

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de ingeniería



DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN ESPACIO REFRIGERADO DE
UNA REFRIGERADORA PARA USO DOMÉSTICO

Trabajo de graduación en modalidad de proyecto de graduación
presentado por

Enrique Alberto Juárez Sieckavizza

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2017

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN ESPACIO REFRIGERADO DE
UNA REFRIGERADORA PARA USO DOMÉSTICO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de ingeniería



DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN ESPACIO REFRIGERADO DE
UNA REFRIGERADORA PARA USO DOMÉSTICO

Trabajo de graduación en modalidad de proyecto de graduación
presentado por

Enrique Alberto Juárez Sieckavizza

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala

2017

Vo. Bo. :

(f)



Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Tribunal Examinador:

(f)



Ing. Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(f)



Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f)



Ing. Raúl Eduardo Loarca Velásquez

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2017

PREFACIO

En el trabajo de graduación titulado “Diseño y Análisis de un Espacio Refrigerado de una Refrigeradora para uso Doméstico” se busca iniciar una cultura de innovación para el desarrollo en cuanto al proceso de preservación de alimentos mediante procesos de refrigeración. El campo de refrigeración para la conservación de alimentos ha sido un tema de alta importancia a nivel mundial y ha sido la razón para el inicio de este proyecto. El desarrollo de nuevas alternativas, especialmente de bajo costo, al uso de refrigeradoras convencionales en los últimos años ha venido en ascenso por lo que para la Universidad del Valle de Guatemala es de alto valor iniciar este proyecto.

Dado que este proyecto busca dar una solución distinta a las refrigeradoras tradicionales se contó con una principal limitante: el costo debe de ser menor a US \$50.00. Por lo que se tuvo que buscar distintas alternativas para la estructura y aislantes térmicos. Luego de analizar las alternativas para la estructura de la refrigeradora se concluyó que la mejor opción para este proyecto es el de un tonel de procedencia reciclada, el cual luego de una serie de modificaciones pudo ser adaptado a la necesidad que se tenía. Para el aislante se utilizó un material reciclable, el poliestireno expandido debido a su buen desempeño para aislar la temperatura interna y precio accesible. Junto con los aspectos explicados con anterioridad se suma la utilización de materiales comunes para complementar el diseño y hacer que el espacio refrigerado logre su objetivo de mantener la temperatura interna para la preservación de alimentos adentro del mismo.

Agradezco primeramente a mi familia ya que, sin el apoyo, cuidado y enseñanza de ellos no sería la persona que hoy en día soy. También quiero agradecer al apoyo de mi asesor, Ing. Andrés Viau, quién me ha dado su apoyo y tiempo para lograr concluir mi trabajo de graduación exitosamente.

ÍNDICE

	Página
Lista de cuadros	ix
Lista de figuras	x
Resumen	xii
I. Introducción	1
II. Objetivos	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos	3
III. Justificación.....	4
IV. Marco teórico	5
V. Metodología y resultados	20
A. CONCEPTO Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA	20
B. DISEÑO PRELIMINAR Y COMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA.....	22
1. Definición de requerimientos..	22
2. Cronograma.	24
3. Definición de criterios de evaluación de éxito.....	24
4. Definición de plan de mitigación de riesgos.....	25
5. Trade study.....	26
C. DISEÑO Y FABRICACIÓN.....	29
1. Definición de diseño del prototipo..	29
2. Selección de aislante.....	36
3. Análisis de cargas.	39
4. Costo del proyecto.....	43
D. ENSAMBLAJE DEL SISTEMA, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS	44

1.	Acople a sistema de refrigeración por compresión de vapor.....	44
2.	Pruebas y correcciones.....	46
E.	OPERACIÓN Y SOSTENIMIENTO.....	51
VI.	Conclusiones.....	52
VII.	Recomendaciones.....	53
VIII.	Bibliografía.....	54
IX.	Anexos.....	55
A.	PLANOS.....	55
B.	PRUEBAS TERMOGRÁFICAS.....	58
C.	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	62
D.	CORRECTO USO DEL REFRIGERADOR.....	67

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Propiedades térmicas de materiales reciclables.....	12
Cuadro 2. Propiedades térmicas de los alimentos.....	16
Cuadro 3. Calor de respiración de alimentos.	17
Cuadro 4. Requerimientos del proyecto.....	22
Cuadro 5. Criterios de evaluación de éxito.....	24
Cuadro 6. Plan de mitigación de riesgos.....	26
Cuadro 7. Trade Study.....	28
Cuadro 8. Temperaturas teóricas	37
Cuadro 9. Medidas tonel Norma UNE-EN 12711:2001 y medidas del aislante.....	37
Cuadro 10. Áreas superficiales	37
Cuadro 11. Valores de resistencia por material.	38
Cuadro 12. Datos importantes para carga por transmisión en paredes del refrigerador.....	39
Cuadro 13. Datos para obtener la carga del producto.	41
Cuadro 14. Cargas de refrigeración de alimentos.	41
Cuadro 15. Información ingresada a Heatcraft Proselect.....	42
Cuadro 16. Costos del proyecto.....	43
Cuadro 17. Resultados prueba termográfica en el exterior del refrigerador mientras se enfriaba el espacio refrigerado.....	48
Cuadro 18. Tiempos promedio de ascenso y descenso de temperatura.	51
Cuadro 19. Pruebas termográficas en el exterior durante enfriamiento.	58
Cuadro 21. Proceso de manufactura del espacio refrigerado.	62
Cuadro 22. Cuidado para un correcto funcionamiento de un refrigerador.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Colocación en serie de distintos materiales.	10
Figura 2. Fibra de vidrio.	11
Figura 3. Espuma de poliestireno expandido.	11
Figura 4. Polvo de perlita.....	12
Figura 5.Heatcraft Software.....	19
Figura 6. Cronograma.	24
Figura 7. Propuesta A del refrigerador.	27
Figura 8. Propuesta B del refrigerador.....	27
Figura 9. Prototipo C del refrigerador.....	28
Figura 10. Base del refrigerador.	30
Figura 11. Medidas de la base del refrigerador.....	30
Figura 12. Tonel Norma UNE-EN 12711:2001 utilizado.....	31
Figura 13. Diseño y corte realizado al tonel	31
Figura 14. Proceso de corte del tonel de acuerdo con Medidas	32
Figura 15. Tratamiento anticorrosivo aplicado.	32
Figura 16. Cortes realizados al tonel.....	33
Figura 17. Soldadura de hembra en los marcos de la puerta y de la base del refrigerador.	33
Figura 18. Soldadura de bisagra para unir los dos elementos.	34
Figura 19. Angular con cortes doblado.....	34
Figura 20. Soldadura de los soportes.	35
Figura 21. Base finalizada con ejemplo de posición del compresor.	35
Figura 22. Colocación de empaque del refrigerador.....	36
Figura 23. Sistema de aseguramiento de cierre hermético.....	36
Figura 24. Modificación del poliestireno expandido.	38
Figura 25. Aislante en el interior del refrigerador.	39
Figura 26. Interfaz de carga por infiltraciones de aire en Heatcraft Proselect Software	42
Figura 27. Instalación del tubo capilar y evaporador en el espacio refrigerado.....	44
Figura 28. Instalación del condensador.	45
Figura 29. Instalación del compresor y sistema eléctrico.	46
Figura 30. Diseño final del refrigerador.	46

Figura 31. Antes y después del cierre del prototipo.....	47
Figura 32. Análisis termográfico.	48
Figura 33. Análisis termográfico en el interior del refrigerador luego de la desconexión del sistema. ...	49
Figura 34. Descenso de la temperatura en °C en el eje y contra el tiempo en segundos en el eje x.	50
Figura 35. Ascenso de temperatura en °C en el eje y contra el tiempo en segundos en el eje x.....	50
Figura 36. Filtraciones de aire debido a imperfecciones en la instalación del empaque.	51
Figura 37. ECOFRIGO.	55
Figura 38. Base del refrigerador.	56
Figura 39. Tonel.	56
Figura 40. Puerta.....	57
Figura 41. Aislante.....	57
Figura 42. Aislante superior e inferior.	58

RESUMEN

El trabajo de graduación “Diseño y Análisis de un Espacio Refrigerado de una Refrigeradora para uso Doméstico” tiene como objetivo principal el manufacturar el espacio refrigerado del prototipo de un refrigerador de uso doméstico de bajo costo. Para alcanzar este objetivo se trabajó con base en la teoría de Systems Engineering propuesto por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del espacio (NASA por sus siglas en inglés). Una de las restricciones más importantes para este proyecto es el costo, ya que el espacio refrigerado no podía superar los US \$50.00, por lo que se tuvieron que buscar materiales no tradicionales para su uso en un refrigerador.

El diseño del refrigerador fue obtenido mediante un análisis de distintas opciones de refrigerador creados por el estudiante, en donde se analizaron distintas categorías en cada uno de los posibles diseños y el prototipo que cumplió con la mayoría de estas fue el manufacturado. Para la elección de materiales se realizó una lluvia de ideas y se fueron incluyendo o descartando mediante sus posibilidades de contribuir a la refrigeradora ideada.

Uno de los aspectos más importantes para la creación de un espacio refrigerado es su capacidad de mantener estable la temperatura interna del mismo y esto es gracias al aislante térmico que este debe de tener. Para seleccionar el aislante más adecuado para el diseño se tomaron en cuenta distintos materiales, a los cuales se les realizó un análisis de transferencia de calor. De acuerdo con los resultados mostrados el aislante más capaz y económico fue el poliestireno expandido. La estructura de la refrigeradora está basada en un tonel reciclado, el cual luego de ser limpiado correctamente y modificado pudo ser adaptado para ser el componente principal del diseño.

Finalmente, los costos del proyecto fueron de Q 390.00 cumpliendo así con el objetivo principal de construir el espacio refrigerado de un prototipo de una refrigeradora para uso doméstico de bajo costo. Cabe mencionar que para la producción del diseño propuesto muchos costos cambiarían al tener que conseguirse los materiales al por mayor provocando que el costo sea aún menor.

I. INTRODUCCIÓN

En el trabajo de graduación denominado “Diseño y Análisis de un Espacio Refrigerado de una Refrigeradora para uso Doméstico” se propuso el objetivo de crear un prototipo de un espacio refrigerado con un costo máximo de US \$50.00. El realizar un prototipo de un refrigerador de bajo costo es un proyecto innovador en Guatemala dado que puede brindar de soluciones distintas y económicas a personas de bajos recursos para mantener sus alimentos en condiciones adecuadas para su consumo.

La metodología seguida en el trabajo fue basada en la teoría de *Systems Engineering* propuesto por NASA. Dicho proceso se caracteriza por manejar distintas fases en donde el encargado del proyecto debe de ir presentando documentos o diseños que poco a poco se van uniendo y relacionado para cumplir el objetivo principal. Las fases del proyecto son: Concepto y desarrollo de tecnología; diseño preliminar y complementación de tecnología; diseño y fabricación, ensamblaje del sistema, integración y pruebas; y operación y sostenimiento.

En la primera fase se creó una lluvia de ideas de lo que se quiere realizar y cumplir en el trabajo de graduación. Esta fase es la línea base de lo que será el proyecto, por lo tanto, el realizarla correctamente es clave para que el trabajo sea realizado ordenadamente. La segunda fase consistió en concretar todas las ideas creadas en el paso anterior y se definió un cronograma para una mejor organización. En el segundo paso se desarrollaron los distintos posibles diseños del refrigerador de bajo costo y se escogió el que tenía más potencial de cumplir los requerimientos ideados a partir de un *trade study*.

A partir de la tercera fase se desarrolló el diseño final del refrigerador que fue seleccionado en la Fase B y el cual está basado en la reutilización de un tonel norma UNE-EN 12711:2001. Se realizó un análisis de selección del mejor aislante relacionando su baja capacidad de transferencia de calor y precio; obteniendo como aislante seleccionado el poliestireno expandido. Teniendo las medidas y características principales del prototipo y aislante, se calcularon las distintas cargas que existen en el refrigerador, tomando en cuenta que la temperatura de diseño del espacio refrigerado debía de ser de 4°C. Las cargas de refrigeración son de suma importancia dado que a partir de estas se debe de diseñar un sistema de refrigeración que pueda cumplir con dichas demandas. El resultado de las cargas de refrigeración fue 162.84 W. Se finalizó esta fase con el prototipo del espacio refrigerado creado para ser ensamblado con el sistema de refrigeración por compresión de vapor en la siguiente etapa.

Con el prototipo manufacturado se procedió a unirlo con el sistema de refrigeración creado en el trabajo de graduación denominado “Fabricación de un prototipo de bajo costo de un sistema de refrigeración por compresión de vapor” realizado por Luis Martínez. Luego, se realizaron pruebas termográficas y análisis de

cómo desciende y asciende la temperatura con el tiempo. El resultado de las pruebas demuestra que en un día el sistema de refrigeración se activará aproximadamente 65 veces y que la temperatura alcanzada es de 5°C. De la misma manera, las pruebas demuestran que en ciertos puntos existe una transferencia de calor hacia el sistema considerable por lo que se debe de analizar la posibilidad de utilizar un aislante con un grosor mayor a media pulgada.

La metodología concluye con el funcionamiento correcto y con las modificaciones realizadas en el refrigerador denominado ECOFRIGO17. Se concluye con el cumplimiento del objetivo principal dado que se alcanzó un costo de Q 390.00 lo cual, con un tipo de cambio de 7.8, es igual a US \$50.0. Así mismo se desarrolla un manual de creación del espacio refrigerado en 15 pasos y con recomendaciones para el correcto uso del refrigerador.

II. OBJETIVOS

A.OBJETIVO GENERAL

- Manufacturar el espacio refrigerado del prototipo de un refrigerador de uso doméstico de bajo costo.

B.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el espacio refrigerado frío del prototipo de una refrigeradora.
- Determinar el mejor material de aislamiento dependiendo de sus propiedades térmicas y disponibilidad en Guatemala.
- Adquirir al menor costo los materiales necesarios para la manufactura del espacio refrigerado de un refrigerador, en el mercado local.
- Manufacturar el prototipo del espacio refrigerado con un costo menor de US\$ 50.00.
- Crear un manual del proceso de construcción de la refrigeradora.
- Crear un manual del correcto uso de la refrigeradora que sea intuitivo para el usuario y para el mejor desempeño del sistema.

III. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, el uso de la refrigeración de alimentos se ha convertido en una herramienta de gran valor para los seres humanos, para cuidar de su salud y tener una mejor alimentación; sin embargo, el alto costo de los equipos de refrigeración impide a muchas familias poder mantener sus alimentos y/o medicinas en buenas condiciones. Dada esta necesidad, se propone diseñar un prototipo de refrigeradora que sea económica de adquirir y con bajas pérdidas de calor, para cubrir las necesidades de los futuros usuarios a los que va dirigido este proyecto.

Actualmente existen distintos diseños de refrigeradoras económicas, sin embargo, los prototipos funcionan con la teoría de refrigeración por evaporación. Por lo que se propone desarrollar un prototipo de un refrigerador por compresión de vapor económico ya que no existe en el mercado un sistema de este tipo.

La eficiencia de un sistema de refrigeración es de suma importancia, dado que es la encargada de indicar de qué manera se está desempeñando la refrigeradora. Por lo que si se está consumiendo una gran cantidad de energía y no existe una temperatura óptima se tiene una eficiencia muy baja y provoca altos gastos por el consumo eléctrico.

Para controlar la eficiencia existen muchas variantes en el diseño e inclusive del uso de la refrigeradora. Un ejemplo de la variante del diseño es el material que aislará el espacio refrigerado. Esto es debido a que, mientras más hermético es el sistema, menores serán las pérdidas de calor del mismo y mejor será la eficiencia. La segunda variante es la manera en la cual se utiliza la refrigeradora, por ejemplo, la cantidad de veces que se abre y cierra la refrigeradora en un día. Para controlar la segunda variante, dado que esta va más allá del alcance del diseñador del sistema, se realizará un instructivo que ilustre y explique el correcto uso de una refrigeradora junto con sus respectivas justificaciones técnicas.

Finalmente, el controlar la mayoría de las variantes que abarca diseño térmico y estructural de una refrigeradora puede resultar en que la refrigeradora sea una opción económica y funcional para muchas familias en distintas comunidades del país.

IV. MARCO TEÓRICO

A. ENERGÍA TÉRMICA

Para lograr comprender el significado de “eficiencia térmica” es oportuno empezar desde las bases de este término. La energía es la base de cualquier análisis físico que se quiera realizar a cualquier sistema o, en este caso, para realizar análisis térmicos en un sistema de refrigeración. La energía puede existir en distintas formas y en el módulo se hará mayor énfasis en la energía térmica.

De acuerdo con C.W. Chan en *Applied Thermal Engineering*, la energía total E de un sistema se ve conformado por la suma de los distintos tipos de energía que conforman el mismo y es denotado por unidad de masa mediante la letra e y es expresada como:

Ecuación 1: Energía por unidad de masa.

$$e = \frac{E}{m} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$$

Donde:

e: energía por unidad de masa

E: sumatoria de energía interna, potencial, eléctrica, cinética y de tensión superficial.

m: masa

Continuando, E es la suma de todos los tipos de energía que existe, las cuales pueden ser: Cinética, potencial, eléctrica, magnética, de tensión superficial y térmica. Sin embargo, en este apartado se abarcará únicamente la energía térmica dado que es la que influye en la transferencia de calor. La energía térmica puede ser transferida de un sistema a otro debido a las diferencias de temperaturas que estas tienen. Un claro ejemplo de la manera en la cual se transfiere la energía térmica de un sistema a otro es cuando se coloca un vaso con agua fría en una mesa; dentro de cierto tiempo el agua se calentará hasta llegar a la misma temperatura del ambiente provocado por la transferencia de calor, tema que más adelante será explicado. (Chan, 2013)

“El calor es energía en transición y se reconoce sólo cuando cruza la frontera de un sistema” relata Frank Kreith. En el ejemplo anterior, la superficie interna del vaso funciona como frontera ya que contiene el agua. Por lo tanto, la energía térmica del ambiente es transferida hacia el vaso para calentar el agua. El calor, al ser energía, se mide en kilojoules para el sistema internacional y en BTU para el sistema inglés. Cuando se refiere

a adición de calor es cuando se transfiere calor hacia un sistema y cuando se refieren a la transferencia de calor hacia afuera de un sistema es rechazo de calor. (Kreith, 2012)

La letra Q es la cantidad de calor transferido durante un proceso. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama razón de transferencia de calor y se representa con \dot{Q} . En la siguiente ecuación se puede observar el calor q por unidad de masa. (Kreith, 2012)

Ecuación 2: Calor por unidad de masa

$$q = \frac{Q}{m} \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

Donde:

q : Es calor por unidad de masa.

Q: Es energía térmica.

m: es masa.

B. PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

La primera ley de la termodinámica es también conocida como el principio de conservación de energía, es otra de las bases para comprender el análisis de un refrigerador y su eficiencia al trabajar. Esta ley explica las relaciones entre los tipos de energía explicados en el capítulo anterior y que la energía solo puede transformarse de un tipo de energía a otro, pero no rige la dirección en la cual suceden estos cambios. (Kreith, 2012)

Continuando con el ejemplo del vaso de agua fría y relacionándolo con este principio. El agua poco a poco aumentará su energía debido a la transferencia de calor. Si se ignora cualquier transferencia de masa cómo la evaporación del agua, el incremento de la energía total del agua es igual a la cantidad de transferencia de calor, cumpliendo así, con el principio de conservación de energía.

Basándose en este principio se realizan muchos de los procesos de transferencia de calor debido al intercambio y/o conversión de la energía indica Frank Kreith en su libro denominado *Principios de transferencia de calor*. Sin embargo, no hay que confundir que los principios de la transferencia de calor se obtienen a partir del principio de la conservación de la energía y demás leyes de la termodinámica dado que estas leyes se rigen únicamente para el análisis de los estados de equilibrio de los sistemas. La razón por la cual no se pueden mezclar las leyes termodinámicas con la transferencia de calor es que el calor es un resultado de desequilibrio de temperaturas. (Kreith, 2012)

En el caso de un refrigerador, hay que tomar en cuenta siempre el análisis termodinámico y su relación con sus principios y también hay que analizar el tema de transferencia de calor, tema que en el párrafo anterior se explicó por qué no abarcan los mismos análisis. A continuación, se explicará la relación que estas dos ciencias tienen en común.

C. RELACIÓN TERMODINÁMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Cómo se explicó con anterioridad, termodinámica y transferencia de calor no son lo mismo; sin embargo, es importante mencionar cómo estas dos ramas se apoyan entre sí y cómo serán utilizadas en el análisis y diseño de un refrigerador. Kreith indica que todos los procesos de transferencia de calor comprenden el intercambio de la energía e inclusive toman en cuenta la conversión de la misma, obedeciendo a la primera ley de la termodinámica. En otras palabras, la transferencia de calor inicia sus análisis con las bases de los estados de un sistema o varios sistemas. Sin embargo, esta es la única relación que se maneja y, por ende, todo el análisis posterior ya es totalmente de esta rama. (Kreith, 2012)

Relacionando lo anterior con el análisis de un sistema de refrigeración cómo es ECOFRIGO 17, la cantidad de calor transferido durante un proceso simplemente es igual a la diferencia entre el cambio de energía del sistema y el trabajo realizado. Sin embargo, este tipo de análisis no son considerados en la resolución mediante transferencia de calor ya que no se considera el flujo de calor ni el tiempo que se invierte en dicha transferencia. Para poder analizarlo mediante la transferencia de calor se deben tomar en cuenta las variables mencionadas con anterioridad y dichas maneras de analizar la transferencia de calor son explicados en el siguiente capítulo.

D. TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres tipos de transferencia de calor, por conducción, radiación y convección. Es importante explicar cada una de ellas ya que de estas dependen los análisis de los distintos sistemas en donde el calor se mueve de un sistema a otro. De acuerdo con Frank Kreith realmente, de los tres tipos de transferencia de calor, solo dos pueden clasificarse cómo tales. Dichos tipos son conducción y radiación; el autor lo menciona debido a que solo estos dependen de un gradiente de temperaturas para existir. En cambio, convección, necesita de una operación extra, la cual es de transporte mecánico de masa. (Kreith, 2012)

El primer tipo de transferencia de calor a explicar es el de conducción. Este tipo de transferencia de calor sucede en líquidos, sólidos o gases. La razón por la cual existe transferencia de calor en los sólidos (caso de un refrigerador) es por el gradiente de temperatura y el calor fluirá del medio de mayor temperatura a la de menor. La rapidez del flujo de calor está totalmente ligado al gradiente de temperatura y a la geometría que tiene el medio, es decir, el área que tiene que “pasar” el calor, el espesor y el material del medio. Por lo tanto, la razón de la transferencia de calor es la siguiente:

Ecuación 3: Transferencia de calor por conducción

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \text{ (W o BTU/h)}$$

Donde:

Q_{cond} : Es la razón de conducción de calor.

k : es la constante de conductividad térmica del material.

T_1 y T_2 : Son el gradiente de temperatura que permite la transferencia de calor.

Δx : es el espesor del material.

El segundo tipo de transferencia de calor es por radiación. Este tipo es energía emitida en forma de ondas electromagnéticas. La radiación no necesita de estar en contacto con algún material para que el calor pueda fluir a comparación de la conducción. La radiación depende de la temperatura del sistema y del comportamiento del material en su superficie. La siguiente ecuación representa la tasa de transferencia de calor.

Ecuación 4: Transferencia de calor por radiación.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{alrededores}^4) \text{ (W o BTU/h)}$$

Donde:

ε : Es la emisividad del material.

σ : Es la constante de Stefan-Boltzmann.

A_S : Es el área superficial del cuerpo.

T_S : Temperatura superficial en Kelvin o Rankine.

$T_{Alrededores}$: Temperatura ambiente en Kelvin o Rankine.

La emisividad es un valor que está entre 0 y 1 y que representa que tan cerca está una superficie a ser considerada un *cuerpo negro*. Un *cuerpo negro* es considerado un radiador de calor perfecto. Por lo tanto, la emisividad es un valor que depende del material superficial. En el caso del refrigerador ECOFRIGO 17, su material superficial es aluminio y su emisividad es de 0.07. Así mismo, la constante de Stefan-Boltzmann es un valor igual a $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ para el sistema internacional, y para el sistema inglés $\sigma = 0.1714 \times 10^{-8} \text{ BTU/h ft}^2 \text{ R}^4$. (Kreith, 2012)

El tercer tipo de transferencia de calor es por convección. Existen dos tipos de convección, la forzada y la natural. El caso que nos interesa es la convección natural debido a que el fluido que existe alrededor y

adentro de la refrigeradora no es forzado a fluir por algún medio mecánico. En este caso, la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y la siguiente ecuación lo representa.

Ecuación 5: Transferencia de calor por convección.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_S(T_S - T_{\infty}) \text{ (W o BTU/h)}$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : Es tasa de transferencia de calor por convección.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

A_S : Área superficial donde sucede la convección.

T_S : Temperatura superficial

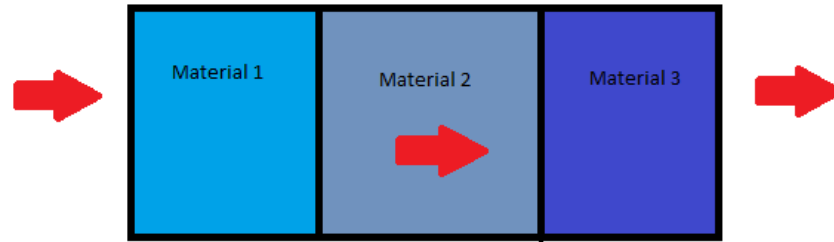
Estos tres tipos de transferencia de calor son los que interesan para el análisis de un refrigerador debido a que no existe un medio mecánico cercano al funcionamiento del refrigerador para hacer circular el aire y para que este pueda tener convección forzada.

E. RESISTENCIA TÉRMICA

El aislamiento de un refrigerador cómo es ECOFRIGO 17 es crítico para el correcto funcionamiento. Para poder analizarlo debe de saberse cómo distintas capas de materiales colocadas en serie pueden disminuir la transferencia de calor del ambiente hacia la refrigeradora. Cómo se ha explicado con anterioridad la transferencia de calor existe desde el ambiente o sistema con mayor temperatura hacia el de temperatura menor. El permitir que exista un alto índice de calor transferido hacia el espacio acondicionado de un refrigerador provoca que el sistema de refrigeración deba de trabajar más para eliminar el calor adentro del espacio para mantenerlo en una temperatura deseada.

Para poder analizar el aislamiento térmico en un sistema, este debe de considerarse cómo una serie de resistencias que impiden el paso del calor de un lugar a otro. En el caso de la refrigeradora, los aislamientos irán colocados en serie y a continuación se explicará cómo se pueden analizar este tipo de sistemas acomodados con sus respectivos aislamientos térmicos.

Figura 1. Colocación en serie de distintos materiales.



Fuente: Diseño propio.

Ecuación 6: Resistencia térmica por material.

$$R_n = \frac{L_n}{K_n A}$$

Donde:

R_n : Resistencia térmica

L_n : Largo del material.

K_n : Constante de conductividad térmica.

A : Área del material.

La ecuación 6 representa la interpretación de un material en serie cómo una resistencia que se opone al flujo de calor. La siguiente ecuación sirve para encontrar el flujo de calor que existe en una combinación de dos o más resistencias térmica.

Ecuación 7: N capas de aislamiento en serie.

$$q_k = \frac{T_1 - T_{N-1}}{\sum_{n=1}^N \left(\frac{L}{kA} \right)} \text{ (W o BTU/h)}$$

Donde:

q_k : Es la transferencia de calor por conducción.

T_1 : Es la temperatura 1.

T_{N-1} : Es la temperatura después de la última capa de aislamiento.

Como se puede observar en la ecuación 7, entre más capas de aislantes existan y estas sean de un grosor bastante considerable, menor será la tasa de transferencia de calor que exista por conducción. En el caso de las refrigeradoras, se utiliza un aislante especial con un ancho considerablemente pequeño, pero por la constante de conductividad térmica del aislante, este ayuda a compensar su finalidad de aislar correctamente.

F. TIPOS DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS

El objetivo de los aislamientos térmicos es el de minimizar el flujo de calor de un lado a otro. Una característica principal de los aislantes térmicos es que deben tener una conductividad térmica baja. Los aislantes térmicos se pueden reducir a tres categorías. A continuación, se explica cada una de las categorías.

El primer grupo de aislantes son los fibrosos y se caracterizan principalmente porque consisten en filamentos de baja densidad y de pequeño diámetro que se pueden insertar en un espacio vacío. Un claro ejemplo de los fibrosos es la fibra de vidrio que es comúnmente utilizado a temperaturas menores a 700 °C. (Kreith, 2012)

Figura 2. Fibra de vidrio.



Fuente: (Google images, 2017)

El segundo grupo es el celular y este tiene como características principales que son, en su mayoría tableros flexibles o rígidos. Este tiene la capacidad de ser rociado en una superficie y cubrirla sin importar la forma que esta tenga. El aislamiento tiene una baja densidad y una buena resistencia a la compresión. Un claro ejemplo es la espuma de poliestireno expandido (ver Figura 3).

Figura 3. Espuma de poliestireno expandido.



Fuente: (Google images, 2017)

El último grupo es el granular, el cual consiste en hojuelas pequeñas de materiales inorgánicos agrupados en formas prefabricadas. Un ejemplo de este tipo de aislante es el polvo de perlita (ver imagen 4). (Kreith, 2012)

Figura 4. Polvo de perlita.



Fuente: (Google images, 2017)

G. AISLAMIENTOS TÉRMICOS RENOVABLES

Hoy en día la utilización de materiales reciclables como aislamientos térmicos se ha vuelto más común. Debido a que ECOFRIGO 17 es un proyecto pensado para personas de escasos recursos y que no puede acceder comprar una refrigeradora comercial de un precio elevado, se utilizará aislamientos térmicos fuera de lo común (de procedencia reciclable), pero con sus propiedades térmicas aceptables para poder funcionar como tal. Entre los materiales que se consideraron para el análisis de aislante térmico están los siguientes: Cartón corrugado, poliestireno expandido, cascabillo de arroz y retazos de papel reciclado.

Debido a que el propósito del proyecto no es realizar un análisis de cualidades térmicas de los distintos materiales, se procedió a ubicar información de dichas propiedades en investigaciones realizadas. De acuerdo con información proveída por la Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire (ASHRAE por sus siglas en inglés) y junto con los resultados obtenidos por Joel Gutiérrez en su trabajo denominado *Determinación experimental de Conductividad Térmica de Materiales Aislantes Naturales y de reciclado*, las propiedades de los materiales anteriormente descritos son las siguientes:

Cuadro 1. Propiedades térmicas de materiales reciclables.

Material	Conductividad Térmica ($\frac{W}{m K}$)	Categoría
Cartón Corrugado	0.067	Granular
Cascabillo de arroz	0.0360	Celular
Poliestireno expandido	0.037	Celular
Fibra de Vidrio	0.05	Fibroso
Retazos de papel	0.091	Granular

Fuente (Gutiérrez, 2012)

Es importante mencionar que, los valores de las conductividades térmicas pueden variar dependiendo del material y la humedad del mismo. Al ser materiales reciclables, muchos pueden tener distintas densidades y por lo tanto cambiar su conductividad térmica.

H. CARGA DE REFRIGERACIÓN

La carga de refrigeración es calculada mediante 4 aspectos en el análisis de un espacio refrigerado. Los aspectos que se deben tomar en cuenta son: carga por transferencia de calor en paredes, carga por alimentos almacenados y carga interna por elementos que se encuentran adentro del espacio refrigerado. El primer aspecto es la transferencia de calor, el cual sucede en las paredes, techo y el piso.

1. Carga por transmisión de calor en paredes. El primer aspecto es la transferencia de calor, el cual sucede en las paredes, techo y el piso. En el caso de la refrigeradora a desarrollar se analizará en estado estacionario debido a que tanto el exterior como el interior del espacio refrigerado no está expuesto a altas velocidades de aire. El calor sensible obtenido se puede calcular con la siguiente ecuación:

Ecuación 9: Transferencia de calor en estado estacionario.

$$q = UA\Delta t$$

Donde:

q: es la ganancia de calor, (W o BTU/h).

A: es el área superficial externa, m^2 .

U: Coeficiente de transferencia de calor, (W/m^2K).

Δt : es el cambio de la temperatura interna y externa, K.

El valor U es el coeficiente de transferencia de calor de las paredes, piso y techo del refrigerador. Este valor depende directamente del material aislante a utilizar y su ecuación es la siguiente:

Ecuación 10: Coeficiente de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

Donde:

U: coeficiente de transferencia total, (W/m^2K)

h_i : es la conductancia de la superficie interna, (W/m^2K).

x : es el espesor del aislante térmico, (m).

k : es la conductividad térmica del aislante de la pared, (W/mK).

h_0 : es la conductancia de la superficie externa, (W/m^2K).

De acuerdo con la ASHRAE los valores de h_i y h_0 para un ambiente sin perturbaciones altas de aire, se utilizan el valor de 1.6. En algunos casos la pared del espacio refrigerado está conformada por varios materiales y por lo tanto el valor U se ve modificado, para esta situación se tiene que aplicar la siguiente ecuación.

Ecuación 11: Pared con varios materiales en paralelo

$$U = \frac{1}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3}}$$

Donde:

x : espesor del aislante térmico, (m).

k : conductividad térmica del aislante de la pared, (W/m^2K).

2. Carga del producto. El propósito principal de un espacio refrigerado es almacenar alimentos o materiales que deban mantenerse a una temperatura deseada; sin embargo, estos no entran al refrigerador con la temperatura necesaria por lo que el sistema debe extraer el calor que tienen, siendo esta una carga para el sistema. Para el análisis se deben de tomar en cuenta dos distintos casos que dependen de la temperatura de almacenamiento.

El primer caso es el proceso en el cual la temperatura inicial del producto se disminuye a una temperatura baja pero arriba de la temperatura de congelamiento. Para el análisis de este proceso se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 12: Disminución de temperatura inicial a temperatura arriba de temperatura de congelación.

$$Q_1 = mc_1(t_1 - t_2)$$

Donde:

Q_1 : calor removido del producto, (kJ)

m : masa del alimento, (kg).

c_1 : Calor específico del alimento arriba del punto de congelación, ($\frac{kJ}{kgK}$).

t_1 : Temperatura inicial, ($^{\circ}C$).

t_2 : Temperatura deseada, ($^{\circ}C$).

El resultado de la Ecuación 12 debe de ser aplicado en la Ecuación 16 para obtener la carga por almacenamiento de alimentos para el primer caso. En el segundo caso, se analiza el proceso de disminución de la temperatura inicial hasta la temperatura de congelamiento y/o una temperatura debajo de este punto. Para este análisis se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 13: Disminución de temperatura inicial a temperatura de congelación.

$$Q_2 = mc_1(t_1 - t_f)$$

Donde:

Q_2 : calor removido del producto, (kJ)

m : masa del alimento, (kg).

c_1 : Calor específico del alimento arriba del punto de congelación, ($\frac{kJ}{kgK}$).

t_1 : Temperatura inicial, ($^{\circ}C$).

t_f : Temperatura de congelación del alimento, ($^{\circ}C$).

Para saber la cantidad de calor removido para poder congelar el producto se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 14: Calor removido para congelar el producto.

$$Q_3 = mh_{if}$$

Donde:

Q_3 : calor removido del producto, (kJ)

m : masa del alimento, (kg).

h_{if} : Calor latente de fusión del alimento, (kJ/Kg)

Por último, está el cálculo para alcanzar una temperatura debajo del punto de congelación y se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 15: Disminución de temperatura congelación a temperatura debajo de congelación.

$$Q_4 = mc_2(t_f - t_3)$$

Donde:

Q_4 : calor removido del producto, (kJ)

m : masa del alimento, (kg).

c_1 : Calor específico del alimento arriba del punto de congelación, ($\frac{kJ}{kgK}$).

t_f : Temperatura de congelamiento, (K).

t_3 : Temperatura final del producto, (K).

Teniendo cada una de las cargas por las distintas etapas que pasa el alimento, estas deben de ser sumadas para obtener una carga total por el enfriamiento del producto. Es importante mencionar que todos estos cálculos dependen de la temperatura a la cual se quiere que esté el espacio refrigerado, por lo que, si la temperatura no es lo suficientemente baja para congelar el producto, las ecuaciones 14 y 15 no se utilizan. Por lo que para obtener la carga total de refrigeración del producto se asume un tiempo promedio en el cual se asume que los alimentos llegarán a la temperatura deseada y esto se puede observar en la siguiente ecuación:

Ecuación 16: carga promedio de enfriamiento de producto.

$$q = \frac{Q_1}{3600n} \text{ o } q = \frac{Q_2+Q_3+Q_4}{3600n}$$

Donde:

q : carga promedio por enfriamiento de productos, (kW).

Q_1 : calor removido para llevar el producto de una temperatura inicial a temperatura arriba del punto de congelación, (kJ)

Q_2 : calor removido del producto para llegar a temperatura de congelación, (kJ)

Q_3 : calor removido para congelar el producto, (kJ)

Q_4 : calor removido del producto para llegar debajo del punto de congelación, (kJ)

n : tiempo de almacenamiento promedio para alcanzar temperatura deseada, (h).

Los datos de calor específico del alimento y su temperatura de congelación son dispuestos por ASHRAE, quien tiene una amplia información de las propiedades térmicas de los alimentos. El cuadro que se muestra a continuación contiene distintos alimentos y sus propiedades térmicas.

Cuadro 2. Propiedades térmicas de los alimentos				
Alimento	Humedad (%)	Punto inicial Congelamiento (°C)	Calor específico arriba de punto de	Calor específico debajo del punto

			congelación $\left(\frac{kJ}{kg K}\right)$	de congelación $\left(\frac{kJ}{kg K}\right)$
Frijoles	90.27	-0.7	3.99	1.85
Zanahorias	87.79	-1.4	3.92	2.00
Elote	75.96	-0.6	3.62	1.98
Papas	78.96	-0.6	3.67	1.93

Fuente: (ASHRAE, 2006)

Además de la carga que se genera por disminuir la temperatura de los alimentos, se debe de tomar en cuenta la energía generada por la respiración de los alimentos. A continuación, se muestran los datos de la respiración de los alimentos que se muestran en el Cuadro 2. (Bohn, 2005)

Cuadro 3. Calor de respiración de alimentos.

Alimento	Calor de Respiración a 40 °F $\left(\frac{BTU}{lb \cdot 12 \text{ horas}}\right)$
Frijoles	1.3
Zanahorias	0.875
Elote	2.975
Papas	0.3875

Fuente: (Bohn, 2005)

3. Carga por infiltraciones de aire. La ganancia de calor por infiltraciones de aire es de las cargas más importantes en cualquier análisis de espacios refrigerados. Esto sucede cada vez que las puertas se abren y cierran para que el personal, productos y máquinas ingresen y egresen respectivamente. Lo que provoca las infiltraciones es el diferencial de densidades entre el aire del ambiente y de la refrigeradora. Para poder analizar la ganancia de calor por medio de la puerta del refrigerador se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 18: carga por infiltraciones de aire.

$$q_t = qD_tD_f(1 - E)$$

Donde:

q_t : carga por infiltraciones en un periodo de 24 horas, (kW).

q : Carga de refrigeración sensible y latente (kW)

D_t : Factor de tiempo de apertura de refrigerador.

D_f : Factor de flujo de puerta de refrigerador

E : Efectividad de las protecciones térmicas de la puerta del refrigerador.

La Ecuación 18 depende de varios valores, los cuales algunos son coeficientes que se asumen para un estado estacionario y otros que se obtienen de otras ecuaciones. El primer valor de la ecuación, carga de refrigeración sensible y latente, se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 19: Carga de refrigeración sensible y latente

$$q = 0.577WH^{1.5}\left(\frac{Q_s}{A}\right)\left(\frac{1}{R_s}\right)$$

Donde:

q : Carga de refrigeración sensible y latente (kW)

W : Ancho de puerta del refrigerador, (m).

$H^{1.5}$: Altura de la puerta del refrigerador (m).

$\frac{Q_s}{A}$: Carga sensible de infiltraciones de aire por metro cuadrado de apertura de puerta, ($\frac{kW}{m^2}$).

R_s : Proporción de carga de calor sensible por infiltraciones.

La proporción de carga de calor sensible por infiltraciones se puede obtener mediante cartas psicométricas. El factor del tiempo de apertura del refrigerador depende de la cantidad de veces que se abre y cierra la puerta del espacio refrigerado. Para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 20: Factor del tiempo de apertura del refrigerador.

$$D_t = \frac{P\theta_p + 60\theta_o}{3600\theta_d}$$

Donde:

D_t : Factor de tiempo de apertura del refrigerador.

P : cantidad de aperturas de puerta.

θ_p : Tiempo de abrir y cerrar la puerta del refrigerador, (s).

θ_o : tiempo en el cual la puerta está abierta, (min).

θ_d : Periodo de tiempo, (h)

Según ASHRAE, los valores del tiempo de abrir y cerrar la puerta (θ_p), oscilan entre los 15 a 25 segundos para las puertas convencionales. Y los valores de θ_o y θ_d los asigna el analista según su consideración.

Por último, los valores de D_f y E son coeficientes con valores que ASHRAE recomienda utilizar. La proporción de flujo por la puerta, según ASHRAE, es igual a 1 con la condición de que no exista ningún objeto que interrumpa el flujo de aire en la puerta. La efectividad depende de la manera en la cual la

refrigeradora está protegida por empaques o cortinas de plástico que disminuya el aire que entra al espacio refrigerado. Para una puerta nueva el factor E puede ser igual a 0.95, sin embargo, con respecto al tiempo este valor puede verse radicalmente reducido hasta llegar a valores de 0.8. Si la puerta no contiene cortinas, el valor E es igual a 0 (ASHRAE, 2006).

I. HEATCRAFT PROSELECT SOFTWARE

Hoy en día existen muchos softwares para el análisis y diseño de espacios de refrigeración. El software denominado *Heatcraft Proselect* es un programa utilizado por ingenieros para poder obtener los cálculos de cargas de refrigeración con mayor facilidad. Un aspecto positivo de este programa a comparación de los demás es que usa las ecuaciones propuestas por ASHRAE para la obtención de resultados por lo que se utilizará para contribuir con los resultados analíticos del diseño del espacio refrigerado.

Figura 5.Heatcraft Software



Fuente: (Google images, 2017)

Existe una versión web gratis de este software, pero con ciertas características bloqueadas debido a que este es un programa de paga para las empresas de refrigeración. Entre las características que este programa provee esta la generación de cotizaciones, análisis de cargas de refrigeración, cálculo de presupuesto, cálculo de ahorro de energía y un dibujo técnico del espacio refrigerado. Esta herramienta será utilizada en el desarrollo del proyecto para obtener una carga de refrigeración más real.

V. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Al iniciar este trabajo de graduación se debió escoger una metodología a seguir para poder realizar de la mejor manera el proyecto y se decidió trabajar en base a la teoría de Ingeniería de Sistemas creado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés). Esta metodología se divide en cinco fases, las cuales contienen una serie de actividades que ayudarán a realizar de una manera más ordenada el trabajo de graduación. A continuación, se explica a profundidad cada una de las fases y las actividades realizadas.

A. CONCEPTO Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA

En esta fase se proponen los posibles diseños de la refrigeradora que deben cumplir con la mayoría de los requerimientos propuestos. Las partes que componen esta fase son: inicio de la planificación del proyecto; realizar una lluvia de ideas de requerimientos y restricciones; lluvia de idea de los criterios de evaluación de éxito del proyecto y creación de un plan de control de riesgos y con su mitigación durante el proceso de manufactura. El propósito de esta fase es determinar la factibilidad y crear la línea fase del proyecto.

1. Inicio de planificación del proyecto. El proyecto “Diseño y Análisis de un Espacio Refrigerado para una Refrigeradora de uso Doméstico” se inició con la idea de crear una alternativa de bajo costo a los sistemas de refrigeración tradicionales. La idea se generó a partir de la problemática de que las familias de escasos recursos no pueden comprar una refrigeradora por lo que el mantener sus alimentos en buen estado es un problema al que se enfrentan día con día provocando muchos gastos y enfermedades.

En este paso se ideó el objetivo principal de desarrollar el espacio refrigerado de bajo costo de un prototipo de una refrigeradora de uso doméstico. Para cumplir este objetivo se debe de realizar un análisis de aislantes térmicos, posibles materiales para la creación de la estructura y que sea compatible con un sistema de refrigeración por medio de compresión de vapor. Todas estas variables deben de cumplir con un costo máximo y que este sea menor al precio promedio de refrigeradoras que se pueden encontrar en los comercios.

2. Lluvia de idea de requerimientos. Los requerimientos son los aspectos que restringen el proyecto, es decir lo que delimita las opciones en el momento que se está diseñando el refrigerador. Debido a que en este paso se hace una pequeña lista de los requerimientos que se idearon en el momento de empezar el proyecto. Los requerimientos ideados son los siguientes:

- a. Espacio refrigerado con un costo no máximo de USD \$50.00.
- b. Aislante debe de ser eficiente, capaz de ser reciclable o reutilizable.
- c. Refrigeradora capaz de almacenar alimentos.
- d. El espacio refrigerado debe de ser compatible con el sistema de refrigeración por compresión de vapor.
- e. Todos los accesorios deben de ser fáciles de obtener comercialmente.
- f. Se debe de utilizar un aislante funcional.
- g. Refrigeradora no debe de tener una altura mayor de 1 m 50 cm.
- h. Fácil ensamblaje de refrigerador.
- i. Mayoría de materiales capaces de ser reciclables o reutilizables.

Es importante mencionar que los requerimientos desarrollados no son los finales, estos son la base de los que se elaborarán en la Fase B. De acuerdo con el programa de *Systems Engineering*, las primeras restricciones necesariamente no deben de ser los finales dado que estos se pueden ir identificando en las primeras dos fases.

3. Lluvia de idea de criterios de evaluación de éxito. Los criterios de evaluación son los encargados de definir si el proyecto cumplió con las expectativas. Para definir qué criterios hacían del proyecto a realizar exitoso se basó principalmente en el cumplimiento de los objetivos. A continuación, se muestran los primeros criterios para decidir si el proyecto es exitoso o no.

- a. Refrigeradora se abre y cierra correctamente.
- b. Refrigeradora tiene una altura aceptable
- c. Costo de refrigeradora aceptable.
- d. Refrigeradora enfría correctamente hasta una temperatura de diseño.
- e. Refrigeradora está limpia interna y externamente.

Se puede observar que los criterios de evaluación anteriores hacen que la refrigeradora funcione correctamente, sin embargo, en la Fase B se completarán y perfeccionarán los mismos para ser más aplicables al proyecto.

4. Inicio del plan de control de riesgos y su mitigación. Durante el desarrollo y construcción del refrigerador se puede encontrar con ciertas situaciones, las cuales es de suma importancia tomarlos en cuenta en el momento de iniciar el proyecto para ya tener un posible plan de contingencia. Debido a que en esta fase solo se idean los posibles riesgos, se realizó una lluvia de ideas con los que se consideraban riesgos potenciales. Los siguientes riesgos son los que se consideraron al iniciar el proyecto, sin embargo, estos fueron modificados mientras se avanzaba en el proyecto y se definía el diseño final.

- a. Material de refrigeradora dañada.
- b. Los empaques de la puerta del refrigerador no sellan correctamente.
- c. No se puede realizar la unión de los componentes del sistema de refrigeración con el espacio refrigerado.
- d. Material del refrigerador difícil de maniobrar.
- e. Aislante es muy difícil de limpiar y maniobrar.
- f. Daños en el traslado de la refrigeradora.

De acuerdo con la metodología propuesta por la NASA en la siguiente fase se realiza el diseño final de cada una de las listas creadas en esta fase. Es importante dejar todos los aspectos de la Fase A ya que a partir de esta todo el proyecto se llevará a cabo.

B. DISEÑO PRELIMINAR Y COMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA

Ya teniendo la línea base del proyecto realizado en el paso anterior, esta fase se basa en puntualizar todos los detalles del proyecto. En este paso se realiza una actualización de los distintos documentos en la Fase A; definir el mejor diseño a partir de un *trade study* con distintos posibles prototipos que puedan solucionar la problemática inicial; planes de verificación de la construcción de la refrigeradora y finalizar el cronograma.

1. **Definición de requerimientos.** La lista de requerimientos que se presenta en el Cuadro 4 se basó en la lluvia de ideas de requerimientos realizado al inicio del proyecto. Cada una de las restricciones son formuladas para cumplir el objetivo principal de manufacturar el espacio refrigerado con un costo no mayor de US \$50.00.

Cuadro 4. Requerimientos del proyecto.

Ítem	Requerimiento	Definición
1	Volumen de refrigeradora	El volumen mínimo del espacio refrigerado debe de ser de 1 Litro.
2	Materiales estructurales	La mayoría de los materiales estructurales deben ser reciclables.
3	Aislante eficiente	El aislante debe de tener un bajo coeficiente de transferencia de calor (entre 0.03 y $0.07 \frac{W}{m K}$).
4	Costo de US \$50	El costo máximo del espacio refrigerado no debe de exceder los US \$50.

Continuación Cuadro 4: Requerimientos del proyecto

Ítem	Requerimiento	Definición
5	Ensamblaje	El ensamblaje del refrigerador debe de completarse en 15 pasos o menos.
6	Accesorios de construcción	Los accesorios del refrigerador deben de ser posibles de conseguir en el mercado guatemalteco.
7	Pasos de construcción	Realizar la construcción de la refrigeradora en menos de 16 pasos sencillos de comprender.
8	Altura del refrigerador	El almacenamiento de los alimentos debe de estar a una altura mayor de 20 cm respecto al suelo.
9	Aislante compatible	El aislante por utilizar debe de ser capaz de estar en contacto con los alimentos.
10	Compartimientos	El espacio refrigerado debe de contar con varios compartimientos.
11	Compatibilidad sistema de refrigeración	El espacio refrigerado debe de ser capaz de albergar el sistema de refrigeración por compresión de vapor.
12	Hermeticidad	La puerta del refrigerador debe de ser capaz de sellarse correctamente.
13	Utilizar empaques para refrigerador	Utilizar empaques comerciales adecuado para la puerta del refrigerador.
14	Área superficial del refrigerador.	El área que ocupe el refrigerador debe de ser menor de $1 m^2$.
15	Carga de transferencia de calor en paredes.	El calor transferido es menor de 45 W.

Como se puede observar en el Cuadro 4, los requerimientos son de los primeros pasos que se deben hacer en el desarrollo de un proyecto dado que delimitarán las posibles ideas para solucionar el problema. Es importante resaltar que los requerimientos fueron ideados por el estudiante y por lo tanto son la base del desarrollo del trabajo de graduación.

2. Cronograma. Para poder realizar de mejor manera el proyecto, se procedió a la creación de un cronograma para ir cumpliendo semana tras semana los objetivos del trabajo de graduación. Esta herramienta fue realizada tomando en consideración el desarrollo de cada una de las fases y los posibles atrasos que pueden surgir en un proceso de creación de un prototipo. A continuación, se muestra el cronograma creado.

Figura 6. Cronograma.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Planteamiento de problemática	■									
Planteamiento de objetivos		■								
Análisis y selección de materiales a usar		■	■	■	■					
Selección de diseño					■					
Análisis y cálculos					■	■				
Presupuesto y compra de materiales						■				
Ensamblaje de refrigeradora (1)							■	■		
Creación de manual de usuario							■	■		
Pruebas de transferencia de calor							■	■		
Mejoras de aislamiento								■	■	
Pruebas de pérdidas de calor								■	■	
Entrega									■	■

Para una mejor comprensión de las Figura 6, se están tomando en cuenta factores externos al proceso de manufactura del prototipo cómo atrasos en entregas de materiales, errores en el proceso de creación, reunión con encargado del sistema de refrigeración, etc. En el momento de realizar este documento si se cumplió con cada uno de los objetivos anteriores, cumpliendo así el propósito del cronograma.

3. Definición de criterios de evaluación de éxito. Los criterios de evaluación de éxito son los aspectos que determinarán si el prototipo realizado cumple con los objetivos del proyecto. Los siguientes aspectos se basaron en las ideas realizadas en la fase A.

Cuadro 5. Criterios de evaluación de éxito

Ítem	Criterio	Cumple
1	Espacio refrigerado creado con materiales reciclables.	
2	La refrigeradora tiene una altura total aceptable.	
3	Área superficial del refrigerador aceptable.	
4	Cumple con el costo de US \$50.00	
5	Puerta del refrigerador abre y cierra correctamente.	
6	Puerta del refrigerador sella herméticamente.	

Continuación Cuadro 5: Criterios de evaluación de éxito

Ítem	Criterio	Cumple
7	Aislante del refrigerador es reciclable.	
8	El aislante cumple con su función y no es un puente térmico.	
9	La transferencia de calor hacia el exterior no es considerable.	
10	Interior y exterior del refrigerador está limpio.	
11	Estructura tiene espacio suficiente para instalar el sistema de refrigeración.	
12	El interior del refrigerador tiene estantería para almacenamiento de comida.	
13	No existen fugas de aire refrigerado.	
14	Refrigeradora logra mantener correctamente los alimentos a una temperatura menor de 4 °C.	

El análisis de evaluación se diseña en los primeros dos pasos, pero se lleva a cabo en el momento en el cual el prototipo ha sido terminado y se encuentra funcionando. El proceso de *systems engineering* es iterativo y es importante esta fase para el futuro del proyecto debido a que se pueden corregir los problemas principales para su mejor funcionamiento.

4. Definición de plan de mitigación de riesgos. Existen muchos riesgos en el proceso de un proyecto y existen algunos que no pueden ser prevenidos. El realizar un control con todos los posibles riesgos que se pueden encontrar en el proceso, se puede obtener tanto un ahorro de tiempo en la manufactura como un ahorro de los gastos. El siguiente plan está diseñado para todos los riesgos que si pueden ser controlados y para realizarlo se pensó en el peor escenario que pudiera existir en cada uno de los pasos de la creación del prototipo. A continuación, se muestra el plan de mitigación de riesgos generado.

Cuadro 6. Plan de mitigación de riesgos.

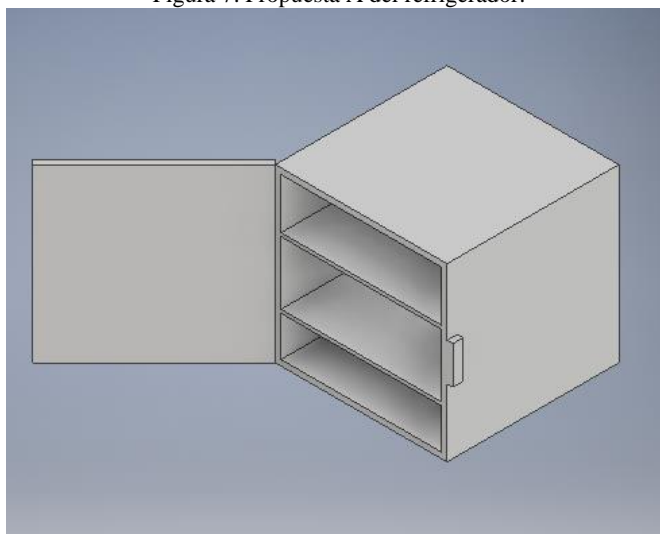
Ítem	Riesgo	Mitigación
1	Material del espacio refrigerado dañado.	Sujetar el prototipo durante su traslado y para su modificación utilizar herramientas para las cuales se esté capacitado.
2	No se puede doblar el material para la base del refrigerador.	Realizar cortes cada cierta distancia para poder doblar el material y así obtener la forma necesaria.
3	Puerta de refrigerador no cierra correctamente.	Considerar espacio para colocar el empaque, la posición de las bisagras, y utilizar seguros en la puerta.
4	Puerta de refrigerador no sella herméticamente.	Utilizar empaque con imanes, superficie de contacto limpia.
5	Existen infiltraciones de aire en la puerta y/o estructura.	Verificar posibles puntos de fuga y rellenarlos.
6	No se puede realizar la unión con el sistema de refrigeración.	Durante el diseño del espacio refrigerado considerar el tamaño del sistema de refrigeración.
7	Aislante no cumple con su propósito de mantener la temperatura.	Realizar un análisis de transferencia de calor para el aislante seleccionado.
8	Superficie interna se ensucia muy fácilmente.	Al momento de realizar alguna modificación en el interior, colocar un plástico para proteger la superficie.
9	Al momento de soldar, se daña el material exterior del espacio refrigerado.	Utilizar el electrodo correcto para el material junto con la corriente necesaria.
10	Existe condensado cerca del sistema eléctrico.	Seleccionar un aislante correcto.

5. *Trade Study*. Para seleccionar el diseño a desarrollar se realizó un *trade study*. El análisis consiste en realizar cierta cantidad de propuestas de diseño, los cuales serán comparados según ciertos criterios. Es importante mencionar que la mayoría de los diseños propuestos son basados en un tonel de 55 galones como

estructura principal por motivos económicos. En el caso del proyecto se realizaron tres propuestas como posibles diseños.

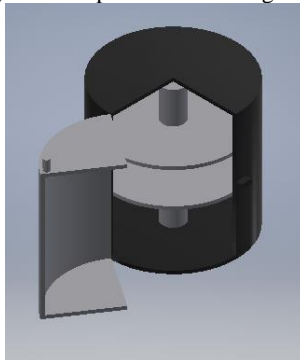
a. **Propuesta A.** Para este diseño se utiliza el material de un tonel para realizar cada una de las caras del refrigerador por lo que la geometría del refrigerador no es circular. En este tipo de diseño se muestran varias estanterías, en donde la última es para almacenar parte del sistema de refrigeración. El aislante debe de ser instalado en la parte interna del diseño, para las estanterías se utilizaría también el material del tonel.

Figura 7. Propuesta A del refrigerador.



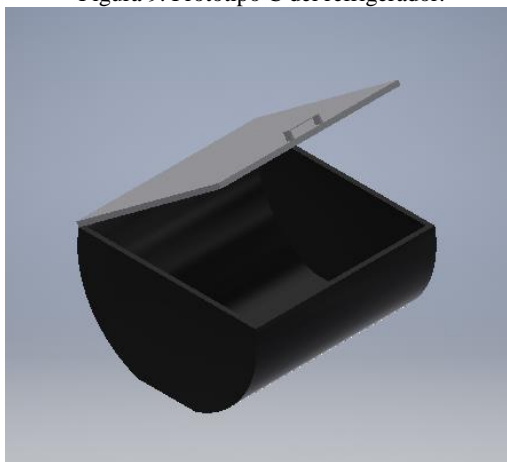
b. **Propuesta B.** En este diseño se utiliza por completo el tonel para la estructura. Se le realizará un corte para que esta sea la puerta, en el interior lleva un eje con distintos discos en distintos niveles para que estos sean las estanterías en donde se colocará el producto. El sistema de enfriamiento estará instalado en el interior del tonel y elementos como el compresor estarán en el último compartimiento.

Figura 8. Propuesta B del refrigerador.



c. Propuesta C. El diseño C está basado igualmente en un tonel. La diferencia con el prototipo B es que el tonel será utilizado horizontalmente y lo extraído del tonel no será utilizado por completo para la puerta. El tonel debe de tener dos cortes uno superior y uno inferior en donde el superior sería la apertura de la puerta y el corte inferior para estabilizar la refrigeradora.

Figura 9. Prototipo C del refrigerador.



Luego de tener los diseños se realizó el Cuadro 7 para poder definir el diseño más adecuado y a mejorar en una siguiente fase. Para decidir los parámetros del cuadro, se tomó en cuenta todos los requerimientos y criterios de evaluación de éxito. Cada parámetro será valorado con una puntuación del 1 al 3, siendo 1 el prototipo que menos la cumple y 3 el que la cumple totalmente. A continuación, se muestra el *Trade Study* realizado.

Cuadro 7. *Trade Study*.

Criterio	Propuesta A	Propuesta B	Propuesta C
Utilización de materiales reciclables	2	3	2
Aprovechamiento de materiales	1	3	2
Volumen de refrigeración aceptable.	1	3	2
Acople con sistema de refrigeración	2	3	2
Atractiva Visualmente	2	3	1
Cumple con el costo	2	3	2
Altura aceptable	1	3	1
Tamaño aceptable	2	2	2

Continuación Cuadro 7: *Trade Study*

Criterio	Propuesta A	Propuesta B	Propuesta C
Contiene estanterías	3	3	1
Construcción sencilla	2	2	3
Total	17	28	18

Como se puede observar en el Cuadro 7, el prototipo que mejor cumple con solucionar la problemática es el B. Este diseño será sometido a una serie de modificaciones para lograr que mejore su puntaje en las categorías que no cumplió con exactitud, por lo que la Figura 8 no es el prototipo que será construido si no que es la base del mismo. El propósito de esta fase era dejar ya definidas las líneas a seguir en el proyecto y así como tener el primer bosquejo de lo que sería el prototipo mediante la comparación realizada, aspectos que fueron cumplidos con éxito.

C. DISEÑO Y FABRICACIÓN

Para diseñar un espacio refrigerado se debe de tomar en cuenta su geometría, capacidad del aislante y cargas de refrigeración que este tiene. Se inicia esta fase tomando el prototipo seleccionado en el *trade study* analizado en el paso anterior y realizándole las modificaciones pertinentes. Una vez definido esto, se procedió a escoger el mejor aislante a utilizar y un análisis de cargas de refrigeración, como se mostrará a lo largo de esta fase. Por último, se definen los costos de este proyecto, el cual debe de cumplir con el requerimiento y objetivo principal de no pasar un costo de US \$50.

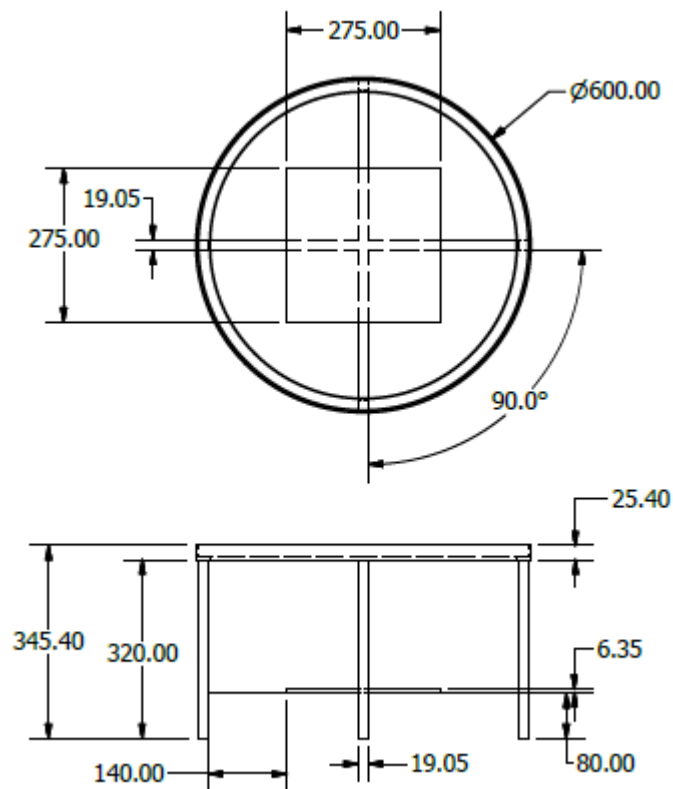
1. **Definición de diseño del prototipo.** Basándose en el prototipo B del refrigerador, se procedió a analizar las posibles mejoras que este podría tener. A simple vista, el diseño no cuenta con un espacio adecuado para colocar el compresor (el cual es una fuente potencial de calor) debido a que este se encuentra adentro del refrigerador y está únicamente separado por una repisa del espacio refrigerado. Otro punto importante es un requerimiento ideado, el cual indica que el espacio refrigerado debe de estar a una altura considerable del piso, por simple higiene. Por lo que se realizó una base para el refrigerador y el cual fue aprovechado para instalar el compresor. A continuación, se mostrará cada uno de los elementos que componen el diseño del espacio refrigerado.

a. **Base del refrigerador.** Cómo se explicó anteriormente, uno de los requerimientos indica la separación del almacenamiento de alimentos con respecto al piso. Con esta restricción se le incluyó una base, en la cual se instalará el compresor y parte del sistema eléctrico. Para los materiales de la base se utilizó hembra de ½ de pulgada y hierro en ángulo de 1 x 1/8 de pulgada. En las Figuras 10 y 11 se pueden observar la base y sus medidas con las medidas en milímetros.

Figura 10. Base del refrigerador.



Figura 11. Medidas de la base del refrigerador.



b. Espacio refrigerado. El espacio refrigerado está basado en un tonel de 230 litros norma UNE-EN 12711:2001 y se le realizaron una serie de modificaciones para hacerlo compatible con el sistema de refrigeración. A continuación, se muestra el diseño de la estructura y los pasos realizados para su creación.

Figura 12. Tonel Norma UNE-EN 12711:2001 utilizado



Figura 13. Diseño y corte realizado al tonel

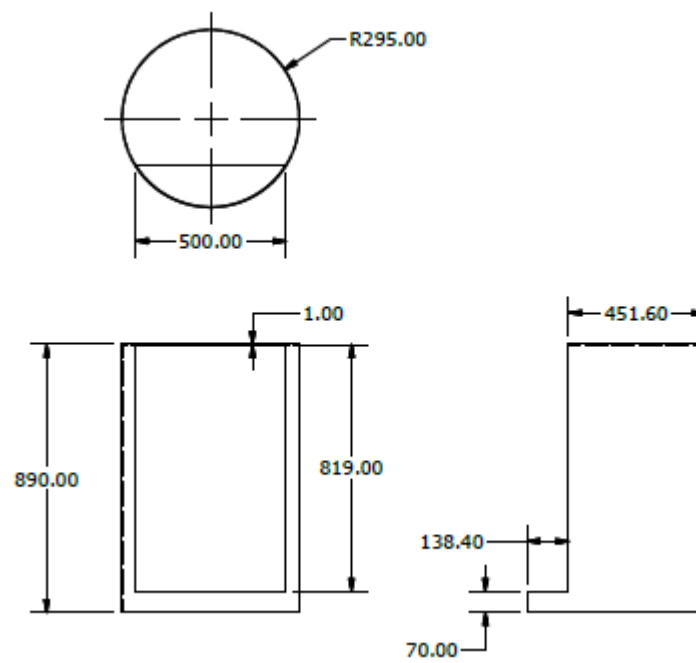


Figura 14. Proceso de corte del tonel de acuerdo con medidas



Cómo se puede observar en las figuras 13 y 14, primero, mediante el software Autodesk Inventor se diseñaron los cortes del tonel para después proceder a realizarlos. Con los planos en mano se procedió a realizar las medidas y marcar las líneas en donde se debía de cortar el tonel. En el momento de que se cortó el tonel se notó que existía un alto nivel de corrosión en el interior, por lo que se procedió a cubrirlo con una pintura anticorrosiva como se muestra en la Figura 15. A continuación, se muestra el tonel ya cortado en dos partes, la puerta a utilizar y el espacio refrigerado con su capa anticorrosiva.

Figura 15. Tratamiento anticorrosivo aplicado.



Figura 16. Cortes realizados al tonel



Teniendo el diseño de la base del refrigerador y el tonel dividido en dos, se procedió a la unión de todos estos elementos. Es importante resaltar que para la unión de estos elementos se utilizaron herramientas como máquina de soldar y un barreno; el uso de estas herramientas está considerado en la mano de obra para la generación del costo total de la manufactura del prototipo. Las imágenes que se mostrarán a continuación son un resumen de cómo se fueron uniendo cada una de las partes.

Figura 17. Soldadura de hembra en los marcos de la puerta y de la base del refrigerador.



En la Figura 17 se muestra la soldadura de hembras en los marcos de los cortes realizados. La función de este es que sobre esta se colocó el empaque de la puerta el cual produce el sello entre los dos elementos cuando el refrigerador se encuentra cerrado. Sin la hembra hubiera sido muy difícil generar la hermeticidad necesaria.

Figura 18. Soldadura de bisagra para unir los dos elementos.



Para unir los dos elementos se tomó en cuenta una separación de media pulgada para el inserto del empaque, esta es la razón por la cual en la Figura 18 se ve una luz en la puerta. Teniendo el espacio refrigerado ensamblado se procedió a realizar la base del mismo. Se utilizó angulares para soportar el peso del tonel, sin embargo, el darle la forma circular a dicho material fue logrado mediante el ítem 2 del Plan de Mitigación de Riesgos. Se le realizó al material cortes de dos centímetros de largo con una separación de cuatro centímetros entre corte para poder doblarlo correctamente.

Figura 19. Angular con cortes doblado.



Para los soportes del refrigerador se utilizó el mismo angular separado a 90 grados el uno del otro y al final de este se le soldó una pequeña placa a cada uno para hacer más estable el parado del refrigerador. Por

último, se agregó la placa que soporta el compresor en el centro de la base como se puede observar en la Figura 21.

Figura 20. Soldadura de los soportes.



Figura 21. Base finalizada con ejemplo de posición del compresor.



Por último, se le aplicó al exterior del refrigerador una capa de anticorrosivo y se le colocó el empaque al marco de la puerta para garantizar un correcto sellado. El empaque cuenta con un imán que ayuda a mantener las dos superficies unidas, sin embargo, la lámina del tonel era muy delgada por lo que era muy propensa a doblarse provocando altas fugas de aire. Para prevenir este problema se utilizó un sistema de aseguramiento poco convencional para cerrar la puerta del refrigerador (ver Figura 23) y ayudar al empaque a cumplir su función.

Figura 22. Colocación de empaque del refrigerador.



Figura 23. Sistema de aseguramiento de cierre hermético.



2. Selección de aislante. Una vez definido la geometría del espacio refrigerado se procedió a escoger el mejor aislante reciclable. Como se muestra en el Cuadro 1, los aislantes a tomar en cuenta fueron cartón corrugado, poliestireno expandido y fibra de vidrio. Se consideraron estas opciones por su capacidad de ser reciclados, fácil obtención y precio en el mercado. Con las propiedades de los materiales se realizó un análisis de transferencia de calor por cada material para seleccionar el que mejor se desempeñara como aislante.

El primer paso para realizar el análisis era definir la temperatura a la cuál iba a estar el espacio refrigerado y una temperatura promedio a la cual iba a estar el ambiente alrededor del mismo, dichas temperaturas fueron obtenidas a partir del trabajo de Luis Alfonso Martínez denominado “Fabricación de un prototipo de bajo

costo de un sistema de refrigeración por compresión de vapor”. Luego se calcularon las áreas superficiales (interna y externa) del cilindro dado que éstas son utilizadas en los cálculos de transferencias de calor que existe en el sistema.

Cuadro 8. Temperaturas teóricas

Localización	Temperatura
Interior	4 °C
Exterior (ambiente)	30 °C

Fuente: (Martínez, 2017)

Para calcular las áreas superficiales se asume un espesor de aislante de media pulgada y se obtuvieron los valores de cada uno de los radios y alturas que dependían de este valor. El siguiente cuadro muestra dichos valores y estos son los utilizados en los siguientes cálculos de transferencia de calor en un cilindro.

Cuadro 9. Medidas tonel Norma UNE-EN 12711:2001 y medidas del aislante.

Medida	Valor
Alto Tonel (L_2)	87 cm
Radio exterior tonel (r_3)	28.5 cm
Espesor tonel	1 mm
Radio interior tonel (r_2)	28.4 cm
Espesor aislante	1.27 cm
Radio interior aislante (r_1)	27.13 cm
Altura interna (L_1)	84.36 cm

El área superficial es importante dado que en esta existirá convección de calor. Para obtener los valores de la superficie expuesta a esa transferencia de calor, se utilizan los datos de Cuadro 7 y se insertan en la Ecuación 21.

Ecuación 21. Cálculo de área superficial

$$A_s = \pi * r * 2 * L$$

Cuadro 10. Áreas superficiales

Área Superficial	Medida (m^2)
Interior	1.44
Exterior	1.56

Ya con los valores de temperatura, radios internos y externos y áreas superficiales se procede a calcular el mejor aislante. Para este cálculo se toma en cuenta la convección en las dos superficies del espacio

refrigerado y la resistencia térmica que hace el aislante y, por mínimo que sea, el espesor de la pared del cilindro. Las ecuaciones utilizadas para obtener estos valores son la Ecuación 3 para conducción y la Ecuación 5 para convección de calor.

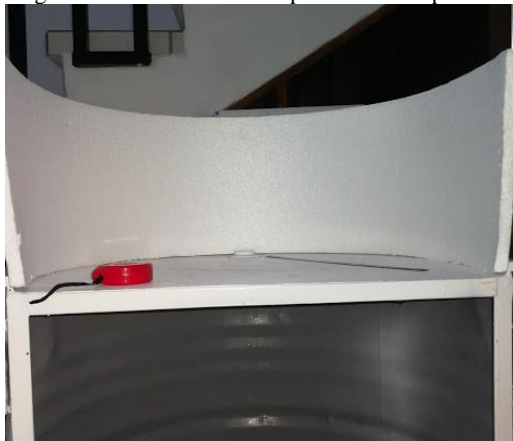
Cuadro 11. Valores de resistencia por material.

Valor	Cartón (°C/W)	Poliestireno Expandido (°C/W)	Fibra de Vidrio (°C/W)
R_1 Convección Interior	0.00927	0.00927	0.00927
R_2 Convección Exterior	0.03209	0.03209	0.03209
Conducción Aislante	0.12882	0.19180	0.17262
Conducción Pared	0.00001	0.00001	0.00001
Tonel			
Resistencia Total	0.17020	0.23318	0.21400

Fuente: Propia.

A simple vista con el Cuadro 9 se puede observar que el mejor aislante por tener un valor más alto de Resistencia a la transferencia de calor es el Poliestireno Expandido, por lo que este fue el aislante seleccionado para utilizarlo en el espacio refrigerado. A continuación, se muestran las imágenes de cómo se instaló el aislante en donde se utilizó una plancha de poliestireno expandido de espesor con medidas de 2 x 4 pies y un espesor de ½ pulgada.

Figura 24. Modificación del poliestireno expandido.



Para lograr que la plancha de Poliestireno adaptara la forma del tonel se utilizó una pistola de calor para elevar la temperatura del material y poderlo doblar sin dañarlo. Se utilizaron 3 planchas de aislante para todo el sistema de refrigeración. En la Figura 25 se muestra cómo quedó el aislante adentro del refrigerador.

Figura 25. Aislante en el interior del refrigerador.



3. **Análisis de cargas.** Las cargas que afectan a un refrigerador son tres. La primera es la transmisión de calor entre paredes y está relacionado con la capacidad del aislamiento térmico y el ambiente en el cual está expuesto el refrigerador. La segunda carga por considerar es la del producto que se almacena en el refrigerador. La tercera carga que se toma a consideración en el análisis es el de infiltraciones de aire que depende del volumen refrigerado y las dimensiones y uso de la puerta.

a. **Carga por transmisión en paredes.** Teniendo la forma geométrica del espacio refrigerado, el material aislante y las temperaturas de refrigeración se procedió a calcular la carga por transferencia de calor en las paredes. El calor fluye desde el espacio con temperatura alta hacia el sistema refrigerado. En el Cuadro siguiente se muestra la información necesaria para obtener la carga.

Cuadro 12. Datos importantes para carga por transmisión en paredes del refrigerador.

Medida	Valor	Dimensión
Área superficial	1.56	m^2
Área superficial techo y piso	0.26	m^2
ΔT	26	K
h_1	1.26	$\frac{W}{m^2 K}$
h_2	1.26	$\frac{W}{m^2 K}$
k_1 Aislante	0.037	$\frac{W}{m K}$
k_2 Pared Tonel	80.2	$\frac{W}{m K}$
x_1 Aislante	0.0127	m
x_2 Pared Tonel	0.001	m

Con los valores se procedió primero a obtener el coeficiente de transferencia total de la pared del tonel y el techo y piso respectivamente. Esto es calculado utilizando la Ecuación 10 y los resultados obtenidos son los siguientes.

$$U_{pared} = \frac{1}{\frac{1}{1.6} + \frac{0.0127}{0.037} + \frac{0.001}{80.2} + \frac{1}{1.6}} = 0.63 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_{piso} = \frac{1}{\frac{1}{1.6} + \frac{0.0254}{0.037} + \frac{0.001}{80.2} + \frac{1}{1.6}} = 0.52 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_{techo} = \frac{1}{\frac{1}{1.6} + \frac{0.0127}{0.037} + \frac{0.001}{80.2} + \frac{1}{1.6}} = 0.63 \frac{W}{m^2K}$$

El coeficiente de transferencia total es utilizado en la Ecuación 9 para obtener el calor sensible.

$$q_{pared} = 1.56 * 26 * 0.63 = 25.46 W$$

$$q_{piso} = 0.26 * 26 * 0.52 = 3.47 W$$

$$q_{techo} = 0.26 * 26 * 0.63 = 4.22 W$$

$$q_{Total} = 33.15 W$$

En conclusión, la carga por transferencia de calor en paredes es de 33.15 W. Este valor puede verse altamente reducido por colocar un aislante con un espesor más alto, sin embargo, esto repercute en los costos del proyecto. Es importante mencionar que en este caso no se toma en cuenta los cálculos por radiación debido a que el espacio refrigerado se ubicaría en un área en donde no sea afectado por la luz solar.

b. Carga del producto. Todos los productos que se ingresan a un espacio refrigerado repercuten en la carga que este maneja. Es por esto que analizar las propiedades térmicas de los alimentos y como estos son refrigerados es de suma importancia. Para el cálculo de este factor se asume que el refrigerador albergará dos kilogramos de cada uno de los alimentos mostrados en el Cuadro 2.

Los datos utilizados para el cálculo de carga de producto son mostrados en el Cuadro 13. Se asume que el enfriamiento del producto tiene un tiempo de 12 horas y que el diferencial de temperatura es de 26 grados.

Cuadro 13. Datos para obtener la carga del producto.

Alimento	Masa (kg)	Calor específico ($\frac{kJ}{kg K}$)	Calor de respiración $(\frac{kJ}{kg})$ $\frac{1}{12 \text{ horas}}$
Papas	2	3.67	0.899
Frijoles	2	3.99	3.0173
Zanahorias	2	3.92	2.03
Elote	2	3.62	6.90

Fuente: (Bohn, 2005)

Aplicando las Ecuaciones 12 y 16 junto con los valores del Cuadro 13 se obtiene la carga por almacenamiento y respiración de los alimentos. El espacio refrigerado está diseñado para que alcance una temperatura de 4 °C, la cual no provoca que se congelen los alimentos. Por esta razón solo se utiliza la ecuación para llevar los alimentos a una temperatura arriba del punto de congelación. A continuación, se muestra los resultados obtenidos y la carga total teórica.

Cuadro 14. Cargas de refrigeración de alimentos.

Alimento	Carga por Almacenamiento (W)	Carga por Respiración (W)	Carga Total (W)
Papa	5.10	0.042	5.14
Frijol	5.54	0.14	5.68
Zanahoria	5.44	0.094	5.54
Elote	5.03	0.32	5.35
TOTAL			21.71

El valor total de carga de refrigeración de alimentos depende directamente de la temperatura inicial de los alimentos. Es por esto que se asume que los alimentos entran a una temperatura ambiente y si llegaran a entrar a una temperatura mayor, la carga también será mayor. Por lo tanto, el valor de 21.71 W es de referencia para el diseño del sistema de refrigeración.

c. Carga por infiltraciones de aire. El sistema de refrigeración debe de ser capaz de mantener la temperatura de refrigeración aun cuando se mezcla el aire refrigerado con el aire a temperatura ambiente. En el momento de diseñar se toma en cuenta la cantidad de veces que se abre y cierra la puerta del refrigerador y el tiempo que esto se lleva a cabo para calcular la carga generada por esta acción.

Para el cálculo de carga por infiltraciones de aire se utilizaron las medidas del espacio refrigerado, asumiendo que tiene forma de cubo debido a que el software utilizado para obtener esta carga no puede obtener un valor de un espacio refrigerado cilíndrico. También se tomó en cuenta las medidas de la puerta

del refrigerador. En el Cuadro 15 se muestran los datos ingresados al software Heatcraft Proselect y en la Figura 26 su respectiva interfaz.

Cuadro 15. Información ingresada a Heatcraft Proselect.

Dato	Valor
Temperatura espacio refrigerado °C	4
Temperatura ambiente °C	30
Largo (ft)	2
Ancho (ft)	2
Alto (ft)	3
Altura Puerta (ft)	1.6
Ancho Puerta (ft)	2.7
Tiempo de apertura (minutos)	1.5

El tiempo de apertura es el tiempo que transcurre en lo que se abre y cierra la puerta; para esta acción se asumió que transcurre minuto y medio en promedio el cual se considera suficiente para ingresar y extraer los alimentos. Otro aspecto que se asumió para que el cálculo se pudiera adaptar a la mayoría de ambientes posibles es el de 50% de humedad relativa del ambiente exterior del refrigerador.

Figura 26. Interfaz de carga por infiltraciones de aire en Heatcraft Proselect Software

The screenshot shows the software interface with the following data and controls:

- Inputs:**
 - Temp de cuarto: 4.00
 - Temperatura Ambiente: 30.00 °C
 - Bulbo seco: 4.00
 - % Humedad relativa: 90.0
 - Bulbo humedo: 3.3
 - Temperatura Ambiente: 30.00 °C
 - Temperatura Ambiente: 22.1 °C
 - Tipo de puerta especial: Ninguno
 - Cantidad de puertas especiales: 0
 - Puerta especial de carga: 0 BTU/day
- Method Selection:**
 - Metodo de cambios de aire
 - Metodo de velocidad de aire
- Table of Parameters:**

30	30	30	30
50	50	50	50
22	22	22	22
1	0	0	0
1.6	7.0	7.0	7.0
2.7	3.0	3.0	3.0
1	2	2	2
1.50	0.00	0.00	0.00
0	0	0	0
- Results:**
 - Temperatura de Entrada Bulbo Seco: 30
 - Humedad relativa de entrada: 50
 - Temperatura de Entrada Bulbo Húmedo: 22
 - Numero de puertas: 0
 - Altura de puerta: 7.0 ft
 - Ancho de puerta: 3.0 ft
 - Aperturas por hora: 2
 - Tiempo de apertura: 0.00 min
 - Eficiencia cortina plastica: 0
 - Carga de infiltración diaria: 5479 BTU/day
 - Carga/Hr debida a la velocidad del aire: 342 BTU/H
 - Carga debida al aire: 342 BTU/H
- Buttons and Footer:**
 - Resumen, Idioma Español, Unidades: Mixed, Fecha 06/10/2017, Aceptar

Fuente: (HeatCraft, 2017)

Con el resultado mostrado por el programa, se procedió a convertirlo a vatios para poder aplicarlo al sistema.

$$q_{infiltraciones} = 342 \frac{Btu}{hora} = 100.23 W$$

El valor obtenido por carga por infiltraciones es bastante alto a comparación de las demás cargas. Este resultado puede ser considerablemente reducido minimizando el tiempo de apertura y colocando una cortina que funcione como obstáculo para el intercambio de aire a temperatura ambiente y el aire refrigerado. Así mismo se puede modificar el diseño de la puerta, haciéndola más pequeña debido a que, así como es el tamaño de la puerta será la filtración de aire. Otro factor importante de error es que el espacio refrigerado es simulado cómo un cubo, por lo que el volumen de transferencia es mucho más grande al de un cilindro.

En conclusión, el valor total de carga en el diseño de refrigerador es de 155.09 W. ASHRAE siempre recomienda utilizar un porcentaje de seguridad y en el caso del proyecto se calculó con un porcentaje de 15%. El resultado final es de 162.84 W, por lo que se recomienda un sistema de refrigeración que pueda proveer la misma carga.

4. Costo del proyecto. Teniendo las medidas del espacio refrigerado, el tipo de aislante utilizado, estructura de soporte del refrigerador y mano de obra realizada en el proyecto se presentan el costo del proyecto. La compra y adquisición de los productos fueron comprados mientras se realizaba la manufactura del prototipo, buscando siempre el producto más barato de varias opciones para cumplir el objetivo principal del proyecto.

Cuadro 16. Costos del proyecto.

Rubro	Costo (Q)	Unidades	Total	Proveedor
Compra tonel	10.00	1	10.00	-
Perfil angular ½'' 3 m	50.00	1	50.00	Super Mayen
Hembra ½'' 3 m	35.00	1	35.00	Super Mayen
Plancha de Poliestireno Expandido	8.00	3	24.00	Novex
Empaque (perímetro de la puerta)	75.00	1	75.00	Almacén de refrigeración Optimus
Seguros de puerta (caja con 2 piezas)	50	1	50.00	Novex
Pintura (lata)	10.50	2	21.00	Novex
Mano de obra	125.00	-	125.00	-
Total			390.00	

Como se mencionó anteriormente, en los costos se incluye la mano de obra. En este rubro se toma en cuenta el uso de herramientas de corte, soldadura junto con su respectivo equipo, aplicación de anticorrosivo y pegamento. Manejando un tipo de cambio de un dólar estadounidense a 7.8 quetzales, se cumple con el objetivo de crear un prototipo del espacio refrigerado con un costo menor (o en este caso igual) a US \$ 50.00.

El costo total puede verse altamente reducido comprando los materiales por mayor. Esto es debido a que es más económico comprarlo de esta manera (en dado caso se desee hacer una producción de 100 unidades, por ejemplo) para utilizarlo como estructura y tiene la ventaja de ser completamente nuevo.

D. ENSAMBLAJE DEL SISTEMA, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS

Cómo se mencionó al inicio de este trabajo, el proyecto fue realizado para ser combinado con el trabajo de graduación denominado “Fabricación de un prototipo de bajo costo de un sistema de refrigeración por compresión de vapor”. Teniendo el prototipo del espacio refrigerado ensamblado y pintado se procedió a unirlo con el sistema de refrigeración y realizarle pruebas que demuestran la manera en la cual el diseño se desempeña. A continuación, se explica cómo se adaptaron los dos trabajos y los resultados de las pruebas.

1. Acople a sistema de refrigeración por compresión de vapor. El espacio refrigerado fue diseñado tomando en cuenta el espacio que ocupa el sistema de refrigeración. El sistema de refrigeración utilizado es del trabajo de graduación denominado “Fabricación de un Prototipo de Bajo Costo de un Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor”. A continuación, se muestra cada una de las partes que conforman el refrigerador y como estas fueron ensambladas con la estructura.

Figura 27. Instalación del tubo capilar y evaporador en el espacio refrigerado.



Para ingresar el tubo capilar y el evaporador en el espacio refrigerado se perforó un agujero y en este se ingresaron ambos elementos. El evaporador fue montado adentro del espacio refrigerado utilizando tres soportes para la colocación del serpentín, los cuales están atornillados a la cubierta superior del tonel. Luego de ingresadas las tuberías, se cubrió el agujero con aislante para evitar pérdidas. El condensador está montado en el espacio refrigerado en la parte posterior del tonel como se puede observar en la Figura 28 y se encuentra soportado por 4 tornillos, los cuales están cubiertos en el interior del espacio refrigerado mediante el aislante para que no sea un puente térmico.

Figura 28. Instalación del condensador.



Teniendo la instalación del evaporador, condensador y tubo capilar se procedió a instalar el compresor. En el área en donde se ubicó al compresor, se instaló todo el sistema eléctrico del sistema, por lo que controlar el condensado que se genera a la salida del compresor es muy importante. En la Figura 29 se observa cómo se encuentra instalado el compresor en la base del refrigerador.

Figura 29. Instalación del compresor y sistema eléctrico.



En conclusión, se tiene un espacio refrigerado capaz de albergar al sistema de refrigeración por compresión de vapor. Debido a que el compresor y el condensador son dos elementos que generan calor, se analizará el desempeño del aislante en estas ubicaciones. En la Figura 30, se muestra el estado final del refrigerador.

Figura 30. Diseño final del refrigerador.



2. Pruebas y correcciones. De acuerdo con *systems engineering* esta parte de la fase es en donde realmente se comprueba si se está alcanzando con el objetivo principal del proyecto. En el caso de que no se

cumpla se toma esta fase para iterar el prototipo y realizarle ciertas modificaciones para volverlo exitoso. Para identificar realmente si el diseño y construcción del prototipo cumple con el propósito de proteger el espacio refrigerado de pérdidas de temperatura se realizaron distintas pruebas.

La primera corrección que se le realizó al prototipo fue el de colocarle los seguros a la puerta. Esto fue provocado por el espesor del tonel utilizado, debido a que este era muy delgado siendo muy propenso a doblarse. El material de la puerta sufrió un golpe provocando un mal cierre de la puerta (ver Figura 31) por lo que se decidió colocarle dos seguros en la parte inferior y superior de la respectivamente, logrando un correcto cierre de la misma.

Figura 31. Antes y después del cierre del prototipo.

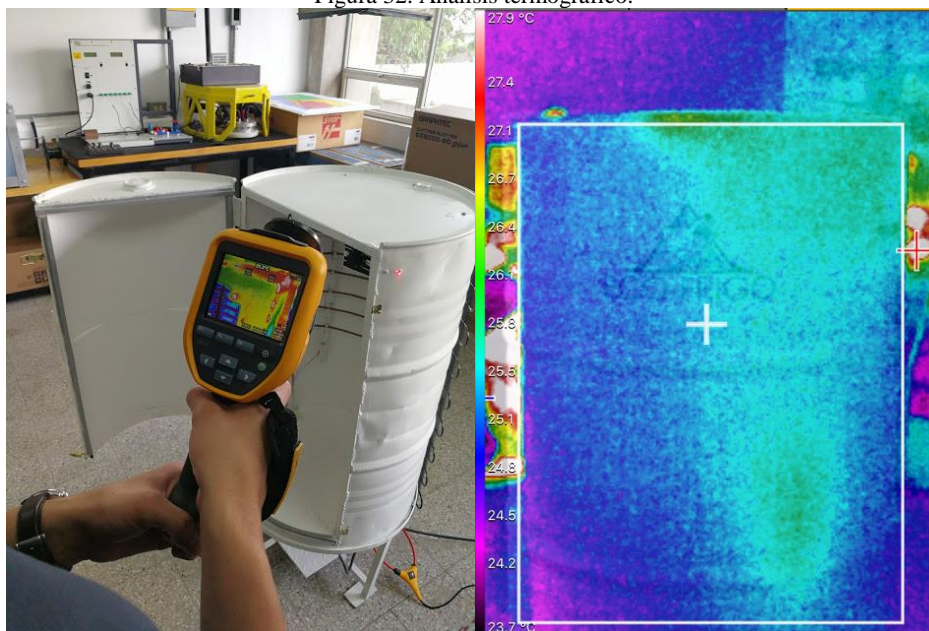


Para poder minimizar los problemas con el material del tonel se recomienda modificar el diseño de la puerta del mismo. Se observa que, en la parte superior de la puerta tiene menos problemas el material y esto es debido a que el corte fue realizado por completo. En cambio, los problemas se encontraron en la parte inferior debido a que el corte no fue realizado por completo, dejando prácticamente la lámina sin ningún soporte.

Luego del ensamblaje del espacio refrigerado junto con el sistema de refrigeración se procedió a realizar pruebas termográficas y pruebas de descenso y ascenso de temperatura. El análisis termográfico revela los puntos en donde existe mayor transferencia de calor hacia el interior del refrigerador y cómo se desempeñan

los aislantes con respecto al tiempo. En la primera prueba se tomaron intervalos de tiempo de 5 minutos para medir la temperatura externa del tonel y los resultados obtenidos se pueden observar en el Cuadro 17.

Figura 32. Análisis termográfico.



Cuadro 17. Resultados prueba termográfica en el exterior del refrigerador mientras se enfriaba el espacio refrigerado.

Intervalo	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Promedio (°C)
1	27.9	24.2	25.5
2	30	23.8	25
3	27.2	23.7	25.2
4	27.7	23.9	24.9
5	26.6	23.5	24.3
6	27.9	23.6	24.4

Fuente propia.

Como se puede observar en el Cuadro 17, la temperatura exterior del refrigerador se mantiene constante. Estas mediciones fueron realizadas tratando de abarcar la mayor cantidad de área superficial del prototipo para obtener un promedio de temperatura más exacto. Así mismo se tomó cierto porcentaje del cierre de la puerta para verificar posibles salidas de aire acondicionado hacia el exterior, sin embargo, este inconveniente no se presentó.

La segunda prueba fue la de calentamiento del espacio en el momento de desconexión del sistema de refrigeración. Esto serviría para verificar la capacidad del aislante para mantener un espacio refrigerado por

cierta cantidad de tiempo hasta que la temperatura llegase a la temperatura de activación del sistema. La temperatura de desconexión del sistema es de 4°C y la temperatura de reconexión es de 12 °C. Esta prueba se dividió en dos análisis, el primero con la cámara termográfica y el segundo utilizando un sensor de temperatura para no tener que abrir y cerrar la puerta para la toma de datos.

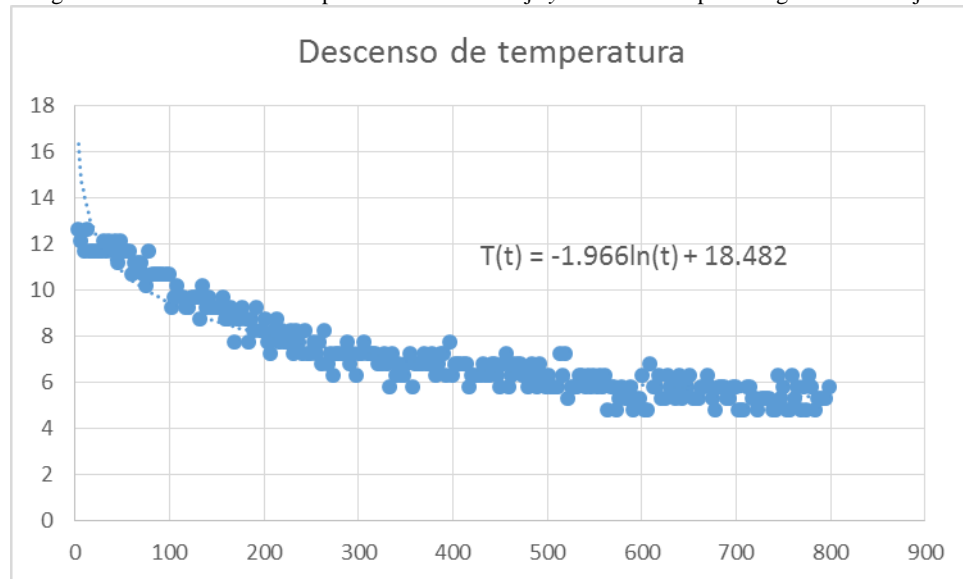
El análisis de la cámara termográfica en el interior del refrigerador reveló un aspecto importante durante el tiempo de desconexión del sistema de refrigeración. En el momento de desconectar el sistema, la superficie del espacio refrigerado que está más cercana a la entrada del condensador tiene una temperatura de 23.5 °C el cual es evidenciado en la Figura 33. Con este aspecto se procedió a alejar más el condensador del espacio refrigerado para disminuir dicha temperatura.

Figura 33. Análisis termográfico en el interior del refrigerador luego de la desconexión del sistema.



El análisis termográfico revela que en el momento de desconexión del sistema de refrigeración se empieza a derretir el condensado que se encuentra en la tubería del evaporador y el agua se acumula en el fondo del espacio refrigerado. Para evitar este problema se recomienda incluir un espacio para que todo el condensado se dirija ahí y no se acumule en el interior provocando problemas en el aislante y alimentos por humedad. Para obtener el descenso de la temperatura del espacio refrigerado durante el funcionamiento del sistema de refrigeración y el ascenso de la misma cuando el sistema esté desconectado se utilizaron sensores de temperatura. A continuación, se muestra los resultados de la toma de muestra de las temperaturas.

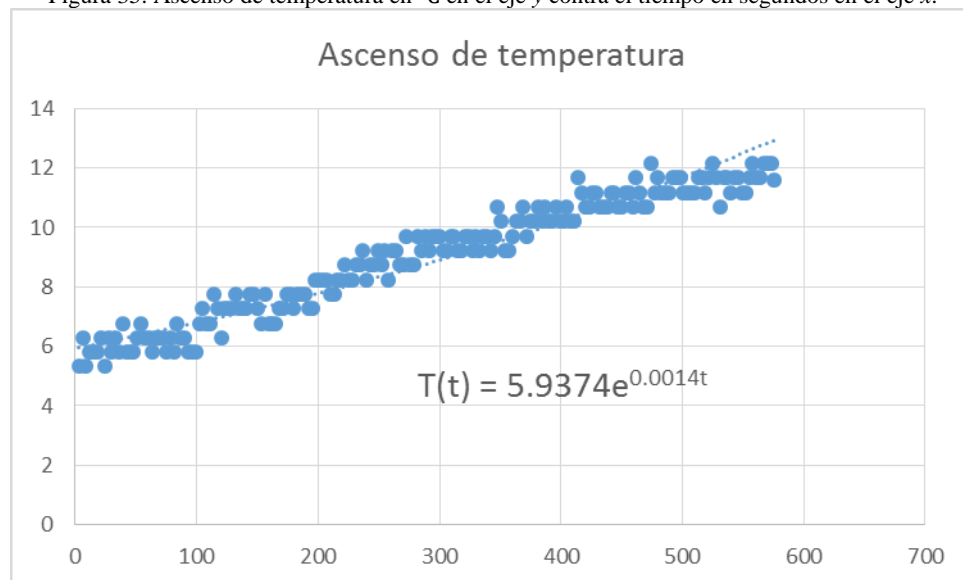
Figura 34. Descenso de la temperatura en °C en el eje y contra el tiempo en segundos en el eje x.



$$5 = -1.966 \ln(t) + 18.482$$

$$t_{descenso} = 837 \text{ s} \approx 14 \text{ minutos}$$

Figura 35. Ascenso de temperatura en °C en el eje y contra el tiempo en segundos en el eje x.



$$12 = 5.937e^{0.0014t}$$

$$t_{ascenso} = 502 \text{ s} \approx 8 \text{ minutos}$$

Cuadro 18. Tiempos promedio de ascenso y descenso de temperatura.

Ítem	minutos
Tiempo descenso	13.95
Tiempo ascenso	8.36

Fuente propia.

A partir de la ecuación de las Figuras 34 y 35 se obtiene el tiempo promedio de ascenso y descenso de temperatura en el espacio refrigerado. Con esta información se obtiene que el refrigerador realiza aproximadamente 65 ciclos al día y alcanza una temperatura mínima de 5 °C.

El poco tiempo que transcurre para que la temperatura del espacio refrigerado se eleve puede ser debido a que existen ciertas partes de la puerta en donde el empaque no cubre y por lo tanto existen filtraciones de aire (ver Figura 36). Otro aspecto que considerar es por la transferencia de calor generado desde el condensador hacia el espacio refrigerado como muestra el análisis termográfico de la Figura 33.

Figura 36. Filtraciones de aire debido a imperfecciones en la instalación del empaque.



E. OPERACIÓN Y SOSTENIMIENTO

Luego de que a el refrigerador se le realizaran las modificaciones recomendadas en la fase anterior se procedió a ponerlo en marcha. La unión del sistema de refrigeración y el espacio refrigerado fue concluido con éxito y a tiempo de acuerdo con el cronograma del proyecto. De acuerdo con los datos de tiempo de enfriamiento y aumento de temperatura, se realizan 65 ciclos al día manteniendo una temperatura de 5 °C a 12 °C. Se concluye el proyecto con un prototipo del espacio refrigerado con un costo total de Q. 390.00.

VI. CONCLUSIONES

1. Se logró manufacturar el prototipo del espacio refrigerado de un refrigerador de uso doméstico utilizando como base un tonel y respetando el costo máximo del proyecto. El prototipo tiene una carga de 162.48 W, con una temperatura de 5 °C y la cual se mantiene por 8 minutos con el sistema apagado.
2. Se diseñó el prototipo del espacio refrigerado mediante la teoría de *Systems Engineering* con un costo final de Q 390.00.
3. Se determinó que el mejor aislante es el poliestireno expandido debido a que tiene un coeficiente de transferencia de calor de $0.037 \frac{W}{m \cdot K}$, precio de Q 9.00 por plancha con medidas de ½ pulgada x 2 pies x 4 pies y es capaz de ser reciclable y/o reutilizado.
4. Se encontraron distintos proveedores en el mercado guatemalteco para obtener al menor costo posible los materiales de construcción del espacio refrigerado.
5. Se manufacturó el espacio refrigerado con un costo de materiales de Q 265.00 utilizando materiales reciclados como el tonel y con capacidad de ser reutilizados como el poliestireno expandido y con un costo de mano de obra de Q 125.00.
6. Existen 14 pasos para la creación del espacio refrigerado tomando en cuenta la base y la unión con el sistema de refrigeración por compresión de vapor.
7. Se creó un manual del correcto uso de un refrigerador para mejorar el comportamiento del sistema.

VII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas de funcionamiento del refrigerador con alimentos durante un tiempo más prolongado para verificar que estos se mantengan correctamente a una temperatura de 5 °C.
2. Se aconseja modificar el tamaño de la puerta para reducir la carga por infiltraciones, debido a que esta es muy grande y aumenta significativamente entre más tiempo se mantenga abierta. Se recomienda reducir la altura y ancho de la misma.
3. Para evitar daños al material aislante por la humedad, se recomienda diseñar un fondo de condensado para que todo este sea expulsado del espacio refrigerado.
4. Se sugiere utilizar un empaque con un imán más potente para poder eliminar la necesidad de utilizar seguros que mantengan la puerta del refrigerador cerrado.
5. Se recomienda utilizar un aislante con un espesor mayor a ½ pulgada para minimizar la transferencia de calor generado por el evaporador hacia el espacio refrigerador.
6. Se recomienda utilizar el refrigerador en un ambiente más real al de prueba para visualizar la manera en la cual todos los componentes se desenvuelven con respecto al uso y al tiempo.
7. Para minimizar la carga por infiltraciones de aire en la puerta se puede utilizar una cortina plástica dado que esta disminuiría el intercambio entre el aire a temperatura ambiente y el del espacio refrigerado.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE, Inc. 2006. *ASHRAE Handbook Refrigeration*. Estados Unidos. American Society of Heating. 15 págs.
- [2] C.W.Chan, *et al.* 2013. A review of chemical heat pumps, thermodynamic cycles and thermal energy storage technologies for low grade heat utilisation. Elsevier. 50 (1): 1257-1273.
- [4] Frigus Bohn. 2005. *Manual de Ingeniería*. México. Grupo Frigus Therme. 39 págs.
- [3] Goríbar, Eduardo. 1997. *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. México. Editorial Limusa. 461 págs.
- [9] HeatCraft. *Heatcraft Proselect Quick-start Guide*. http://www.heatcraft.com/res/pdfs/proselect/ProSelect_QuickStart.pdf. [Consultado el 25/09/2017]
- [5] Kreith, Frank; Raj, Manglik; Mark, Bohn. 2012. *Principios de Transferencia de Calor*. 7ª edición. México, D.F.: Cengage Learning. 250 págs.
- [6] Martínez, Luis. "Fabricación de un Prototipo de Bajo Costo de un Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor" Guatemala, 2017.
- [7] National Aeronautics and Space Administration. 2007. *System Engineering Handbook*. Washington, DC. NASA Headquarters. 360 págs.
- [8] Salas, J; Veras, J. 1985. *Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cáscara de arroz*. Informes de la construcción. 37 (372): 53-64.

IX. ANEXOS

A. PLANOS

Los planos creados en el trabajo de graduación son los siguientes.

Figura 37. ECOFRIGO.

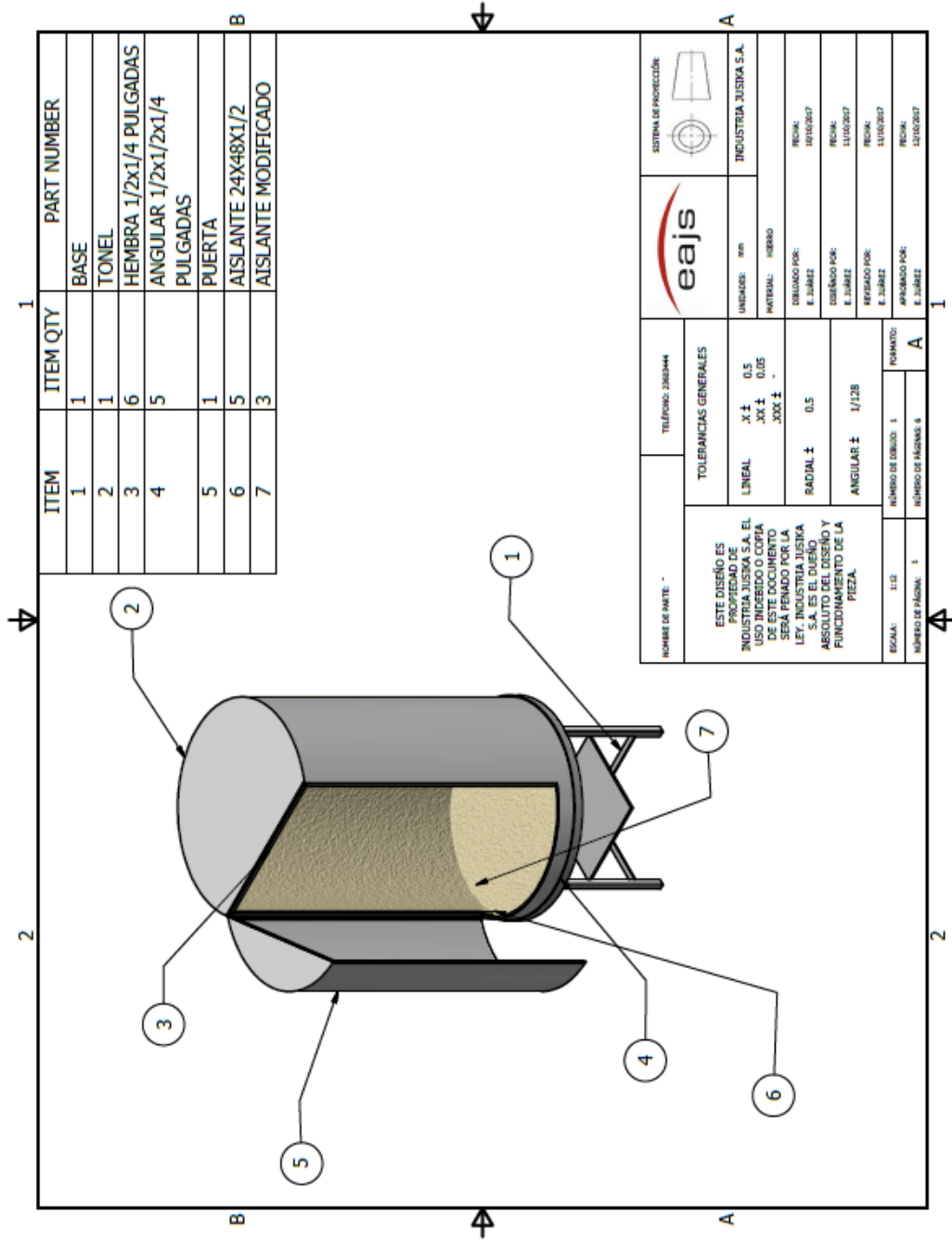


Figura 38. Base del refrigerador.

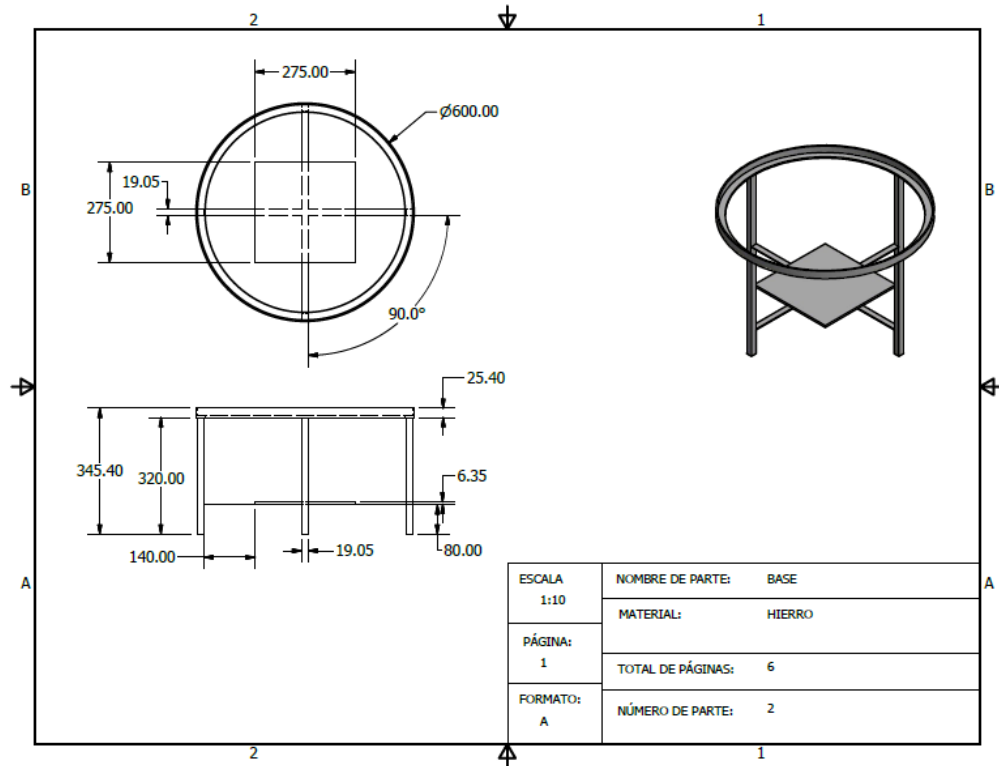


Figura 39. Tonel.

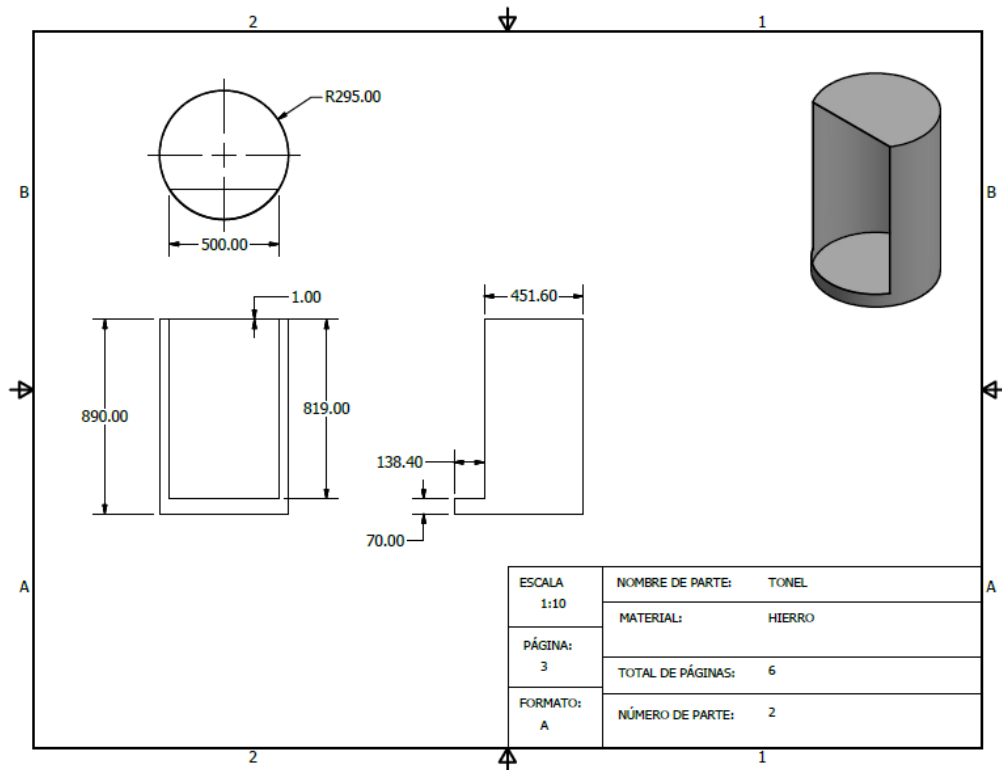


Figura 40. Puerta.

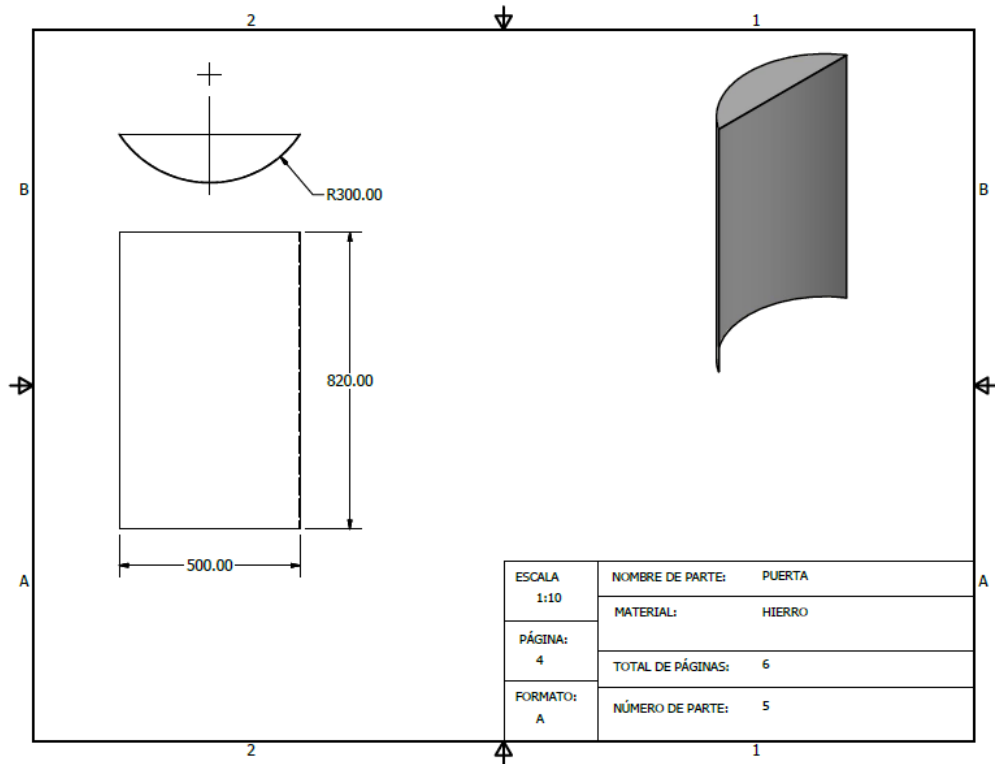


Figura 41. Aislante.

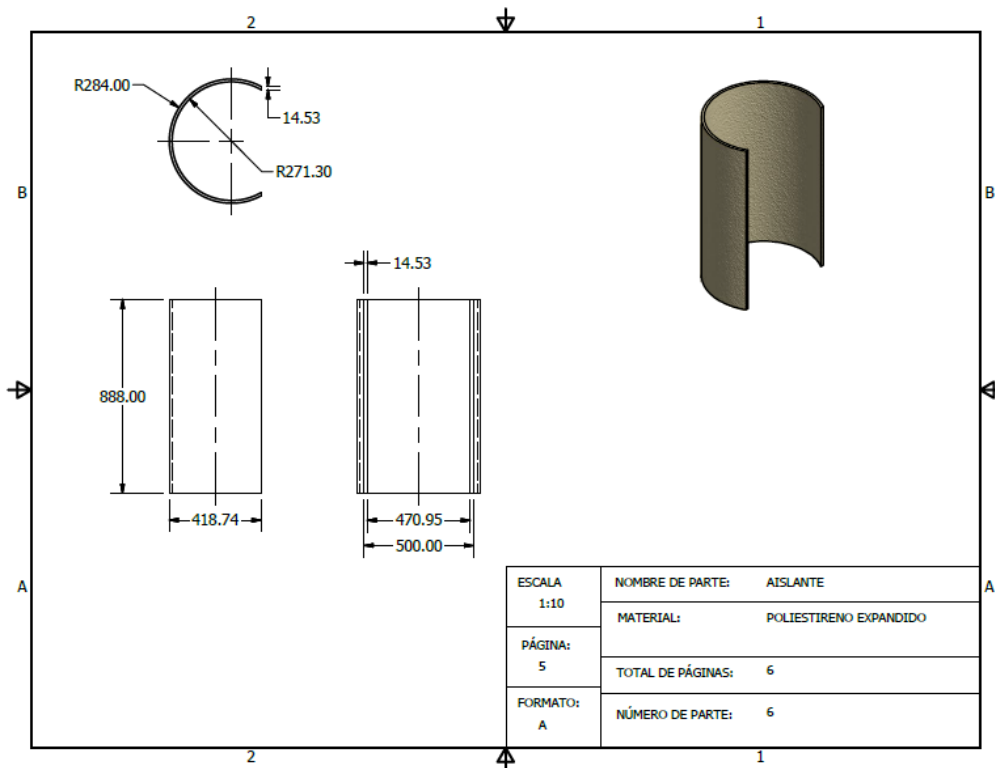
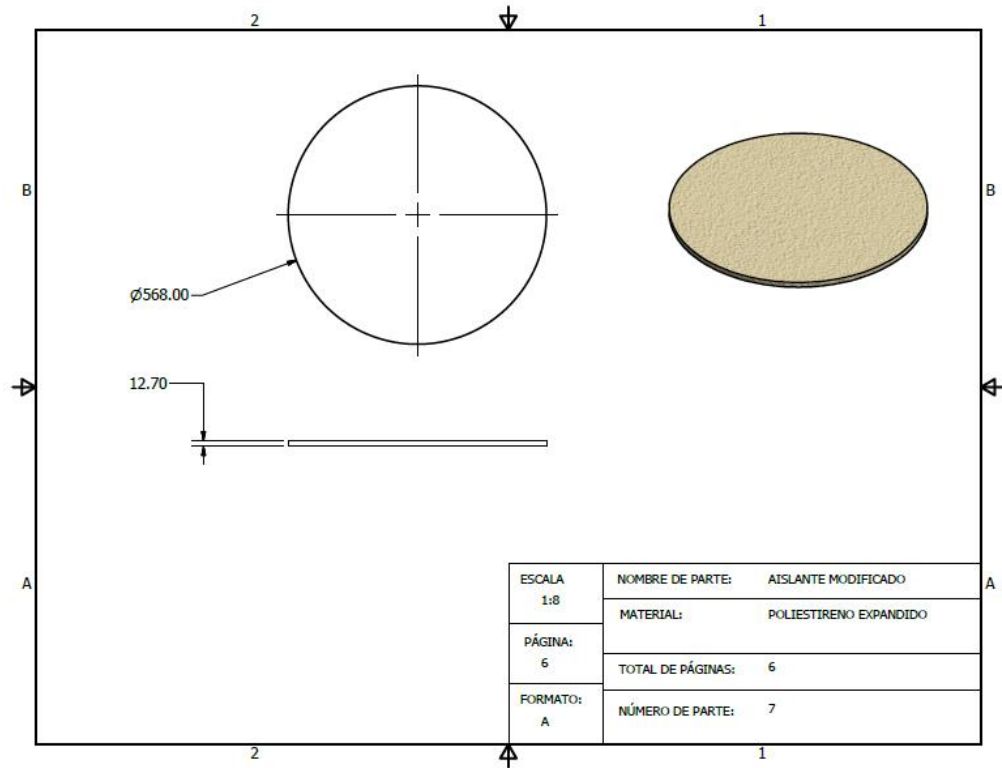


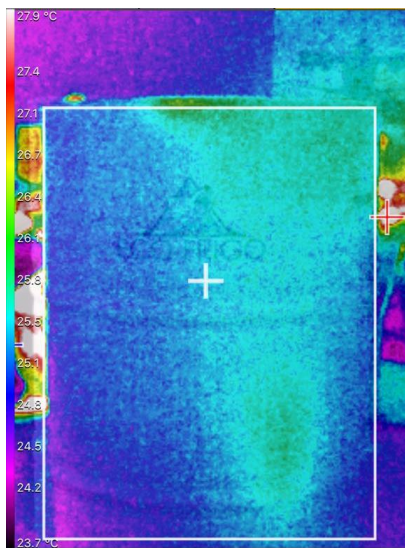
Figura 42. Aislante superior e inferior.



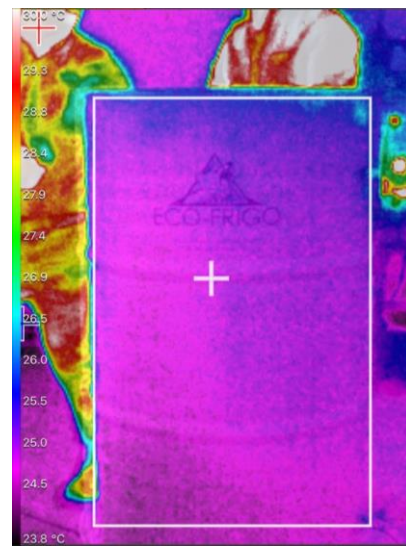
B. PRUEBAS TERMOGRÁFICAS

Cuadro 19. Pruebas termográficas en el exterior durante enfriamiento.

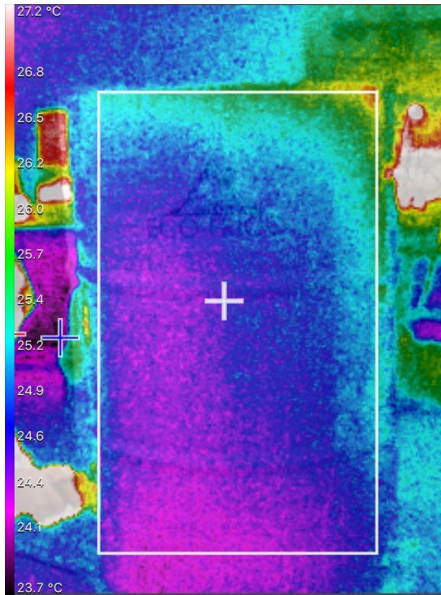
Prueba termográfica durante enfriamiento luego de 5 minutos con una temperatura promedio de 25.5 °C.



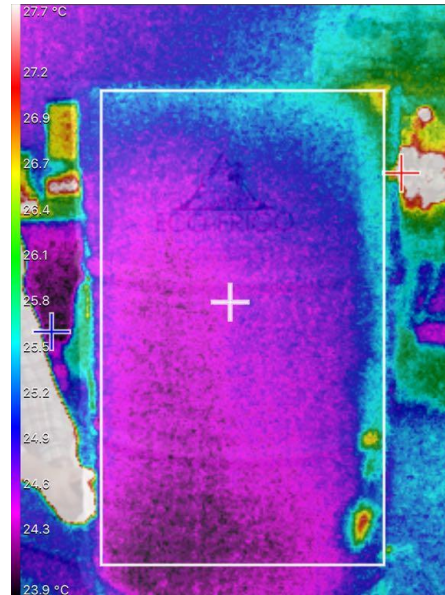
Prueba termográfica durante enfriamiento luego de 10 minutos con una temperatura promedio de 24.3 °C.



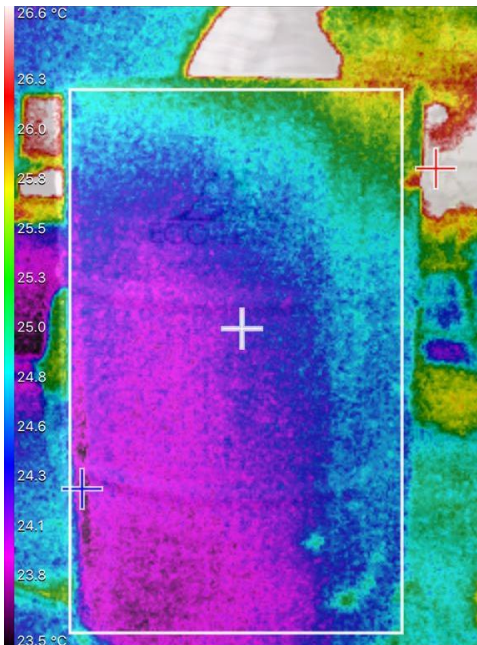
Prueba termográfica durante enfriamiento luego de
15 minutos con una temperatura promedio de 24.3
°C.



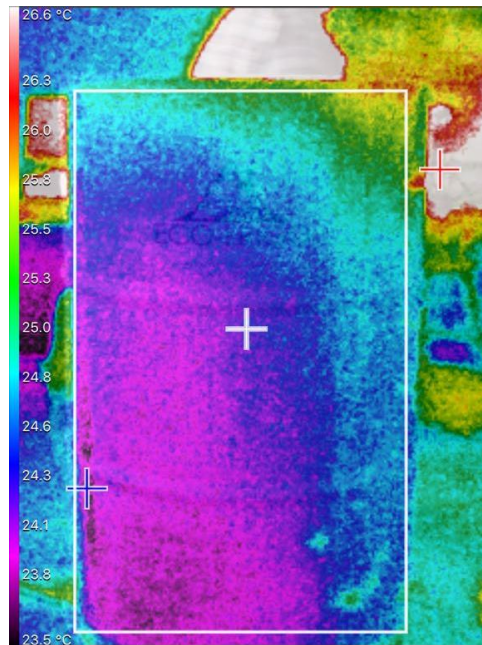
Prueba termográfica durante enfriamiento luego de
20 minutos con una temperatura promedio de 23.5
°C.



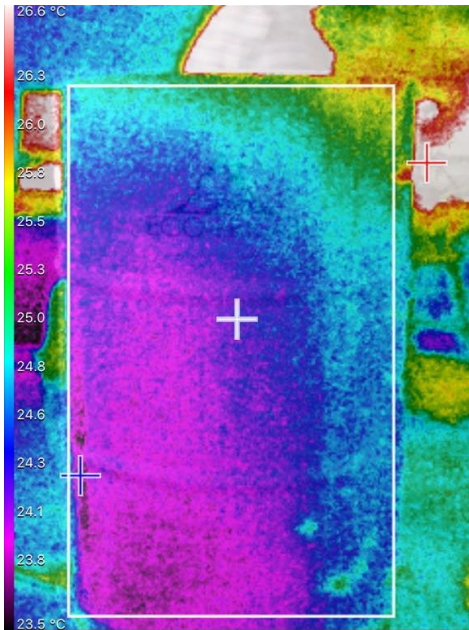
Prueba termográfica durante enfriamiento luego de
25 minutos con una temperatura promedio de 24.2
°C.



Prueba termográfica durante enfriamiento luego de
30 minutos con una temperatura promedio de 24
°C.

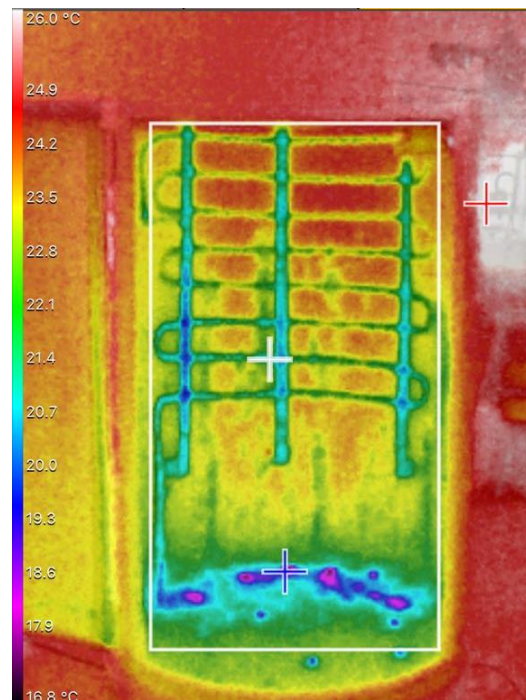


Prueba termográfica durante enfriamiento luego de
35 minutos con una temperatura promedio de 24.2
°C.



Análisis termográfico en el interior mientras el sistema de refrigeración se encuentra apagado luego de 3 minutos.

Análisis termográfico en el interior mientras el sistema de refrigeración se encuentra apagado luego de 6 minutos.



Análisis termográfico en el interior mientras el sistema de refrigeración se encuentra apagado luego de 9 minutos.



Análisis termográfico en el interior mientras el sistema de refrigeración se encuentra apagado luego de 12 minutos





Análisis termográfico en el interior mientras el sistema de refrigeración se encuentra apagado luego de 15 minutos.



Fuente Propia

C.PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

Cuadro 20. Proceso de manufactura del espacio refrigerado.

Paso	Proceso	Imagen
1	Lavar y limpiar el tonel para eliminar cualquier residuo.	 A red metal drum is shown being cleaned. The top surface is covered in a thick layer of white foam, and a hand is visible at the top edge, suggesting manual scrubbing. The drum is outdoors on a concrete surface.
2	Marcar y realizar los cortes en el tonel con respecto a las medidas de los planos.	 A red metal drum is shown from a top-down perspective. A vertical cut has been made through the top of the drum, and a circular hole has been drilled into the top surface. The drum is outdoors on a concrete surface.

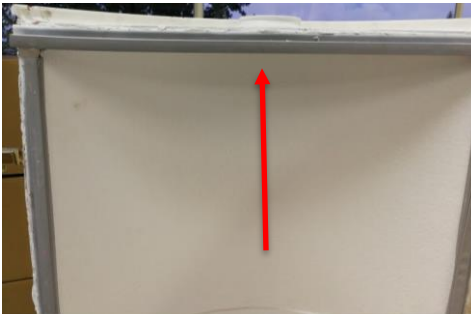
- 3 Soldar las hembras en cada una de las superficies cortadas del tonel y la puerta.



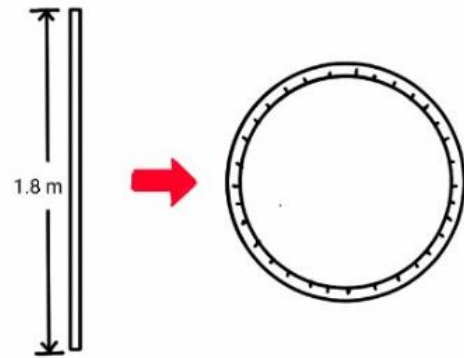
- 4 Soldar las bisagras para unir el tonel y la puerta, dejando un espacio de 1 cm entre las caras de las hembras.



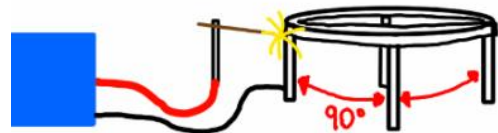
- 5 Instalar los empaques en las hembras de la puerta del refrigerador.



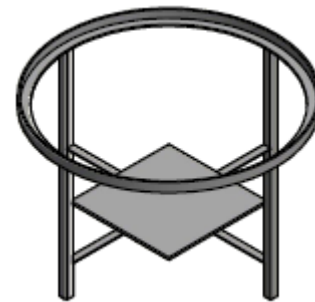
- 6 Cortar 1.8 m de angular y realizarle cortes de 3 cm de largo con una separación de 5 cm para poder hacer la circunferencia de la base del refrigerador.



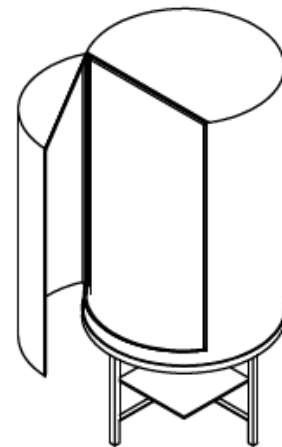
- 7 Soldar 4 angulares de 32 cm a 90° entre cada uno a la circunferencia creada.



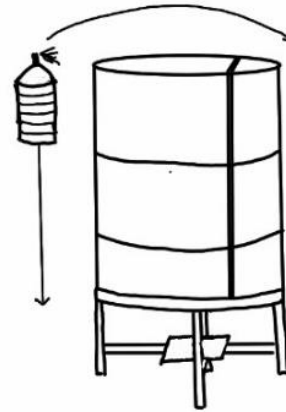
- 8 Soldar 3 hembras formando una cruz a los soportes de la base. Encima de esta colocar una plancha de 27.5 cm^2 .



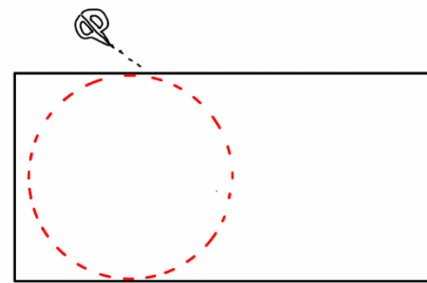
- 9 Unir espacio refrigerado y base.



- 10 Pintar exterior del espacio refrigerado de blanco.



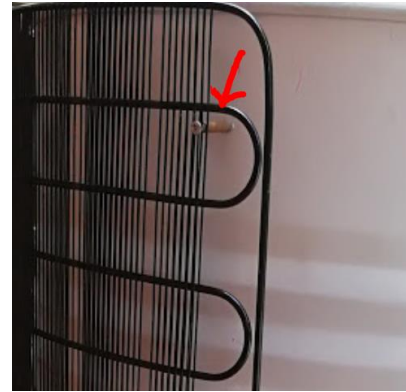
- 11 Recortar tres círculos con 56.8 cm de diámetro de la plancha de poliestireno expandido. Colocar dos en el fondo del espacio refrigerado y uno en el techo.



- 12 Con la ayuda de una pistola de calor calentar las planchas de poliestireno expandido y doblarlas hasta obtener la forma interna del tonel. Una vez logrado esto colocarla mediante pegamento hasta cubrir toda la superficie interna del tonel.



- 13 Realizar tres agujeros en el techo del tonel para los soportes del evaporador en el interior del espacio refrigerar y dos agujeros en la parte posterior del refrigerador para tornillos de soporte del condensador.



- 14 Unir espacio refrigerado con sistema de refrigeración por compresión de vapor.



D.CORRECTO USO DEL REFRIGERADOR

Cuadro 21. Cuidado para un correcto funcionamiento de un refrigerador.

Ítem	Cuidado	Razón
1	No ingresar alimentos aún calientes al refrigerador.	El trabajo que debe de realizar el sistema de refrigeración para reducir la temperatura del producto es mucho mayor, debido al aumento de la carga por productos. Es mejor enfriar por un tiempo la comida en el exterior.
2	Dejar espacio entre los alimentos para que pueda circular aire entre estos.	Es más sencillo enfriar alimentos cuando el aire logra circular por una mayor área superficial del mismo.
3	No dejar la puerta mucho tiempo abierta.	Entre más tiempo pase el refrigerador con la puerta abierta, mayor será la cantidad de aire a temperatura ambiente que se mezcle en el interior, aumentando la carga por infiltraciones.
4	Dejar un espacio mayor a 15 cm entre el condensador y la pared.	Cuando no existe un espacio aceptable entre el condensador y la pared, el calor tiende a dirigirse hacia el espacio refrigerado elevando la temperatura del mismo.
5	Limpiar el condensador cada cierto tiempo.	Suciedad en la tubería del funciona como resistencia térmica, disminuyendo la capacidad del condensador para liberar calor, reduciendo la eficiencia del sistema.

6	El refrigerador funciona de mejor manera cuando esté lleno.	El mantener lleno el refrigerador ayuda a sostener las temperaturas bajas debido a que menos esfuerzo debe realizar el sistema para alcanzarlas.
7	Mantener limpio los empaques del refrigerador.	Si los empaques no se encuentran en buen estado son susceptibles a permitir infiltraciones de aire al espacio refrigerado.

Fuente propia.