refrigeración definidos, definiendo el estado 1 con temperatura y la presión medida experimentalmente.	63
Figura 66. Estados del ciclo de refrigeración definidos, definiendo el estado 1 con la temperatura y con vapor saturado.	64
Figura 67. Estados definidos en las figuras 67 y 68.	64
Figura 68. Ficha técnica del sistema.	72
Figura 69. Cotización de <i>Congelsa</i>	77

RESUMEN

Este proyecto consistió en diseñar y ensamblar un sistema de refrigeración por compresión de vapor, a un bajo costo, orientado a cumplir las necesidades mínimas de los hogares que no pueden acceder a una refrigeradora comercial. Poseer un sistema de refrigeración en el hogar es primordial para el goce de una buena alimentación y salud. El prototipo fabricado permite enfriar un volumen de 220 *litros* a 5°C para garantizar la inocuidad de los alimentos y medicinas.

El sistema fue diseñado mediante principios termodinámicos que rigen la refrigeración. El ensamblaje físico cumple con requisitos establecidos por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calentamiento, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). Los componentes para ensamblar el prototipo fueron adquiridos localmente con un costo total de Q945.35, si se desearan fabricar 500 sistemas importando los componentes, el costo unitario en Guatemala sería Q258.56.

Para realizar un proceso de diseño ordenado se aplica la metodología de Systems Engineering. Adicional al prototipo, se brinda una guía de fabricación para que personas que deseen construir su propio sistema, puedan realizarlo. Para comprobar el funcionamiento adecuado, se realizaron pruebas termográficas, pruebas de vacío y presurización, con herramientas de uso profesional e industrial.

I. INTRODUCCIÓN

La constante mejora y creación de nuevos sistemas para almacenar alimentos o medicinas, es uno de los principales objetivos de la termodinámica. En el presente trabajo se analizan los elementos fundamentales que constituyen un sistema por compresión de vapor. Posteriormente se hará un análisis de la selección y diseño de componentes que permitirán una extracción de calor de un espacio refrigerado. El sistema está basado en la minimización de recursos y costos para su fabricación, cumpliendo lineamientos brindados por la ASHARE.

El sistema satisface requerimientos y necesidades de hogares promedio, ayudándolos a contribuir en la calidad de vida. Guatemala no es un país dedicado a manufactura de refrigeradoras, si bien existen empresas dedicadas a la fabricación, todas importan de otros países sus componentes y accesorios. Además del diseño y selección de componentes, se presenta información detallada de proveedores internacionales, los cuales pueden servir como base para llevar el sistema a una producción mayor.

El prototipo propuesto y realizado, se complementa con compras locales, con el fin de demostrar su funcionalidad y aplicación. Seguido al diseño, se realiza un ensamblaje con adecuados procedimientos que aseguran un sistema cerrado libre de fugas. Se realiza además un análisis termográfico al sistema, para determinar su correcto funcionamiento, así como un desempeño.

El diseño fabricado, cuenta con una guía para fabricación intuitiva, la cual puede servir para que técnicos y especialistas en refrigeración puedan utilizar el modelo propuesto para crear o reacondicionar sus propias refrigeradoras.

II. OBJETIVOS

A. GENERAL DEL PROYECTO

Crear un prototipo funcional de un sistema de refrigeración por compresión de vapor de bajo costo, que funcione con 110 Voltios en corriente alterna.

B. ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

1. Adquirir al menor costo los componentes necesarios para el funcionamiento del prototipo del sistema de refrigeración, en el mercado local o internacional.
2. Diseñar y fabricar un evaporador que asegure el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración.
3. Realizar una evaluación y selección del refrigerante que sea aprobado por la ASHRAE.
4. Utilizar métodos de ensamblaje adecuados que asegure un sistema cerrado.
5. Realizar pruebas termodinámicas con el fin de comprobar el funcionamiento adecuado de los componentes que permitan la extracción de calor.
6. Crear una ficha técnica del sistema.
7. Crear un manual del proceso de construcción del sistema de refrigeración interno.
8. Crear un plan de mitigación de fallas para el sistema.
9. Determinar el costo final del sistema de refrigeración en términos del volumen de producción.

III. JUSTIFICACIÓN

En la encuesta Nacional de Condición de Vida (ENCOVI) realizada en el año 2014, se encuestaron 11,536 hogares guatemaltecos distribuidos de manera representativa en todas las regiones del país, estableciendo que el 40.8% de hogares que tienen acceso a energía eléctrica, no cuentan con un sistema de refrigeración.

Según el Servicio de Inocuidad e Inspección de los Alimentos de los Estados Unidos (USDA, 2010), en un espacio no refrigerado, las bacterias pueden duplicarse en los alimentos en un lapso de 20 minutos.

Este proyecto brinda un equipo de refrigeración por compresión de vapor accesible a las familias para que alcancen una mejora en la calidad de vida. A través de la unidad propuesta se pretende que las familias puedan conservar medicinas y alimentos, además de la reducción de desperdicio por falta de refrigeración.

En el mercado guatemalteco existe gran variedad de repuestos y accesorios para refrigeración, al igual que talleres con técnicos con gran experiencia en temas de reparación y reemplazo. Ninguna empresa está inmersa en temas de diseño. En el presente proyecto se brinda una guía intuitiva que sirve como base para posteriores replicas o mejoras.

IV. MARCO TEÓRICO

A. REFRIGERACIÓN EN GUATEMALA

La refrigeración a nivel mundial es un factor fundamental y de gran relevancia en la calidad de vida de los seres humanos. Entidades como la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) en Estados Unidos brinda recomendaciones domesticas sobre el buen manejo y cuidado de insumos refrigerados.

En Guatemala, el MAGA (Ministerio de agricultura y ganadería) plantea en su informe “Resultado estratégico para el país” que el estado de salud de los guatemaltecos está determinado por el acceso a la atención médica, la forma de preparación de los alimentos e inocuidad y los hábitos de higiene. (MAGA, 2017)

El MAGA es el responsable de velar por el aseguramiento de la inocuidad de alimentos de origen animal y vegetal. A pesar de no tener a disposición artículos sobre inocuidad doméstica, en sus manuales para usos comerciales, brinda importante información sobre temperaturas ideales de refrigeración entre 4.4 °C y 7 °C para carnes. (MAGA, 2011)

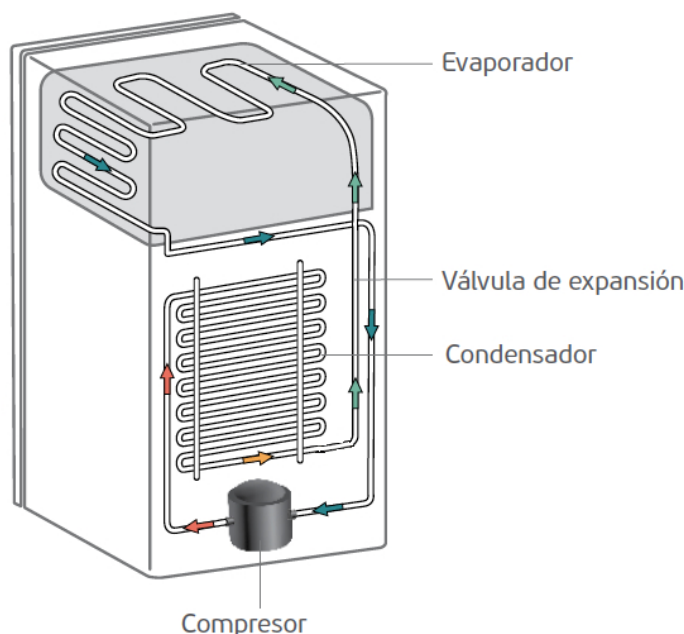
En Guatemala para poder comercializar productos alimenticios se necesita la obtención de licencias sanitarias, extendidas por el Ministerio de Salud Pública. En donde exponen que, para fábricas de productos cárnicos, así como productos lácteos es necesario tener la suficiente capacidad de refrigeración para mantener los alimentos a 5°C o menos. Esto con el fin de asegurar que no haya ningún efecto perjudicial en la calidad higiénica de los mismos incluyendo la proliferación de microorganismos patógenos. (MAGA, 2008)

B. REFRIGERADORAS DE USO DOMÉSTICO

Actualmente el uso de un sistema de refrigeración o de refrigeradores es fundamental para el desarrollo humano. La descomposición orgánica es un proceso natural que todos los organismos animales y vegetales tienden a tener. En un sistema no refrigerador la proliferación de microbios y bacterias es sumamente relevante.

Un refrigerador no es una simple caja que enfría, es un aparato que funciona a partir de un circuito cerrado en donde se utiliza un fluido de trabajo, llamado refrigerante, para realizar una extracción de calor. La mayoría de refrigeradores en la actualidad funcionan con base en un sistema por compresión de vapor, el cual necesita involucrar distintos componentes para poder funcionar, los cuales se detallan en la Figura 1.

Figura 1. Principales componentes de una refrigeradora.



(Figura tomada de Santibañez, J. 2016)

C. REFRIGERANTES PARA SISTEMAS DOMÉSTICOS

Un refrigerante está definido como «Un fluido utilizado para realizar transferencia de calor en un sistema...» (ASHRAE, 2004:4) los refrigerantes además de ser utilizados como un fluido de trabajo en un sistema de refrigeración, al agregar otras sustancias, brindan funciones como lubricación y limpieza.

En el año 2004 ASHRAE en conjunto con ANS (American National Estándar) crea su Estándar 34-2004 el cual estandariza la designación, seguridad y clasificación de los refrigerantes utilizados en un mercado mundial. El objetivo de este estándar es hacer una referencia rápida a los distintos refrigerantes para que brinden información amplia y ya conocida, sin necesidad de utilizar el nombre químico o la fórmula, sino un nombre comercial. (ASHRAE, 2004)

El refrigerante más utilizado para refrigeración doméstica en el pasado fue el R-12, aunque fue sustituido por nuevas alternativas debido a la destrucción que causaba a la capa de ozono. Actualmente en Guatemala el R-134a es uno de los más utilizados por todas las cualidades que esté presenta. (Carreño, 2013).

El refrigerante R-134a es utilizado en aplicaciones de refrigeración doméstica e industrial, acondicionamiento de aire y vehículos. La empresa Honeywell brinda información importante sobre este refrigerante.

Cuadro 1. Propiedades principales del refrigerante R134a.

Propiedad	Valor
Nombre químico	Tetrafluoretano
Notación química	CF ₃ CH ₂ F
Peso molecular	102
Punto de ebullición @ 1 Atm, (°F)	-14.9
Punto de congelamiento @ 1 Atm, (°F)	-141.9
Temperatura critica (°F) (ASTM D-1321)	213.91
Presión critica* (psia)	588.75
Densidad de líquido saturado @ 86°F, (lb/ft ³)	74.1
Calor específico en líquido @ 86°F, (BTU/lb °F)	0.35
Calor específico en vapor @ Presión constante* (Cp), @ 86° y 1 Atm, (BTU/lb °F)	0.18
Rango de inflamabilidad, % vol. (Basado en el estándar 34 ASHRAE)	Ninguno
ANSI/ASHRAE Estándar 34-2004 Grupo de clasificación de seguridad	A1

(Cuadro tomado de Honeywell, 2017)

1. **Medidas de seguridad.** El refrigerante R134a puede ser no tóxico para la capa de ozono, pero puede llegar a tener daños reales en la salud humana, para esto existen medidas que según Honeywell pueden mejorar la condición del afectado.

a. **En caso de inhalación.** Moverse a un área con aire fresco, si se denota un paro de respiración, administrar respiración artificial, administrar oxígeno si es necesario y contactar ayuda profesional. En ninguna circunstancia administrar adrenalina o derivados. (Honeywell, 2017:2)

b. **En caso de contacto con la piel.** Lavar con abundante agua, si en algún caso particular el refrigerante tiene contacto con la piel en estado congelado, se debe proceder a lavar con abundante agua tibia, si no es posible tener el agua tibia, se tiene que limpiar con un paño limpio y suave. Por ninguna razón se debe rascar la piel en el área que tuvo contacto con el refrigerante, si este no se ha limpiado adecuadamente. (Honeywell, 2017:3)

c. **En caso de contacto con los ojos.** Enjuagar con abundante agua, también bajo los párpados por 15 minutos, en caso de que el refrigerante esté congelado, lavar con abundante agua tibia. (Honeywell, 2017:3)

d. En caso de ingerir. Es poco probable que se pueda ingerir por su estado gaseoso, aunque si llegará a suceder seguir los pasos de caso de inhalación, en ningún momento se debe inducir al vómito sin supervisión médica. (Honeywell, 2017:3)

Figura 2. Presentación comercial de refrigerantes.



(Figura tomada de Honeywell, 2017)

D. COMPRESORES HERMÉTICOS Y SU SELECCIÓN

En la industria de refrigeración existente distintos tipos de compresores, pero todos se basan en recibir el refrigerante a una baja presión y temperatura, comprimirlo y llevarlo a una presión y temperatura a la que puede ser condensado.

Los compresores utilizados en sistemas de refrigeración domésticos son de tipo herméticos, es decir la unidad compresora y el motor eléctrico se encuentran dentro de un envoltorio de acero, el cual no permite que se puedan realizar acciones tales como mantenimientos o reparación. (Lijo, 2012)

Los compresores herméticos cuentan de tres tubos a los cuales se soldan las demás piezas del sistema de refrigeración. Los compresores herméticos tienen dos tuberías de un mismo diámetro (1 y 2) y una tercera tubería de un menor diámetro. (3) La tubería 3, está contraria a las conexiones eléctricas del compresor, con esto se evita que algún tipo de condensado se forme en el exterior, ingrese a los mismo y provoque un corto circuito.

Figura 3. Compresor hermético.



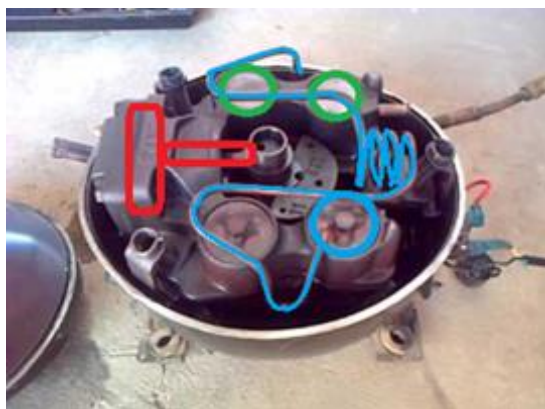
(Figura propia, 2017)

Para poder armar el sistema de refrigeración es necesario que (3) vaya conectado el condensador, (2) al evaporador y (1) se conecte a una válvula de intervención, con el fin de poder cargar refrigerante al sistema, comprobar la presión de aspiración o introducir aceite. (Lijo, 2012)

1. **Funcionamiento del compresor.** El refrigerante R134a es cargado al interior de la carcasa metálica llenando el espacio libre, teniendo contacto con el motor y el compresor, sirviendo como refrigerante en el proceso de compresión.

El aspirado del refrigerante para ser comprimido se realiza por medio de las cámaras silenciadoras, denotadas en la Figura 4 (verde), posterior pasa a la cámara de compresión en donde se encuentra el pistón (rojo) para posteriormente ser expulsado mediante una tubería para continuar con el proceso de refrigeración (celeste). El compresor hermético es silencioso debido a que cuenta con resortes interiores, así como cámaras silenciadoras que amortiguan el golpeteo de las válvulas.

Figura 4. Interior de compresor hermético.



(Figura tomada de Fallas Electrónicas, 2017)

E. CONDENSADORES DE CONVECCIÓN NATURAL Y SU SELECCIÓN

El condensador (Figura 5) es el encargado de condensar el refrigerante posterior a su salida del compresor a una alta temperatura y alta presión. En las refrigeradoras el condensador es la parte que tiene contacto con el ambiente o sumidero. Es un intercambiador de calor que realiza una transferencia de calor aire mediante un material conductor.

En la industria normalmente son de hierro negro y se acostumbra a poner varillas metálicas perpendiculares a la tubería, con el fin de obtener una mayor área de contacto y así mejorar la transferencia de calor. (Lijo, 2012)

Figura 5. Condensador de convección natural.



(Figura tomada de Alibaba, 2017)

1. Capacidad de un condensador. La capacidad de condensado está ligada al área de transmisión, al material y a la temperatura del sumidero. Según la norma ENV 327 el salto térmico ideal para un condensador de enfriamiento natural debe ser de 15°C.

Ecuación 1. Calor disipado por condensador

$$Q_{cond} = Ak(\Delta T)$$

$$Q_{cond} = \text{Calor disipado por el condensador (kW)}$$

$$A = \text{Area de contacto (m}^2\text{)}$$

$$k = \text{Coeficiente de transferencia de calor del material } \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right)$$

$$\Delta t_c = \text{Salto térmico de condensación. (}^\circ\text{C)}$$

Ecuación 2. Salto térmico de condensación

$$\Delta t_c = t_{sum} - t_{con}$$

$$t_{con} = \text{Temperatura de Condensación. (}^\circ\text{C)}$$

$$t_{sum} = \text{Temperatura del sumidero. (}^\circ\text{C)}$$

2. Selección de condensador. El condensador se elige con base en la capacidad de rechazo de calor. Los distintos fabricantes han elaborado pruebas experimentales para determinar sus factores de corrección con el fin de hacer más eficientes sus sistemas de refrigeración. Con las siguientes ecuaciones podremos obtener la capacidad nominal del condensador en condiciones de trabajo. (Lijo, 2012)

Ecuación 3. Capacidad nominal del condensador

$$Q_n = Q_e F_c F_r F_a \left(\frac{15}{\Delta T} \right)$$

$$Q_n = \text{Capacidad nominal del condensador. (kW)}$$

$$Q_{n.evap} = \text{Capacidad del evaporador (kW)}$$

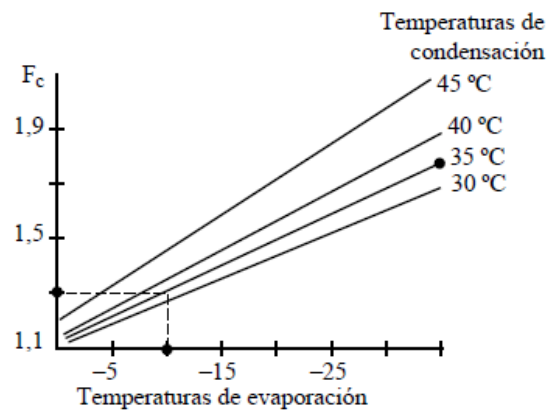
$$F_c = \text{Factor de compresión (Figura 6)}$$

$$F_r = \text{Factor de refrigerante (Cuadro 2)}$$

$$F_a = \text{Factor de altitud (Cuadro 3)}$$

$$\Delta T = \text{Salto térmico de condensación (}^\circ\text{C)}$$

Figura 6. Factor de corrección por compresión.



(Figura tomada de Lijo, 2012)

Cuadro 2. Factor de corrección por tipo de refrigerante.

Refrigerante	Factor del refrigerante (Fr)			
	R-22	R 134 a	R 404 A	R 507
Factor de corrección	1,04	1,06	1	0,97

(Cuadro tomado de Lijo, 2012)

Cuadro 3. Factor de corrección por altitud.

Altitud del nivel del mar	Factor de altitud (Fa)		
	0	500	1000
Fa	1	1,01	1,06

(Cuadro tomado de Lijo, 2012)

F. EVAPORADORES DE CONVECCIÓN NATURAL Y SU DISEÑO

En los sistemas de refrigeración el evaporador es un intercambiador de calor fundamental para producir una extracción de calor del espacio refrigerado. El intercambiador de calor debe ser de un material que sea un buen conductor térmico para obtener un mayor provecho. En términos generales un evaporador es modelado de igual manera que el condensador, aunque este no tiene contacto con el sumidero sino con el espacio refrigerado.

Figura 7. Evaporador de convección natural.



(Figura tomada de Alibaba, 2017)

1. **Capacidad de evaporador.** El tamaño del evaporador está directamente ligado a la capacidad de extracción de calor o enfriamiento que tendrá la refrigeradora. Sin embargo, queda limitado al espacio de instalación, las diferencias de temperatura y el costo del material seleccionado para su construcción. (Lijo, 2012)

Ecuación 4. Calor extraído por el evaporador

$$Q_{evap} = Ak(\Delta t_E)$$

$$Q_{n.evap} = \text{Capacidad nominal de extracción de calor. (kW)}$$

$$A = \text{Area de contacto (m}^2\text{)}$$

$$k = \text{Coeficiente de transferencia de calor del material. } \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right)$$

$$\Delta t_E = \text{Salto térmico de evaporación. (}^\circ\text{C)}$$

Ecuación 5. Salto térmico de evaporación

$$\Delta t_E = t_{Ref} - t_{Eva} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$t_{Eva} = \text{Temperatura de evaporación. (}^\circ\text{C)}$$

$$t_{Ref} = \text{Temperatura del espacio refrigerado. (}^\circ\text{C)}$$

2. **Selección del evaporador.** Con la capacidad del evaporador, se procede a la obtención de la capacidad nominal en condiciones de trabajo, al igual que el condensador, los fabricantes han realizado modelos experimentales para determinar un factor de corrección el cual toma en cuenta las pérdidas por compresión y las pérdidas por la formación de escarcha. (Lijo, 2012)

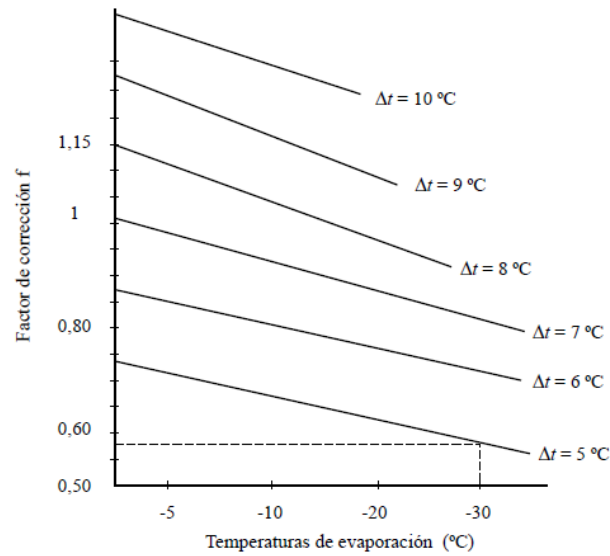
Ecuación 6. Capacidad nominal del evaporador en condiciones de trabajo

$$Q_{n.evap} = \frac{Q_{evap}}{f_c} \text{ (kW)}$$

$$Q_{evap} = \text{Capacidad nominal de Refrigeración del compresor (Brindado por fabricante)}$$

$$f_c = \text{factor de corrección (Figura 8)}$$

Figura 8. Factor de corrección de evaporador por salto térmico.



(Figura tomada de Lijo, 2012)

G. CICLO INVERTIDO DE CARNOT

El ciclo de Carnot es un ciclo totalmente reversible. Es un modelo de refrigeración perfecto, el cual brinda la mayor eficiencia térmica entre dos límites de temperatura en distintos fluidos. El Coeficiente de desempeño de Carnot sirve para que sea comparado con cualquier ciclo de potencia o refrigeración real, este brinda una noción sobre las irreversibilidades que tiene un sistema y así poder realizar mejoras.

Reducir la diferencia entre un COP_{Real} y un COP_{Carnot} es uno de los principales objetivos cuando se trata de hacer más eficiente un sistema de refrigeración. (ASHRAE, 2009)

La transferencia de calor en un ciclo reversible está dada por:

$$Q_O = T_O(S_2 - S_3)$$

$$Q_i = T_R(S_1 - S_4) = T_R(S_2 - S_3)$$

$$W_{Neto} = Q_O - Q_i \text{ (kW)}$$

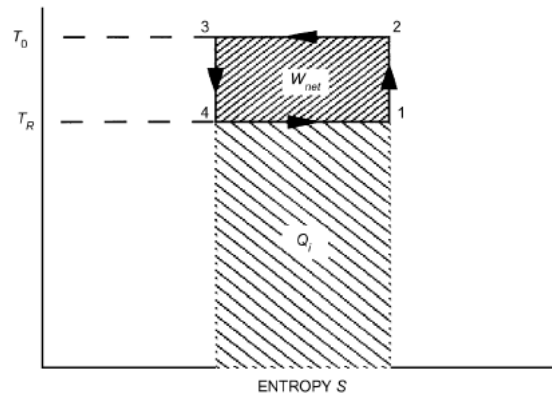
Ecuación 7. Eficiencia máxima del ciclo invertido de Carnot.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_R}{T_O - T_R} \quad (2)$$

T_R = Temperatura del espacio refrigerado.

T_O = Temperatura del sumidero.

Figura 9. Ciclo de refrigeración de Carnot.



(Figura tomada de ASHRAE, 2009)

V. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el proceso completo de investigación y desarrollo del proyecto está basada en la metodología propuesta en “Systems Engineering”, el cual se basa en fijar una metodología ordenada para poder solucionar problemas.

A. OBTENCIÓN DE REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES

Los sistemas de refrigeración se encuentran presentes en restaurantes, cafeterías, hospitales, centros educativos, farmacias o en cualquier lugar en donde refrigerar sea una necesidad o comodidad. En cada lugar existen distintas necesidades y aplicaciones.

El diseño de este sistema de refrigeración está enfocado en hogares que tienen acceso a energía eléctrica, pero no tienen una refrigeradora por cualquier motivo. En Guatemala, no tener una refrigeradora en el hogar, puede ser por falta de recursos económicos o simplemente por no tener la necesidad.

El bajo costo del sistema es el objetivo principal. Debido a esto, se plantean requerimientos básicos para tener un punto de partida, y poder obtener de estos el mayor beneficio posible.

Los requerimientos en su mayoría son obtenidos mediante la observación de sistemas de refrigeración ya existentes, los cuales han sido mejorados con el tiempo por empresas dedicadas a la manufactura y ensamble de refrigeradoras a gran escala. Los requerimientos están divididos en distintas secciones identificadas con códigos.

Cuadro 4. Requerimientos del sistema de refrigeración.

Código	Variable	Requerimiento	Fuente
RSI-1	Tipo de uso	Doméstico	Propia
RSI-2	Secciones internas	Refrigerador no congelador	Propia
RSI-3	Tipo de sistema	Compresión de vapor	Propia
RSI-4	Volumen de refrigeración	220 litros ó $0.22 m^3$	Refrigeradoras más vendidas en el mercado actual en tiendas (Elektra, Walmart y La Curacao)
RSI-5	Temperatura de espacio refrigerado	4°C o menor	Temperatura óptima para evitar proliferación de bacterias y patógenos por la FDA.
RSI-6	Capacidad de ensamblaje	Capacidad de ser replicable	Propia
RSI-7	Temperatura del ambiente	30°C	Propia

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 5. Requerimientos del compresor.

Código	Variable	Requerimiento	Fuente
RCO-1	Volumen de espacio refrigerado.	220 litros ó $0.22 m^3$	Refrigeradoras más vendidas en el mercado actual en tiendas (Elektra, Walmart y La Curacao)
RCO-2	Voltaje de alimentación	110 voltios	Voltaje común para uso doméstico en la red eléctrica de Guatemala
RCO-3	Frecuencia	60 Hz	Frecuencia en Guatemala
RCO-4	Tipo de compresor	Reciprocate y Hermético	Compresores más utilizados en el mercado
RCO-5	Mantenimiento de compresor	Libre de mantenimiento	Compresores más utilizados en el mercado
RCO-6	Aprobación de compresor	ASHRAE32	ASHRAE
RCO-7	Temperaturas de evaporación	-10°C a -35°C	Propia
RCO-8	Refrigerante	R134A	ASHRAE
RCO-9	Potencia	Menor a 1/2 hp	Compresores más utilizados en el mercado
RCO-10	Fijación	Por medio de tornillos	Propia

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 6. Requerimientos de evaporador.

Código	Variable	Requerimiento	Fuente
REV-1	Tipo de evaporador	Convección natural	Propio
REV-2	Material del evaporador	Cobre	Propio
REV-3	Diámetro	1/4"	Diámetro más utilizado en el mercado
REV-4	Dobleces	Tipo arco	Propio
REV-5	Salto térmico	8°C a 12°C	Para convección natural (Lijo, 2012)

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 7. Requerimientos de condensador.

Código	Variable	Requerimiento	Fuente
RCO-1	Tipo de evaporador	Convección natural	Propio
RCO-2	Material del evaporador	Acero	Propio
RCO-3	Diámetro	1/4"	Diámetro más utilizado en el mercado
RCO-4	Dobleces	Tipo arco	Propio
RCO-5	Salto térmico	15°C	Norma ENV 327

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 8. Requerimientos de tubo capilar.

Código	Variable	Requerimiento	Fuente
REX-1	Dispositivo de expansión	Tubo capilar	Dispositivo de expansión utilizado para refrigeradoras domesticas

(Cuadro propio, 2017)

B. EVALUACIÓN DE POSIBLES CONCEPTOS

La evaluación de posibles conceptos tiene como base estudiar las distintas alternativas o procedimientos para poder diseñar el sistema de refrigeración por compresión a vapor, de acuerdo con los requerimientos iniciales.

La ponderación directa realizada a las alternativas brindará información de la opción más factible y viable para proceder al diseño y fabricación del sistema de refrigeración. Únicamente se evalúan dos alternativas con fundamentos teóricos y termodinámicos.

1. **Primer concepto.** El concepto se basa en tomar como consideración inicial, la capacidad de refrigeración promedio que necesita un hogar, para posteriormente proceder a realizar una selección de componentes que se adecuen al sistema de refrigeración. La secuencia de los eventos se denota en el Cuadro 9.

La carga promedio de refrigeración podría ser calculada con los insumos de la canasta básica de alimentos o bien, mediante una aproximación de los productos que puede tener un hogar con el nivel económico objetivo, almacenados en una refrigeradora.

Cuadro 9. Primer concepto en orden eventos.

Orden de eventos	Procedimiento
1	Definir temperatura de refrigeración
2	Calcular una carga promedio de refrigeración
3	Adquirir el mercado un evaporador que satisfaga la carga de refrigeración
4	Adquirir el mercado un condensador que satisfaga la capacidad del evaporador
5	Adquirir un compresor con la capacidad de enfriamiento del sistema
6	Adquirir un dispositivo de expansión adecuado
7	Determinar el volumen del espacio refrigerado
8	Ensamblar sistema de refrigeración
9	Realizar pruebas y análisis termodinámicos

(Cuadro propio, 2017)

Figura 10. Ejemplo de carga de refrigeración de un hogar promedio.



(Figura tomada de Rivas, Vanesa 2017)

2. **Segundo concepto.** El concepto se basa en tomar como consideración inicial el volumen del espacio refrigerado. El objetivo es poder realizar un correcto diseño y ensamblaje de componentes que puedan realizar la mayor extracción de calor, al menor costo posible. La secuencia de eventos se denota en el cuadro.

El volumen del espacio refrigerado se puede determinar mediante visitas de campo a empresas dedicadas a la venta de refrigeradoras, visualizar los distintos tipos de modelos y estudiar las capacidades en litros o metros cúbicos de almacenaje, esto también contribuye a determinar distintas formas de ensamblaje del sistema por compresión a vapor.

Cuadro 10. Segundo concepto en orden eventos.

Orden de eventos	Procedimiento
1	Investigar sobre los volúmenes de refrigeración de las refrigeradoras más comunes en el mercado
2	Definir temperatura de refrigeración
3	Adquirir un compresor con respaldo técnico para un volumen específico
4	Calcular y definir una carga de refrigeración
5	Diseñar un evaporador acorde a la carga de refrigeración
6	Adquirir un condensador con capacidad de rechazar el calor extraído en el sistema
7	Ensamblar sistema de refrigeración
8	Realizar pruebas y análisis termodinámicos

(Cuadro propio, 2017)

Figura 11. Refrigeradoras con volúmenes promedio.



(Figura propia, 2017)

3. Evaluación mediante ponderación directa. A continuación, se realiza una ponderación directa con una escala de 0 a 10, siendo 0 deficiente y 10 excelente respectivamente. Realizar una ponderación a ambos conceptos brindará la oportunidad de elegir la mejor vía para poder desarrollar el mismo objetivo. Posterior a la ponderación se realiza un análisis sobre las ventajas o deficiencias de uno respecto al otro. En el análisis estará dividido en siete criterios, el concepto con mayor puntuación procederá a su análisis.

Cuadro 11. Ponderación directa de conceptos.

Criterio de calificación	Concepto 1	Concepto 2
Propicia una reducción de costos	4	9
Propicia a un ensamblaje no complicado	6	4
Posibilita una mayor extracción de calor de un espacio refrigerado	7	10
Su principal funcionamiento se basa en compresión de vapor	10	10
Posibilita los requerimientos planteados por ASHRAE	10	10
Es adaptable a un hogar promedio	6	9
Se adecua a un ensamblaje de grado alimenticio	10	10
Total, de puntos sobre 70	53	62

(Cuadro propio, 2017)

Ambos conceptos cumplen el mismo objetivo, aunque el primer concepto está basado en un cálculo inicial de carga promedio de refrigeración requerida, mediante un promedio de alimentos, medicinas o accesorios que se ingrese al espacio refrigerado para un hogar promedio. Esto significa que todos los componentes del sistema estarían diseñados y calculados para suplir esa carga de refrigeración. Esto nos obligaría a enfocarnos en cumplir esa carga y no en una reducción de costos. Determinar que esa carga es representativa para las necesidades del 40.8% de los hogares que tienen acceso a energía eléctrica pero no tienen refrigeradora en Guatemala.

En cambio, el segundo concepto da lugar a tener un espacio refrigerado promedio de las refrigeradoras más comerciales, calcular el sistema para adquirir los componentes o diseñarlos y luego brindar al usuario una capacidad de refrigeración para poder ser aprovechada en un volumen definido.

Seguramente en un hogar promedio no sabrán interpretar el significado de la carga de refrigeración, este segundo concepto da lugar brindar nociones de volumen para que el espacio sea replicable y este sistema sea instalado con una capacidad de refrigeración asegurada. Partir de un volumen y no de una carga, propicia a una mejor autonomía en cuanto a consumo eléctrico, debido a que, si se exceden las capacidades iniciales planteadas, se estaría brindando al usuario un sistema por compresión de vapor sobredimensionado.

4. Evaluación refrigerante R134a. El refrigerante utilizado en el sistema por compresión a vapor es un R134a. Fue determinado por del fabricante del compresor, además de ser el más comercial para sistemas de refrigeración domésticos.

Según la ASHRAE el refrigerante R-134a, ha sustituido los refrigerantes R-22 o R-502. En el Estándar 34-2013, la ASHRAE reconoce y aprueba el tetrafluoretano como refrigerante adecuado para sistemas de refrigeración por compresión a vapor.

C. ANÁLISIS Y CÁLCULOS

1. Datos y condiciones iniciales del sistema. Para iniciar los distintos cálculos y diseños, es necesario establecer las condiciones iniciales del sistema.

Cuadro 12. Condiciones iniciales del sistema.

Dato	Valor	Fuente o requerimiento
Volumen del espacio refrigerado	220 litros / $0.22 m^3$	RCO-1
Temperatura objetivo del espacio refrigerado (t_l)	4°C	RSI-5
Temperatura del sumidero (t_h)	30°C	RSI-7
Salto térmico en condensador	15°C	RCO-5
Salto térmico en evaporador	10 °C	REV-5

(Cuadro propio, 2017)

2. Selección de compresor. Según los requerimientos del compresor planteados en el Cuadro 4 con un total de 10 requerimientos, procedemos a buscar en el mercado local o internacional un compresor que cumpla esas características, adicional que sea una marca con respaldo técnico amplio, para poder tener fundamentos de diseño más seguros.

Figura 12. Refrigeradoras de distintas marcas reconocidas con compresores marca *Embraco*.



(Figura propia, 2017)

En el mercado existen distintas calidades y precios en compresores recíprocos herméticos, pero no todos son una buena opción para un primer diseño. Constató que la marca “Embraco” sería una buena opción para el prototipo, debido al respaldo técnico que ofrecen en cuanto a documentación e información técnica para diseño.

Del catálogo del fabricante, basado los requerimientos (RCO-1 al RCO-10) se determina el compresor modelo: EMI 45HER de la marca: *Embraco*, el cual cumple con todos los requerimientos.

Figura 13. Compresor EMI 45HER marca *Embraco*.

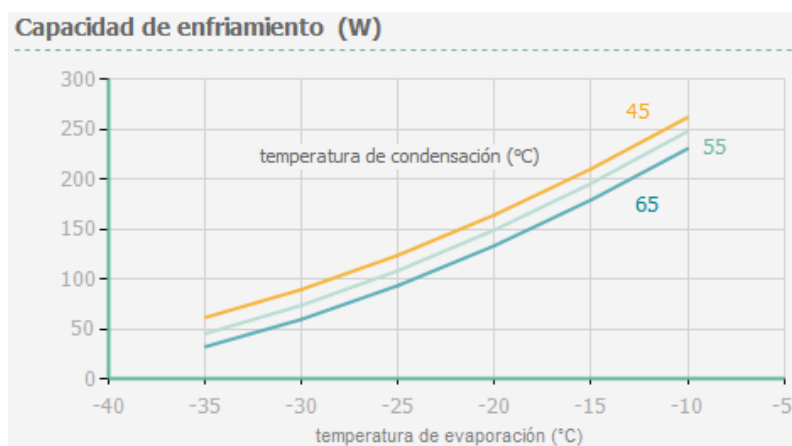
Compresores LBP (Baja Presión de Retorno)				60Hz		R-134a							
REFRIGERADORAS													
VOLUMEN DEL SISTEMA (litros) Temperatura Ambiente		COMPRESOR				CAPACITOR DE ARRANQUE		TUBO CAPILAR				Temperatura de Evaporación	
		Modelo	Capacidad Frigorífica Btu/h	Eficiencia Btu/Wh	Referencia Comercial HP	Capacitancia μF		Diámetro Interno		Largo			Caudal de N_2 a 10 atm l/min
32°C	43°C					115V	220V	pul	mm	pul	mm		
170 a 360	140 a 300	EM 45HHR	420	3,93	1/8	145 a 175 110 VAC	-	0,025	0,63	45	1150	8,4	-20°C a -10°C
		EM 45HNR	420	3,90		145 a 175 110 VAC	38 a 46 220 VAC	0,028	0,71	79	2000		
		EMI 45HER	420	4,18		145 a 175 110 VAC	53 a 64 190 VAC	0,031	0,80	140	3550		

(Figura tomada de Embraco, 2017)

El principal requerimiento que aporta a la selección del compresor es el volumen del sistema (RCO-1) el cual es de 220 litros, seguido del voltaje de alimentación (RCO-2) y la temperatura de evaporación (RCO-7) que nos asegura que, en efecto, podrá alcanzarse la temperatura de refrigeración entre 4.4°C y 7°C.

Como podemos observar en la Figura 14, el compresor tiene una curva característica intuitiva en la que podemos denotar que, a menor temperatura de evaporación, menor será la capacidad de extraer el calor del espacio refrigerado. Los datos obtenidos de estas gráficas serán fundamentales para calcular las capacidades del evaporador y condensador a continuación.

Figura 14. Curva característica de capacidad de enfriamiento del compresor EMI 45HER.



(Figura tomada de *Embraco*, 2017)

3. **Capacidad nominal del evaporador.** El evaporador es el accesorio del sistema de refrigeración encargado de extraer el calor del espacio refrigerado, en otras palabras, enfriar el interior de la refrigeradora.

La capacidad del evaporador idealmente debería ser igual a la capacidad de enfriamiento que el fabricante del compresor especifica para distintas condiciones iniciales de trabajo. Durante todo el proceso de extracción de calor existen irreversibilidades como la formación de escarcha, estas contemplan con un factor de corrección que se basa en la temperatura de evaporación y el salto térmico.

¿De dónde obtenemos las capacidades de enfriamiento? Los fabricantes brindan tablas de datos, softwares, o bien graficas como la Figura 14, en donde podemos tener un valor aproximado en Watts ó BTU/h, teniendo una temperatura de condensación y una temperatura de evaporación.

Con el salto térmico de 10°C (REV-5) y la temperatura objetivo del espacio refrigerado de 4°C (RSI-5), podemos mediante la ecuación 5 obtener una temperatura de evaporación. Si bien aplicaremos posteriormente un factor de corrección para obtener la capacidad nominal del evaporador, utilizaremos 0°C como temperatura del espacio refrigerado para así asegurar la temperatura más baja posible sin que sea un congelador.

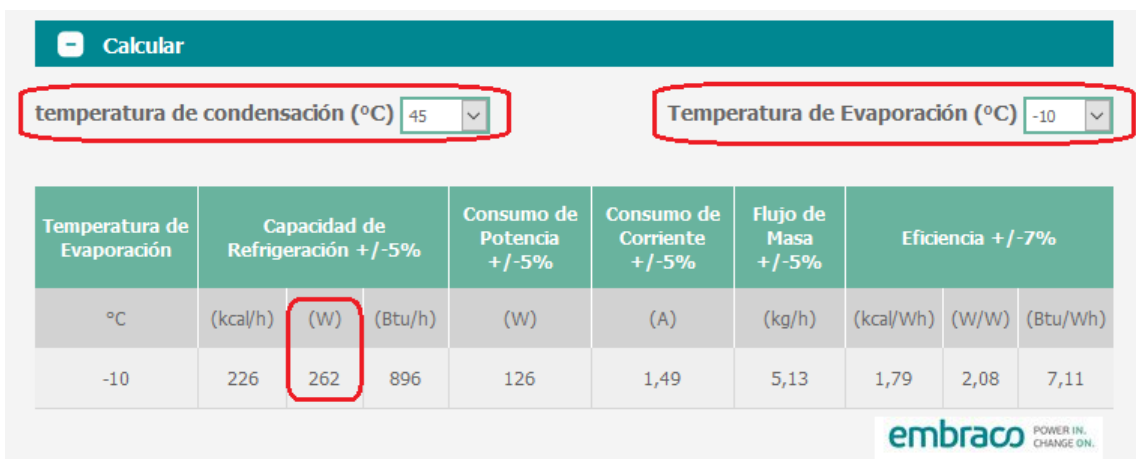
$$\Delta t_E = t_{Ref} - t_{Eva} \quad (5)$$

$$10^\circ C = 0^\circ C - t_{Eva}$$

$$t_{Eva} = -10^\circ C$$

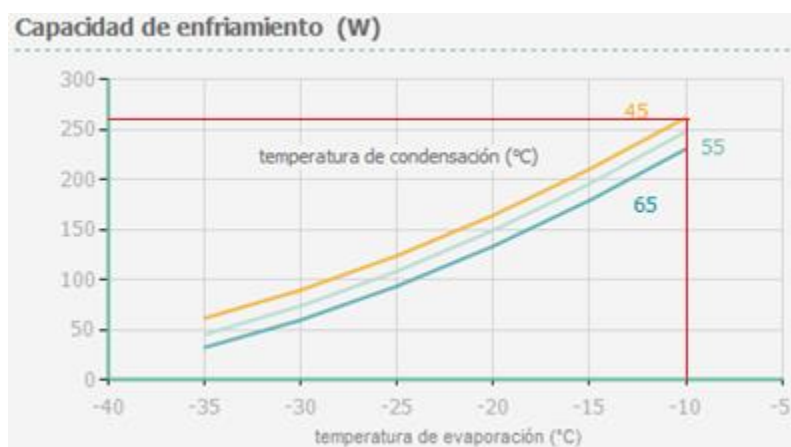
Con la temperatura de evaporación definida y la temperatura de condensación, procedemos a utilizar la plataforma del fabricante para obtener la capacidad de refrigeración, entre otros datos.

Figura 15. Capacidad de refrigeración de compresor EMI 45HER a condiciones de trabajo definidas.



(Figura tomada de *Embraco*, 2017)

Figura 16. Curva característica de EMI 45HER a condiciones de trabajo definidas.

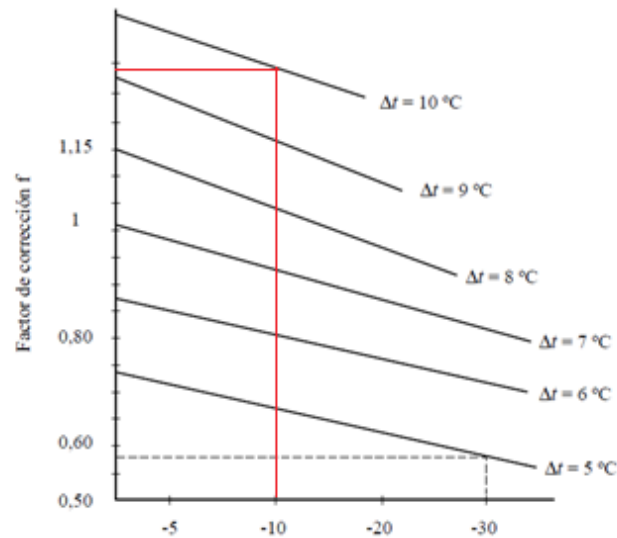


(Figura tomada de *Embraco*, 2017)

En la plataforma del fabricante, con base en la temperatura de condensación y la temperatura de evaporación, encontramos una capacidad de refrigeración de 262 Watts. (Figura 15 y 16).

Tener la capacidad de refrigeración del fabricante en condiciones previamente definidas, da lugar a poder calcular la capacidad de extracción de calor que tendrá el evaporador en el interior de la refrigeradora. La capacidad se calcula mediante la ecuación 6 y tomando en cuenta el factor de corrección de la Figura 17.

Figura 17. Factor de corrección a condiciones de trabajo establecidas.



(Figura tomada de Lijo, 2012)

$$Q_{n.evap} = \frac{Q_{evap}}{f_c} \quad (6)$$

$$Q_{evap} = (0.262 \text{ kW})(1.29)$$

$$Q_{n.evap} = 0.338 \text{ kW} = 1153 \text{ BTU/h}$$

Cuadro 13. Capacidad de enfriamiento y nominal del evaporador.

Dato	Valor
Salto térmico en evaporador	10°C
Temperatura nominal del espacio refrigerado	4°C
Temperatura mínima del espacio refrigerado	0°C
Capacidad nominal de refrigeración del compresor	0.262 kW
Capacidad en condiciones de trabajo del evaporador	0.338 kW / 1153 BTU/h

(Cuadro propio, 2017)

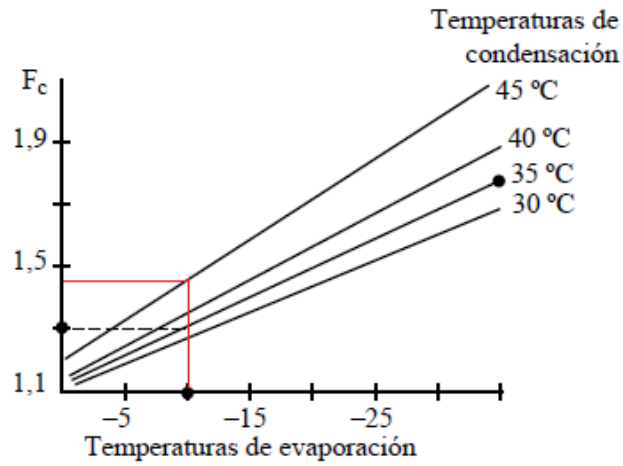
4. **Capacidad nominal del condensador.** El condensador es el accesorio del sistema de refrigeración encargado de expulsar el calor absorbido al agente condensante, en este caso el aire.

El condensador debe tener la capacidad de disipar el calor que ha sido extraído del espacio refrigerado más el calor producido por el trabajo del compresor. Para determinar la capacidad del condensador en operaciones de trabajo, los fabricantes utilizan distintos modelos experimentales para obtener sus propios factores de corrección.

Con base en la ecuación 2 se obtendrá la capacidad del condensador, se requiere extraer factores de corrección adimensionales y tomar en cuenta la capacidad del evaporador. El primero es el factor de

compresión el cual incluye el trabajo realizado por el compresor, el factor de refrigerante acorde al refrigerante utilizado, en nuestro caso R134a y el factor de altitud según una altura promedio para Guatemala.

Figura 18. Factor de corrección por compresor.



(Figura tomada de Lijo, 2012)

Figura 16. Factor de corrección por refrigerante.

Figura 19. Selección de factor de corrección por refrigerante.

	Factor del refrigerante (Fr)			
Refrigerante	R-22	R 134 a	R 404 A	R 507
Factor de corrección	1,04	1,06	1	0,97

(Figura tomada de Lijo, 2012)

Figura 20. Interpolación en factor de corrección por refrigerante.

	Factor de altitud (Fa)			
Altitud del nivel del mar	0	500	1000	1500
Fa	1	1,01	1,06	1,08

(Figura tomada de Lijo, 2012)

$$Q_{n.cond} = Q_e F_c F_r F_a \left(\frac{15}{\Delta T}\right) \quad (3)$$

$$Q_{n.evap} = 0.354$$

$$F_c = 1.45 \text{ (Figura 15)}$$

$$F_r = 1.06 \text{ (Figura 16)}$$

$$F_a = 1.08 \text{ (Figura 17)}$$

$$\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C (RCO-5)}$$

$$Q_{n.cond} = (0.338 \text{ kW})(1.45)(1.06)(1.08) \left(\frac{15}{15}\right)$$

$$Q_{n.cond} = 0.561 \text{ kW} = 1914 \text{ BTU/h}$$

Cuadro 14. Capacidad de condensador en condiciones de trabajo.

Dato	Valor
Salto térmico en condensador	10°C
Temperatura nominal del ambiente	30°C
Capacidad nominal del condensador	0.561 kW / 1914 BTU/h

(Cuadro propio, 2017)

5. Selección de dispositivo de expansión. Los dispositivos de expansión son vitales para poder realizar la expansión del fluido de alta a baja presión. En aplicaciones domésticas en donde se utilizan cargas frigoríficas con variaciones mínimas, se utilizan tubos capilares. Los tubos capilares son recomendados por el fabricante en donde existe una relación de longitud y diámetro.

Como observamos en la Figura 10, para el compresor seleccionado *Embraco* recomienda las posibles combinaciones.

Cuadro 15. Tubos capilares recomendados para compresor Marca *Embraco*, Modelo EMI 45HER.

Opciones	Diámetro Interno	Longitud
Opción 1	0.63 mm	1150 mm
Opción 2	0.71 mm	2000 mm
Opción 3	0.8 mm	3550 mm

(Cuadro propio, 2017)

6. **Diseño de evaporador.** Para que el sistema pueda realizar una extracción de calor del espacio refrigerado, es necesario tener la función de un evaporador el cual buscará llevar a un equilibrio térmico la temperatura del refrigerante y el espacio refrigerado propiciando una extracción de calor.

Tomando en cuenta la capacidad del evaporador en condiciones de trabajo necesaria para el sistema, podemos mediante la ecuación 4, despejar la longitud del evaporador del área de contacto. Esta servirá de base para realizar una geometría adecuada que se adapte al espacio refrigerado. Por ser una geometría circular en la tubería, los cálculos se realizarán con un radio equivalente de la tubería de 0.00287 m, obtenido con el promedio de los radios reales externo e interno de 0.003175 mm y 0.002565 mm, respectivamente.

$$Q_{n.evap} = Ak(\Delta t_E) \quad (4)$$

$$\frac{Q_{n.evap}}{2 \pi r_{prom} k \Delta t_E} = l \quad (m)$$

$$Q_{n.evap} = 0.338 \text{ kW}$$

$$r_e = 0.00287 \text{ m}$$

$$k = 0.401 \frac{\text{kW}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta t_E = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$l = 4.67 \text{ m}$$

Cuadro 16. Longitud del evaporador de cobre.

Dato	Valor
Material de evaporador	Cobre
Diámetro de tubería	1/4"
Capacidad en condiciones de trabajo del evaporador	0.338 kW / 1153 BTU/h
Longitud del evaporador	4.67 m

(Cuadro propio, 2017)

7. **Selección y ajuste de condensador.** Regularmente los condensadores son comprados por su capacidad y no se diseñan. Tener un condensador más largo o corto afecta directamente a la eficiencia del sistema de refrigeración. Regularmente se compra un condensador por la capacidad igual o mayor a la calculada. El condensador debe contar con la capacidad de poder transferir el calor al ambiente o sumidero, tanto del calor extraído de los alimentos, medicamentos u objetos dentro del espacio refrigerado, como del calor generador por el compresor.

En el mercado local los condensadores de transferencia natural son llamados de parrilla, debido a que por la capacidad mayor a la del evaporador, se le agregan varillas transversalmente en ambos lados para aumentar el área de contacto y tener una capacidad de transferencia de calor en un componente más pequeño.

El condensador adquirido sule empíricamente capacidades de refrigeración de compresores de 1/4 a 1/6 hp, por lo que en base a la geometría y características iniciales lo acoplaremos al sistema. Se iniciará calculando la capacidad de transferencia de calor de las varillas, luego será restado a la capacidad nominal del condensador en condiciones de trabajo para obtener la longitud de la tubería. El condensador cuenta con un total de 154 varillas de hierro negro de 0.00315 m, soldadas transversalmente en el serpentín.

$$Q_{varillas} = n2\pi r l k_{hierro}(\Delta T) \quad (kW) \quad (1)$$

$$r = 0.0007 \text{ m}$$

$$l = 0.98 \text{ m}$$

$$n = 154 \text{ Varillas}$$

$$k_{hierro} = 0.079 \frac{kW}{m \text{ } ^\circ C}$$

$$\Delta t_{varillas} = 5 \text{ } ^\circ C$$

$$Q_{varillas} = 0.262 \text{ kW}$$

El valor obtenido de 0.262 kW será la tasa de transferencia de calor que podrán hacer las varillas hacia el ambiente en base a la geometría. El salto térmico de las varillas es distinto al salto térmico del condensador, debido a que estas no tienen un contacto directo con el refrigerante. Teniendo el calor rechazado por las varillas se puede restar de la capacidad nominal del condensador en condiciones de trabajo para obtener el calor que tendrá que rechazar la tubería propiamente. Para calcular la longitud de la tubería se utiliza la ecuación 1.

$$Q_{tubería} = Q_{n.cond} - Q_{varillas}$$

$$Q_{n.cond} = 0.561 \text{ kW}$$

$$Q_{varillas} = 0.262 \text{ kW}$$

$$Q_{tubería} = 0.561 \text{ kW} - 0.262 \text{ kW}$$

$$Q_{tubería} = 0.299 \text{ kW}$$

$$Q_{tubería} = Ak(\Delta t_c)$$

$$\frac{Q_{tubería}}{2 \pi r_{prom} k \Delta t_c} = l \quad (m)$$

$$Q_{tubería} = 0.299 \text{ kW}$$

$$r_{prom} = 0.00315 \text{ m}$$

$$k_{hierro} = 0.079 \frac{\text{kW}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta t_c = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$l = 12.75 \text{ m}$$

Cuadro 17. Configuración recomendada para condensador.

Dato	Valor
Material de condensador	Acero
Diámetro de tubería	1/4"
Capacidad en condiciones de trabajo del condensador	0.561 kW / 1914 BTU/h
Capacidad de varillas en condiciones de trabajo	0.262 kW
Capacidad de tubería en condiciones de trabajo	0.299 kW
Cantidad de varillas	154 unidades
Diámetro de varillas	0.0014 m
Largo de varillas	0.98 m
Largo de tubería	12.75 m

(Cuadro propio, 2017)

D. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS Y PLAN DE MITIGACIÓN.

Identificar riesgos y tener un plan de mitigación ante las eventualidades inesperadas contribuye a tomar decisiones previamente analizadas y evaluadas como correctas. Con un plan de mitigación se disminuye la pérdida de tiempo en elaborar propuestas enfocadas a buscar de soluciones. Los accidentes o eventualidades por lo regular tienden a ser poco identificables. Aunque por experiencia o circunstancias pasadas, podemos elaborarlo.

Cuadro 18. Identificación de riesgos y plan de mitigación en el desarrollo del proyecto.

Código	Riesgo	Plan de mitigación
R-1	Compresor de prototipo no existente en el mercado local	Contacto con fábrica para importación
R-2	Medidas de tubos capilares no encontradas en el mercado local	Compra de tubo capilar y realizar una interpolación lineal para identificar la relación de diámetro respecto a longitud
R-3	Obstaculización de tubo capilar en ensamblaje	Compra de tubo capilar extra
R-4	Complicación con el diseño de un evaporador a partir de tubería de cobre	Compra de un tubo capilar de capacidad igual o superior a la capacidad en condiciones de trabajo
R-5	Complicación en el ensamble del sistema de refrigeración	Contar con dos o más talleres de refrigeración que puedan solventar la problemática
R-6	Falta de refrigerante	Contar con dos o más proveedores de refrigerantes
R-7	Intoxicación o accidentes con refrigerante	Tener presentes medidas de seguridad y de emergencia de los fabricantes
R-8	Fugas en el sistema	Identificar y detener el sistema por completo, hasta reparación
R-9	Tiempo de ensamblaje	Contemplar un 50% más de tiempo para el ensamblaje
R-10	Condensador no existente en el mercado local	Adquirir de capacidad mayor y realizar ajuste.

(Cuadro propio, 2017)

E. PRESUPUESTO Y COMPRA DE MATERIALES.

Con base en la selección y diseño de componentes para el prototipo del sistema de refrigeración, se cotizó en el mercado local los distintos materiales y accesorios necesarios. Se cotizó en dos distintas empresas de las cuales se obtuvieron los mejores precios y calidad.

1. **Mercado local.** En Guatemala, las empresas dedicadas a la comercialización de accesorios para refrigeración no están relacionadas con el diseño de nuevos sistemas, sino en la reparación de estos. Para realizar un adecuado proceso de cotización, fueron visitadas las empresas.

Los proveedores seleccionados no contaban con la totalidad de los insumos. Fue realizada una ponderación directa para justificar la selección.

Cuadro 19. Proveedores cotizados en Guatemala.

Proveedor	Dirección	Teléfono
CONGELSA	3 calle 12-13 Zona 11	24408150
DISTRIBUIDORA GRANADA	5 ave. 6-71 Zona 9	23321591

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 20. Cuadro comparativo de costos.

No.	Accesorio	<i>Congelsa</i>	<i>Distribuidora Granada</i>
1	Compresor 1/8 hp	Q299.00 / Q537.00	No venden
2	4.7 metros de Tubería de cobre 1/4"	Q39.50	Q45.82
3	Condensador con varillas difusoras	Q270.00	No venden
4	Tubo capilar 0.8 mm	Q18.00	Q12.10
5	Filtro deshidratante	Q8.00	Q10.25
6	Válvula de carga	Q4.00	Q4.70
7	Termostato para enfriador de tipo ambiental	No venden	Q43.75

(Cuadro propio, 2017)

Figura 21. Visita a *Congelsa*.

(Figura propia, 2017)

Figura 22. Visita a *Distribuidora Granada*.

(Figura propia, 2017)

Con base en las cotizaciones de ambos proveedores (figura 23 y 24) se determinó un cuadro comparativo de costos para el prototipo. Podemos observar que ningún proveedor tiene la totalidad de los accesorios necesarios en Guatemala. Cada uno de los accesorios y cantidades fueron determinadas previamente para poder armar un sistema por compresión a vapor.

Cuadro 21. Costo de accesorios para el prototipo con IVA incluido.

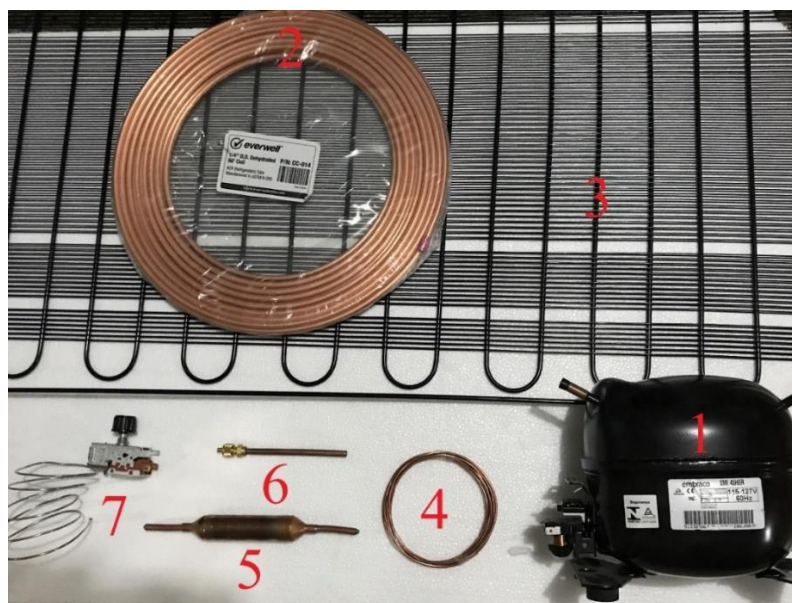
No.	Accesorio	Precio	Proveedor	Marca	Modelo
1	Compresor 1/8 hp	Q537.00	<i>Congelsa</i>	<i>Embraco</i>	EMI 45HER
2	4.7 metros de Tubería de cobre 1/4"	Q39.50	<i>Congelsa</i>	<i>Everwell</i>	CC-014
3	Condensador con varillas difusoras	Q270.00	<i>Congelsa</i>	<i>Perseus</i>	200D5028p002
4	Tubo capilar 0.8 mm	Q12.10	<i>Distribuidora Granada</i>	<i>Sin marca</i>	Sin modelo
5	Filtro deshidratante de carbón activo de 15 gramos	Q8.00	<i>Congelsa</i>	<i>Sin marca</i>	Sin modelo
6	Válvula de carga de 1/4 soldable	Q4.00	<i>Congelsa</i>	<i>Sin marca</i>	Sin modelo
7	Termostato para enfriador de tipo ambiental 1.5°C a 5°C	Q43.75	<i>Distribuidora Granada</i>	<i>Ranco</i>	K50-P1127-001
	Total	Q914.35			

(Cuadro propio, 2017)

El costo del total de los accesorios y componentes necesarios para armar el sistema por compresión de vapor es de Q914.35. El mayor gasto en todos los componentes lo tiene el compresor, si bien el compresor Mabe hubiese sido funcional, elegimos la marca *Embraco* debido al respaldo técnico y documentación para diseño que el fabricante proporciona. Con el compresor *Mabe* el costo del prototipo hubiese sido de Q676.35.

El alto costo de los componentes para fabricar el prototipo se atribuye a que en Guatemala los accesorios son revendidos como repuestos y no con fines de diseño, lo cual da un mayor margen de ganancia a los proveedores porque seguramente es más económico comprar un repuesto relativamente caro a comprar una refrigeradora nueva. Adicional a los costos de componentes, existen costos de manufactura que incluyen la mano de obra y consumibles que son vitales para la fabricación, estos serán analizados posteriormente.

Cuadro 22. Componentes y accesorios adquiridos en el mercado local.



(Figura propia, 2017)

2. **Mercado internacional.** Comprar los componentes directamente de fábrica o con distribuidores internacionales mayoristas, brinda una ventaja importante en cuanto a costos de producción del sistema de refrigeración. Empresas importantes como *Fogel* en Guatemala, definitivamente importan sus componentes y materiales para poder tener precios competitivos al mercado.

A continuación, haremos un análisis según las cotizaciones solicitadas en el mercado internacional. Para determinar un costo de producción con base en una cantidad definida, la muestra y solicitud de precios se realizó con base en un objetivo de fabricación de 500 refrigeradoras. Por lo que serán necesarios 500 componentes iguales a los del Cuadro 21.

Cuadro 23. Proveedores internacionales cotizados.

No.	Proveedor	Correo electrónico	Origen
1	<i>Zhuji City Gayle Refrigeration Fittings Co., Ltd</i>	postmaster@zj-gayle.com	China
2	<i>Shaanxi Yongrui Indus Co., Ltd</i>	sxyrgm@gmail.com	China
3	<i>Xinxiang Daking Machinery Equipment Co., Ltd</i>	daking@xxdaking.com	China
4	<i>Linan E-Cool Zhi Leng She Bei Co., Ltd</i>	postmaster@ecool.com	China
5	<i>Hefei Taitong Refrigerator Technology Co., Ltd.</i>	info@9zchem.com	China
6	<i>Guangzhou Icecool Refrigeration Equipment Co., Ltd.</i>	info@9icecool.com	China

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 24. Costo de accesorios FOB.

No.	Accesorio	Precio unitario	Marca	Proveedor No.
1	Compresor 1/8 hp	Q102.20	ECM	4
2	4.7 metros de Tubería de cobre 1/4"	Q9.26	YR	2
3	Condensador con varillas difusoras	Q47.45	Daking	3
4	Tubo capilar 0.8 mm	Q10.15	Tatato	5
5	Filtro deshidratante de carbón activo de 15 gramos	Q2.92	Hengsen	1
6	Válvula de carga de 1/4 soldable	Q1.83	Hengsen	1
7	Termostato para enfriador de tipo ambiental 1.5°C a 5°C	Q7.30	Ranco	6
Total		Q181.11		

(Cuadro propio, 2017)

Se tomaron en cuenta seis proveedores de insumos para refrigeración, los cuales exportan sus productos para que sean utilizados para el ensamblaje de distintas marcas alrededor del mundo. Los precios son en base a la tasa del cambio del 23 de septiembre del 2017 por el Banco de Guatemala Q7.30 por dólar. Los precios de los fabricantes son sumamente inestables debido a que dependen del valor de las materias primas al momento de exportar, aunque el costo da un aproximado bastante exacto.

Por ser un valor FOB en el Cuadro 24, analizaremos los costos de importación e impuestos en los que incurren nuestros accesorios, para determinar un costo real para 500 sistemas de refrigeración en Guatemala. Para tener una mejor referencia se acude a la empresa *ALL PORT*.

Cuadro 25. Costo en Guatemala de 500 sistemas en partes.

Rubro	Costo
Accesorios FOB para 500 sistemas	Q90,555.00
Contenedor de 20 pies	Q15,330.00
Impuestos (12%)	Q10,866.60
Transporte en Guatemala	Q3,000.00
Trámites y agentes aduaneros	Q5,000.00
Póliza de seguro	Q4,527.00
Total	Q129,278.60

(Cuadro propio, 2017)

El total de los componentes tendría un costo en Guatemala de Q258.56, en este punto se han evaluado únicamente costos de partes, en la siguiente sección se evaluarán los costos de producción para cada sistema con base en los cálculos y análisis realizados previamente.

3. Costo final del sistema de refrigeración. El costo final del sistema de refrigeración toma en cuenta los costos de insumos, así como de mano de obra para ensamblar el sistema, además de los componentes. Se asume tercerizar el proceso de soldadura con fines de no entrar a detalle en los gastos de insumos como: Oxígeno, acetileno, desgaste de herramientas, varilla de aporte acero plata, consumo eléctrico, entre otros.

Cuadro 26. Costo del prototipo final del sistema de refrigeración.

Rubro	Costo
Costo de accesorios para el prototipo (Cuadro 18)	Q914.35
Costo de carga de Refrigerante R134a	Q26.00
Costo de ensamblado e instalación	Q250.00
Costo total	Q1,190.35

(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 27. Costo final del sistema de refrigeración con base en la producción de 500 sistemas.

Rubro	Costo
Costo de accesorios importados hacia Guatemala (Cuadro 21)	Q258.56
Costo de carga de refrigerante R134a	Q26.00
Costo de ensamblado e instalación	Q150.00
Costo total	Q434.56

(Cuadro propio, 2017)

F. FABRICACIÓN DEL SISTEMA INTERNO DE REFRIGERACIÓN.

Para asegurar un sistema por compresión de vapor completamente cerrado, es necesario apearse a correctas prácticas de manufactura, utilizando accesorios y consumibles adecuados. A continuación, desarrollaremos el proceso de fabricación del sistema previamente analizado y calculado. Esta sección sirve como manual de fabricación para técnicos de refrigeración o entusiastas que deseen ensamblar su propio sistema, para un espacio refrigerado. El sistema interno de refrigeración fue ensamblado en conjunto con técnicos de la empresa REFRI PROM, ubicada en Villa Nueva, Guatemala, brindando apoyo en temas de soldadura y pruebas que aseguren un sistema cerrado, libre de fugas.

1. Fabricación de evaporador. Para poder extraer el calor del interior del espacio refrigerado en el que se instale el sistema, se utiliza la tubería de cobre de 1/4". La tubería es proporcionada en rollos de distintas longitudes por el fabricante como lo muestra la Figura 22. Para poder doblar la tubería es necesario utilizar una dobla tubo, con el cual se pueden obtener dobleces finos de hasta 180° sin dañar la tubería. El evaporador debe tener una longitud total de 4.7 metros como observamos en el Cuadro 15.

El proceso de doblar la tubería con una herramienta adecuada no necesariamente es con fines de estética. Una doblez sin un radio de curvatura considerable podría impedir el flujo de refrigerante y alterar el sistema de refrigeración. Si bien, doblar el serpentín de cualquier forma ocupará la misma superficie de contacto hacia el ambiente, lo ideal es distribuir de manera uniforme la tubería dentro del espacio refrigerado. La forma del espacio refrigerado determinará la geometría final, así como el método de sujeción.

Figura 23. Rollo tubería de cobre flexible de 1/4".



(Figura propia, 2017)

Figura 24. Dobladora de tubo manual



(Figura propia, 2017)

Figura 25. Ejemplo de evaporador de 4.7 metros.



(Figura propia, 2017)

2. **Ajuste de condensador.** En el mercado local venden condensadores tipo parrilla para distintos rangos de capacidad de rechazo de calor. El condensador encontrado localmente fue excede la capacidad de nuestro condensador calculado, por lo que se procede a reajustarlo. Tomando en cuenta las características del Cuadro 17, es necesario cortarlo a una longitud de tubería de 12.74 metros y varillas de 0.98 metros. El corte de las varillas puede ser realizado con sierra o bien con un disco abrasivo de corte para acero. Es importante recordar el uso de equipo de seguridad personal para manipular cualquier tipo de herramienta, en caso de utilizar pulidora ver Figura 27.

Figura 26. Re ajuste de condensador a longitud calculada.



(Figura propia, 2017)

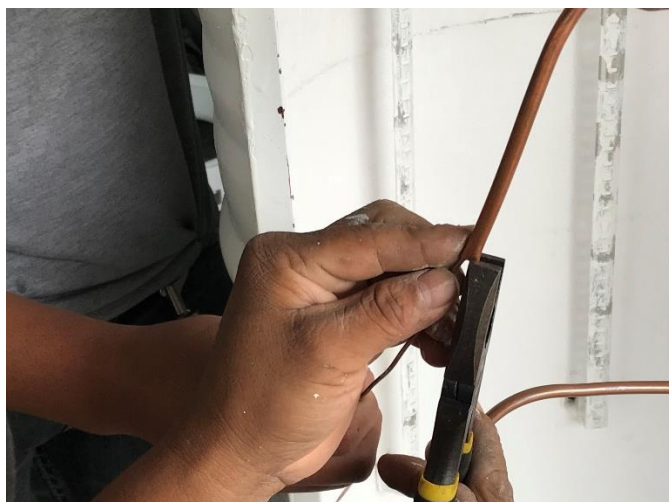
Figura 27. Equipo de protección y herramienta utilizada para re acondicionamiento del condensador.



(Figura propia, 2017)

3. Soldadura de tubo capilar a evaporador y a filtro deshidratante. Soldar el tubo capilar quizá sea la tarea más delicada de todo el proceso de soldadura. El tubo capilar tiene un diámetro interno de 0.8 milímetros, el cual puede taparse con cualquier partícula ajena al sistema. Para soldar el tubo capilar al evaporador se debe ingresar aproximadamente un centímetro y doblar el tubo de cobre de modo que la soldadura sea más sencilla de aplicar. La soldadura es realizada mediante proceso de fundición de metales utilizando equipos de oxiacetilénica o propano con varilla de aporte de acero plata. Para soldar el tubo capilar al filtro deshidratante se realiza el mismo procedimiento, debido a que el filtro trae consigo dos tramos de aproximadamente 6 centímetros de tubería de 1/4". Antes de soldar verificar que la flecha impresa en el filtro vaya en dirección hacia el tubo capilar.

Figura 28. Sujeción de tubo capilar previo a soldar.



(Figura propia, 2017)

Figura 29. Sujeción de tubo capilar previo a soldar.



(Figura propia, 2017)

Figura 30. Soldadura de tubo capilar a filtro deshidratante.



(Figura propia, 2017)

4. Abocardados para unión de tubería. La fabricación de uniones abocardadas es de vital importancia en los sistemas de refrigeración. Los abocardados deben realizarse en todas las uniones de tuberías del mismo diámetro a cualquiera de ambas tuberías, de preferencia a la siguiente en dirección del flujo. Algunas tuberías ya traen consigo abocardados, pero por lo regular son fabricados. Es posible soldar dos tuberías sin realizar un proceso de abocardado, aunque por calidad y seguridad no es recomendable.

Para realizar un proceso de abocardado es necesario contar con la herramienta adecuada, la cual se compone de una prensa para distintos diámetros y una guía la cual es de un acero con una dureza mayor a la

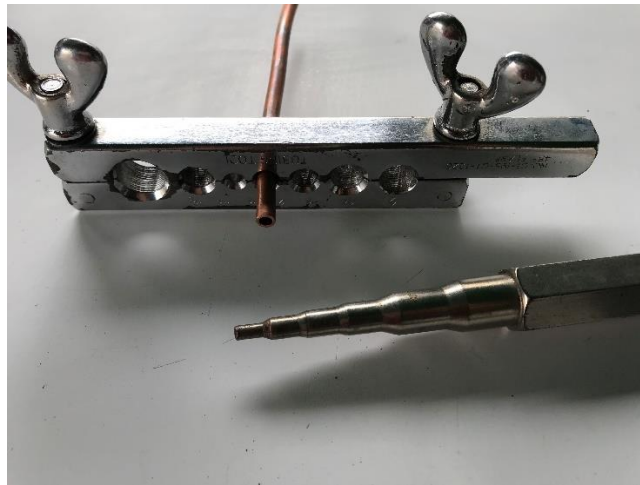
de la tubería, como en la Figura 32. Para un correcto funcionamiento de la herramienta es necesario dejar fuera únicamente el tramo que se irá a abocardar.

Figura 31. Ejemplo de tubería con abocardado.



(Figura propia, 2017)

Figura 32. Herramienta para realizar abocardados en tubería de refrigeración.



(Figura propia, 2017)

Figura 33. Inserto de guía para abocardado.



(Figura propia, 2017)

5. Unión de evaporador a compresor. Con el uso de correcto de abocardados, se realiza la unión de la salida del evaporador con el compresor para llevar a cabo un retorno de refrigerante y asegurar un sistema cerrado. La tubería de cobre debe ser cortada mediante cortadores por presión como los de la Figura 34. El uso de estos cortadores a presión asegura que no queden partículas libres que puedan afectar el funcionamiento del sistema, no es adecuado utilizar abrasivos para el corte final de las uniones de los serpentines. La tubería de succión debe ser instalada contrario al sistema eléctrico para garantizar que el condensado no dañe el sistema eléctrico provocando un corto circuito.

Figura 34. Unión de evaporador a compresor.



(Figura propia, 2017)

Figura 35. Compresor con tubería de succión instalada.



(Figura propia, 2017)

6. **Instalación de la válvula de carga.** La válvula de carga al igual que los demás componentes debe ser soldada utilizando varilla acero plata como material de aporte. Como en la Figura 37, Esta puede ser instalada en el ingreso sobre las conexiones eléctricas, debido a que no creará condensado cuando el sistema por compresión de vapor este en marcha.

7. **Instalación de condensador.** Posterior a realizar el ajuste del condensador, es necesario soldarlo a la salida de alta presión del compresor y por su otro extremo al filtro deshidratante. El proceso de soldadura de los condensadores, por lo general, es más complicado porque regularmente son de acero y van soldados a otro material, en este caso con cobre. Para poder fundir y soldar ambas tuberías como observamos en la Figura 38, es necesario utilizar fundente en abundancia, lo cual permitirá que la varilla de aporte se funda sin dejar mayores porosidades.

Figura 36. Compresor con tubería de succión instalada.



(Figura propia, 2017)

Figura 37. Aplicación de fundente para soldar acero con cobre.



(Figura propia, 2017)

8. Presurizado de sistema de refrigeración. Como método de prueba para determinar y asegurar un sistema completamente cerrado. Se procede a presurizar el sistema con nitrógeno a 100 psi, valor que no debe cambiar en los manómetros durante 8 horas o periodo de duración de la prueba, si existe una variación significa que el sistema tiene fugas y deben ser reparadas. Se utiliza nitrógeno debido a su capacidad desplazar al oxígeno, además de ser inodoro e incoloro, propiedades que no afectarán el sistema.

Figura 38. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 2 horas.



(Figura propia, 2017)

Figura 39. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 4 horas.



(Figura propia, 2017)

Figura 40. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 4 horas.



(Figura propia, 2017)

Figura 41. Presurizado de sistema con nitrógeno a 100 psi después de 8 horas.



(Figura propia, 2017)

9. Vacío de sistema. Posterior a determinar que no existen fugas en el sistema mediante el uso de nitrógeno, se procede a realizarle un vacío y una deshidratación al sistema. El vacío proporciona al sistema la seguridad que el sistema de refrigeración se encuentra completamente vacío, sin humedad, nitrógeno u otros gases que se encuentran en el ambiente. El vacío es posible mediante el uso de una bomba de vacío que por lo regular cuenta con manómetros en milímetros de mercurio (mmHg).

La prueba de vacío puede darse como concluida cuando la presión de los manómetros es constante durante un largo periodo de tiempo, en nuestro caso 4 horas.

Figura 42. Bomba de vacío.



(Figura propia, 2017)

10. Carga de refrigerante. Acorde a la evaluación de refrigerante, determinamos que este es definido por el fabricante del compresor. La corriente utilizada por el compresor está relacionada con el trabajo que este realiza para el proceso de compresión, la corriente cambiará dependiendo de la carga de refrigerante en el sistema. El fabricante brinda una corriente de trabajo recomendada para obtener una capacidad frigorífica determinada como observamos en la Figura 12. Según el fabricante (*Embraco*, 2017) obtener una capacidad de refrigeración de 262 Watts es posible si el compresor trabaja con una corriente de consumo de 1.49 Amperios con una incertidumbre del 5%. Es necesario ingresar o extraer refrigerante R134a al sistema hasta que el consumo eléctrico esté en el rango del fabricante, para realizar el ajuste es necesario que el compresor esté trabajando normalmente. La corriente es medida mediante un amperímetro de gancho.

Figura 43. Corriente de consumo del sistema de refrigeración.



(Figura propia, 2017)

Figura 44. Bomba de vacío.



(Figura propia, 2017)

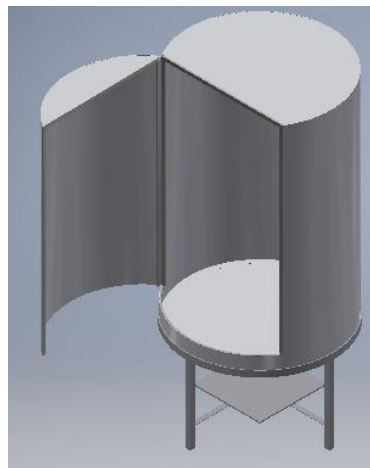
G. INSTALACIÓN EN UN ESPACIO REFRIGERADO.

El sistema de refrigeración interno por compresión de vapor se complementa con un espacio hermético para formar una refrigeradora. El espacio refrigerado al cual se adecue el sistema diseñado debe tener la menor cantidad de pérdidas posibles, con el fin de aumentar la eficiencia de la refrigeradora.

Con el fin de realizar pruebas y complementar una refrigeradora, se utiliza el modelo de bajo costo propuesto por el trabajo de graduación denominado: *Diseño y análisis para un espacio refrigerado de uso doméstico*. (Enrique Juárez, 2017). El modelo propuesto del espacio refrigerado se basa en la utilización de materiales de bajo costo para la estructura y aislamiento, así como la forma de cierre.

Con el fin de probar el prototipo del sistema de refrigeración, es ensamblado en este diseño domestico propuesto. El sistema puede ser utilizado en cualquier diseño que cumpla el requerimiento RCO-1 con un aislamiento térmico adecuado.

Figura 45. Modelo propuesto por Enrique Juárez.



(Enrique Juárez, 2017)

Figura 46. Prototipo del sistema de refrigeración interno, instalado en el espacio refrigerado.



(Figura propia, 2017)

Figura 47. Prototipo del sistema de refrigeración interno, instalado en el espacio refrigerado.



(Figura propia, 2017)

Figura 48. Compresor del prototipo, instalado en la refrigeradora.



(Figura propia, 2017)

El sistema interno por compresión de vapor por naturaleza no cuenta con un elemento de control el cual determine y mantenga el espacio refrigerado a una temperatura objetivo, conectando y desconectando el compresor. Los termostatos son adquiridos de fábrica a las temperaturas deseadas o bien pueden ser ajustados mediante un tornillo de calibración. En este caso en particular, la temperatura de conexión y desconexión son 12°C y 6°C respectivamente. Estos termostatos, cuentan con un tubo capilar con gas en el interior el cual se expande o contrae según las condiciones, realizando contactos eléctricos mecánicamente. El termostato utilizado para este sistema cuenta con siete unidades de escala, las cuales no representan grados Celsius, sino el desfase de la temperatura de conexión y desconexión. Si el termostato apunta a “0”, significa que el compresor está apagado.

Figura 49. Termostato instalado en refrigeradora, parte trasera.



(Figura propia, 2017)

Figura 50. Termostato instalado en refrigeradora, parte delantera.



(Figura propia, 2017)

H. PRUEBAS Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO.

Posterior al diseño, fabricación del sistema de refrigeración interno y el ensamblaje de la refrigeradora. Se procedió a realizar distintas pruebas para analizar la funcionalidad del sistema. Si bien el sistema de refrigeración por compresión de vapor es independiente del espacio refrigerado, combinados conforman una refrigeradora.

En el Cuadro 24 se encuentra una descripción corta de las distintas actividades que se realizaron para analizar el sistema fabricado.

Cuadro 28. Pruebas realizadas al sistema de refrigeración.

No.	Actividad	Descripción corta
1	Pruebas termográficas	Las pruebas termográficas brindarán de forma objetiva, información sobre el correcto funcionamiento de los distintos componentes del sistema.

Continuación de cuadro 28.

No.	Actividad	Descripción corta
2	Pruebas de enfriamiento.	Con el sensor de temperatura, se podrán obtener datos de temperatura en tiempo real desde la computadora. Con la información brindada por el sensor se obtendrá la curva de arranque inicial específica del sistema, para ser modelada matemáticamente en términos del tiempo. También se pondrá obtener la rampa de descenso posterior a una desconexión del compresor por el termostato.
3	Obtención de datos para definir estados en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor	Se obtendrá con ayuda de sensores datos para definir estados termodinámicos. Además, se harán mediciones de presión, voltaje y corriente.
4	Análisis termodinámico	Se realizará un análisis termodinámico con la información obtenida, así como la comparación con el modelo teórico propuesto por fabricante del compresor. En este punto se definen los coeficientes de desempeño y eficiencias de la segunda ley de la termodinámica.

(Cuadro propio, 2017)

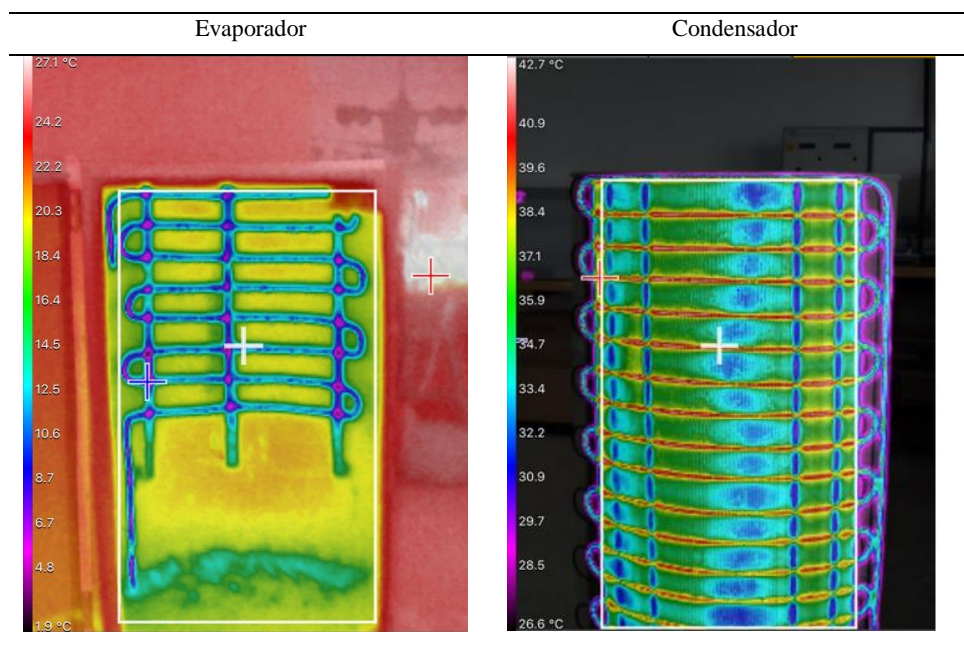
1. **Pruebas termográficas.** Realizar pruebas termográficas a un sistema de refrigeración quizá sea un costo elevado si no se cuenta con la herramienta. Con el fin de identificar la funcionalidad correcta de los componentes del sistema, se utiliza cámara termográfica marca FLUKE, modelo TIS65. El análisis termográfico es cualitativo, debido a que posteriormente se analizará el sistema de refrigeración con sensores de temperatura.

Figura 51. Cámara termográfica FLUKE TIS65.



(Figura propia, 2017)

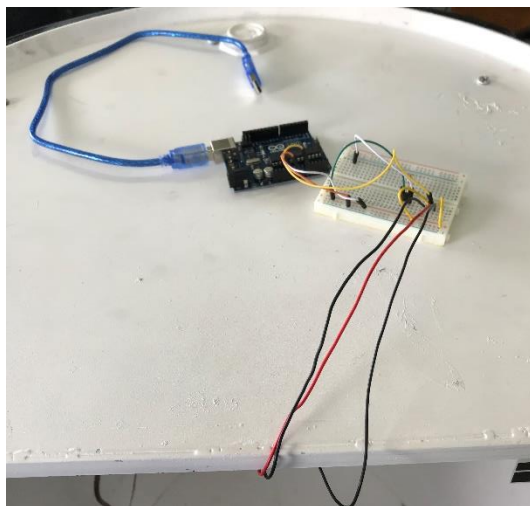
Cuadro 29. Capturas termográficas realizadas a los intercambiadores de calor.



(Figura propia, 2017)

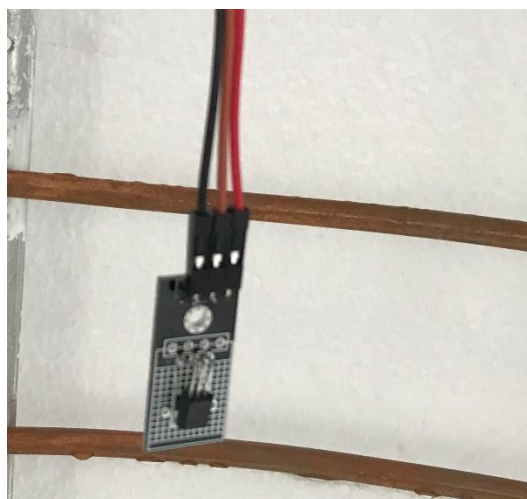
2. **Pruebas de enfriamiento.** Existen distintos tipos de termómetros actualmente, los cuales se basan en métodos alternativos al mercurio. Extraer información de estos termómetros con fines de investigación no son la mejor opción, debido a la incertidumbre de la toma de medición en el tiempo. Para el análisis de la curva de descenso se utilizó un *Arduino UNO* y un sensor de temperatura análogo LM35 con una incertidumbre de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, se colocó para obtener la temperatura ambiente dentro de la refrigeradora con la puerta cerrada.

Figura 52. Circuito de sensor de temperatura.



(Figura propia, 2017)

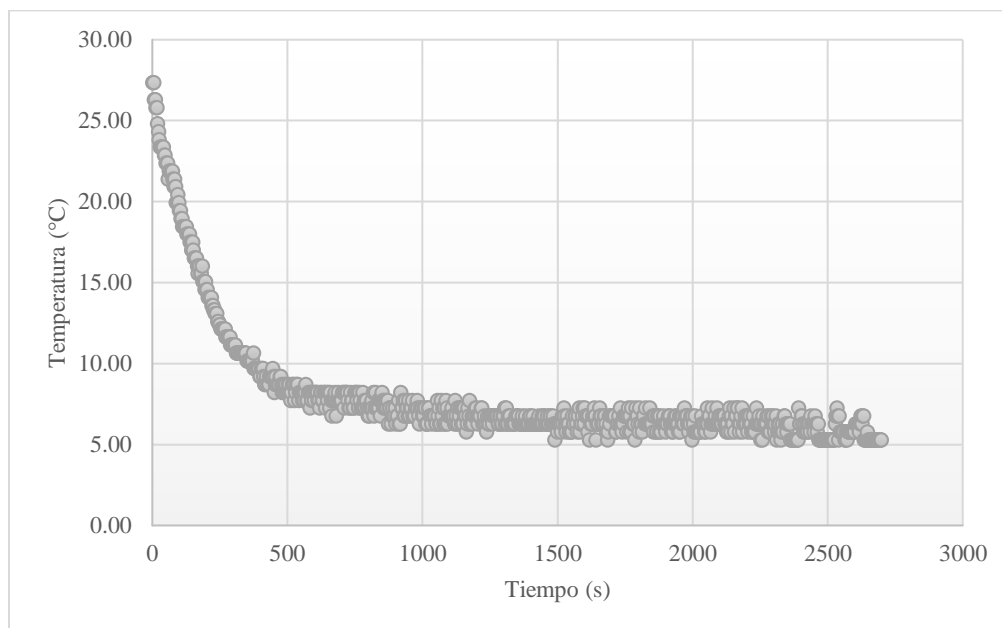
Figura 53. Sensor de temperatura instalado en el espacio refrigerado.



(Figura propia, 2017)

a. Rampa de descenso inicial. La prueba de descenso inicial consistió en encender la refrigeradora desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de equilibrio censando cada 3 segundos. Posterior a obtener alrededor de 900 datos, se analizan e interpretan para obtener la curva característica de ascenso inicial de la refrigeradora. La curva obtenida no es únicamente del sistema interno por compresión de vapor, sino de la refrigeradora. Esta puede cambiar dependiendo el espacio refrigerado en el que esté instalando el sistema, así como las irreversibilidades del mismo.

Figura 54. Rampa de descenso inicial de la refrigeradora.



(Figura propia, 2017)

Analizando la rampa de descenso denotamos que no es un enfriamiento natural, sino un enfriamiento forzado el cual llega a un punto de equilibrio. Con los datos podemos obtener la ecuación que más se adapte al sistema, por lo que se procede a obtener la línea de tendencia y una ecuación característica. La ecuación más adecuada para replicar los resultados es de tipo logarítmica, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.86, el cual se interpreta como la calidad de la ecuación.

Ecuación 8. Ecuación característica de la rampa de descenso inicial de la refrigeradora

$$T(t) = -3.627\ln(t) + 33.05$$

$$T(t) = \text{temperatura en } ^\circ\text{C}$$

$$t = \text{tiempo en segundos}$$

La ecuación matemáticamente tiene en su dominio a los números reales mayores que 0. Donde cero representa el tiempo inicial, a temperatura ambiente. En la Figura 57 podemos observar la gráfica azul, que representa la rampa de ascenso inicial del sistema acorde a la ecuación 8. La línea roja ($y = 8$) determina el máximo de temperatura al que puede estar el interior de la refrigeradora y la línea verde ($y = 5.25$) representa la temperatura deseada o bien la temperatura de corte del termostato.

Si sustituimos la temperatura deseada en la ecuación 8, podemos obtener el tiempo en segundos en que llega a la temperatura de refrigeración deseada. La cual es 36 minutos respectivamente.

$$5.25 = -3.627 \ln(t) + 33.05$$

$$t = 2131.8 \text{ s} = 36 \text{ minutos}$$

Figura 55. Rampa de descenso inicial de la refrigeradora y temperatura deseada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).



(Figura propia, 2017)

b. Rampa de ascenso posterior a desconexión. Al obtener una estabilización de temperatura, el termostato hace su función y desconecta el sistema. La temperatura en el interior de la refrigeradora inicia su ascenso hasta llegar a una temperatura de arranque del termostato. Recordemos que la gráfica obtenida es sin carga de alimentos o medicinas, únicamente del aire dentro del espacio refrigerado. Este tiene un calor específico sumamente bajo, por consiguiente, los cambios de temperatura no necesitan una gran capacidad de calor para realizarse. La ecuación más adecuada para replicar los resultados es de tipo exponencial, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.93.

Ecuación 9. Ecuación característica de la rampa de ascenso del sistema apagado.

$$T(t) = 5.9374e^{0.0014t}$$

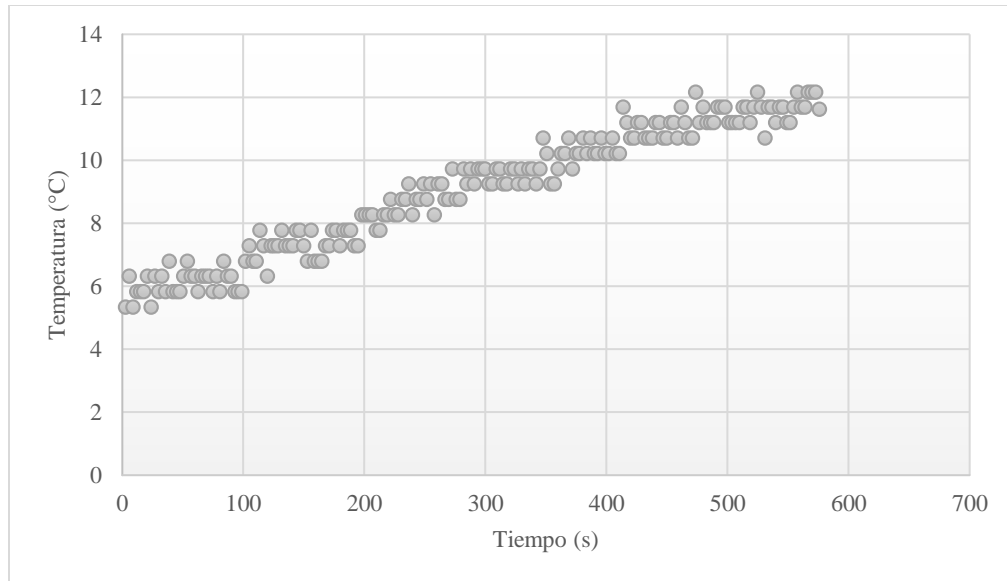
$T(t) = \text{temperatura en } ^\circ\text{C}$
 $t = \text{tiempo en segundos}$

De la ecuación 9 podemos determinar el tiempo en que el sistema sin carga acciona nuevamente el termostato para encender el compresor. El tiempo para arrancar el compresor nuevamente es de 8:20 minutos aproximadamente. El tiempo puede aumentar o disminuir dependiendo el espacio refrigerado en el que esté instalado el sistema, debido a sus irreversibilidades.

$$12 = 5.9374e^{0.0014t}$$

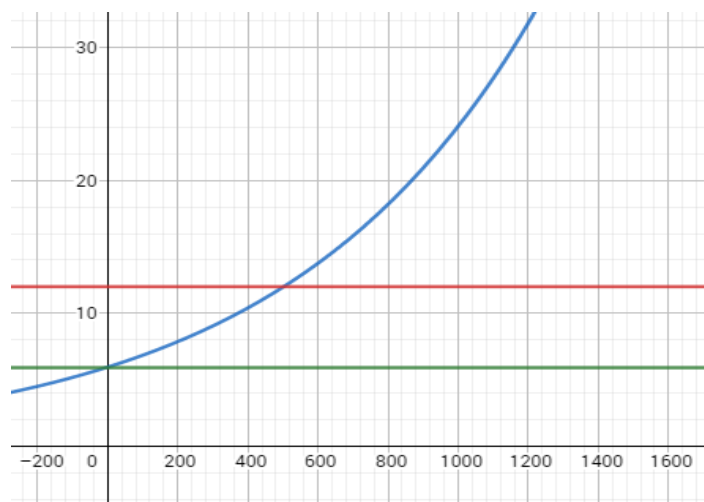
$$t = 502 \text{ s} = 8:20 \text{ minutos}$$

Figura 56. Rampa de ascenso de la refrigeradora con sistema apagado y puerta cerrada.



(Figura propia, 2017)

Figura 57. Ecuación de la rampa de ascenso de la refrigeradora con sistema apagado y puerta cerrada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).



(Figura propia, 2017)

Como podemos observar en la Figura 59, después de la desconexión el espacio empieza a ganar calor del exterior, hasta que el termostato lo arranque nuevamente. Las líneas en y, representan los grados de desconexión y reconexión del termostato.

c. Rampa de descenso en reconexión. Posterior a alcanzar la temperatura máxima configurada en el termostato, nuevamente se arranca el sistema para llevar al espacio refrigerado a la temperatura ideal de refrigeración como observamos en la Figura 61.

Es importante obtener la rampa de descenso en reconexión para comprobar que después de la primera rampa, se necesita menos trabajo para llevar al sistema a una temperatura objetivo. Esto debido a que los componentes internos de la refrigeradora ya están más cercanos de un equilibrio térmico que estando a la temperatura ambiente. Del análisis, se obtiene la ecuación logarítmica de descenso en reconexión con un coeficiente de determinación R^2 de 0.89.

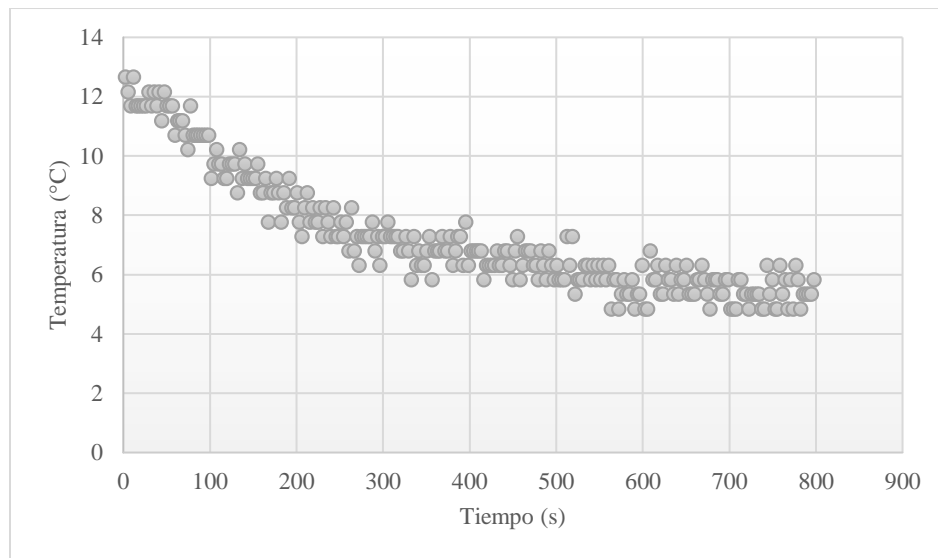
Ecuación 10. Ecuación característica de la rampa de descenso del sistema en reconexión.

$$T(t) = -1.966\ln(t) + 18.482$$

$$T(t) = \text{temperatura en } ^\circ\text{C}$$

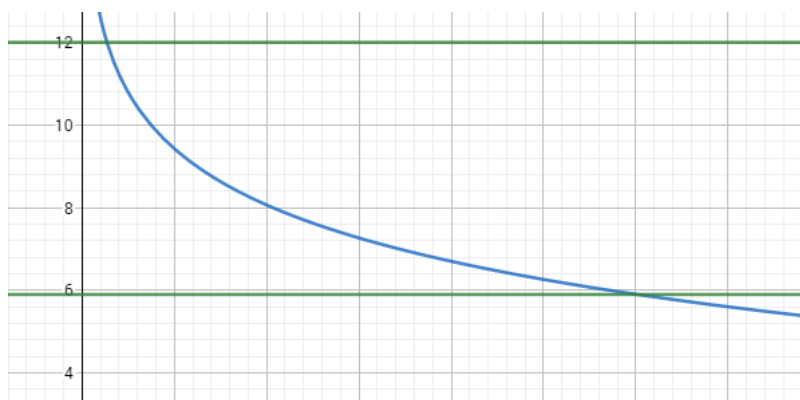
$$t = \text{tiempo en segundos}$$

Figura 58. Rampa de descenso con sistema apagado y puerta cerrada.



(Figura propia, 2017)

Figura 59. Rampa de descenso con sistema apagado y puerta cerrada, Temperatura (°C) – Tiempo (s).



(Figura propia, 2017)

Sustituyendo la temperatura ambiente de diseño en la ecuación 10, podemos obtener el tiempo en segundos en que el espacio refrigerado llega a la temperatura deseada. La cual es de 14 minutos respectivamente.

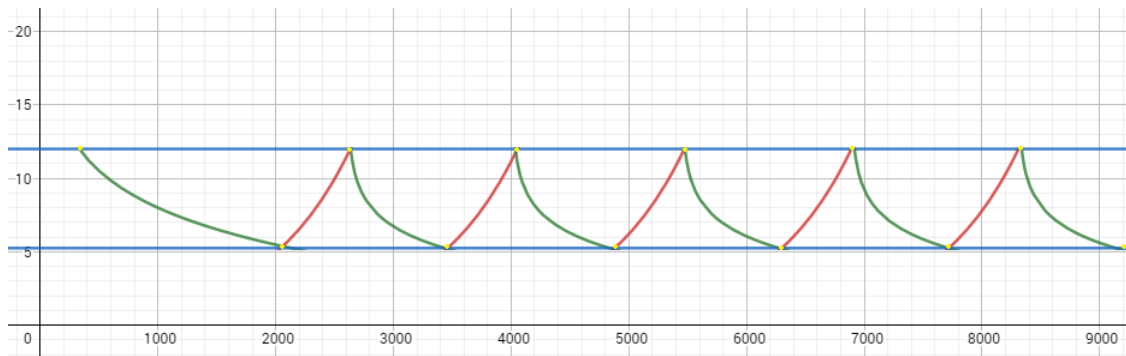
$$5.25 = -1.966 \ln(t) + 18.482$$

$$t = 837 \text{ s} = 14 \text{ minutos}$$

Si utilizamos la rampa de descenso inicial, el tiempo que toma llevar de 12°C a 5.25°C, tenemos un tiempo aproximado de 30 minutos y en reconexión el tiempo es de 14 minutos aproximadamente. Podemos ver claramente que la rampa inicial es más tardada que la de reconexión, porque los componentes del interior del espacio refrigerado no están tan lejos del equilibrio térmico comparados con la rampa inicial.

d. Gráfica de ciclos de ascenso y descenso. En la Figura 62 podemos visualizar los ciclos repetitivos de conexión y desconexión del compresor al llegar a una temperatura de 5.25°C, las temperaturas que están determinadas por el termostato se representan en azul. El primer descenso en verde dura más tiempo que los demás descensos, por las irreversibilidades iniciales. Las gráficas en rojo demuestran los ascensos de temperatura cuando el compresor está desconectado y el sistema no está extrayendo calor del espacio refrigerado. La grafica representada en la Figura 62 varía dependiendo la carga que el usuario ingrese dentro de la refrigeradora, los tiempos se visualizan sumamente cortos debido al bajo calor específico del aire dado a que es lo único que se encuentra en el espacio refrigerado en las mediciones.

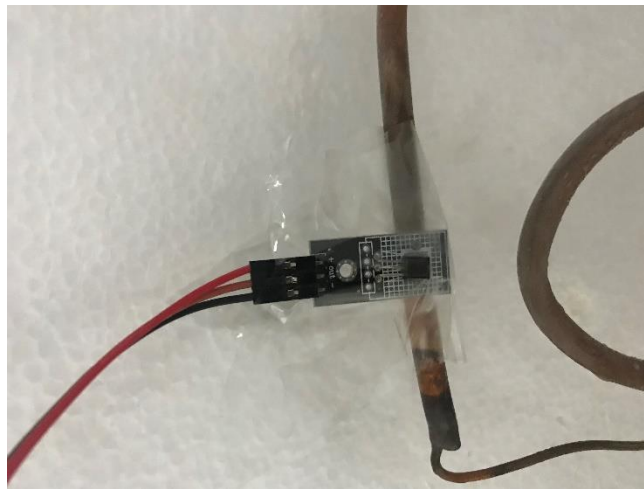
Figura 60. Ciclos de ascenso y descenso de la refrigeradora, Temperatura (°C) – Tiempo (s).



(Figura propia, 2017)

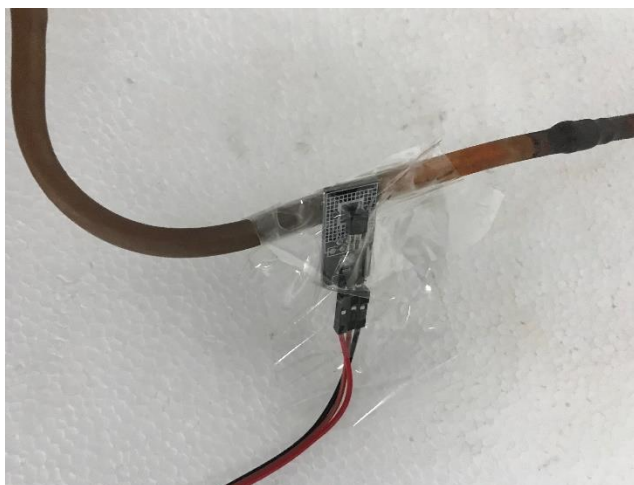
3. Obtención de datos para definir estados en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Para definir los distintos estados de un modelo de refrigeración por compresión de vapor de la refrigeradora, se procede a instalar el sensor de temperatura en distintos puntos de interés. Posterior a la colocación de los sensores se realizaron 125 mediciones de temperatura con el fin de encontrar un dato más aproximado a la temperatura del refrigerante en ese punto. Si bien se obtendrán datos aproximados, no es la forma correcta de realizar este tipo de mediciones, deberían ser mediante un termopar con contacto directo al refrigerante.

Figura 61. Instalación de sensor en la entrada del evaporador.



(Figura propia, 2017)

Figura 62. Instalación de sensor en la entrada del evaporador.



(Figura propia, 2017)

Cuadro 30. Moda de temperaturas en la entrada y salida del evaporador.

Temperatura en la entrada del evaporador	Temperatura en la salida del evaporador
-1.28 °C	-5 °C

(Cuadro propio, 2017)

La presión del sistema fue medida en la válvula de carga del compresor, debido a que no existe ninguna otra forma de medir la presión del evaporador, se toma esta como una aproximación. En el evaporador existen caídas de presión debido a la fricción de la tubería, aunque podría ser despreciable. También existe una caída de presión en el cambio de diámetro entre la línea de baja presión y el compresor.

Cuadro 31. Moda de temperaturas en la entrada y salida del evaporador.

Presión del evaporador en psi	Presión del evaporador en mPa
17 psi	0.117

(Cuadro propio, 2017)

Para determinar la potencia eléctrica del compresor es necesario obtener mediciones de voltaje y corriente, así como saber el factor de potencia del compresor por ser corriente alterna. El factor de potencia puede ser extraído de cálculos realizados por el fabricante.

Cuadro 32. Voltaje, corriente de consumo y factor de potencia del compresor en trabajo.

Voltaje	Corriente	Factor de potencia
121.5 V	1.48 A	0.74

(Cuadro propio, 2017)

4. Análisis termodinámico. Se iniciará modelando el sistema como un ciclo real de refrigeración, posterior un análisis ideal, seguido de un cálculo de coeficientes de desempeño y eficiencia de la segunda ley de la termodinámica, para finalizar con una comparación con el modelo teórico del fabricante y los consumos eléctricos para un hogar promedio. Para esto se utilizará la información brindada en la sección anterior. Los cálculos de estados se realizarán con ayuda del software mini-REFPROP (REFPROP, 2017), teniendo una referencia de estado ASHRAE de entalpía y entropía= 0 para el líquido saturado a -40°C , obtenemos las propiedades del refrigerante R134a.

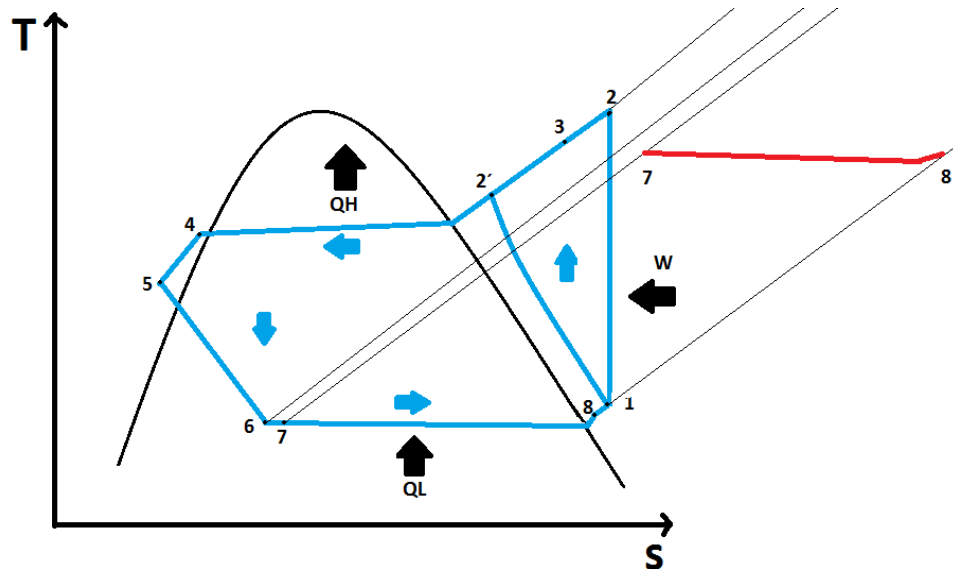
a. Ciclo real de refrigeración. Tomando en cuenta las temperaturas del evaporador tabuladas en el Cuadro 30 y la presión aproximada del Cuadro 31, se pueden definir los estados 7 y 8 de la Figura 66, para posteriormente obtener el cambio de entalpía y al ser multiplicado por el flujo másico poder obtener el calor real extraído por el evaporador.

Figura 63. Estados 1 y 4 del ciclo por compresión de vapor.

1: R134a: Specified state points						
	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Enthalpy (kJ/kg)	Quality (kg/kg)	Phase
7	-1.2800	0.11700	5.4659	254.12	Superheated	Gas
8	-5.0000	0.11700	5.5526	251.08	Superheated	Gas

(Figura propia, 2017)

Figura 64. Diagrama T-S del ciclo de refrigeración operando fuera de la campana de enfriamiento.



(Figura propia, 2017)

Como anteriormente mencionamos, la única forma de obtener la capacidad real del sistema de refrigeración interno mediante las propiedades del refrigerante R134a y un ciclo real de refrigeración es definiendo los estados 7 y 8 de la Figura 66, los cuales son en la entrada y salida del evaporador respectivamente. Si bien obtuvimos información de presión y temperaturas, con ayuda de software, en la Figura 65 se determinó la calidad del gas en esos estados. El fluido de trabajo en esos estados es sobrecalentado, si lo graficamos como en la Figura 66 podemos observar en rojo cómo estaría trabajando el ciclo por compresión de vapor lejos de la campana de enfriamiento, lo cual no permitiría extraer calor del espacio refrigerado, pero evidentemente la refrigeradora si cumple su función.

La mala definición de estados en un ciclo real corresponde a la mala obtención de datos. Para obtener un modelo del ciclo de refrigeración real por compresión de vapor completamente definido se debería tener instalados termopares para medir la temperatura real del refrigerante y válvulas de mantenimiento para la medición de presión en 8 distintos puntos, lo cual no es el objetivo del proyecto.

b. Ciclo ideal de refrigeración con condiciones de trabajo. Con el fin de poder analizar el ciclo no de forma real sino ideal, tomaremos las suposiciones descritas en el Cuadro 33. Además, asumir que en el estado 3 de la Figura 69, el fluido está en líquido saturado. El proceso ideal tomará en cuenta la temperatura de evaporación y condensación utilizadas para diseñar los componentes, las cuales son -10°C y 45°C respectivamente. La presión utilizada en el proceso de 4 a 1 será la medida realmente para obtener un modelo más cercano a la realidad, obtenida del Cuadro 31.

Cuadro 33. Suposiciones para un ciclo por compresión de vapor ideal.

Estado 1 a 2	Estado 2 a 3	Estado 3 a 4	Estado 4 a 1
Proceso isentrópico	Proceso isobárico	Proceso isoentálpico	Proceso isotérmico

(Cuadro propio, 2017)

Figura 65. Estados del ciclo de refrigeración definidos, definiendo el estado 1 con temperatura y la presión medida experimentalmente.

9: R134a: Specified state points [Barometric pressure: 0.10133 MPa]						
	Temperature (°C)	Pressure (MPa_g)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Phase
1	-10.000	0.011700	247.13	0.99202	Superheated	Gas
2	68.062	1.0586	299.20	0.99202	Superheated	Gas
3	45.000	1.0586	115.80	0.41833	0.00000	Liquid
4	-10.000	0.099278	115.80	0.44859	0.37505	2-Phase

(Figura propia, 2017)

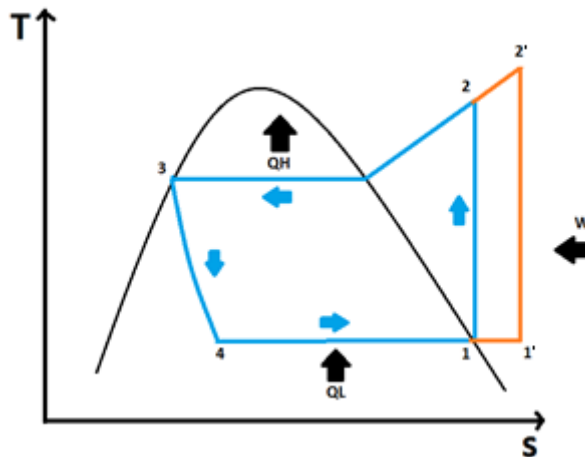
Figura 66. Estados del ciclo de refrigeración definidos, definiendo el estado 1 con la temperatura y con vapor saturado.

10: R134a: Specified state points [Barometric pressure: 0.10133 MPa]						
	Temperature (°C)	Pressure (MPa_g)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Phase
1	-10.000	0.099278	244.52	0.93774	1.0000	Gas
2	51.672	1.0586	281.13	0.93774	Superheated	Gas
3	45.000	1.0586	115.80	0.41833	0.00000	Liquid
4	-10.000	0.099278	115.80	0.44859	0.37505	2-Phase

(figura propia, 2017)

Los estados calculados entre de los estados de las figuras 67 y 68, difieren en que en el primero se toma la presión medida experimentalmente y en la segunda se asume un vapor saturado para el estado 1. Definir el estado 1 con la presión real, contribuirá en tener una mejor aproximación del ciclo de refrigeración ideal. En la figura 69, en azul se puede observar que el ciclo finaliza como vapor saturado y en el naranja como sobrecalentado, lo cual es más acercado a la realidad.

Figura 67. Estados definidos en las figuras 67 y 68.



(figura propia, 2017)

Con los estados definidos podemos obtener información sobre la capacidad de enfriamiento del sistema. Para esto utilizaremos el cambio de entalpía del estado 4 y 1, de la Figura 67. El flujo másico es proporcionado por el fabricante del compresor en la Figura 15.

$$\dot{Q}_L = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_L = 0.001425 \frac{kg}{s} \left(247.13 \frac{kJ}{kg} - 115.80 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_L = 0.187 \text{ kW} = 638.57 \frac{BTU}{h}$$

La capacidad de extracción de calor calculada se interpreta como la capacidad de enfriamiento aproximada a la real, debido a que se asume un ciclo ideal en condiciones reales del sistema de refrigeración por compresión de vapor. El fabricante propone una capacidad de enfriamiento en base a la cual se diseñó el evaporador y condensador. La capacidad de enfriamiento según un análisis modelado como ideal, propicia un porcentaje de error del 29%, significa que nuestro sistema diseñado permite una capacidad de enfriamiento para carga un 29% menos a la que propone el fabricante. En este punto existen distintos factores que influyeron en este porcentaje de error, el más importante son los factores de corrección de diseño, los cuales en la realidad deben ser ajustados por iteraciones de los fabricantes.

Recordemos que aproximar el ciclo a uno ideal, nos da un dato cercano a la realidad. Es probable que de ser posible obtener las temperaturas y presiones reales en la entrada y salida del evaporador, el porcentaje fuese menor.

Cuadro 34. Comparación de capacidad del fabricante y el diseño propio.

Capacidad	Capacidad de enfriamiento
Fabricante	0.262 kW
Diseño propio	0.187 kW
Porcentaje de error	29%

(Cuadro propio, 2017)

c. Análisis de coeficiente de desempeño real y trabajo. Para calcular el coeficiente de desempeño de la refrigeradora es importante saber el trabajo que ingresa al compresor, en este caso es en forma de energía eléctrica. Con base en los datos tabulados en el Cuadro 32 podemos determinar el trabajo de entrada al compresor. El trabajo eléctrico de entrada o bien la potencia consumida por el compresor se obtiene con la corriente y el voltaje, por tratarse de corriente alterna debe considerarse el factor de potencia, el cual se obtuvo de cálculos del fabricante a condiciones definidas.

$$\dot{W}_i = V I \cos \phi \quad (8)$$

$$\dot{W}_i = (121.5 V)(1.48 A)(0.65)$$

$$\dot{W}_i = 0.117 kW$$

El coeficiente de desempeño (COP) determina la eficiencia de la refrigeradora, para ello es necesario utilizar la capacidad de refrigeración y el trabajo consumido por el compresor. Entre más alto es el COP, más eficiente es la refrigeradora.

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{W} \quad (9)$$

$$COP_R = \frac{0.187 \text{ kW}}{0.117 \text{ kW}}$$

$$COP_R = 1.60$$

Comparado con el coeficiente de desempeño propuesto por el fabricante del compresor (*Embraco*, 2017) en la Figura 15, es de 2.08 y comparado con el nuestro de 1.60 obtenemos un porcentaje de error de 23%. Esto significa que nuestro sistema de refrigeración por compresión de vapor es un 23% menos eficiente que el desempeño máximo que el fabricante ha logrado para las configuraciones de evaporación y condensación previamente definidas.

d. Coeficiente de desempeño máximo. El Coeficiente de rendimiento o desempeño máximo, está ligado al ciclo invertido de Carnot, el cual es el más eficiente posible, es completamente reversible. Este está relacionado únicamente con la temperatura del espacio refrigerado y el ambiente. Este coeficiente debería ser la meta para diseño de los distintos fabricantes de refrigeradoras, aunque por las irreversibilidades es teóricamente imposible de alcanzar en sistemas comerciales.

$$COP_{R.rev} = \frac{t_l}{t_h - t_l} \quad (7)$$

$$COP_{R.rev} = \frac{(5.25^\circ\text{C} + 273 \text{ K})}{(27^\circ\text{C} - 5.24^\circ\text{C})}$$

$$COP_{R.rev} = 12.79$$

e. Eficiencia de la Segunda ley de la termodinámica. La eficiencia de la segunda ley de termodinámica puede definirse mediante cálculos de energía teniendo previamente todos los estados definidos. En este caso en particular, se realizarán un análisis mediante el uso del COP_{MAX} y el COP_R , debido a que esta eficiencia toma en cuenta todas las irreversibilidades dentro de la refrigeradora, tomando en cuenta también la transferencia de calor hacia el exterior. Mejorar la segunda ley de la termodinámica es un parámetro adecuado para cuantificar mejoras al sistema.

$$n_{II.Ciclo} = \frac{COP_R}{COP_{R.rev}} \quad (10)$$

$$n_{II.Ciclo} = \frac{1.62}{12.79}$$

$$n_{II.Ciclo} = 13\%$$

f. Consumo eléctrico máximo mensual del sistema. Asumiendo un consumo eléctrico constante de 0.117 kW. Evaluaremos el costo máximo en consumo eléctrico que podría tener el sistema de refrigeración. Este sería el peor panorama, asumiendo que no hay un termostato y el sistema opera 24 horas del día.

Cuadro 35. Panoramas de consumo eléctrico.

Caso	Descripción	Horas diarias	Consumo eléctrico	Costo kWh en Quetzales	Gasto mensual (31 días)
1	Consumo eléctrico de 1 mes operando 24 horas al día.	24	0.117 kW	Q1.10	Q95.00
2	Consumo eléctrico en el mejor caso, asumiendo que las puertas no se abren.	14.51	0.117 kW	Q1.10	Q57.89

(Cuadro propio, 2017)

VI. CONCLUSIONES

1. Se diseñó y fabricó el prototipo funcional de un sistema interno por compresión de vapor, que funciona con 110 Voltios en corriente alterna y tiene la capacidad de mantener una temperatura estable de 5.25°C en un espacio refrigerado de 220 litros, con una extracción de calor de 187 kW y un consumo eléctrico de 0.117 kW.
2. Se adquirieron los componentes para la fabricación del prototipo del sistema interno de refrigeración por compresión de vapor en el mercado local, por un costo total de Q945.35 mediante un adecuado proceso de cotización a dos distintos proveedores locales. El bajo costo no fue el objetivo principal para la selección de los componentes para el prototipo, sino el respaldo y documentación técnica del fabricante, debido a que estos serían utilizados para diseñar un nuevo sistema.
3. Se diseñó un evaporador para una capacidad de enfriamiento de 0.262 kW, la cual fue proporcionada por el fabricante del compresor con base en una temperatura de evaporación de -10°C y condensación de 45°C. El evaporador propuesto tiene una longitud de 4.7 metros en tubería de cobre de 1/4", este puede ser adecuado a cualquier tipo de espacio refrigerado, mediante procedimientos de doblez adecuado.
4. Se seleccionó el refrigerante 1,1,1,2-Tetrafluoroetano (R134a) normado por ASHRAE, debido a que el fabricante lo indica para su compresor, además de ser el refrigerante más utilizado en el mercado doméstico de refrigeración.
5. Se realizó una prueba de presurización con nitrógeno en un periodo de 8 horas, la cual garantiza un sistema cerrado libre de fugas. Además de presurizar el sistema, se realizó un proceso de vacío mediante una bomba de vacío con el fin de eliminar humedad y corroborar la hermeticidad del sistema.
6. Se realizaron pruebas termodinámicas que reflejan el correcto funcionamiento del sistema, se obtuvo un COP real de 1.60, una eficiencia de la segunda ley de termodinámica del 13%, además de obtener un porcentaje de error del 29% en comparación con la capacidad de enfriamiento de diseño propuesta del fabricante.
7. Se realizó una ficha técnica del sistema, la cual expresa la capacidad de enfriamiento, la temperatura de condensación y evaporación, el coeficiente de desempeño, el consumo eléctrico máximo, las dimensiones del condensador y evaporador, las distintas combinaciones de tubos capilares, la capacidad del compresor, temperaturas de trabajo e información sobre los ciclos de ascenso y descenso de la refrigeradora.

8. Se creó un manual del proceso de construcción del sistema de refrigeración interno, el cual explícitamente demuestra los pasos ordenados para que el sistema sea replicado por técnicos de refrigeración o investigadores.

9. Se creó un plan de mitigación de posibles fallas en el proceso de fabricación con el fin de brindar soluciones a problemáticas previamente analizadas, para agilizar el proceso de diseño.

10. El costo de todos los componentes necesarios para replicar 500 sistemas de refrigeración por compresión de vapor adquiridos en un mercado internacional tiene un costo de Q258.56. El costo es tomando en cuenta todos los gastos de importación hacia Guatemala e impuestos.

VII. RECOMENDACIONES

1. Para ajustar los componentes y realizar mejoras al sistema, es importante fijar una temperatura objetivo de diseño menor a 0°C para que el error experimental se reduzca y la temperatura objetivo pueda ser regulada con el termostato.
2. Investigar sobre la influencia que tiene enrollar el tubo capilar en la tubería de salida del evaporador y como esto incluye con el coeficiente de desempeño de la refrigeradora.
3. Si se desea determinar todos los estados del sistema para un análisis de refrigeración real, se debe instalar termopares y válvulas de descarga en cada punto, con el fin de obtener datos de presión y temperatura exactos para definir los estados.
4. De ser posible replicar este sistema en un volumen de producción alto, es recomendable comprar los termostatos con una previa configuración de temperaturas de conexión y desconexión.
5. Cotizar en el extranjero evaporadores ya armados con base en la capacidad de extracción de calor. Esto facilitará el proceso de manufactura y reducirá el tiempo de producción.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- ASHRAE, Inc. 2009. *Refrigerant system chemistry*. Estados Unidos. American Society of Heating. 14 págs.
- ASHRAE, Inc. 2009. *Thermodynamics and refrigeration cycles*. Estados Unidos. American Society of Heating. 20 págs.
- Carreño, Paúl; C. Jadán. 2013. *Estudio del comportamiento termodinámico del refrigerante R-134^a modificando su composición química*. Cuenca Ingeniería Química. 217 págs.
- Embraco. *Capacidad de compresor y tubo capilar*.
<http://www.embraco.com/DesktopModules/DownloadsAdmin/Archivos/3LReD3PsO0.pdf> [4 de agosto del 2017]
- Franco Lijó, Juan Manuel. 2012. *Manual de refrigeración*. 2^a ed. Barcelona: Reverté. 245 págs.
- Honeywell International Inc. 2017. *Properties, uses, storage and handling R134a*. Estados Unidos. Honeywell performance materials and technologies. 13 págs.
- Honeywell International Inc. 2017. *Safety data sheet Genetron R134a*. Estados Unidos. Honeywell performance materials and technologies. 13 págs.
- Ministerio de Agricultura y ganadería. 2011. *Manual de requisitos higiénico sanitario para el diseño de instalaciones, construcción y equipo de un matadero para la especie bovina*. Guatemala. Dirección de inocuidad. 86 págs.
- Ministerio de Agricultura y ganadería. 2017. *Resultado estratégico del país*. Guatemala. Dirección de planeamiento. 74 págs.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. 2008. *Norma Sanitaria para la Autorización y control de fábricas de embutidos y productos cárnicos procesados en general*. Guatemala. Dirección General de Regulación, Vigilancia y Control de la Salud. 22 págs.
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. 2008. *Norma Sanitaria para la Autorización y control de fábricas procesadoras de leche y productos lácteos*. Guatemala. Dirección General de Regulación, Vigilancia y Control de la Salud. 24 págs.
- Rivas, Vanesa. *Venta de refrigeradora usada en Guatemala*. <http://blog.tuanunciosgratis.com> [3 de agosto del 2017]

IX. ANEXOS

Figura 68. Ficha técnica del sistema.

ECOFRIGO

Especificaciones técnicas

Compresor

Marca de compresor: Embraco

Modelo: EMI45HER

Origen: brasileño

Refrigerante: R134a

Capacidad: 1/8 hp

Voltaje: 115-127 V, Frecuencia: 60 hz

Consumo eléctrico: 0.117 kW

Lubricante: ISO22

Capacidad máxima de enfriamiento del compresor: 0.262 kW



Espacio refrigerado

Capacidad ideal de enfriamiento: 0.187 kW

COPR: 1.60

Temperatura mínima en espacio refrigerado: 5.25°C

Temperatura máxima en espacio refrigerado: 12°C

Capacidad de almacenamiento: 220 litros

Datos para ingenieros

Salto térmico en evaporador: 10°C

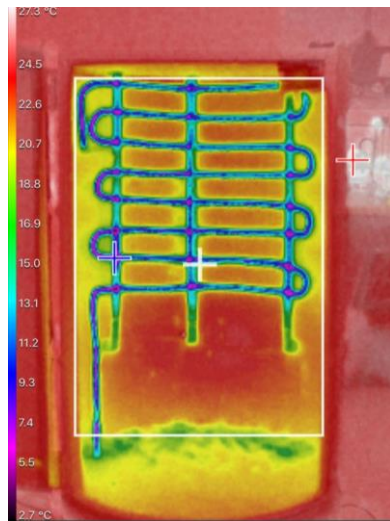
Salto térmico en condensador: 15°C

Presión de trabajo en baja presión: 0.0117 Mpa

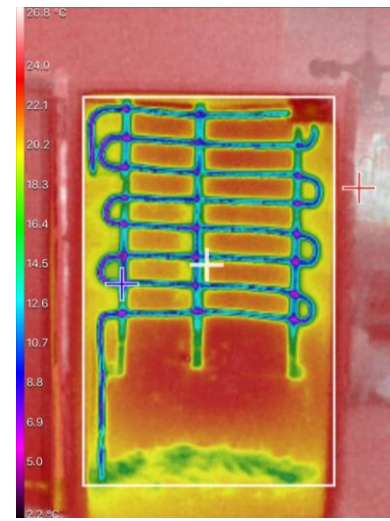
(Figura propia, 2017)

Cuadro 36. Pruebas termográficas a evaporador.

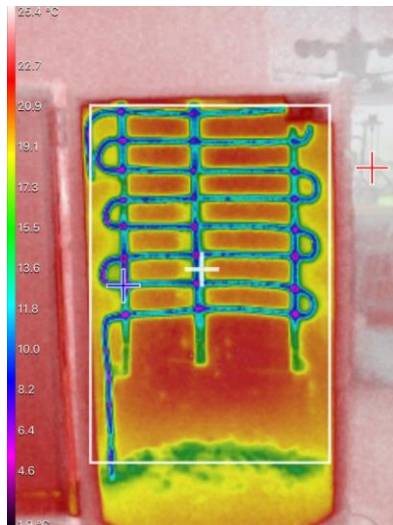
Prueba termográfica después de 5 minutos con
temperatura promedio de 21°C



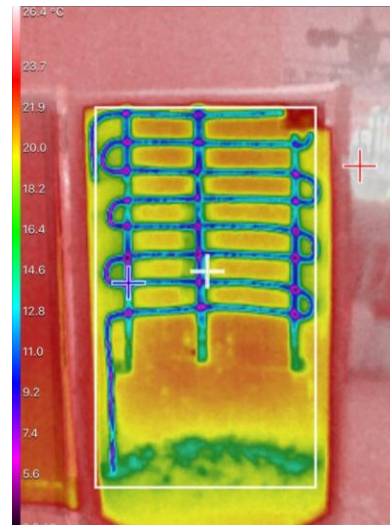
Prueba termográfica después de 10 minutos con
temperatura promedio de 18°C



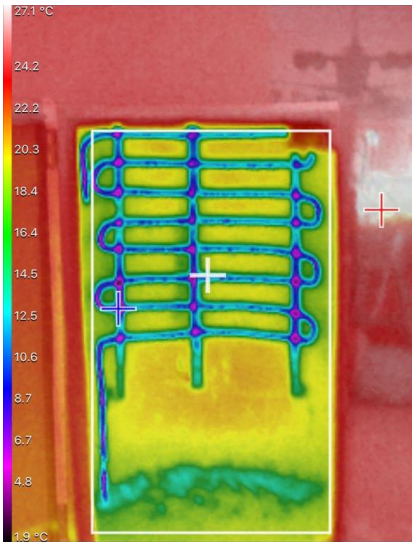
Prueba termográfica después de 15 minutos con
temperatura promedio de 14°C



Prueba termográfica después de 20 minutos con
temperatura promedio de 10°C



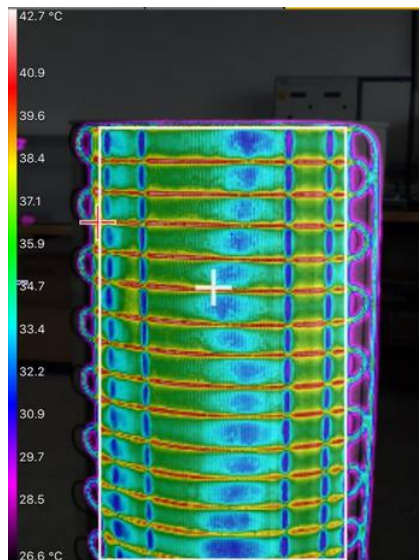
Prueba termográfica después de 25 minutos con
temperatura promedio de 8°C



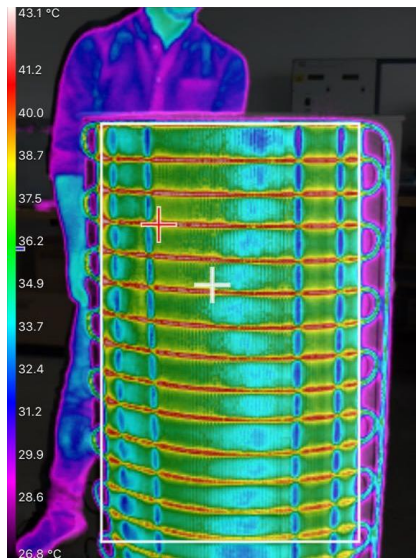
(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 37. Pruebas termográficas al condensador.

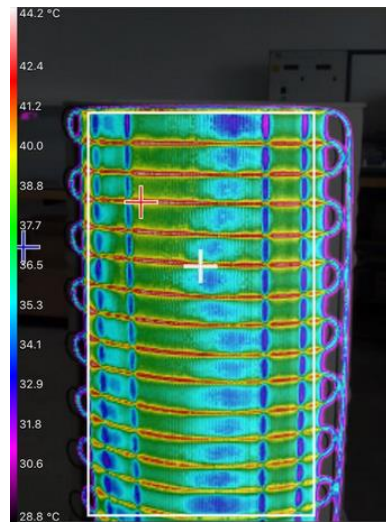
Prueba termográfica después de 5 minutos con
temperatura promedio de 32°C



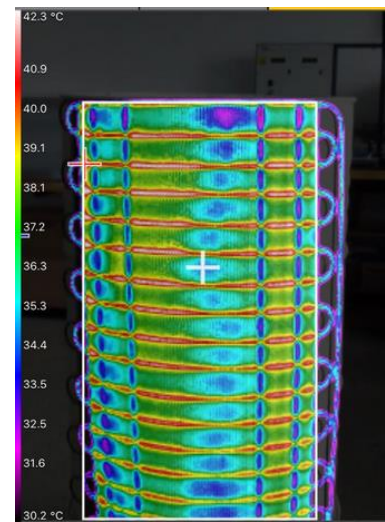
Prueba termográfica después de 10 minutos con
temperatura promedio de 35°C



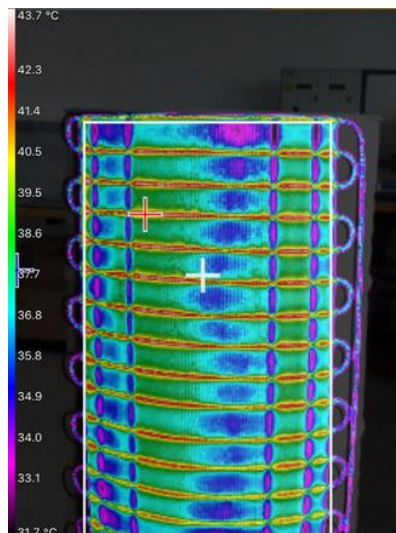
Prueba termográfica después de 15 minutos con
temperatura promedio de 37°C



Prueba termográfica después de 20 minutos con
temperatura promedio de 39°C



Prueba termográfica después de 25 minutos con
temperatura promedio de 41°C




(Cuadro propio, 2017)

Cuadro 38. Proceso de fabricación del sistema interno por compresión de vapor.

Paso	Descripción	Figuras de referencia
1	Cortar la tubería de cobre de 1/4" a 4.7 metros y doblar con un doblador de tubos, la configuración se hace dependiendo el área disponible en el espacio refrigerado.	25, 26 y 27
2	El condensador comprado es más grande de lo necesario. Para ajustarlo es necesario cortar las varillas a 0.98 metros y con ayuda de una cinta métrica medir 12.74 metros y cortar.	28 y 29
3	Recuerde maniobrar el tubo capilar con cuidado, ingrese un extremo en la entrada del evaporador y el otro extremo en la salida del filtro deshidratante. Con ayuda de un alicate doble el tubo de cobre de manera que quede sujeto para posteriormente soldar.	30,31 y 32
4	Realice abocardados en todas las uniones de tubería que tengan el mismo diámetro, con el fin de ingresar un tubo dentro del otro para soldarlo adecuadamente. Recuerde que la parte abocardada va en la tubería hacia la que se dirige el refrigerante.	33,34 y 35
6	Para soldar la tubería en el compresor recuerde que la salida del evaporador debe ir soldada en tubo opuesto a los circuitos eléctricos.	36 y 37
7	La válvula de carga debe ir soldada en la parte superior de los circuitos, en esta no se formará condensado.	37
8	Para soldar el condensador con la salida del compresor y con el filtro deshidratante, debe utilizar fundente en abundancia, debido a que la tubería es de cobre y el condensador hierro negro. Es importante una inspección visual posterior a soldar.	38 y 39
9	Presurice el sistema con nitrógeno a 100 psi, haga revisiones continuas por un lapso de 8 horas para determinar que no haya fugas en el sistema. Si ve que la presión baja, será necesario buscar la fuga en el sistema.	40, 41, 42 y 43
10	Realice un vacío del sistema durante 4 horas, mediante el uso de una bomba de vacío. Esto ayudará a sacar toda la humedad del sistema, además de los residuos de nitrógeno.	44
11	Conecte los manómetros y cargue refrigerante R134a al sistema hasta encontrar con ayuda de un amperímetro de gancho, una corriente estable de operación de 1.49 Amperios.	45 y 46

(Cuadro propio, 2017)


Figura 69. Cotización de Congelsa.

 VENTA DE EQUIPOS Y REFRIGERANTES AIRE ACONDICIONADO, REFRIGERACION, PARA REFRIGERACION INDUSTRIAL CONGELSA		COTIZACIÓN No. 16725	
3 CALLE 12-13 ZONA 11 COL. ROOSEVELT TELEFAX (PBX): (502) 2440-8150		Guatemala, 21 de SEPTIEMBRE de 2017	
CODIGO	NIT	FORMA DE PAGO	
3826	1751758-3	CONTADO	
NOMBRE CLIENTE		TELS	
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA		2364-0336 AL 40//5966-1833	
DIRECCIÓN	ATENCIÓN	LUGAR DE ENTREGA	
11 CALLE 15-79 ZONA 15 VISTA HERMOSA III	LUIS ALFONSO MARTINEZ	11 CALLE 15-79 ZONA 15 VISTA HERMOSA III	

CODIGO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO NETO U	SUB TOTAL
EMI45HER-SF	20	COMPRESOR EMBRACO R-134 1/8 EMI45HER-SF DOMEST	537.00	10.740.00
QE60L2BW	20	COMPRESOR QE60L2BW MABE 1/8 HP REFRIGERANTE R 134	299.00	5.980.00
CP031	20	CAPILAR 0.31 10 PIES	18.00	360.00
CSREMB002	20	CONDENSADOR 200D5028P002/WR01F02078 PERSEUS	276.00	5.520.00
F134T	20	LATA DE FREON R-134 AMUCOOL PINCHAR	26.00	520.00
TERADW003	20	CONTROL TERADW003 AMBIENTAL DE REFRIGERADORA	35.00	700.00
VPA10	20	VALVULA PINCH 1/4 SOLD	4.00	80.00
FSP15G	20	FILTRO SOLDABLE PEQUEÑO GIGANTE 15 GRAMOS	8.00	160.00
TR20	20	TUBO FLEXIBLE COBRE 1/4 ROLLO 50'	123.00	2.460.00

Validación de la Cotización hasta	24/09/2017	TOTAL Q.	26.520.00
--	------------	-----------------	-----------

Observaciones:


 JORGE BOCHANTIN
 VENDEDOR

CLIENTE

NOTA: Precios pueden variar sin previo aviso. Sujeto a existencia al momento de la compra.

(Congelsa, 2017)