

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de prototipo de un refrigerador
de bajo costo para comunidades del Corredor Seco de
Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Luis Pablo Salvatierra
Weissenberg para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de prototipo de un refrigerador
de bajo costo para comunidades del Corredor Seco de
Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Luis Pablo Salvatierra
Weissenberg para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala
2025

Vo.Bo Asesor.:

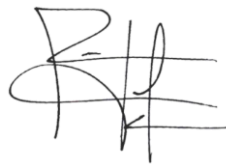


Ing. Gustavo Waldemar Pineda de León

Vo.Bo. Tema Examinadora:



MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega



Ing. Rony José Herrarte Estévez



Ing. Gustavo Waldemar Pineda de León

Fecha de aprobación de examen de graduación: Guatemala, 18 de junio de 2025.

Índice

Lista de figuras	v
Lista de cuadros	vii
Resumen	xi
Abstract	xii
1. Introducción	1
2. Justificación	2
3. Objetivos.....	4
3.1. Objetivo general.....	4
3.2. Objetivos específicos.....	4
4. Marco teórico.....	5
4.1. Contexto general.....	5
4.1.1. Contexto socioeconómico.....	6
4.1.2. Condiciones y hábitos alimenticios.....	7
4.2. Aislantes de uso común.....	8
4.3. Aislantes de bajo costo	9
4.3.1. Pulpa de papel reciclado	9
4.3.2. Lana de oveja	11
4.3.3. Cáñamo	12
4.3.4. Poliestireno expandido	13
4.4. Refrigeración por compresión.....	14

4.5.	Medios de refrigeración de bajo costo.....	16
4.5.1.	Sistemas de refrigeración por absorción/adsorción.....	16
4.5.2.	Sistema de refrigeración con bomba de inyección (jet pump).....	18
4.5.3.	Sistema de enfriamiento termoeléctrico (principio de Peltier).....	19
4.5.4.	Sistema de refrigeración termoacústica.....	20
4.5.5.	Refrigeración magnética.....	21
4.6.	Coeficiente de rendimiento (COP).....	22
4.7.	Transferencia de calor.....	23
4.7.1.	Formas de transferencia de calor.....	24
4.8.	Disipadores térmicos.....	26
5.	Metodología.....	29
5.1	Fases de la metodología.....	29
5.2	Desarrollo.....	30
5.3	Prototipado y cálculos.....	32
5.4	Selección de materiales.....	35
5.4.1.	Armadura.....	35
5.4.2.	Aislante.....	36
5.4.3	Disipadores de calor.....	38
5.5	Cálculos.....	38
5.5.1.	Carga térmica.....	38
5.5.2.	Carga por infiltración de aire.....	39
5.5.3.	Carga por contenido.....	40
5.5.4.	Carga por transferencia a través de paredes.....	41

5.6	Manufactura	43
5.6.1.	Armadura	43
5.6.2.	Cabina interna	44
6.	Resultados	46
6.1	Resultados experimentales.....	47
6.2	Comparación de COP	49
6.3	Análisis de costos.....	49
7.	Conclusiones.....	51
8.	Recomendaciones.....	52
9.	Referencias.....	53

Lista de figuras

Figura 1. Nivel de pobreza en los departamentos del Corredor Seco de Guatemala.....	5
Figura 2. Producción agropecuaria.....	6
Figura 3. Propiedades de la pulpa según el porcentaje de aerogel.....	10
Figura 4. Propiedades de la pulpa según la forma de mezclado.....	11
Figura 5. Coeficiente de conductividad térmica de mezcla de lana de diferentes razas de ovejas.....	11
Figura 6. Temperatura en función del grosor de la pared de lana.....	12
Figura 7. Poder calorífico de biomasas comunes.....	12
Figura 8. Conductividad térmica de materiales aislantes.....	15
Figura 9. Ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor.....	15
Figura 10. Temperaturas alcanzables según las etapas de compresión	17
Figura 11. Ciclo de un sistema de refrigeración por absorción	18
Figura 12. Sistema de refrigeración con bomba de inyección	18
Figura 13. Sistema de refrigeración termoeléctrica	20
Figura 14. Sistema de refrigeración termoacústica.....	21
Figura 15. Sistema de refrigeración magnética	22
Figura 16. Ecuaciones de transferencia de calor en régimen transitorio para diferentes geometrías.....	24
Figura 17. Pruebas con la celda Peltier	34
Figura 18. Resultados en las primeras pruebas con la celda Peltier.....	34
Figura 19. Diseño de prototipo de refrigerador termoeléctrico.....	35
Figura 20. Dimensiones de las paredes de la armadura.....	44
Figura 21. Cabina interna del refrigerador.....	45

Figura 22. Temperatura mínima alcanzada en el prototipo.....	47
Figura 23. Resultados después de 2 horas de corrida.....	48

Lista de cuadros

Cuadro 1. Conductividad térmica de materiales aislantes	14
Cuadro 2. Reducción de temperatura según las etapas de compresión.....	17
Cuadro 3. Identificación de códigos	30, 46
Cuadro 4. Requisitos del diseño	33, 46
Cuadro 5. Recursos necesarios para el proyecto.....	31
Cuadro 6. Conductividad térmica de materiales aislantes.....	37
Cuadro 7. Alimentos que se consideraron para almacenar en el refrigerador	41
Cuadro 8. Dimensiones de las paredes de madera del refrigerador	43
Cuadro 9. Resultados experimentales	48
Cuadro 10. Costo de fabricación del prototipo	50
Cuadro 11. Costo de operación del refrigerador termoeléctrico	50
Cuadro 12. Costo de operación del refrigerador por compresión de vapor	51
Cuadro 13. Requisitos cumplidos.....	51

Resumen

Las condiciones climáticas y económicas en el Corredor Seco de Guatemala presentan una dificultad para almacenar comida en las comunidades de escasos recursos económicos principalmente frutas y verduras. El objetivo del presente trabajo fue diseñar un sistema de refrigeración de bajo costo de fabricación y operación capaz de prolongar la vida de los alimentos, reduciendo de esta manera los costos de transporte hacia y desde el mercado, así como el desperdicio de comida

Se analizaron diferentes métodos de refrigeración sin compresor (termoeléctrica, por absorción, por adsorción y magnética) para evaluar cuál es la opción que mejor se adecúa a las condiciones del Corredor Seco. El modelo de refrigeración termoeléctrica desarrollado alcanza una temperatura mínima de 16.6 °C después de operar por 60 minutos con un costo de fabricación de Q980 y un consumo de 0.76 kWh. Adicional a su operación, el refrigerador está construido con materiales con una baja huella de carbono.

Palabras clave: Corredor Seco, Guatemala, refrigeración termoeléctrica, bajo costo, comunidades rurales,

Abstract

The climatic and economic conditions in the Dry Corridor of Guatemala present difficulties for food storage in low-income communities, particularly for fruits and vegetables. The objective of this study was to design a low-cost refrigeration system, both in manufacturing and operation, capable of extending the shelf life of food, thereby reducing transportation costs to and from local markets and minimizing food waste.

Different compressor-free refrigeration methods (thermoelectric, absorption, adsorption, and magnetic) were analyzed to evaluate which option best adapts to the conditions of the Dry Corridor. The developed thermoelectric refrigeration model reaches a minimum temperature of 16.6 °C after operating for 60 minutes, with a manufacturing cost of Q980 and an energy consumption of 0.76 kWh. In addition, the refrigerator is built with materials that have a low carbon footprint.

Keywords: Dry Corridor, Guatemala, thermoelectric cooling, low cost, rural communities

1. Introducción

El corredor seco de Guatemala enfrenta una serie de desafíos, entre los cuales destaca la escasez de energía eléctrica y la dificultad para conservar alimentos frescos. Ante esta problemática, este trabajo de investigación presenta el diseño y construcción de un refrigerador innovador, capaz de operar sin la necesidad de un compresor y con un consumo eléctrico significativamente menor a los refrigeradores convencionales. Utiliza materiales locales y de bajo costo como madera y poliestireno expandido como aislamiento térmico. Se desarrolló un prototipo que busca ofrecer una solución sostenible y accesible a las comunidades de esta región. Se analizaron diferentes métodos de refrigeración sin compresor (termoeléctrica, por absorción por adsorción y magnética) para evaluar cuál es la opción que mejor se adecúa a las condiciones del corredor seco de Guatemala. El modelo de refrigeración termoeléctrica desarrollado alcanza una temperatura mínima de 16.6 °C después de operar por 60 minutos y tiene un costo de fabricación de Q980.35, y un consumo de 0.76 kWh. Adicional a su operación, el refrigerador está construido con materiales con una baja huella de carbono.

2. Justificación

Según la Universidad de California Davis, la pérdida de frutas y verduras en países en vía de desarrollo es de hasta el 50 % debido a falta de conservación por refrigeración (2019). Esto implica realizar viajes diarios al mercado para comprar alimentos, lo que significa costos de transporte elevados. El hecho de que los refrigeradores convencionales tengan precios elevados respecto al salario mínimo, y que su consumo energético sea alto, evita a las familias de escasos recursos el poder contar con uno. En el presente, el salario mínimo en Guatemala es de Q3,843.55 para actividades agrícolas, y Q3,723.05 para actividades no agrícolas (Ministerio de Trabajo, 2025). Es importante tomar en cuenta que muchas de las personas del sector objetivo no cuentan con un trabajo con salario fijo, por lo que adquirir un refrigerador para la conservación de sus alimentos suele estar fuera de su alcance.

El diseñar un sistema de refrigeración de bajo costo de producción y operación presenta un beneficio tanto para la empresa que lo manufacture, así como para las personas de comunidades de bajos recursos que viven en el corredor seco de Guatemala. El enfoque del proyecto consiste en diseñar y prototipar un sistema de refrigeración que cumpla con estos dos requisitos. Se busca proponer un diseño que sea funcional con recursos disponibles en la región de interés y que no requiera de energía eléctrica o, en su defecto, un mínimo de energía eléctrica para su operación diaria. Es importante proveerle a estas comunidades un medio para almacenar sus alimentos en buen estado por un período de varios días, de esta manera previenen enfermedades de malnutrición al mismo tiempo que se tiene un impacto positivo en su economía. Se seleccionó la región del corredor seco ya que la descomposición de frutas y verduras es más acelerada debido a las altas temperaturas. De igual manera, es un sector más viable para aplicar métodos como la evaporización de agua, método que no requiere de electricidad para que el sistema funcione y que se puede elaborar con materiales que casi no requieren de una inversión económica, tales como la arcilla y grava. Esta es una ventaja para ambas partes del proyecto: productores y beneficiarios; ya que la producción puede ser alta y la mano de obra, barata.

La finalidad de este proyecto es establecer un ciclo de refrigeración funcional, útil y sencillo que sea capaz de almacenar frutas y verduras por un tiempo mayor a 3 días en una región calurosa como lo es el corredor seco. De igual manera, se pretende comprobar dicho ciclo con un prototipo para identificar áreas de mejora y detectar posibles errores a corto y mediano plazo. Se pretende proponer un diseño innovador que deje a un lado componentes eléctricos, como un compresor (común en refrigeradores convencionales), con el propósito de reducir costos de operación y contar con una simplicidad de diseño. Una de las razones principales por la cual no son populares los sistemas de refrigeración económicos y eco amigables en Guatemala y el corredor seco es por falta de interés, conocimiento y el reto de ser una región con clima variado. Este último punto es relevante ya que la diferencia de temperatura entre el sumidero y la fuente de una máquina térmica es importante para determinar el COP (Fuerte, M. 2021). Con un estudio riguroso se pueden adaptar proyectos y sistemas de refrigeración de bajo costo existentes en Norteamérica y Europa.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar un diseño innovador de un sistema de refrigeración sin compresor, de bajo costo de producción y operación para las comunidades de bajos recursos en la región del corredor seco en Guatemala.

3.2. Objetivos específicos

1. Lograr que la temperatura de la cámara de refrigeración sea menor a la temperatura ambiente
2. Diseñar un sistema de refrigeración que consuma menos de $\frac{1}{4}$ hp (186.4 W)
3. Diseñar y construir un sistema de refrigeración cuyo costo de fabricación no supere los Q1,500.00
4. Establecer la carga térmica del refrigerador en base a los alimentos que más se consumen en el corredor seco de Guatemala
5. Comparar el COP de un refrigerador por compresión de vapor contra el COP del diseño propuesto

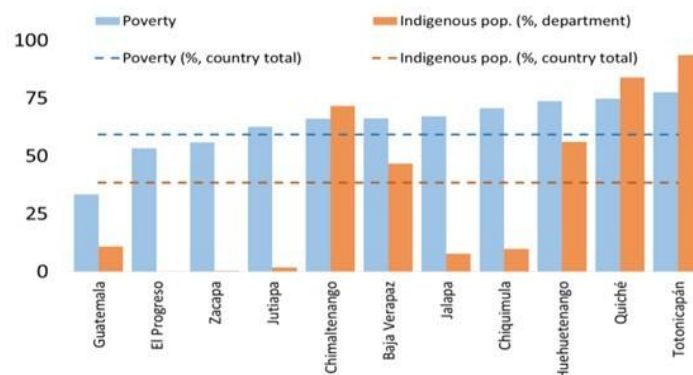
4. Marco teórico

4.1. Contexto general

El Corredor Seco es una región de Centroamérica que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica. Se caracteriza por ser una región semiárida con alta pobreza y vulnerabilidad a desastres climáticos, como inundaciones y sequías. Uno de los mayores retos de la población que habita en esta región es la malnutrición debido a la inseguridad alimentaria (Gotlieb et al., 2019).

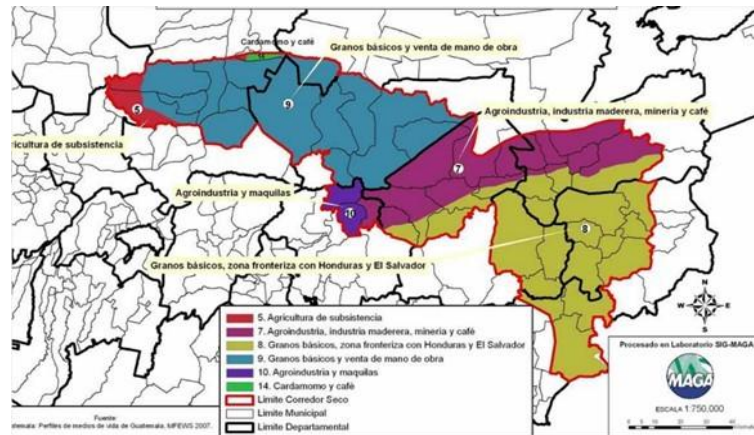
En Guatemala, el Corredor Seco abarca los siguientes departamentos: El Progreso, Zacapa, Chiquimula, Quiché, Baja Verapaz, Jutiapa y Jalapa. Más de 2.5 millones de habitantes se encuentran en estos departamentos, de los cuales el 70 % viven en pobreza extrema (**Figura 1**). Una de las causas principales es que la temperatura promedio en estos departamentos se encuentra entre 14 °C y 24 °C, lo cual afecta a las actividades agropecuarias: fuente principal de ingresos de la población (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, 2010).

Figura 1. Nivel de pobreza en los departamentos del corredor seco de Guatemala



Nota. Adaptado de Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (2010)

Figura 2. Producción agropecuaria



Nota. Adaptado de Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (2010)

4.1.1. Contexto socioeconómico

Las actividades económicas mayormente practicadas en la región son la agricultura y la ganadería, centrándose en la cosecha de café, maíz y frijol (**Figura 2**) (WFP, 2019). Sin embargo, las condiciones climáticas presentan un reto para la producción agropecuaria, pues se enfrentan con una gran inseguridad de recursos. Esto solamente empeora durante los meses entre mayo a octubre, ya que es la época del año en que la demanda es más alta. Con tal de suplir el producto para mantenerse en el mercado, los agricultores venden sus herramientas de trabajo y, más importante, sus reservas alimentarias, dejando a las familias en una posición vulnerable (Fraga, 2020).

El PIB de la región solo conforma el 10 % del total de Guatemala, por lo que el 80 % de los municipios que se encuentran en el Corredor Seco, viven en pobreza o pobreza extrema. Han surgido alternativas para generar ingresos, siendo los más frecuentes emprendimientos pequeños y la migración. Las personas que migran no logran cambiar su situación económica, pues la falta de educación y barreras lingüísticas las previenen de encontrar oportunidades laborales favorables (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, 2010).

4.1.2. Condiciones y hábitos alimenticios

Como se mencionó previamente, la población que habita en el Corredor Seco de Guatemala son agricultores y ganaderos, por lo que su alimentación se basa en los productos que generan: pollo, res, frijoles, arroz y maíz. La compra de otros productos como frutas y verduras tiene un precio elevado debido a que es una región de difícil acceso para los vehículos que transportan los alimentos. Pese a que la mayoría de familias cultivan sus propios alimentos, se ven en la necesidad de vender parte de sus reservas para comprar fertilizantes y demás recursos para seguir produciendo, esto implica una alta inversión dado que la calidad de los suelos es baja. Los tiempos de hambruna se intensifican entre abril y agosto, llegando a no comer los tres tiempos del día y dando paso a la malnutrición (WFP, 2019).

Otros factores que afectan la seguridad alimentaria es la delincuencia. Muchas familias sufren de extorsiones y robo de recursos. Estudios como el de Frotiers sobre la inseguridad alimentaria en el Corredor Seco de Guatemala, realizado en el 2019 señalan que esto tiene su origen debido a los sueldos bajos y poco acceso a recursos médicos, por lo que muchos sectores rurales no son seguros económica ni socialmente. Seiscientos cuatro mil personas en el corredor seco de Guatemala están en emergencia alimentaria y 3.6 millones están en crisis. Las razones principales son (Stat y CARE, 2023):

- Agotamiento de la cosecha anterior
- Desigualdad de género
- Desigualdad económica y pobreza
- Cambio climático: se les acaba la cosecha y se ven en la necesidad de vender sus herramientas y materiales

Según un estudio de campo de Care Evaluations en 2022 realizado a más de 160 hogares en el corredor seco, se encontró que los alimentos consumidos con menor frecuencia son pescado, golosinas, carnes y lácteos, ya que requieren de refrigeración para prolongar los alimentos en buen estado. Por el otro lado, los alimentos que se consumen con mayor frecuencia son cereales y granos, legumbres, nueces, semillas secas, huevos y azúcar, alimentos que comúnmente no requieren de almacenamiento refrigerado para conservarse en buen estado.

El 42 % de los hogares no dispone de reservas de maíz ni de otros granos, lo que los obliga a endeudarse para comprar granos tanto para su consumo personal, como para las cosechas. Una de las estrategias de supervivencia que han aplicado los hogares de las comunidades es ahorrar gastos al consumir alimentos de menor calidad, lo cual es seriamente perjudicial para la salud y conduce a la malnutrición. La falta de almacenamiento de los alimentos puede producir la proliferación de microorganismos que contaminan los alimentos a un ritmo acelerado. La inseguridad e insalubridad alimentaria en el corredor seco de Guatemala conducen a desnutrición moderada o grave de más de 7 millones de personas, lo que vuelve a las personas más susceptibles a enfermedades y perjudica el desarrollo cognitivo. (Chávez Barrios et al., 2022)

4.2. Aislantes de uso común

En la industria de refrigeración es común utilizar alguno de los siguientes aislantes: espuma de poliestireno, fibra de vidrio y espuma de poliuretano, siendo esta última la más popular. El interés de utilizar espuma de poliuretano despierta por sus excelentes propiedades físicas y térmicas, pues es un material rígido con un coeficiente de conductividad térmica de 0.02 W/m K. La espuma puede ser de célula abierta o cerrada; la primera es mejor absorbiendo sonido, mientras que la segunda es mejor aislante térmico. (Gama, et al, 2018).

La espuma de poliuretano pertenece al grupo de espumas poliméricas. Uno de los mayores problemas de obtener la materia prima es que los polímeros utilizados provienen del petróleo. Durante los últimos años han cobrado relevancia las prácticas industriales con bajo Impacto ambiental. Afortunadamente para la industria de la refrigeración, se ha desarrollado tecnología de impresión en 3D para producir la materia prima para el poliuretano. Otra ventaja de este método es que se puede fabricar la espuma para geometrías complejas y para superficies esféricas con técnicas de rociado. Otra forma de reducir el impacto ambiental es utilizar biopolímeros para fabricar sus productos. Empresas como as Dow Chemical, Bayer Material Science y BASF SE ya utilizan biopolímeros (Gama, et al, 2018).

Cabe mencionar que en todo material compuesto se pueden alterar las propiedades físicas, químicas y térmicas según su composición. Esta es una práctica común en los aislantes ya que se puede aumentar la conductividad térmica, o mejorar la resistencia mecánica de los

materiales (Papadopoulos, A, 2004, pag 77-79). Por lo tanto, la versatilidad de los aislantes es amplia y pueden cumplir una doble función: soporte estructural y aislamiento térmico. Dichas alteraciones dependen grandemente del método que se utilice, puede ser un método de producción físico, químico o combinado.

4.3. Aislantes de bajo costo

Al momento de elegir un aislante poco conocido a nivel industrial hay ciertos factores que se deben tomar en cuenta para que sea funcional, los principales factores son los siguientes (Canetti, R.B. 2017):

- Reacción ante el fuego
- Estructura y propiedades físicas
- Hidrofobia con un ángulo de contacto al agua: 158.72°
- Estructura y propiedades químicas
- Medio de producción
- Absorción de humedad
- Eficiencia energética

A continuación, se hablará sobre los materiales eco amigables más prometedores que han comenzado a utilizarse en los últimos años como aislantes en sistemas de refrigeración.

4.3.1. Pulpa de papel reciclado

La pulpa se compone mayormente de celulosa y oxígeno, se puede obtener de papel reciclado, madera o plantas. Según el estudio realizado por Lee, M. et al. En el año 2023 donde estudian este material “reciclar una tonelada de pulpa de papel puede equivaler a salvar 17 árboles, 3.3 yardas cubicas de tierra y 100 galones de agua y gasolina, así como 10 megawatts de electricidad”.

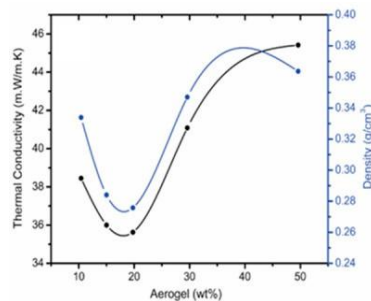
La celulosa normalmente no tiene buenas propiedades térmicas ni mecánicas, pero combinándola con aerogel se aumentan la resistencia mecánica y sus propiedades aislantes (como se muestra en la **Figura 3**). Otra característica que se obtiene de este proceso es que el material se vuelve flexible e hidrofóbico, lo que es conveniente para refrigeración por cambio de fase. De esta forma, las propiedades de interés son las siguientes:

- Conductividad térmica: 0.03468 W/m K
- Módulo de flexibilidad/elasticidad: 429.21 MPa
- Hidrofobia con un ángulo de contacto al agua: 158.72 °

Hay dos formas de crear la mezcla celulosa-aerogel: A) una mezcla física/mecánica, B) una mezcla química. Ambas mejoran las características mencionadas, pero los resultados son ligeramente diferentes como se muestra en la **Figura 4**. La grafica (d) corresponde a mezclado químico *in situ* y la gráfica (e), al mezclado físico.

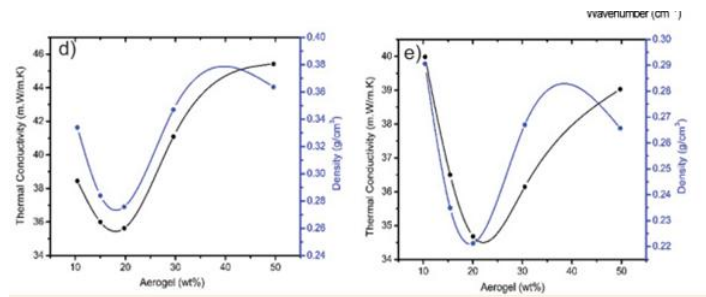
El material obtenido después de la mezcla es una fibra porosa que se puede manipular a través de una impresora 3D para producir una geometría específica. De nuevo, la forma de los poros difiere según el método de mezclado. La conductividad térmica aumenta al sobrepasar el 20 % wt (peso total), ya que se reduce la porosidad y densidad. Para una conducción térmica más alta, es conveniente estar en un rango entre 0% y 20 % wt (Sarkar, et al, 2023).

Figura 3. Propiedades de la pulpa según el porcentaje de aerogel



Nota. Adaptada de Sarkar (2023)

Figura 4. Propiedades de la pulpa según la forma de mezclado



Nota. Adaptada de Sarkar (2023)

4.3.2. Lana de oveja

La lana tiene buenas propiedades físico-mecánicas, tales como: resistencia mecánica (dependiendo de la presentación del material), es higroscópica (absorbe vapor de agua) e hidrofóbica, regulación de temperatura, anti inflamable y es un recurso renovable con poco impacto en el ambiente y bajo costo de producción. Una posible desventaja es que las capas de lana necesarias para tener un aislamiento aceptable son gruesas. Sin embargo, es buena absorbente de sonido y vibraciones (Corscadden et al., 2014).

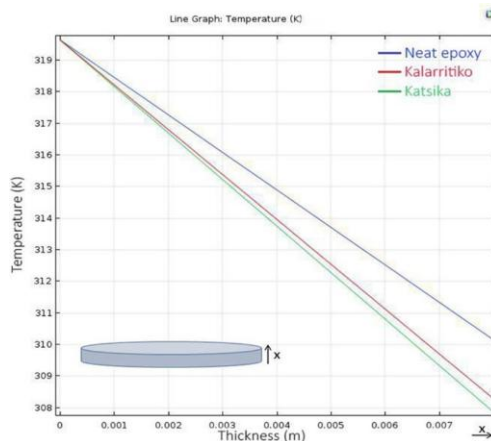
Según un estudio realizado en el 2020 por Semitekolos et al., 2020 sobre las propiedades de la fibra de lana, estas dependen de la raza de la oveja. De igual manera, se pueden alterar sus propiedades mezclándola con otros compuestos. En las siguientes figuras (5 y 6) se muestran las propiedades de diferentes lanas mezcladas con epoxy para modificar sus características.

Figura 5. Coeficiente de conductividad térmica de mezcla de epoxy con lana de diferentes razas de ovejas

Table 4. Coefficient of thermal conductivity for neat epoxy and composite materials.	
Specimen	Thermal Conductivity Coefficient, k (W/ m²K)
Neat Epoxy	0.43 ± 0.015
Kalarritiko + Epoxy	0.32 ± 0.01
Katsika + Epoxy	0.3 ± 0.006

Nota. Adaptada de Corscadden et al. (2014)

Figura 6. Temperatura en función del grosor de la pared de lana



Nota. Adaptada de Semitekolos et al. (2020)

4.3.3. Cáñamo

El cáñamo es otro material biodegradable con buenas propiedades térmicas. En Europa ya se tiene experiencia utilizándolo como aislante y material de construcción, pues se pueden hacer mezclas para crear una especie de concreto. Además de aislante térmico, el cáñamo se puede usar como combustible, ya que es comparable con las biomásas ampliamente utilizadas presentadas en la **Figura 7** (Lekavicius et al., 2015).

Figura 7. Poder calorífico de biomásas comunes

Material	Calorific value (MJ/kg)		Assumed Moisture content (%)
	Gross	Net	
Hemp	18.5	13.4	20
Wood residues	19.7	10	40
Straw	18	13	20
Peat	21.5	8.9	50

Nota. Adaptada de Lekavicius et al. (2015)

Algunas de las ventajas de este material es que la instalación es relativamente sencilla, se puede reutilizar, no tiene agentes tóxicos para el humano ni para el ambiente y es fácil de transportar.

Sin embargo, debido a los tratamientos que se le deben hacer y que la producción se realiza en países extranjeros, el precio de compra es elevado. También se requieren de múltiples capas gruesas para generar un aislante térmico aceptable, lo cual puede ser un obstáculo para sistemas de refrigeración de espacio reducido (Lekavicius, V, et al. , 2015, pág 43-45).

4.3.4. Poliestireno expandido

Otro aislante de bajo costo muy utilizado en la industria es el poliestireno expandido (EPS), también conocido como *duroport*. Algunas de las razones principales por las cuales es tan utilizado son las siguientes (Weber,2025):

- Tiene una conductividad térmica entre 0.030-043 W/(m-K).
- Manipulación e instalación sencilla.
- Impermeable al agua
- Alta durabilidad
- Inocuidad alimenticia
- Bajo precio
- Diversidad de presentaciones

El poliestireno expandido (EPS) tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica puesto que su estructura porosa es capaz de atrapar pequeñas burbujas de aire en su interior. Esta configuración celular no solo le confiere excelentes propiedades aislantes, sino que también incrementa la rigidez del material, todo ello con la ventaja de mantener una densidad considerablemente baja (Gómez, 2023). Estas cualidades hacen del EPS una alternativa viable para aplicaciones en sistemas de refrigeración donde se prioriza la reducción de peso estructural y costos de fabricación, sin comprometer la eficiencia térmica.

A primera instancia podría considerarse que el poliestireno expandido (EPS) no es un material ambientalmente amigable, debido a que su producción se basa en derivados del petróleo. Sin embargo, su alta eficiencia como aislante térmico puede contribuir significativamente a la reducción del consumo energético en sistemas de climatización, generando un ahorro estimado de

hasta 200 litros de combustibles fósiles durante su vida útil (CIR, 2023). De igual manera, pese a que su proceso de descomposición es lento, el EPS es un material altamente reciclable, ya que puede reincorporarse a distintos procesos productivos o utilizarse en la elaboración de nuevos materiales. Esta capacidad de reciclaje permite reducir el impacto ambiental que tradicionalmente se le ha atribuido. (Gómez, 2023)

Finalmente, en el **Cuadro 1** se muestra el resumen de rangos de la conductividad térmica de los materiales mencionados en esta sección.

Cuadro 1. Conductividad térmica de materiales aislantes

Material	Conductividad Térmica (W/m-K)
Pulpa de papel	0.034-0.035
Lana de oveja	0.430-0.445
Cáñamo	0.038-0.045
Poliestireno expandido	0.030-0.0430

Nota. Elaboración propia

4.4. Refrigeración por compresión

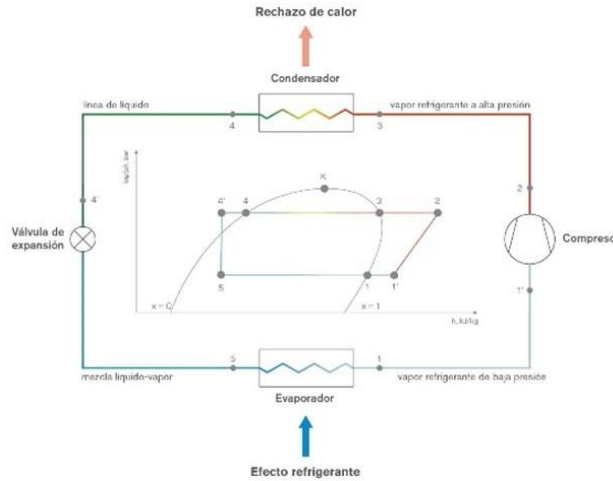
El método de refrigeración más utilizado en los hogares y la industria es por compresión de vapor. El consumo energético de los compresores mecánicos presentes en estos sistemas representa el 20 % de la demanda eléctrica a nivel mundial (Nikbakhti et al., 2020). Esta demanda energética junto a materiales aislantes como el poliuretano y el poliestireno, así como refrigerantes que difícilmente se pueden reciclar, implican un costo de venta y de operación alto para las comunidades de Guatemala que viven en el corredor seco.

Durante las últimas décadas se han realizado estudios para mejorar el rendimiento de un refrigerador doméstico convencional. Algunas formas en que se ha logrado es utilizando amoníaco o refrigerante R404A debido a su bajo punto de ebullición y alta eficiencia. También se han aplicado intercambiadores de calor para mejorar el COP en rangos de temperatura

relativamente bajos. Estrategias más avanzadas son el control de presión en el condensador en función a la temperatura ambiente con sistemas de control. Finalmente, diferentes configuraciones de compresores y ciclos de compresión pueden hacer un sistema de refrigeración tradicional más eficiente (Tassou et al., 2010).

El ciclo de refrigeración por compresión consta de 4 etapas principales: compresión isentrópica, condensación isobárica, expansión isoentálpica y evaporación isobárica. El objetivo de este ciclo es absorber calor de un espacio (fuente) y desecharlo en otro (sumidero) y así tener un diferencial de temperaturas (Rámila, 2023). En la **Figura 9** se muestra el ciclo de refrigeración ideal y real representados con un diagrama presión-entalpía.

Figura 9: Ciclo básico de refrigeración por compresión de vapor



Nota. Adaptada de Rámila (2023).

La diferencia entre los estados ideales y reales se produce por la eficiencia de los componentes del refrigerador, siendo las principales fuentes el compresor y los parámetros de diseño dado que la eficiencia isentrópica de los compresores se encuentra entre 80 y 95 % (Ghiglia, 2021). Dependiendo del tipo de compresor, la energía suministrada y el trabajo que realiza el compresor siempre deben ser mayores a la que establece el ciclo de Carnot (ciclo ideal). En cuanto a los parámetros de diseño, todos los componentes están ligeramente sobredimensionados debido a que es sumamente complicado encontrarse exactamente en los puntos de la campana del diagrama P-s que se muestra en la **Figura 9**, las temperaturas, presiones, intercambiadores de calor y demás componentes se dimensionan ligeramente por encima de los valores ideales. De esta manera se garantiza que se obtendrán los valores deseados. Durante los procesos de refrigeración el refrigerante sufre los siguientes cambios:

- **Compresión:** aumento de presión, temperatura y entalpía. A la salida se alcanzan los puntos más altos de todo el ciclo y el refrigerante se encuentra como un vapor sobrecalentado.
- **Condensación:** el fluido pasa gradualmente de ser un vapor sobrecalentado a un líquido sobrecalentado con presión y temperatura constante, pero como se discutió anteriormente, se lleva hasta un líquido subenfriado para asegurarse de que no sea una mezcla ($x=0$).
- **Expansión:** se reduce la presión del refrigerante a través de una válvula para que se vuelva una mezcla de vapor y líquido con entalpía constante.
- **Evaporación:** gracias a que el refrigerante se encuentra a una presión relativamente baja, es más fácil que absorba calor del medio a enfriar, causando así que se evapore hasta alcanzar un vapor levemente sobrecalentado previo a entrar al compresor nuevamente y repetir el ciclo (Rámila, 2023).

En respuesta a la búsqueda de medios de refrigeración de bajo costo y con un menor impacto ambiental, han surgido nuevas tecnologías, siendo las de mayor potencial las siguientes (Tassou et al., 2010):

- Sistema de refrigeración por absorción/adsorción
- Sistema de refrigeración con bomba de inyección (jet pump)
- Sistema de enfriamiento termoeléctrico (principio de Peltier)
- Refrigeración magnética.

A lo largo de las siguientes secciones se profundizará en el principio de refrigeración de cada una de las tecnologías previamente mencionadas y de su ciclo de operación.

4.5. Medios de refrigeración de bajo costo

4.5.1. Sistemas de refrigeración por absorción/adsorción

La idea central es reemplazar el compresor mecánico por un medio de compresión térmico. Para ello se utiliza una mezcla de líquidos sorbetes, comúnmente agua, hidrógeno y amoníaco (ver **Figura 11**). La principal desventaja es que cuenta con un COP bajo comparado con los refrigeradores domésticos tradicionales. Sin embargo, el 60 % de sistemas de refrigeración en Europa utilizan este principio, pues es posible mejorar el COP tomando en cuenta los siguientes factores (Nikbakhti et al., 2020):

- Aumentando las etapas de compresión como se muestra en el **Cuadro 2**.
- Incorporando ciclos de recuperación de calor.
- Aplicación de sistemas de control para favorecer presiones y temperaturas de operación.
- Mejorar las condiciones de operación (temperatura, humedad, entre otros).

Cuadro 2: reducción de temperatura según las etapas de compresión

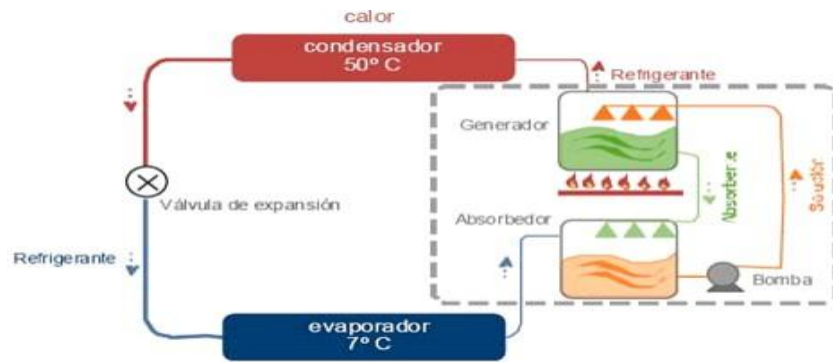
No. Etapas de compresión/recalentamiento	Reducción de Temperatura en °C
1	0 a -10
2	-20
3	-30
Más de 3	No es viable

Nota. Adaptada de Nikbakhti et al., (2020)

Los componentes principales de un refrigerador por absorción son: generador, condensador, evaporador, absorbente y válvula de expansión. Su estructura y operación son muy similares al de un refrigerador convencional, con la diferencia de que se reemplaza un compresor mecánico con un generador y un absorbente. Las principales ventajas de este sistema después de haber realizado las modificaciones adecuadas para contar con un COP aceptable son (Nikbakhti et al., 2020):

- Pueden operar con fuentes de calor relativamente bajas
- Ahorran mucha energía al no usar un compresor mecánico
- Utiliza un refrigerante de bajo impacto ambiental, como el agua o hidrógeno
- Son silenciosos
- La escasez de partes móviles y simplicidad en el diseño hacen que requieran de un mantenimiento.
- Casi no desperdicia calor
- Pueden alcanzar una vida útil de hasta 30 años

Figura 11. Ciclo de un sistema de refrigeración por absorción/adsorción

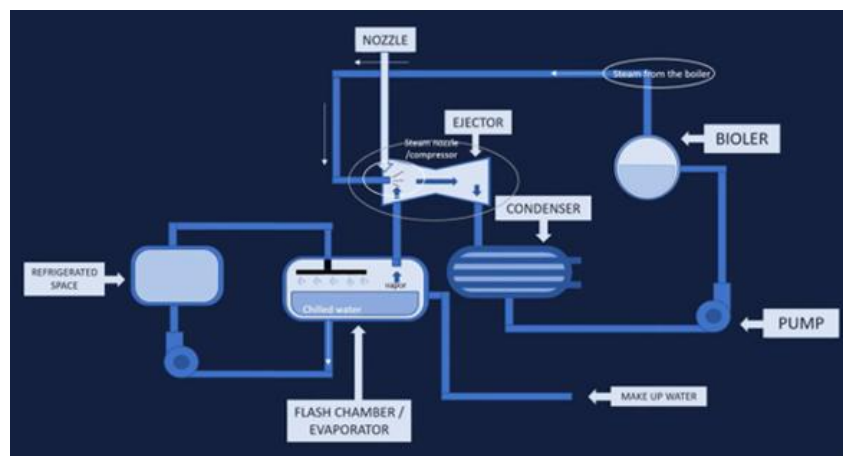


Nota. Adaptada de Nikbakhti et al. (2020)

4.5.2. Sistema de refrigeración con bomba de inyección (jet pump)

Como es de esperarse de una técnica de refrigeración energética y económicamente conservadora, su COP es menor al de un sistema de refrigeración convencional. Esta desventaja se compensa con el ciclo de operación sencillo, pues consta de un generador de vapor, evaporador, bomba de inyección, condensador y válvula de expansión (Figura 12). El principal atractivo de estos sistemas es que pueden operar con agua caliente o energía residual como fuente de alimentación. El fluido de refrigeración es el agua, pero se puede sustituir por refrigerante HF o HCFC para mejorar el desempeño del sistema («An alternative analysis applied to investigate the ejector performance used in R141b jet-pump refrigeration system», 2015).

Figura 12: Sistema de refrigeración con bomba de inyección



Nota. Adaptado de The International Institute of Refrigeration, et al. (2015)

4.5.3. Sistema de enfriamiento termoelectrico (principio de Peltier)

Este método se basa en el principio de Peltier: “el efecto de enfriamiento se da al crear una corriente eléctrica por el circuito que contiene diferentes metales. En lugar de un refrigerante, los electrones cargan con el calor a lo largo del sistema” (Allouhi et al., 2015). La dirección de la absorción de temperatura se define por la dirección del flujo de voltaje (Trumonytechs, 2025).

Los semiconductores más utilizados en los sistemas de refrigeración que aplican este método son aleaciones de telururo de bismuto y telururo de antimonio. Por sí solo, un sistema termoelectrico no es muy eficiente, pero se pueden hacer modificaciones al diseño original para mejorar el COP. Por ejemplo, el uso de luz solar como fuente externa de energía, integrar sistemas de disipación de calor externos y una selección apropiada de materiales semiconductores. En el mejor de los casos, se puede alcanzar una temperatura de refrigeración de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Allouhi et al., 2015).

Los módulos Peltier son capaces de actuar como bombas de calor si se alimenta con una corriente eléctrica, y de generar corriente si existe una diferencia de temperatura relevante entre sus caras de alta y baja temperatura. La ausencia de partes móviles y de un fluido de trabajo (refrigerante) favorece la simplicidad del diseño, pero perjudica el COP. En la **Figura 13** se muestra el circuito más común de un sistema de refrigeración termoelectrica. Es común ver esta técnica de refrigeración para conservar chips eléctricos y en refrigeradores portátiles (Allouhi et al., 2015).

Además del efecto Peltier, los otros dos principios bajo los cuales opera un sistema de refrigeración de este tipo son (Artedimamico, 2022) :

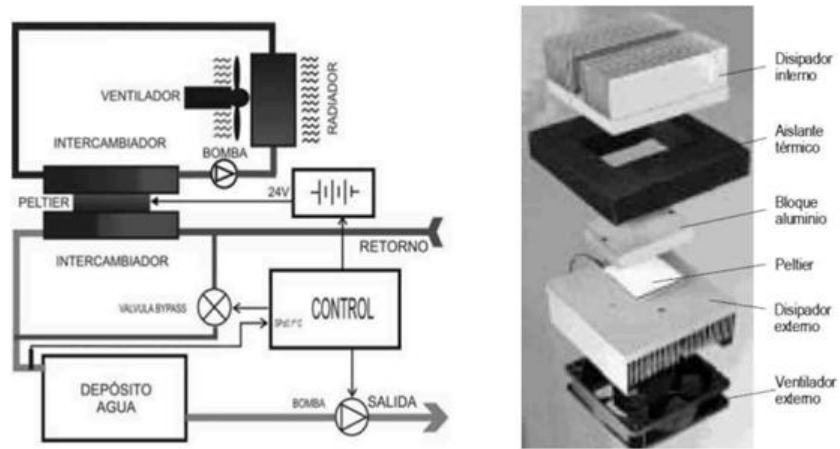
- Efecto Thompson

Establece que cualquier conductor portador de una corriente eléctrica con una diferencia de temperatura en dos puntos absorberá o expulsará calor dependiendo del material y de la dirección de la corriente- Este fenómeno no aplica en materiales superconductores.

- Efecto Seebeck

Se genera una corriente eléctrica entre dos metales unidos en dos puntos proporcional a la diferencia de temperaturas entre los dos materiales.

Figura 13: Sistema de refrigeración termoelectrica

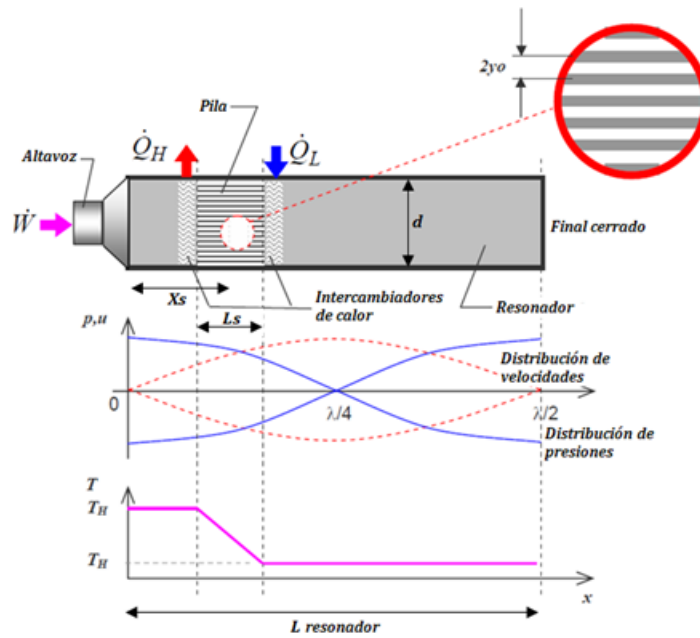


Nota. Adaptada de Artedinamico, (2022)

4.5.4. Sistema de refrigeración termoacústica

La refrigeración termoacústica se lleva a cabo por la compresión de un fluido debido a la energía de una onda acústica. Esto ocurre en los nodos de onda sonora, o en las paredes del conducto donde se esté realizando el proceso. Se utiliza un filtro de material aislante para aumentar el gradiente de temperatura, obteniendo así una región con alta energía térmica, y otra con baja energía térmica (Bhatti et al., 2023). Puesto a que este ciclo se realiza en un conducto cerrado como se muestra en la **Figura 14** (normalmente en tubos de vidrio), se puede extraer el potencial de refrigeración con varillas de cobre u otro material con buena conducción térmica. La eficiencia de este sistema depende de la cantidad de nodos que se tengan dentro del conducto, así como la frecuencia de la vibración. El mayor desempeño se obtiene cuando la onda está cerca de la resonancia. Este fenómeno se puede inducir con calor de desecho de otro proceso o del ambiente, así como con energía solar (Poese y Garrett, 2000).

Figura 14: Sistema de refrigeración termoacústica

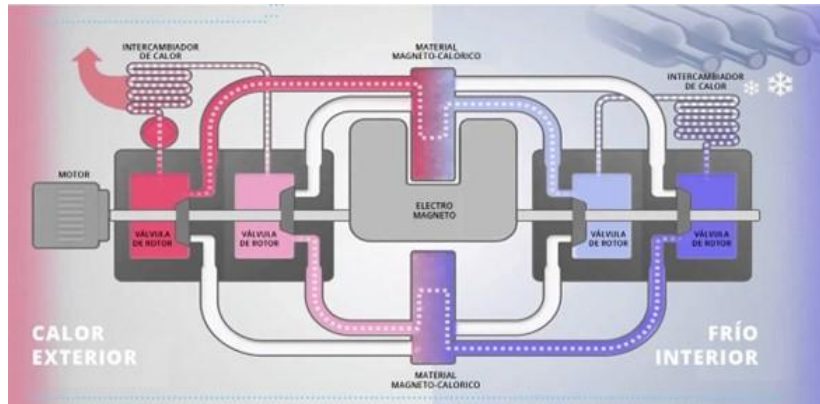


Nota. Adaptada de Poese y Garrett (2000)

4.5.5. Refrigeración magnética

Este sistema de refrigeración sin compresor de gas utiliza el efecto magnetocalórico que se define como “el efecto causado por un campo magnético en los materiales que cuentan con la propiedad de variar la entropía magnética, así como su temperatura al variar el campo magnético” (Romero Gómez et al., 2013). Su rendimiento supera el de las refrigeradoras domésticas tradicionales. Para que se cumpla el efecto magnetocalórico es necesario aplicar el campo magnético de forma adiabática. Esta es una tecnología eficiente y de poca demanda energética, pero es costosa de producir. En la **Figura 15** se muestra el esquema de un sistema de refrigeración magnético. (Tassou et al., 2010).

Figura 15: Sistema de refrigeración magnética



Nota. Adaptada de Tassou et al (2010)

4.6. Coeficiente de rendimiento (COP)

La eficiencia de cualquier máquina o equipo se define por la relación entre el trabajo de salida respecto a la energía de entrada. Estas relaciones se encuentran por debajo de 1 porque no existe una máquina 100 % eficiente debido a los diferentes medios de pérdida de energía. Sin embargo, para los refrigeradores y demás máquinas térmicas el desempeño se mide respecto a una relación entre cuánto calor se extrajo del espacio a refrigerar y el trabajo que ingresa al sistema para extraer el calor. Es decir:

(1)

$$COP = \frac{Q_c}{W}$$

Donde Q_c es el calor extraído del espacio frío y W es el trabajo consumido por el sistema

Tanto para un refrigerador por compresión de vapor como para uno termoeléctrico, el coeficiente de desempeño se expresa de la siguiente manera:

(2)

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{V \times I}$$

Donde Q_c es el calor extraído del espacio frío y W_e es el trabajo eléctrico, V es el voltaje e I es la corriente consumida por el sistema. Con la aclaración que para un refrigerador convencional el trabajo eléctrico lo consume mayormente el compresor, mientras que para un refrigerador termoeléctrico el trabajo lo consume principalmente la celda Peltier.

Dado que el trabajo realizado por el compresor es relativamente baja en comparación a la cantidad de calor que se extrae de la cabina fría del refrigerador, el COP suele ser mayor a 1 para estas máquinas, llegando a encontrarse en valores entre 3 y 5 (Cengel y Ghajar, 2011). Mientras que una celda Peltier tiene menor capacidad de extracción que un sistema por compresión de vapor, el COP para estos refrigeradores suele ser levemente menor, alcanzado un valor promedio de entre 1 y 3.

4.7. Transferencia de calor

La transferencia de calor se define como un proceso de propagación de calor de un cuerpo o espacio a otro debido a una diferencia de temperatura. El intercambio de energía existe hasta que se alcance el equilibrio térmico (calores iguales) (Prodel, 2022). Existen tres tipos de condiciones en las que se puede dar una transferencia de calor dependiendo del sistema que se esté analizando. Estos pueden ser (Cengel y Ghajar, 2011):

- Régimen estacionario: la temperatura todas las caras del cuerpo permanecen constantes con el tiempo. Por lo tanto, la transferencia de calor es unidimensional y no depende de condiciones externas.
- Sistema concentrado: actúa como un sistema estacionario si se analiza en instantes de tiempo. Esto se puede hacer ya que la temperatura en todos los puntos del cuerpo es igual en un instante de tiempo, pero la temperatura del cuerpo no permanece.
- Régimen transitorio: la temperatura del cuerpo no es uniforme en su geometría, es decir que cambia según el punto del cuerpo que se analice. También cambia conforme al tiempo, pero existen casos en los que el estudio se puede modelar de forma que la transferencia de calor sea unidimensional.

4.7.1. Formas de transferencia de calor

- **Conducción de calor:** es el intercambio de energía entre las partículas de un cuerpo con mayor movimiento hacia las partículas de otro cuerpo con menor energía. La conducción puede suceder entre dos cuerpos sólidos en contacto o con líquidos y gases siempre y cuando no exista un movimiento brusco. (Cengel y Ghajar, 2011) . Para un sistema en estado estacionario se representa de la siguiente manera:

$$Q_{cond,pared} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Sin embargo, debido a las diferencias entre régimen estacionario y transitorio discutidos anteriormente, esta ecuación cambia para un régimen transitorio, por lo que pasa a expresarse como se muestra en la **Figura 16** para una pared plana, cilindro y esfera respectivamente.

Figura 16: Ecuaciones de transferencia de calor en régimen transitorio para diferentes geometrías

$$\text{Pared plana: } \theta_{pared} = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \cos(\lambda_1 x/L), \quad \tau > 0.2 \quad (4-23)$$

$$\text{Cilindro: } \theta_{cil} = \frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0(\lambda_1 r/r_o), \quad \tau > 0.2 \quad (4-24)$$

$$\text{Esfera: } \theta_{esf} = \frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \frac{\text{sen}(\lambda_1 r/r_o)}{\lambda_1 r/r_o}, \quad \tau > 0.2 \quad (4-25)$$

Nota. Adaptado de Cengel y Ghajar, (2011)

Donde $\tau = \frac{\alpha t}{l^2}$ y λ y A dependen del valor de τ . **Convección:** es la transferencia de calor mediante el movimiento masivo de un fluido. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor en comparación a la conducción porque pone en contacto partículas más frías de un fluido con partículas más calientes del otro. Por lo tanto, mientras mayor sea la velocidad el fluido y el área de contacto entre el cuerpo y el fluido, más rápida será la transferencia de calor hasta alcanzar el punto de equilibrio térmico. Este mecanismo de transferencia se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

Nota. h es el coeficiente de convección en $W/m^2 - C$, A_s es el área superficial en m^2 , T_s es la temperatura de la superficie en $^{\circ}C$ y T_{∞} es la temperatura del fluido en $^{\circ}C$ (Cengel y Ghajar, 2011).

La convección puede ser libre o forzada según la forma en que inicie el movimiento de las masas. La primera forma de convección sucede por el empuje que surge de un diferencial de densidades naturalmente asociadas a la variación de temperaturas del fluido (*Catálogo de experiencias de cátedra para la docencia de física general*, 2015). Mientras que la convección forzada es aquella en la que el fluido se mueve por fuerzas externas, como pueden ser una bomba o un ventilador. De igual manera, la conducción puede clasificarse como externa (si el fluido se mueve sobre una superficie) o interna (si el movimiento es por dentro de un tubo). El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una constante, sino que depende del fluido y del sólido que estén en contacto, así como de la velocidad del fluido, la distancia respecto a la superficie del sólido y qué tipo de convección sea.

- Radiación: es la forma en que la energía se transmite mediante ondas electromagnéticas. Es decir, que no requiere de ningún medio intermedio para transferirse. Todos los cuerpos con una temperatura por arriba del cero absoluto emiten o absorben calor en algún grado. Sin embargo, la emisividad y absorción de calor en algunos cuerpos sólidos se considera despreciable ya que no se extiende más allá de la superficie en dirección externa ni interna. La transferencia de calor por radiación se expresa como:

(5)

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 - k^4$), A es el área superficial del cuerpo en m^2 , ϵ es la emisividad del cuerpo (adimensional), T_1 es la temperatura de la superficie en K y T_2 es la temperatura del ambiente en K .

4.8. Disipadores térmicos

Un disipador de calor es un componente hecho con un material conductor (normalmente aluminio o cobre) para absorber y desechar el calor de un componente o espacio hacia otro. Para ello usan el principio de transferencia de calor por convección y conducción, por lo que la geometría del disipador busca maximizar el área de contacto superficial entre el componente que se desea mantener a baja temperatura. Según el tipo de flujo de aire y la forma de las aletas, los disipadores pueden ser (AT Machining, 2023):

- **Activos:** se basa en una convección forzada del fluido sobre la superficie del disipador para mejorar su transferencia de calor; comúnmente se utiliza un ventilador para tener una convección forzada.
- **Pasivos:** son más sencillos y económicos que los disipadores activos, ya que no necesitan de ningún componente externo debido a que la transferencia de calor ocurre por convección natural. Por lo tanto, no son tan eficientes como los disipadores activos.

Los parámetros más importantes que tomar en cuenta al diseñar un disipador de calor son el material, el área superficial y la geometría de las aletas. A continuación se describe el efecto de cada uno de los parámetros mencionados en la eficiencia del disipador de calor.

- **Área superficial:** debido a que los disipadores se basan en el intercambio de calor por convección y conducción, la tasa de disipación de calor es directamente proporcional al área de contacto entre el fluido (generalmente aire) y la superficie del elemento caliente, como se expresa en las **ecuaciones 3 y 4**. Por lo tanto, es fundamental maximizar el área superficial del disipador que está en contacto tanto con el componente a enfriar como con el medio de enfriamiento, con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de transferencia de calor (Li, 2024).

- **Material:** la conductividad térmica del material constituye un factor determinante en la eficiencia de la disipación de calor. A mayor conductividad térmica, mayor será la capacidad del material para transferir calor desde el componente caliente hacia el entorno. El cobre es considerado el material óptimo para la fabricación de disipadores de calor, debido a

su alta conductividad térmica, que se encuentra en el rango de 390 a 400 W/m·K. Sin embargo, su elevada densidad y costo pueden representar limitaciones importantes en ciertas aplicaciones. En este contexto, el aluminio se presenta como una alternativa viable, con una conductividad térmica en el rango de 200 a 250 W/m·K. Su menor densidad y menor costo lo convierten en una opción ampliamente utilizada en aplicaciones donde se busca un equilibrio entre rendimiento térmico, peso y economía (Li, 2024).

- Geometría de las aletas: como se mencionó anteriormente, el área de contacto entre el flujo de aire y la superficie del componente a enfriar representa un factor crítico para optimizar la transferencia de calor. Debido a que los disipadores de calor suelen estar sujetos a restricciones de espacio, es común emplear configuraciones que incrementen el área superficial efectiva sin alterar significativamente las dimensiones externas del sistema. Para este fin, se incorporan elementos como aletas o conductos internos. La elección de la geometría del disipador depende tanto de los requerimientos térmicos como de las limitaciones físicas del entorno de instalación. Entre las configuraciones más utilizadas se encuentran las aletas rectas, radiales, rectangulares, curvadas, así como diseños personalizados adaptados a condiciones particulares (Li, 2024).

5. Metodología

5.1 Fases de la metodología

Fase 1. Investigación sobre el contexto socioeconómico de las comunidades del Corredor Seco de Guatemala: se investigará sobre el sector económico de la región: los empleos más comunes y sus respectivos sueldos, las condiciones de trabajo, gastos básicos de las familias de escasos recursos, los alimentos consumidos con mayor frecuencia, entre otros. De esta manera, se tendrá un mejor contexto del estilo de vida de las personas y los recursos físicos y económicos que tienen al alcance. Finalmente, se recopilará información sobre las condiciones climatológicas y se tomarán en cuenta las propiedades termodinámicas de los materiales de los que se dispondrá en las comunidades.

Fase 2. Investigación de sistemas de refrigeración de bajo costo: al tener un contexto de los recursos y materia prima de mejor acceso en las comunidades de interés, se podrá investigar los métodos de refrigeración de bajo costo que mejor se adapten a la región. Se explorarán tanto propuestas que operen con energía eléctrica como principal fuente, así como sistemas que no lo requieran. Se hará una comparación del impacto ambiental que presentan sistemas de refrigeración convencionales contra sistemas innovadores aplicables en comunidades de escasos recursos económicos, así como la eficiencia de cada sistema respecto a los refrigeradores por compresión de gas.

Fase 3. Análisis y cálculos: al seleccionar un sistema de refrigeración viable para el interés del proyecto, se realizará un análisis termodinámico para determinar el COP y la temperatura mínima de refrigeración que podría alcanzar de forma teórica. De este análisis surgirán ciertos requerimientos que el futuro diseño deberá cumplir para garantizar que sea una opción viable y relevante.

Fase 4. Diseño y prototipado: durante esta fase se creará un diseño inicial que cumpla con el funcionamiento termodinámico y que presente una geometría y estética simple pero funcional. Se entiende que será un proceso iterativo, por lo que el diseño inicial no será

idéntico al que se prototipará. Al contar con un diseño aceptable en cuanto a dimensiones y requerimientos de materia prima, se procederá a realizar un prototipo a menor escala que permitirá ver el funcionamiento del medio de refrigeración propuesto. Esta fase será cíclica entre diseño y prototipado, puesto que se corregirán errores que se hallen sobre la marcha. Por lo tanto, no se llegará a presentar un producto final que pueda llevarse a las comunidades objetivo para que lo instalen en sus hogares, pero sí un sistema innovador y funcional.

5.2 Desarrollo

Según la investigación preliminar se determinó que las necesidades de la comunidad objetivo en cuanto a un sistema de refrigeración son principalmente:

- A. Contar con un sistema de refrigeración de bajo costo de operación.
- B. Contar con un sistema de refrigeración de bajo costo de compra.
- C. Poder conservar granos como frijol, maíz y arroz por más de 3 días.
- D. Que el sistema de refrigeración sea duradero.

A partir de la información presentada en el marco teórico, se establecieron los siguientes requisitos para el refrigerador a desarrollar:

Cuadro 3. Identificación de códigos

Código	Requisito
OP	Operación
DI	Dimensiones
PR	Producción

Nota. Elaboración propia

Cuadro 4. Requisitos del diseño

Código	Requisito
PR01	El costo de producción debe ser menor a Q1500.00
PR02	Proporcionar un instructivo de cómo utilizar y dar mantenimiento al sistema
PR03	El recubrimiento total de aislante no debe exceder los Q550.00

DI01	El refrigerador debe tener una masa total menor a 60 kg
DI02	El volumen de almacenamiento debe ser mayor a 75 lt
DI03	La altura del refrigerador no debe superar los 70 cm
DI04	El ancho y largo del refrigerador no deben superar los 60 cm respectivamente.
DI05	El prototipo de refrigerador debe poder apilarse hasta 2 niveles
OP01	El prototipo debe ser resistente a los impactos y a la corrosión
OP02	El prototipo debe alcanzar una temperatura mínima de refrigeración de 5 °C
OP03	El tiempo máximo de mantenimiento del prototipo debe ser de 2 veces por año
OP04	COP del prototipo debe ser mayor a 1.1
OP05	El consumo energético del prototipo debe ser menor a 150 kWh

Nota. Elaboración propia

Para cumplir con estos requisitos se hará uso de los siguientes recursos:

Cuadro 5. Recursos necesarios para el proyecto

Recurso	Etapas
Microsoft Excel	Análisis y cálculos
MINIREFPROP	Análisis y cálculos, selección de refrigerante
UltiMaker Cura	Prototipado
Canva	Elaboración de manual de uso y mantenimiento
DWSIM	Planteamiento, esquematización y cálculos
PLA, lámina de acero inoxidable, aislante	Selección y compra de materiales y prototipado

Impresora 3D, sierra eléctrica	Prototipado
Dobladora de acero inoxidable	Prototipado
4 semanas de investigación sobre el contexto regional	Investigación
9 semanas para comprar los materiales	Investigación
12 semanas para prototipado e iteración de la solución	Diseño y prototipado

Nota. Elaboración propia

5.3 Prototipado y cálculos

Para la primera prueba de refrigeración termoeléctrica, se utilizó una celda Peltier que consume 12 voltios y 2.94 amperios. En la **Figura 17**, se muestra el modelo de la primera iteración y, en la **Figura 18** los resultados de temperatura. En esta ocasión, solamente se usó un ventilador externo de 12 voltios y 0.1 amperios para generar una convección forzada en el disipador de calor de alta temperatura.

El espacio por refrigerar tiene un volumen de 0.21 litros y las paredes se hicieron de duroport con un espesor de 7 mm. Se utilizó un sensor DHT11 conectado a un Arduino UNO para tomar la temperatura dos veces por segundo dentro de la cabina fría. Se realizaron tres pruebas en total: dos con la celda conectada por 26 minutos y una conectada por 30 minutos. La temperatura más baja alcanzada fue de 2 °C con una temperatura ambiental promedio de 24 °C y una temperatura en el disipador caliente de 27 °C.

El calor absorbido en el espacio de menor temperatura se obtiene con la siguiente ecuación:

(6)

$$Q = \Delta T I \alpha$$

$$Q = (22 \text{ } ^\circ\text{C})(2.94 \text{ Amp}) \left(0.3 \frac{\text{V}}{^\circ\text{C}}\right) = 19.40 \text{ W}$$

Nota. ΔT es la diferencia entre la temperatura entre la cara caliente y la cara fría (22°C), I es la corriente que demanda la celda (2.94 Amp), y α es el coeficiente Peltier del dispositivo ($0.3 \text{ V}/^\circ\text{C}$).

También se calculó la transferencia de calor hacia las paredes de duroport mediante la convección utilizando la **ecuación 3**, de tal modo que el resultado es:

$$Q = KA \frac{T_h - T_c}{\Delta x}$$

$$Q = \left(0.03 \frac{W}{m-K}\right) (0.0016 \text{ m}^2) \frac{24^\circ\text{C} - 2^\circ\text{C}}{0.007 \text{ m}} = 151W$$

Nota. K es la constante de conductividad térmica del material (0.03 W/m-K), A es el área de la pared en contacto con el flujo de calor (0.0016 m^2), Δx es el espesor de la pared (0.007 m), T_h es la temperatura ambiente (24°C) y T_c es la temperatura en el espacio frío (2°C) El trabajo eléctrico consumido por la celda Peltier y el ventilador se calculó con la siguiente ecuación que se deriva de la **ecuación 2**:

(7)

$$W_e = VI$$

$$W_e = (24 \text{ V})(2.94 \text{ Amp}) = 35.28 \text{ W}$$

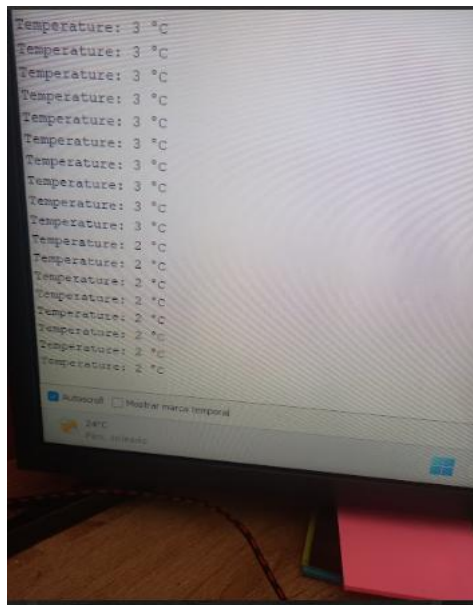
Donde V es el voltaje total consumido por todos los dispositivos (12 V) e I es la corriente total consumida en el sistema (2.94 Amp).

Figura 17. Pruebas con la celda Peltier



Nota. Elaboración propia

Figura 18. Resultados obtenidos en las primeras pruebas con la celda Peltier



Nota. Elaboración propia

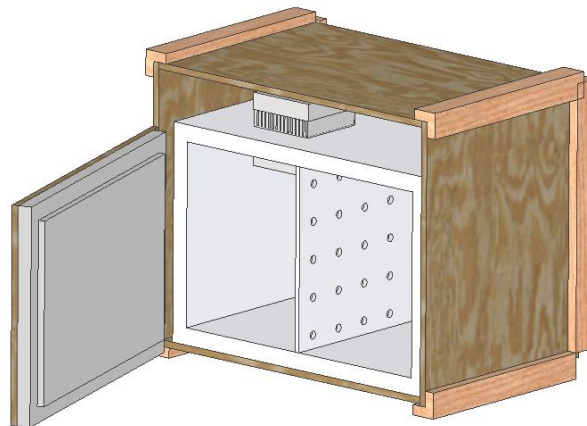
5.4 Selección de materiales

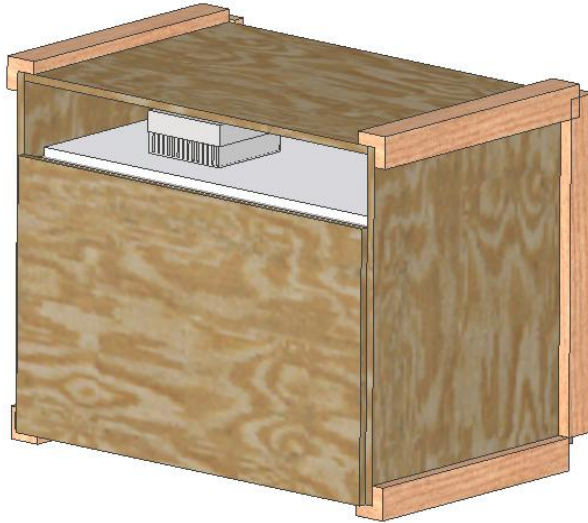
Se Para la selección de materiales se consideraron los recursos de fácil acceso en la región objetivo por cuestiones de mantenimiento y precio. Sin embargo, no se pretendía sacrificar calidad y durabilidad, por lo que se estudiaron las propiedades de los materiales en los refrigeradores convencionales y se buscó acercarse lo más posible al rendimiento estructural de estos productos. Para la selección final se consideró generar el menor impacto ambiental posible para construir el prototipo.

5.4.1. Armadura

Se seleccionó un material de fácil acceso que cumpliera con los requisitos de resistencia a impactos leves, durabilidad, facilidad de maquinado y capacidad para soportar tanto las altas temperaturas propias del entorno del corredor seco como las temperaturas operativas del sistema de refrigeración. Con el objetivo de proporcionar un aislamiento adicional que redujera la carga térmica sobre el disipador de calor de alta temperatura, y a su vez cumpliera con las características mencionadas, se optó por utilizar plywood sangre de 3/8" de espesor para las paredes de la estructura. Además, se diseñaron marcos de madera con escuadras de 1.5 x 1.5 pulgadas para garantizar un soporte adicional y mayor estabilidad a la estructura. El diseño final de la estructura se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19. Diseño de prototipo de refrigerador termoelectrico





Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

5.4.2. Aislante

El aislante más común en las refrigeradoras de uso doméstico es la espuma de poliuretano por su conductividad térmica promedio de aproximadamente 0.032 W/m-K y su bajo costo. Sin embargo, una de sus principales desventajas es el daño al medio ambiente que produce como desecho, pues tarda más de un siglo en descomponerse y quemarlo genera emisiones tóxicas para las personas y el medio ambiente. Por lo tanto, se evaluaron diferentes aislantes de origen natural que tuvieran un impacto ambiental reducido. Las principales opciones fueron el cáñamo, corcho y lana. En el **cuadro 6** se presenta una comparativa entre los aislantes candidatos.

Cuadro 6. Conductividad térmica de materiales aislantes

Material	Conductividad Térmica (W/m-K)
Pulpa de papel	0.034-0.035
Lana minera	0.430-0.445
Cáñamo	0.038-0.045
Poliestireno expandido	0.030-0.0430

Nota. Elaboración propia

Inicialmente se consideró utilizar cáñamo porque un solo rollo bastaba para aislar todo el interior del refrigerador. El problema que se encontró con este material es que solo se podía importar desde Europa, ya que en Guatemala se vende hilo de cáñamo y no planchas ni rollos. El precio de la importación hizo que se descartara esta opción. La siguiente ruta que se siguió fue optar por la lana minera debido a su fácil acceso en Guatemala. Se determinó que con 6 libras de lana se podía hacer una capa de una pulgada de espesor de aislante en todo el interior del refrigerador. La lana se compró en el mercado central de la Ciudad de Guatemala, pero también se puede conseguir con facilidad en el interior del país. Al comparar la lana con la espuma de poliuretano se concluye que la pérdida de aislamiento es del 21.8 %, pero el precio no varía entre ninguna de las dos opciones. Sin embargo, al hacer las primeras iteraciones del refrigerador, se descubrió que la falta de rigidez y estabilidad de la lana implicaba complicaciones en la construcción.

Finalmente, se decidió comprar una estructura cuadrada de poliestireno expandido, pues es una opción equilibrada entre rigidez, precio, aislamiento, bajo impacto ambiental y durabilidad. Además del aislante principal (EPS), la estructura de madera presenta una capa de aislamiento de entre 0.10 y 0.15 W/m-K de conducción térmica.

Finalmente, se decidió que la cabina principal fuera una estructura prefabricada de poliestireno expandido (EPS) con un espesor de una pulgada, debido a que representa una alternativa balanceada en términos de rigidez estructural, costo, capacidad de aislamiento térmico, durabilidad y bajo impacto ambiental. Adicionalmente la estructura de madera exterior proporciona rigidez mecánica y también contribuye al aislamiento global del sistema, presentando un coeficiente de conductividad térmica estimado entre 0.10 y 0.15 W/m·K.

5.3.3 Disipadores de calor

Para la selección de los disipadores de calor se optó por comprar los que recomienda y ofrece el fabricante de las celdas Peltier utilizadas en el sistema, con el fin de garantizar una operación térmicamente eficiente. Por lo tanto, en este trabajo no se incluye la fabricación de los disipadores de calor. Cabe mencionar que estos están fabricados en aluminio, material elegido por su baja densidad, buena conductividad térmica y costo accesible. Las dimensiones de los disipadores son las siguientes:

- Cara caliente de la celda: $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, con aletas de 2 cm de altura, 1 mm de espesor y una separación de 3 mm entre ellas.
- Cara fría de la celda: $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, con aletas de 2 cm de altura, 1 mm de espesor y separación de 3 mm.

Para mejorar la transferencia de calor y asegurar un flujo constante de aire a través de las aletas, se incorporó un ventilador de 1.2 W en cada disipador, promoviendo así un régimen de convección forzada que incrementa significativamente la eficiencia del sistema térmico.

5.5 Cálculos

5.5.1. Carga térmica

La carga térmica se refiere a la cantidad de calor que debe retirar el evaporador del área a refrigerar para mantener la temperatura constante. Las fuentes de carga térmica que se tomaron en cuenta son: por infiltración de aire exterior, por contenido, por transferencia a través de paredes y por equipo. Para esta última fuente de carga térmica solamente se consideró el ventilador del disipador de baja temperatura, ya que la frontera térmica del sistema se considera en la pared exterior de la cabina, por lo que la celda Peltier y el ventilador del disipador de alta temperatura se encuentran fuera del análisis del sistema.

5.5.2. Carga por infiltración de aire

Se refiere a la cantidad de aire que sale del espacio refrigerado a causa de mal sello o cuando se abre la puerta. El efecto de vaciado se da por una diferencia de presión entre la cabina del refrigerador y el aire exterior. La carga por infiltración de aire se determina mediante la ecuación (8). Se estimó un tiempo de 2.5 segundo para que todo el aire frío se escapara de la cabina cuando se abriera la puerta. La masa de aire a tomar en cuenta para el vaciado se encontró mediante el volumen de la cabina y la densidad del aire a 5°C. Con estos dos valores se encontró el flujo másico.

(8)

$$Q = \frac{m}{t} C_p \Delta T$$
$$Q = \left(\frac{\rho V}{t} \right) * C_p * \Delta T$$
$$Q_{Teórico} = \left(\frac{\left(1.293 \frac{kg}{m^3} \right) (0.031 m^3)}{2.5 seg} \right) \left(1.003 \frac{kJ}{kg-K} \right) (19 °C) = 0.31 W$$
$$Q_{Real} = \left(\frac{\left(1.293 \frac{kg}{m^3} \right) (0.031 m^3)}{2.5 seg} \right) \left(1.003 \frac{kJ}{kg-K} \right) (6.6 °C) = 0.11 W$$

Nota. ρ es la densidad del aire ($1.293 \frac{kg}{m^3}$), V es el volumen de aire dentro de la cabina ($0.031 m^3$), C_p es el calor específico del aire a 5 °C ($1.003 \frac{kJ}{kg-K}$), t es el tiempo de vaciado (2.5 segundos) y ΔT es el diferencial de temperatura entre el interior de la cabina y el ambiente (19 °C) en el escenario ideal.

5.5.3. Carga por contenido

Se define como la cantidad de calor que se necesita extraer de los alimentos que ingresan al refrigerador a temperatura ambiente para llevarlos a una temperatura el estado de los alimentos permanezca en buenas condiciones para el consumo humano por al menos 3 días. Los alimentos que se tomaron en cuenta fueron los de mayor consumo en el corredor seco, es decir: granos, carne y agua suficientes para el consumo diario de una familia de cuatro personas. Esta carga se define mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{mC_p\Delta T}{t} \quad (9)$$
$$Q_{Teórico} = 35.52 \text{ W}$$
$$Q_{Real} = 12.34 \text{ W}$$

Nota m la masa total de todos los alimentos que se encuentran dentro del refrigerador, C_p es el calor específico de cada alimento en kJ/kg-K, ΔT es el diferencial de temperatura en °C y t es el tiempo que transcurre desde que el alimento ingresa al refrigerador hasta que alcanza el equilibrio térmico, en este caso se consideraron 4 horas. Este cálculo se repitió para cada uno de los alimentos mostrados en el **cuadro 7**, ya que la masa y el calor específico son diferentes para cada uno. Al final se sumaron todas las cargas parciales para obtener los resultados detallados en el cálculo de la **ecuación 9**, con la diferencia de temperaturas siendo de 19 °C para el escenario teórico y 6.6 °C para el escenario real.

El calor específico de cada uno de los alimentos se encontró mediante el manual de refrigeración de la ASHRAE. Se supuso que los alimentos ingresan todos al mismo tiempo y a una temperatura de 24 °C. De todos los alimentos considerados, la carne de res es la que primero se descompone a temperatura ambiente, resistiendo solamente 4 horas en buen estado; a este

tiempo se le denominó tiempo crítico. Por lo tanto, ese fue el tiempo máximo que se tomó para que el refrigerador bajara la temperatura de todos los alimentos a 5 °C. En el **Cuadro 7** se muestran las características de las diferentes comidas que se evaluaron.

Cuadro 7. Alimentos que se consideraron para almacenar en el refrigerador

Alimento	Masa (kg)	Cp (kJ/kg-°C)	m*Cp
Frijol	1.3	3	3.9
Frutas	1.3	3.91	5.1
Maíz	1.0	2.5	2.5
Agua	3.0	4.2	12.6
Carne de res	1.5	1.9	2.9

Nota. Elaboración propia

5.5.4. Carga por transferencia a través de paredes

El calor de un espacio puede tanto entrar como salir a través de las paredes. Esto depende principalmente del material y del espesor de pared. Fue con esta carga en mente que se decidió utilizar madera para la estructura, ya que brinda mayor aislamiento que el aluminio u otro metal. Se usó el método de resistencias térmicas para modelar este sistema. Tanto en el ambiente interior como exterior existía resistencia por convección, mientras que a través de las paredes se analizaron resistencias por conducción. Las paredes se componían por 3/8 de pulgada de madera y 1 pulgada de duroport. Esto se expresa mejor en la **ecuación 10**.

(10)

$$q' = UA\Delta T$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_d}{k_d} + \frac{\Delta x_m}{k_m} + \frac{1}{h_e}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{12 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}} + \frac{0.02 m}{0.03 \frac{W}{m - ^\circ C}} + \frac{0.0032 m}{0.11 \frac{W}{m - ^\circ C}} + \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}}} = 0.614 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}$$

$$Q_{Teórico} = \left(0.614 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}\right) (1.58 m^2) (19 ^\circ C) = 18.48 W$$

$$Q_{Real} = \left(0.614 \frac{W}{m^2 - ^\circ C}\right) (1.58 m^2) (6.6 ^\circ C) = 6.42 W$$

Nota. El coeficiente total de transferencia (U) se calcula con la ecuación (11). De tal manera que A es el área superficial total de las paredes internas del refrigerador (1.58 m^2), ΔT es la diferencia de temperatura en el interior y exterior del refrigerador en $^{\circ}\text{C}$, h_i es el coeficiente de convección del aire a 5°C ($1.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}}$), h_e es el coeficiente de convección del aire a 24°C ($10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}}$), Δx_d es el espesor de la pared de poliestireno expandido (0.02 m), k_d es el coeficiente de conducción del duroport ($0.03 \frac{\text{W}}{\text{m}\text{-}^{\circ}\text{C}}$), Δx_m es el espesor de la pared de madera (0.0032 m) y k_m es el coeficiente de conducción de la madera ($0.11 \frac{\text{W}}{\text{m}\text{-}^{\circ}\text{C}}$).

Se tomó el área de las paredes del interior del refrigerador y se modeló como una sola pared extendida longitudinalmente que tuviera el área equivalente de 1.58 m^2 según las dimensiones del refrigerador. De esta manera se concluyó que la carga térmica a través de paredes es de 18.476 W para el escenario ideal y 6.42 W en el escenario real.

Finalmente se sumaron todas las fuentes de carga térmica obtenidas y el trabajo que consume el ventilador del interior del refrigerador, que se sabe que es 1.2 W para conocer la carga térmica total que la celda Peltier debe ser capaz de extraer. Esto da como resultado 57.10 W para que la cabina baje de 24°C a 5°C (escenario ideal) y 22.46 W que fueron los resultados obtenidos al poner en marcha el prototipo. COP del Refrigerador Termoeléctrico

Para conocer el rendimiento del refrigerador se debe calcular el COP (Coeficiente de Desempeño) del sistema, tomando en cuenta los ventiladores necesarios para mejorar la disipación de calor en ambas caras de las celdas. Para realizar este cálculo se utilizó la **ecuación 2**.

$$COP = \frac{Q_c}{W_e} = \frac{Q_c}{VI}$$

$$COP_{Teórico} = = \frac{57.10 \text{ W}}{(36 \text{ V})(3.4 \text{ Amp})} = 0.47$$

$$COP_{Real} = = \frac{22.46 \text{ W}}{(36 \text{ V})(3.4 \text{ Amp})} = 0.18$$

Nota. Q_c es el calor que absorbe la celda Peltier en Watts, W_e es el trabajo eléctrico en Watts, V es el voltaje total de todos los componentes del sistema de refrigeración (36 V), e I es la corriente total de todos los componentes del sistema (3.4 Amp).

5.6 Manufactura

5.6.1. Armadura

Para la armadura se compró un tablón de plywood sangre de 4' x 8' x 3/8'. Los cortes que se realizaron realizaron en el taller de carpintería de la Universidad del Valle de Guatemala se muestran en el **cuadro 8** y la **Figura 20**. El soporte principal del refrigerador se hizo con escuadras de madera de 1.5x1.5''. Se decidió usar plywood para que actuara como una capa adicional de aislamiento para reducir las pérdidas del sistema.

Cuadro 8. Dimensiones de las paredes de madera del refrigerador

Pieza	Cantidad	Alto (in)	Ancho (in)
Pared Lateral	2	16.3	12
Pared Posterior	1	12.5	19.7
Puerta	1	12.5	19.7
Techo	1	19.3	12.6
Base	1	19.3	12.6

Nota. Elaboración propia

Figura 20. Dimensiones de las paredes de madera del refrigerador

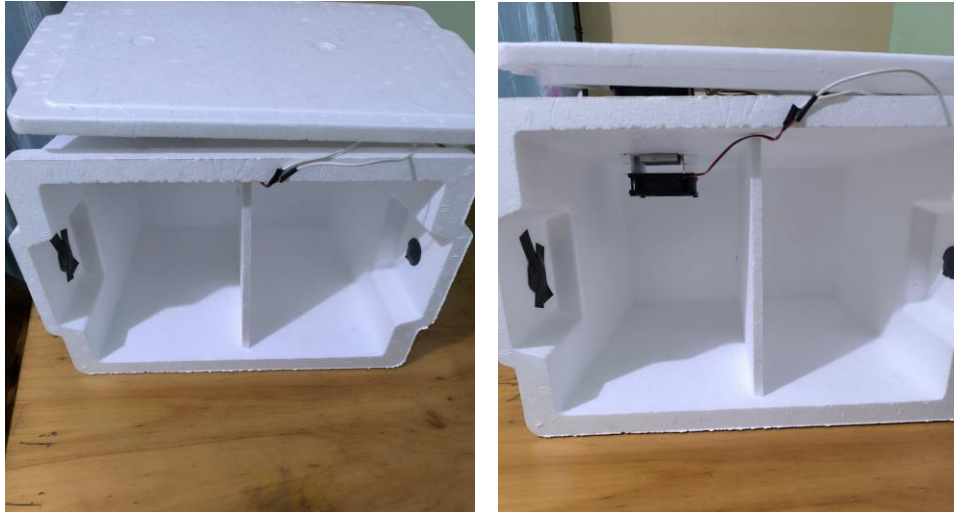


Nota. Elaboración propia

5.6.2. Cabina interna

Para conservar los alimentos en un espacio aislado e inocuo se compró un contenedor de poliestireno expandido de 1 pulgada de espesor. Se decidió utilizar este aislante debido a su accesibilidad económica, facilidad de manipulación y efectividad como aislante térmico. Se le hizo una apertura a un costado de 4cm x 4cm para que entrara únicamente el disipador térmico de baja temperatura. De este modo el disipador de alta temperatura y su respectivo ventilador quedaron fuera del espacio a refrigerar y, por lo tanto, fuera de la frontera térmica del sistema establecida anteriormente. La cabina y el sistema se muestran en las **Figuras 21 y 22**.

Figura 21: cabina interna del refrigerador



Nota. Elaboración propia

6. Resultados

Para saber si los resultados son satisfactorios, se tomarán los requisitos establecidos al inicio del trabajo como medición. Si se cumplen entonces los resultados satisfactorios, de lo contrario se identificarán como áreas de mejora para futuras investigaciones. Para identificar la naturaleza de los requisitos se utilizarán los códigos del cuadro 10. Los requisitos se detallan en el cuadro 11. El resultado final de esta sección indicará cuáles requisitos sí se cumplieron y cuáles no.

Cuadro 3. Identificación de códigos

Código	Requisito
OP	Operación
DI	Dimensiones
PR	Producción

Nota. Elaboración propia

Cuadro 4. Requisitos del diseño

Código	Requisito
PR01	El costo de producción debe ser menor a Q1500.00
PR02	Proporcionar un instructivo de cómo utilizar y dar mantenimiento al sistema
PR03	El recubrimiento total de aislante no debe exceder los Q550.00
DI01	El refrigerador debe tener una masa total menor a 60 kg
DI02	El volumen de almacenamiento debe ser mayor a 75 lt
DI03	La altura del refrigerador no debe superar los 70 cm

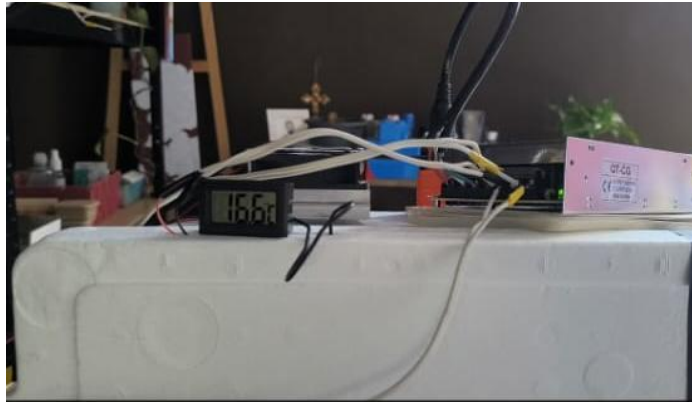
DI04	El ancho y largo del refrigerador no deben superar los 50 cm, respectivamente
DI05	El prototipo de refrigerador debe poder apilarse hasta 2 niveles
OP01	El prototipo debe ser resistente a los impactos y la corrosión
OP02	El prototipo debe alcanzar una temperatura mínima de refrigeración de 5 °C
OP03	El tiempo máximo de mantenimiento del prototipo debe ser de 2 veces por año
OP04	COP del prototipo debe ser mayor a 1.1
OP05	El consumo energético del prototipo debe ser menor a 150 kWh

Nota. Elaboración propia

6.1 Resultados experimentales

En este apartado, se muestran los resultados de tiempo y temperatura de operación del refrigerador. Las imágenes del proceso de la toma de datos se muestran en la **Figura 22** y el resumen de los resultados se muestra en el Cuadro 9. Es importante mencionar que inicialmente fue necesario extraer todo el calor dentro del refrigerador y luego se encendía la celda Peltier únicamente para reponer pérdidas de calor cuando la temperatura interna aumentaba 3 °C, por lo que la temperatura de la cabina oscilaba entre 16 °C y 19 °C. Esto fue posible gracias a que se incorporó un relay que abría y cerraba el circuito eléctrico para evitar que el sistema estuviera operando todo el tiempo. En la **Figura 23**, se muestran imágenes del sistema después de las 2 horas que se probó el sistema. Se destaca que se logró bajar la temperatura de un vaso de agua más de 4 °C en menos de 1 hora, y que se había formado condensado en el disipador de baja temperatura.

Figura 22. Temperatura mínima alcanzada en el prototipo



Nota. Elaboración propia

Figura 23. Resultados después de 2 horas de corrida



Nota. Elaboración propia

Cuadro 9. Resultados experimentales

Tiempo total de corrida	120	Min
Tiempo en alcanzar la temperatura mínima	63	Min
Temperatura ambiente	24.5	°C
Temperatura mínima	16.6	°C
Temperatura del disipador de alta temperatura	34.7	°C
Temperatura del disipador de baja temperatura	13.4	°C
Tiempo de apagado de relay	5:25	Min
Tiempo de encendido de relay	7.20	Min

6.2 Comparación de COP

Para que el refrigerador alcanzara una temperatura interna de 5 °C partiendo de una temperatura ambiente de 24 °C y extrayendo la carga térmica total calculada en el capítulo anterior, el COP debería ser de 0.47. Sin embargo, se determinó que 1 sola celda Peltier no tiene la capacidad de extraer dicha carga térmica, por lo que la temperatura mínima alcanzada en la cabina del refrigerador fue de 16.6 °C en 2 horas partiendo de una temperatura ambiente de 23.5 °C. Se determinó que el COP real del sistema de refrigeración diseñado es de 0.18, por lo que el prototipo realizado presenta aproximadamente 62% de deficiencia respecto a lo esperado.

6.3 Análisis de costos

Uno de los objetivos principales del proyecto es que el prototipo desarrollado sea de bajo costo de producción y de operación. En el **cuadro 10** se muestran los materiales utilizados para la fabricación de la refrigeración y su precio, teniendo como un costo total de producción de Q977.80. De igual manera, en el **cuadro 11** se muestra el costo de operación diario y

mensual del refrigerador considerando que la empresa eléctrica cobra Q1.37 el kWh. Cabe mencionar que en este análisis únicamente se toma en cuenta el tiempo que el relay mantiene encendido el sistema para reponer pérdidas de calor, no se toma en cuenta el arranque inicial del refrigerador. Se determinó que el costo energético mensual de utilizar el refrigerador termoeléctrico es de aproximadamente Q32.20.

En el **cuadro 12** se hizo el mismo análisis de consumo energético de un refrigerador doméstico al evaluar cuántas veces y por cuánto tiempo está encendido el compresor en un período de 12 horas. En este análisis se encontró que el costo de operación de este refrigerador es de Q22.98.

Cuadro 10. Costo de fabricación del prototipo

Proveedor	Producto	Cantidad	Precio
La Torre	Cabina interna (EPS)	1	Q 76.00
Maderas San Miguel	Plywood Sangre 3/8 (in)	1	Q 155.00
	Celda Peltier	1	Q 85.00
	Kit de refrigeración celda Peltier	1	Q 175.00
Tettsa	Coolers/ventiladores	2	Q 45.00
	Fuente de poder (30 V -10 A)	1	Q 385.00
Cemaco	Cable STP 18 (metro)	4	Q 11.80
La Electrónica	Relay	1	Q 45.00
Total			Q 977.80

Nota. Elaboración propia

Cuadro 11. Costo de operación del refrigerador termoeléctrico

Compoente	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Trabajo eléctrico (W)	Tiempo al día (h)	Energía (kW-h)	Costo por día (Q)	Costo por mes (Q)
Celda Peltier	12	4.0	48	13.75	0.66	0.90	27.13
Ventilador disipador alta temperatura	12	0.3	3.6	13.75	0.0495	0.07	2.03
Ventilador disipador baja temperatura	12	0.3	3.6	13.75	0.0495	0.07	2.03
Total	36	4.6	55.2	41.25	0.759	1.04	31.19

Nota. Elaboración propia

Cuadro 12. Costo de operación de un refrigerador por compresión de vapor

Potencia	186.4	W
Tiempo_dia	3	h
Tiempo_mes	90	h
Energía_T	16.776	kWh
Costo mensual	Q22.98	

Nota. Elaboración propia

Al contar con los resultados experimentales del refrigerador y después del análisis de costos, es posible determinar qué requisitos si se alcanzaron a cumplir con el prototipo (**cuadro 13**). Se brindarán recomendaciones en otro apartado para que se puedan alcanzar aquellos requisitos que no se lograron satisfacer en esta iteración del sistema.

Cuadro 13: requisitos cumplidos

Requisito	Se cumplió SI/NO
PR01	SI
PR02	SI
PR03	SI
DI01	SI
DI02	NO
DI03	SI
DI04	SI
DI05	NO
OP1	SI
OP2	NO
OP3	SI
OP4	NO
OP5	SI

Nota. Elaboración propia

7. Conclusiones

1. Se logró una reducción de 7.9 °C dentro de la cabina del refrigerador respecto a la temperatura ambiente.
2. El consumo total del sistema de refrigeración es de 55.2 W.
3. El costo de fabricación del prototipo es de Q978.00.
4. El costo mensual de operación del refrigerador es de aproximadamente Q31.20.
5. La máxima carga de refrigeración que alcanzó el sistema es de 22.5 W.
6. El COP del refrigerador termoeléctrico es 0.18 contra un promedio de un COP de 3 de los refrigeradores por compresión de vapor.

8. Recomendaciones

1. La capacidad de los disipadores de calor debe ser proporcional al volumen que se desea refrigerar.
2. Incorporar un termostato relay que enciende y apague el sistema de forma automática al alcanzar ciertos rangos de temperatura.
3. Asegurarse de que todo el disipador de baja temperatura se encuentre dentro de la cabina.
4. Utilizar plywood u otra madera de un espesor mayor para mejorar la resistencia mecánica de la armadura.
5. Utilizar una celda Peltier de mayor potencia para aumentar la capacidad de refrigeración.

9. Referencias

- Aguirre, A. (2025, 13 octubre). Ciclo básico de refrigeración. Area Academy. <https://areacooling.com/areacademy/es/ciclo-basico-de-refrigeracion>
- Aislamiento térmico en base placas de EPS para edificios de obra nueva y rehabilitación. (2001, 2 diciembre). Weber ES. <https://www.es.weber/blog/aislamiento-placas-eps>
- Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., Bruel, P., Mourad, Y., & Zeraoui, Y. (2015). Solar driven cooling systems: An updated review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 44, 159-181. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.014>
- Bhatti, U. N., Bashmal, S., Khan, S., & Ben-Mansour, R. (2022). Numerical modeling of standing wave thermoacoustic devices—A review. *International Journal Of Refrigeration*, 146, 47-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.09.024>
- Cengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (6.a ed.). McGraw-Hill Education.
- Central American dry corridor: An exploration of the potential of a job creation strategy for Guatemala and Honduras. (2024, 29 enero). International Labour Organization. <https://www.ilo.org/publications/central-american-dry-corridor-exploration-potential-job-creation-strategy>

Centro de Investigaciones Geofísicas. (2025, 9 octubre). Listado de proyectos - Centro de Investigaciones Geofísicas. <https://cigefi.ucr.ac.cr/listado-de-proyectos>

Chávez Barrios, A. I. (2022). Rapid Food Insecurity Assessment San Bartolome Jocotenango, Quiche (J. Ramírez Ávila, Ed.) [Report]. <https://www.careevaluations.org/wp-content/uploads/CARE-Guatemala-Food-Security-Rapid-Assessment.pdf>

Cir. (2023). El poliestireno expandido (EPS) como elemento aislante en la construcción. CIR62. <https://cir62.com/blog/136-poliestireno-eps-aislante-construccion#>

Comunicacion. (2025, 1 septiembre). Intercambiadores de calor. Cómo funcionan. Cofrico. <https://www.cofrico.com/%20consejos-tecnicos/intercambiadores-de-calor/>

Corscadden, K., Biggs, J., & Stiles, D. (2014). Sheep's wool insulation: A sustainable alternative use for a renewable resource? Resources Conservation And Recycling, 86, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.01.004>

De Madrid, U. C. (2015). OSCAR, física visual a un click :: Universidad Complutense de Madrid. <https://webs.ucm.es/centros/webs/oscar>

Erratic weather patterns in the Central American Dry Corridor leave 1.4 million people in urgent need of food assistance | World Food Programme. (2019, 25 abril). UN World Food Programme (WFP). <https://www.wfp.org/news/erratic-weather-patterns-central-american-dry-corridor-leave-14-million-people-urgent-need>

Ghiglia, A. (2021, 22 febrero). Eficiencia isentrópica y potencia específica de los compresores – Kaeser Talk. <https://kaesertalk.com.ar/2021/02/22/eficiencia-isentropica-y-potencia-especifica-de-los-compresores>

Gómez, J. R., Garcia, R. F., De Miguel Catoira, A., & Gómez, M. R. (2012b). Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 17, 74-82.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.027>

Gómez, P. M. (mayo, 2023). ¿Por qué el poliestireno expandido es una opción eficiente para el aislamiento térmico? *Diario De Valderrueda - Actualidad De La Montaña Oriental Leonesa Y Palentina*. <https://www.diariodevalderrueda.es/texto-diario/mostrar/4291548/poliestireno-expandido-opcion-eficiente-aislamiento-termico>

Lekavicius, V., Shipkovs, P., Ivanovs, S., & Rucins, A. (2015). Thermo-Insulation properties of Hemp-Based products. *Latvian Journal Of Physics And Technical Sciences*, 52(1), 38-51. <https://doi.org/10.1515/lpts-2015-0004>

Li, J. (2025, 15 julio). *Fundamentals of Heat Sink Design: Principles and Best Practices*. Primer Molde. <https://firstmold.com/es/tips/heat-sink-design/>

Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2010). Diagnóstico a nivel macro y micro del Corredor Seco y definición de las líneas estratégicas de acción del MAGA, 1-37. <https://www.maga.gob.gt/download/macro-micro.pdf>

Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., & Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 707-738.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036>

Poese, M. E., y Garrett, S. L. (2000). Performance measurements on a thermoacoustic refrigerator driven at high amplitudes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (5), 2480-2486.

Sam. (2023, 20 marzo). *Heat Sink Design: Basics, Principle, and Practical Tips | AT-Machining*. AT-Machining. <https://at-machining.com/es/heat-sink-design/>

Semitekolos, D., Pardou, K., Georgiou, P., Koutsouli, P., Bizelis, I., & Zoumpoulakis, L. (2020). Investigation of mechanical and thermal insulating properties of wool fibres in epoxy composites. *Polymers And Polymer Composites*, 29(9), 1412-1421.
<https://doi.org/10.1177/0967391120971387>

Stat, F., y CARE. (2023). Guatemala: Una realidad constante de inseguridad alimentaria [Report]. <https://care.org.gt/wp-content/uploads/2023/10/Guatemala-case-study-2023-SP.pdf>

Tassou, S., Lewis, J., Ge, Y., Hadawey, A., & Chaer, I. (2009). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.001>

Thongtip, T., & Aphornratana, S. (2015). An alternative analysis applied to investigate the ejector performance used in R141b jet-pump refrigeration system. *International Journal Of Refrigeration*, 53, 20-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.01.017>

Transferencia de Calor - Prodel, S.A. (s. f.). Prodel, S.A. <https://www.prodel.es/subareas/transferencia-de-calor/>