

**AUMENTO DE LA EFICIENCIA EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN
REFRIGERADOR DOMÉSTICO**

David Enrique Restrepo Gaviria

Wilson Hernán Arboleda Muñoz

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director del trabajo de grado:

Adrián Felipe Martínez Pérez

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM

Ingeniería Electromecánica

Medellín

2016

Reconocimientos

Este trabajo fue posible gracias a muchas personas, en especial a nuestro asesor, el Ingeniero Adrián Martínez Pérez, quien nos colaboró y nos brindó su apoyo incondicional.

Al docente Carlos Acevedo, fue aquella persona quien nos motivó desde un principio a continuar con el proyecto y quien nos brindó mucha comprensión, amistad y consejos muy valiosos para nuestro desarrollo como profesionales.

A cada uno de los miembros del jurado que evaluaron este trabajo, por su tiempo, así como cada uno de los profesores que formaron parte de nuestra formación en esta etapa de la vida.

Wilson Arboleda expresa su reconocimiento especial a su hija Melissa Arboleda quien fue el motor, ganas, y fuerzas para continuar dándole el ejemplo y motivación de salir adelante. Este trabajo se lo dedico a muchas personas quienes trataron de frustrarme por la edad y enseñarles que nunca en la vida es tarde para capacitarnos y hacer posible nuestros ideales.

David Restrepo agradece especialmente a su madre Gabriela Margarita Gaviria quien lo ayudó y motivó constantemente, a sus hijas María Fernanda e Isabella y a su esposa Gleydi Valencia quienes sacrificaron muchos momentos en familia para poder contribuir a este gran logro; y por último, a todas aquellas personas que a través de todos estos años de estudio colaboraron a superar cada peldaño para llegar a este punto.

Y por último, un agradecimiento muy profundo al ITM y a la Facultad de Ingeniería por habernos abierto las puertas de sus instalaciones y permitirnos formarnos como ciudadanos responsables con la ética que caracteriza esta linda institución.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1. General.....	13
1.2. Específicos.....	13
2. Marco teórico	14
2.1. Antecedentes.....	14
2.2. Aplicaciones de la refrigeración	16
2.3. Proceso de enfriamiento	19
2.4. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	20
2.5. Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.....	23
3. Metodología	25
4. Resultados y discusión	30
4.1. Cálculo del Coeficiente de Operación (COP)	30
4.1.1. Medición de temperatura en el evaporador convencional..	33
4.1.2. Medición de temperatura en el evaporador modificado.	34
4.2. Datos de temperatura y tiempo en el evaporador convencional y modificado	36
4.3. Ahorro energético	40
4.4. Ahorro económico.....	43
4.4.1. Costos kWh del evaporador convencional.....	44
4.4.2. Ahorro económico del evaporador modificado.....	45
4.5. Impacto ambiental	46
4.5.1. Factor de emisión del sistema eléctrico de proyectos DML (mecanismo de desarrollo limpio)..	47
4.5.2. Consumo eléctrico (datos de actividad)..	48
5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	54
Referencias.....	54
Apéndices	57
Anexos	65

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Temperaturas iniciales y alcanzadas del evaporador convencional.....	33
Tabla 2. Cálculo de variables con EES (versión académica) para el evaporador convencional.	34
Tabla 3. Temperaturas iniciales y alcanzadas del evaporador modificado.....	35
Tabla 4. Cálculo de variables con EES (versión académica) para el evaporador convencional.	35
Tabla 5. Datos tomados en un ciclo de refrigeración del evaporador convencional con una temperatura inicial de 28°C hasta la temperatura final de -2°C.....	39
Tabla 6. Datos tomados en un ciclo de refrigeración con una temperatura inicial de 27,9°C hasta la temperatura final de -2°C.	39
Tabla 7. Datos obtenidos en el evaporador convencional durante 10 minutos de funcionamiento.....	40
Tabla 8. Cantidad de ciclos en 10 minutos del Evaporador Modificado (2°c a -2°c).	41
Tabla 9. Tarifas y costo de energía eléctrica EPM mercado regulado.	44
Tabla 10. Factor de emisión de EPM / Factor de emisión del SIN.....	49
Tabla 11. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador convencional.	50
Tabla 12. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador modificado.....	51

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ley cero de la termodinámica.	17
Figura 2. Principio de refrigeración mecánica.	18
Figura 3. Flujo natural del calor.	18
Figura 4. Esquema para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.	20
Figura 5. Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de compresión de vapor.	21
Figura 6. Tubo capilar.	22
Figura 7. Diagrama Temperatura Vs isotropía para el ciclo ideal de la refrigeración por compresión de vapor.	23
Figura 8. Esquema y Diagrama Temperatura Vs isotropía para el ciclo REAL de la refrigeración por compresión de vapor.	25
Figura 9. Diagrama y Presiones calculadas por programa EES (Versión Académica).	28
Figura 10. Puntos de toma de temperatura en prototipo para calcular el COP.	32
Figura 11. Puntos de toma de temperatura en prototipo para calcular el COP.	32
Figura 12. Temperatura Evaporador Convencional vs. Tiempo.	36
Figura 13. Temperatura Evaporador Modificado vs. Tiempo.	37
Figura 14. Comparativas entre el evaporador convencional y el Modificado.	38
Figura A15. Medición de temperaturas.	57
Figura A16. Prototipo evaporador.	57
Figura A17. Ubicación de los sensores de temperatura del refrigerante en ambos evaporadores.	58
Figura A18. Temperatura inicial del refrigerante en ambos evaporadores y condensador.	58
Figura A19. Temperatura mínima del evaporador convencional.	59
Figura A20. Temperatura alcanzada por el condensador y temperatura mínima del evaporador convencional.	59
Figura A21. Temperaturas iniciales para tomar temperatura mínima de evaporador modificado.	60
Figura A22. Temperatura alcanzada por el condensador y la temperatura mínima del evaporador modificado.	60
Figura B23. Diagrama de potencia del prototipo.	61
Figura B24. Diagrama de control del prototipo.	61
Figura B25. Plano condensador.	62
Figura B26. Plano evaporador convencional.	63
Figura B27. Plano evaporador modificado.	64

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Fotos correspondientes al prototipo y medidas de temperatura y tiempo tomadas durante las pruebas realizadas con ambos evaporadores.	57
Apéndice B. Planos eléctricos y vistas isométricas con el acotado del condensador, evaporador convencional y Modificado.	61

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Equipos: Compresor, controladores de temperatura.	65
Anexo B. Cantidad de energía consumida por electrodomésticos.	69
Anexo C. Placas del evaporador del refrigerador convencional.	70
Anexo D. Carga Térmica de los alimentos.	71

Resumen

Con el presente se tuvo como objetivo comparar la eficiencia del evaporador de una nevera convencional y otro evaporador con la posición de sus placas modificadas. Para entender cómo funciona un sistema de refrigeración es necesario saber las diferentes aplicaciones que existen, los componentes que lo conforman y como calcular los parámetros de operación. Se logró determinar que modificando la orientación de las placas de un evaporador convencional se incrementa la eficiencia energética, disminuyendo los tiempos de operación del ciclo de refrigeración representado en un impacto ambiental positivo y ahorro económico. Este sistema de refrigeración utiliza un prototipo a escala; se compone de dos evaporadores con medidas equivalentes, una válvula selectora por circuito, un compresor y condensador que comparten ambos evaporadores. En el proyecto se tomaron registros de variables de temperatura y del tiempo en el cual cada sistema alcanzó su mínima temperatura, con un detallado paso a paso desde el inicio del proceso por evaporador, hasta que llega a la temperatura para realizar los respectivos cálculos. Para comparar los dos sistemas, se debe calcular el coeficiente de operación (COP) de ambos en las mismas condiciones de trabajo midiendo la temperatura en algunos puntos específicos. Finalmente, conociendo el COP de ambos evaporadores se concluye que tan eficiente es el sistema con el evaporador modificado comparado con el convencional y se registran los resultados del proyecto.

Con la reorientación de las placas del evaporador se obtiene una eficiencia en la refrigeración, la cual permite que el compresor que genera el movimiento del fluido refrigerante permanezca menos tiempo encendido. Al ser este tiempo menor, reduce considerablemente el consumo mensual de la energía eléctrica calculada en kWh. Este consumo se refleja en la factura del proveedor de energía eléctrica local y la disminución de costos (más económica la cuenta de energía).

Por otra parte esta disminución del consumo en la energía eléctrica previene la generación de gases de efecto invernadero. Porque mientras menos energía deba producir una planta generadora de energía eléctrica, menor será la emisión de CO₂ que se arroja al ambiente, medido en Toneladas de CO₂ por cada Megavatio hora.

Palabras clave: Consumo Energético, Refrigerador Domestico, Evaporador Convencional, Coeficiente de Operación, Temperatura.

Summary

This approach was to compare the efficiency of a conventional refrigerator evaporator and another evaporator with the position of its plates modified. To understand how a refrigeration system works, it is necessary to know the different applications that exist, the components that comprise it, and how to calculate the operating parameters. It was determined that by changing the orientation of the plates of a conventional evaporator, energy efficiency is increased, reducing operating times of the refrigeration cycle, resulting in a positive environmental impact and economic savings.

This cooling system uses a scale prototype; it consists of two evaporators with equivalent measures, a selector valve circuit, a compressor and condenser shared by both evaporators. In the project, variations in temperature and time in which each system reached its minimum temperature, with a detailed step by step from the beginning of the process of evaporation until it reaches the temperature, were recorded and the respective calculations were made.

To compare the two systems, calculate the coefficient of performance (COP) of both in the same working conditions by measuring the temperature at some specific points. Finally, knowing the COP of both evaporators, it is concluded that the modified system compared to the conventional evaporator is more efficient, and the results of the project are recorded.

With the reorientation of evaporator plates cooling efficiency is obtained, which allows the compressor to generate the movement of the coolant with less time on. Since this is less time, this significantly reduces the monthly consumption of electrical energy in kWh calculated. This consumption is reflected in the Invoice from the local power supplier and decreasing cost (cheaper energy bills). Moreover, this decline in consumption in electric power prevents the generation of

greenhouse gases. Because the less energy that an electric power generating plant produces, the lower the emission of CO₂ thrown into the atmosphere, measured in tonnes of CO₂ per megawatt hour.

Keywords: Energy Consumption, Domestic Refrigerator Evaporator Conventional Coefficient Operating Temperature.

Acrónimos

COP: Coeficiente de operación

ITM: Instituto tecnológico metropolitano

EES: Engineering Equation Solver (versión académica), solución de ecuaciones de ingeniería.

SET- POINT: Temperatura límite a la que el controlador se regula.

EPM: Empresas públicas de Medellín.

FEG: Factor de emisiones de gases efecto invernadero.

GEI: Gases efecto invernadero.

DML: Mecanismo de desarrollo limpio.

UPME: Unidad de planeación minero energética.

CO₂: Dióxido de carbono.

Introducción

Los evaporadores convencionales tienen una orientación en las placas, propia de su diseño, de la cual surgió la idea de pensar que, al invertir la orientación de éstas, se podría alcanzar la temperatura requerida a menor tiempo.

De todo este análisis se pensó en realizar una maqueta prototipo para poder tomar datos y así poder establecer una comparación entre un evaporador convencional y otro modificado y definir la viabilidad del proyecto. Teniendo como referencia el modelo convencional de las neveras actuales, se tomaron algunos valores de las variables más importantes como la temperatura y el tiempo de refrigeración; estas se relacionan con un modelo propuesto por Mendoza (2014), y así se determinan ventajas que mejoren la eficiencia, el costo de operación, la confiabilidad y la manufactura.

Para disminuir el consumo de energía eléctrica en el hogar, se debe centrar la atención en los electrodomésticos que permanecen más tiempo del día encendidos, entre los que se destaca el refrigerador. En este orden de ideas, si se realiza una pequeña disminución en el consumo de energía o en el tiempo que este electrodoméstico permanezca encendido, se disminuye notablemente el consumo de energía de un hogar en un mes.

El refrigerador está compuesto por varios elementos que operan en un solo conjunto, pero este trabajo se centrara únicamente en el evaporador, ya que, si se modifica la posición de este, se disminuyen los tiempos de refrigeración.

Al estar menos tiempo encendido el compresor, se reflejará en el consumo de energía al día, lo cual ayudará a la preservación de uno de los recursos naturales más valiosos como lo es el agua que se utiliza para la generación de energía eléctrica.

En el ambiente colombiano, no se tienen cambios extremos de temperatura (estaciones), por lo que se puede predecir que a lo largo del año, el ahorro de energía no fluctuaría en mayor cantidad y, mensualmente, se tendría una tasa de “ahorro energético” que es la finalidad de este trabajo.

En consecuencia, mediante un estudio de tipo Experimental, se logra establecer las ventajas que ofrece un evaporador convencional respecto al modificado, no solo en su eficiencia operacional sino en el costo/beneficio que reporta dicha intervención en sus variables descritas, por lo tanto, la solución a esta propuesta está dirigida a beneficiar el sector residencial en materia de una optimización del fluido eléctrico y los costos que se revierten en su aplicación.

1. Objetivos

1.1. General

Modificar la orientación de las placas del evaporador que conforman un refrigerador doméstico convencional, para optimizar los tiempos de refrigeración y su uso eficiente de la energía eléctrica, que se reflejen en un ahorro económico e impacto ambiental.

1.2. Específicos

- a) Reproducir un modelo a escala del evaporador y condensador para pruebas experimentales.
- b) Registrar variables de temperatura y tiempo de refrigeración.
- c) Analizar los resultados entre el modelo experimental y el convencional.
- d) Determinar el porcentaje de eficiencia del sistema modificado.

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes

A modo de antecedentes es importante analizar en forma retrospectiva los eventos históricos que han permitido el desarrollo de los distintos refrigerantes y los impactos que han tenido en la humanidad. De hecho, como lo expone Mendoza (2014):

La refrigeración ha sido desde hace cientos de años, una de las mayores necesidades del hombre, primero surgió como una necesidad por mantener en buena condición los alimentos, pues se han encontrado registros de civilizaciones muy antiguas como los Romanos y Griegos quienes transportaban y almacenaban el hielo en pequeños pozos aislados térmicamente con paja y madera con el fin de conservar en mayor medida posible algunos alimentos e incluso hacer uso del hielo en épocas de calor para fines de confort de reyes y emperadores.

Han sido tales los desarrollos de la ingeniería, que hoy es muy común convivir con artefactos y equipos electrodomésticos que facilitan la vida mediante el acceso a productos refrigerados, pese a que a principios del siglo XIX existían navieras dedicadas únicamente a transportar toneladas de hielo desde Suecia, Estados Unidos y Canadá hasta Australia, Las Indias Orientales y Las Antillas, donde el hielo era escaso. Posteriormente, surgieron nuevas necesidades como las de aplicación en la medicina que fueron de suma importancia y dieron origen las primeras investigaciones por parte de los médicos de la época a mediados del siglo XVIII para lograr métodos con el fin de mantener algunos medicamentos refrigerados y llevar a cabo experimentos a temperaturas bajas de manera artificial mediante procesos químicos empleando mezclas refrigerantes combinando agua

con sal, nieve con nitrato amónico entre otras mezclas que permitían llevar a cabo experimentos como el de Von Braun [Aburto, 2006] que logró congelar el mercurio a -40°C y el de Fahrenheit con el cual logró establecer el cero de su escala termométrica. (p. 4)

Ante el dinamismo de la tecnología como respuesta a múltiples necesidades de la civilización, se han desarrollado nuevos campos de investigación que permiten a su vez el desarrollo de ciencias como la medicina, biología y física entre otras, tal es el caso de la criobiología, de la criocirugía, de la criotrónica y de la criónica, todos estos nuevos campos de la ciencia requieren contar con sistemas de refrigeración que brinden temperaturas muy inferiores a las proporcionadas por refrigeradores ordinarios, por lo que se han generado diferentes técnicas que entran dentro del rango denominado Criogenia, este campo de la refrigeración permite obtener temperaturas tan bajas que da paso al desarrollo de investigaciones que sólo es posible llevarlas a cabo a temperaturas cercanas a los 196°C bajo cero, temperatura a la cual ebulle el nitrógeno y a la cual es posible conservar hasta por 10 años en óptimas condiciones las células, tejidos, gametos, y embriones de origen animal y vegetal para el estudio e investigación correspondiente, logrando altos niveles de eficiencia en su practicas científicas (Jutglar & Miranda, 2008).

De acuerdo con el autor, son claros los aportes que generan estas investigaciones en diversas disciplinas, especialmente en la medicina moderna, en donde es posible llevar a cabo tratamientos contra el cáncer, realizar cirugías que solo con la criogenia se pueden llevar a cabo, el desarrollo de nuevos medicamentos y vacunas que se elaboran en industrias farmacéuticas donde se requieren procedimientos a muy bajas temperaturas; no menos importante, estos desarrollos científicos han trascendido la medicina y han impactado con grandes avances en la física y la creación de nuevos materiales denominados superconductores, los cuales presentan estas

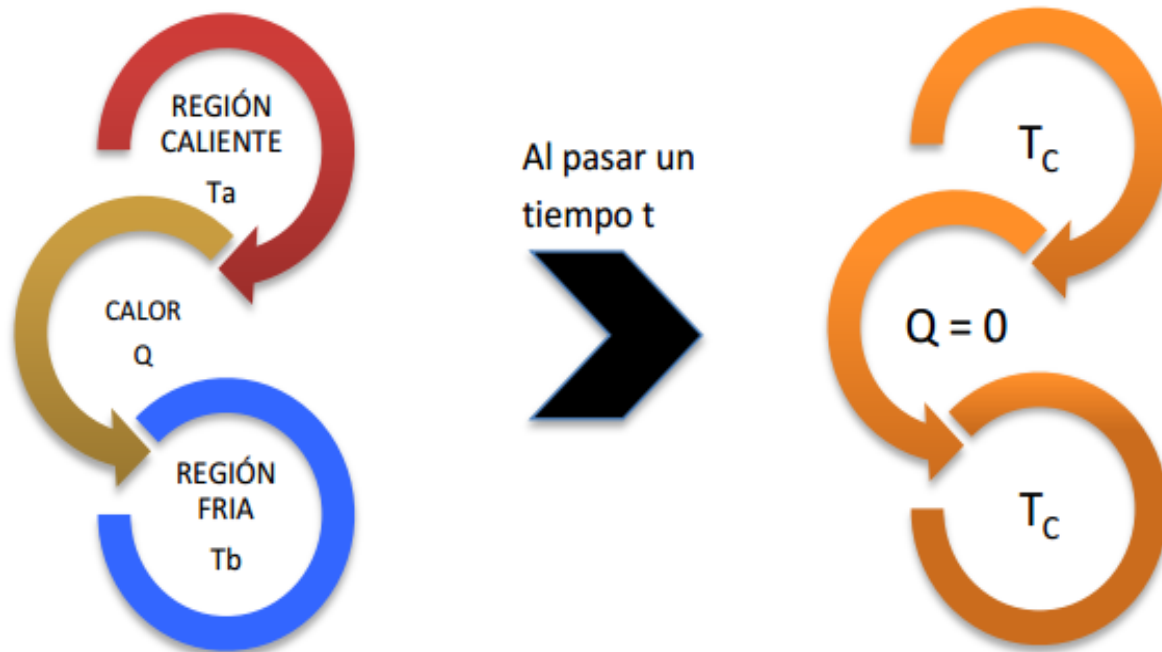
características a bajas temperaturas y que a su vez tienen una aplicación directa en la medicina, pues se requiere de materiales necesarios para la fabricación de instrumentos como los de resonancia magnética nuclear que dependen del uso de imanes superconductores (Jutglar & Miranda, 2008).

2.2. Aplicaciones de la refrigeración

Bajo este escenario, se puede notar que las aplicaciones que se le da a la refrigeración en cualquiera de las áreas de estudio recaerán directamente sobre cualquier otra área, lo cual genera una retroalimentación continua en todas las áreas de estudio y ciencias donde se requieran bajas temperaturas. El desarrollo tecnológico ha ido de la mano de la evolución de las necesidades de la humanidad (Jutglar & Miranda, 2008).

Según Dossat (1991) lograr entender el efecto de refrigeración demanda comenzar por analizar y definir el calor. El calor puede ser entendido desde un punto de vista físico, como la cantidad de energía que fluye de forma natural desde un cuerpo, sustancia o sistema de mayor temperatura hasta otro de menor temperatura, esto se puede entender a partir de la Ley Cero de la Termodinámica.

Que según Cengel y Boles, (2002) establece que “en un sistema cerrado habrá un flujo de energía en forma de calor entre los elementos del mismo, de tal forma que después de un periodo de tiempo este alcanzará su estado mínimo de energía el cual se logra cuando todos estos elementos alcanzan la misma temperatura” (p. 402), es decir, como lo muestra la figura 1, se puede afirmar que el flujo de calor neto entre ellos es nulo.

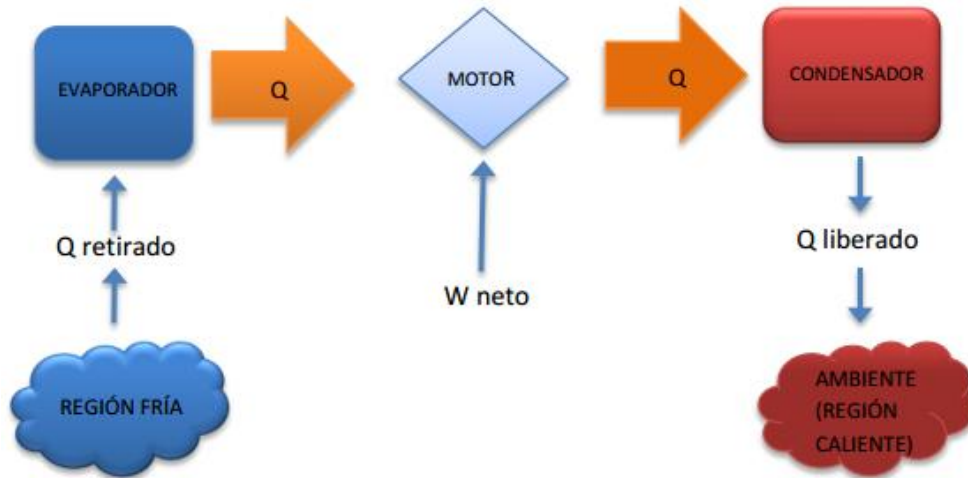
Figura 1. Ley cero de la termodinámica.

Fuente Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.

Como se puede apreciar en la figura anterior, se determina que para lograr enfriar un espacio es necesario emplear un sistema de refrigeración que permita desafiar a la naturaleza, cambiando el sentido de dirección de flujo del calor. En este sentido, una de las maneras en que se puede lograr esto es empleando algún sistema que contenga un dispositivo el cual entregue trabajo mecánico a un ciclo termodinámico cerrado, apoyándose también del uso de un fluido de trabajo conocido como refrigerante, el cual es una sustancia cuyo punto de ebullición se da a muy bajas temperaturas (Cengel & Boles, 2002).

De acuerdo con Pita (1991) con estos elementos es posible extraer calor de un espacio por medio de un intercambiador de calor (evaporador) para reducir su temperatura por debajo de la temperatura ambiente, esto es, el calor extraído del espacio es rechazado hacia el ambiente en otro intercambiador de calor (condensador), como se aprecia en la figura 2.

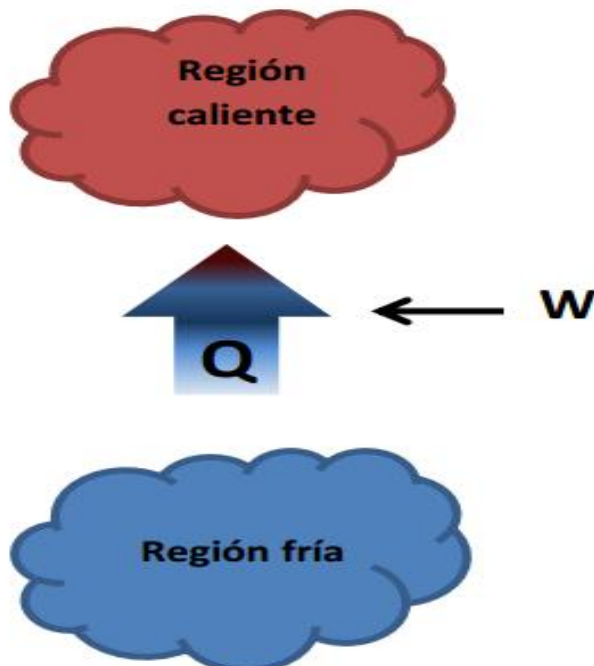
Figura 2. Principio de refrigeración mecánica.



Fuente: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.

Bajo el flujo anterior, resulta más sencillo si se trata de visualizar una región previamente refrigerada y a esta región se le enfría cada vez más, esto no sería posible de forma natural pero al disponer de un dispositivo que brinde trabajo mecánico al sistema será posible realizar una inversión del flujo de calor, tal como lo expone la figura 3 (Pita, 1991).

Figura 3. Flujo natural del calor.



Fuente: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.

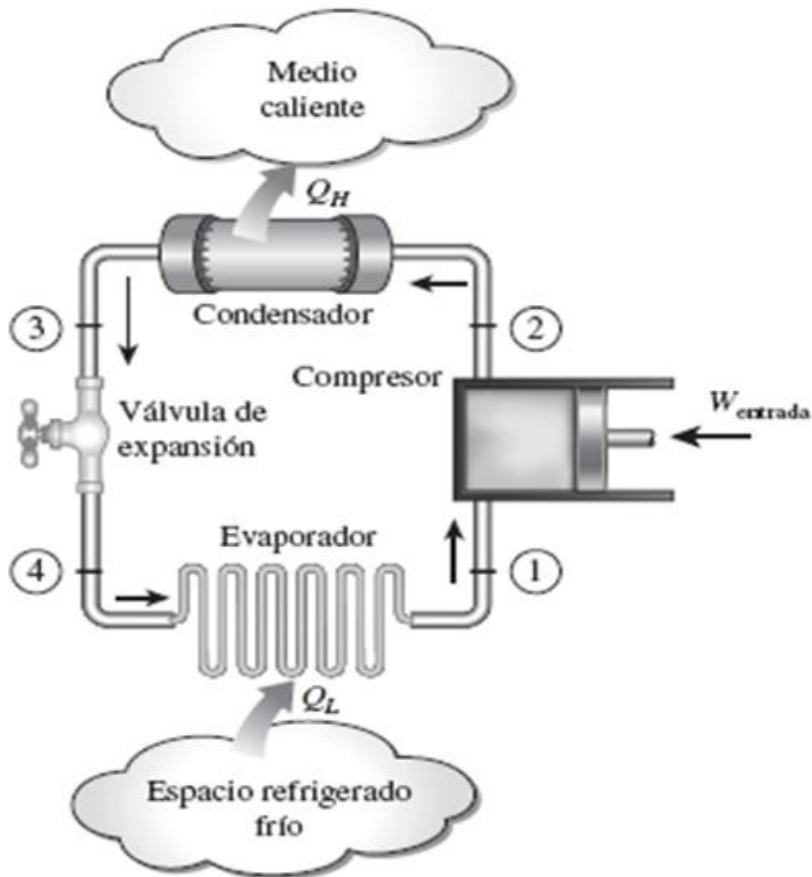
Bajo el concepto de flujo natural e calor, se origina el principio básico de la refrigeración mecánica, aunque como se ha mencionado anteriormente, existes otros mecanismos de refrigeración de acuerdo con las aplicaciones y el campo o disciplina en el cual se demanda su intervención (Pita, 1991).

2.3. Proceso de enfriamiento

Retomando a Cengel y Boles (2002):

El procedimiento para lograr enfriar un espacio, consiste en extraer tanto calor como sea necesario hasta alcanzar la temperatura deseada. Esto se logra de varias formas, la que se va a considerar en este trabajo es aquella que emplea un dispositivo en un sistema termodinámico cerrado. El cual entrega trabajo (W) y recircula un medio de transferencia calor como es el refrigerante, que, al cambiar de fase, absorbe el calor de sus alrededores, esto se obtiene al aumentar la presión del sistema por encima de la atmosférica.

Según las investigaciones realizadas, para realizar este efecto de refrigeración de un espacio cerrado, es necesario un evaporador, como lo representa a la figura 4, el cual se encarga de absorber la temperatura del espacio en mención, y esta temperatura es llevada por el refrigerante hacia el condensador que realiza el intercambio de calor con el medio ambiente. (p. 520)

Figura 4. Esquema para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.

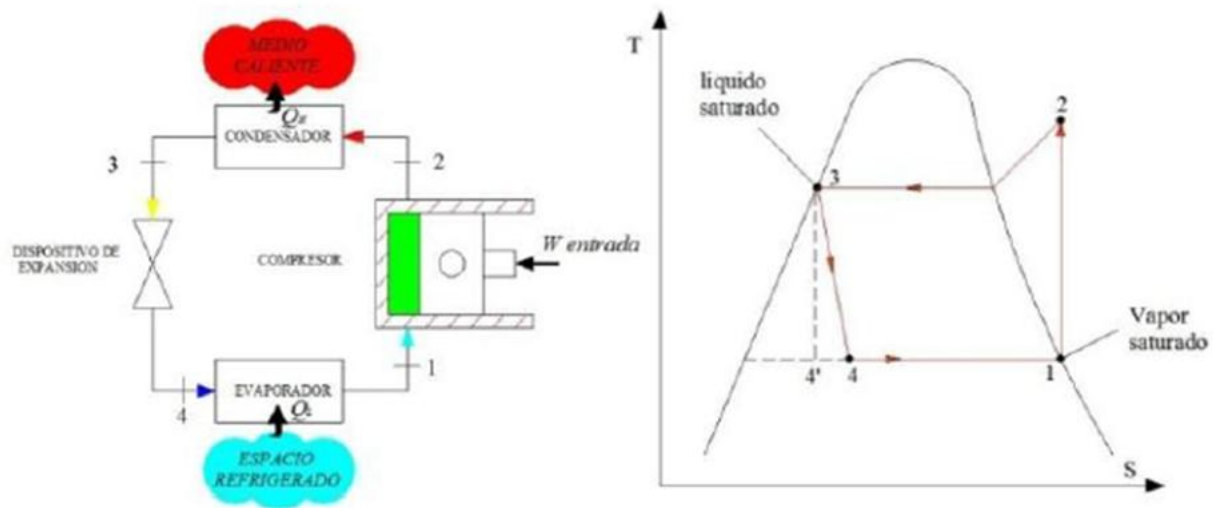
2.4. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

Su principal característica es el uso de un dispositivo de expansión (válvula de expansión o tubo capilar). Funciona en cuatro etapas: compresión, rechazo de calor, estrangulamiento en el dispositivo de expansión y absorción de calor. Existen dos clases: el ciclo ideal que considera las condiciones ideales de funcionamiento y el ciclo real que considera las irreversibilidades que suceden en cada componente. (Castillo & Puente, 2014, p. 3)

Para efectos de cálculos, como lo muestra la figura 5, aluden al sistema de refrigeración trabajando como un ciclo ideal, ya que en cada una de las etapas se consideró el flujo estable y no

se tomaron pérdidas debido a la entropía del compresor, la fricción del flujo ni las pérdidas de calor del mismo ciclo.

Figura 5. Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de compresión de vapor.



Fuente: Castillo, B. F., & Puente, R. F. (2014). *Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Educador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6223/1/UPS-CT002826.pdf>

De la figura anterior se establece:

- 1-2 Compresión isotérmica en un compresor
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

Cuando se trata de la refrigeración a nivel domiciliario, no es necesario el uso de válvulas automáticas de control para expandir el refrigerante y regular la entrada de este, por eso se sustituye por un tubo capilar que no requiere casi ningún tipo de mantenimiento y su costo es bajo. La figura 6 muestra un tubo capilar el cual va a reemplazar la válvula de estrangulamiento con regulación de presión. Este consiste en un tubo de diámetro reducido, sus medidas pueden oscilar entre 0,5 y 1,5 mm, el empleo de este tubo tiene como objetivo principal la correcta condensación del

refrigerante en estado líquido antes de ingresar al evaporador y esto se logra reduciendo la presión y la temperatura (Castillo & Puente, 2014).

“En la fase de diseño del circuito de refrigeración. Puede seleccionarse algún diámetro interno disponible y luego se ajusta a la longitud hasta lograr el efecto de enfriamiento en el evaporador” (Castillo & Puente, 2014, p. 33).

Figura 6. Tubo capilar.

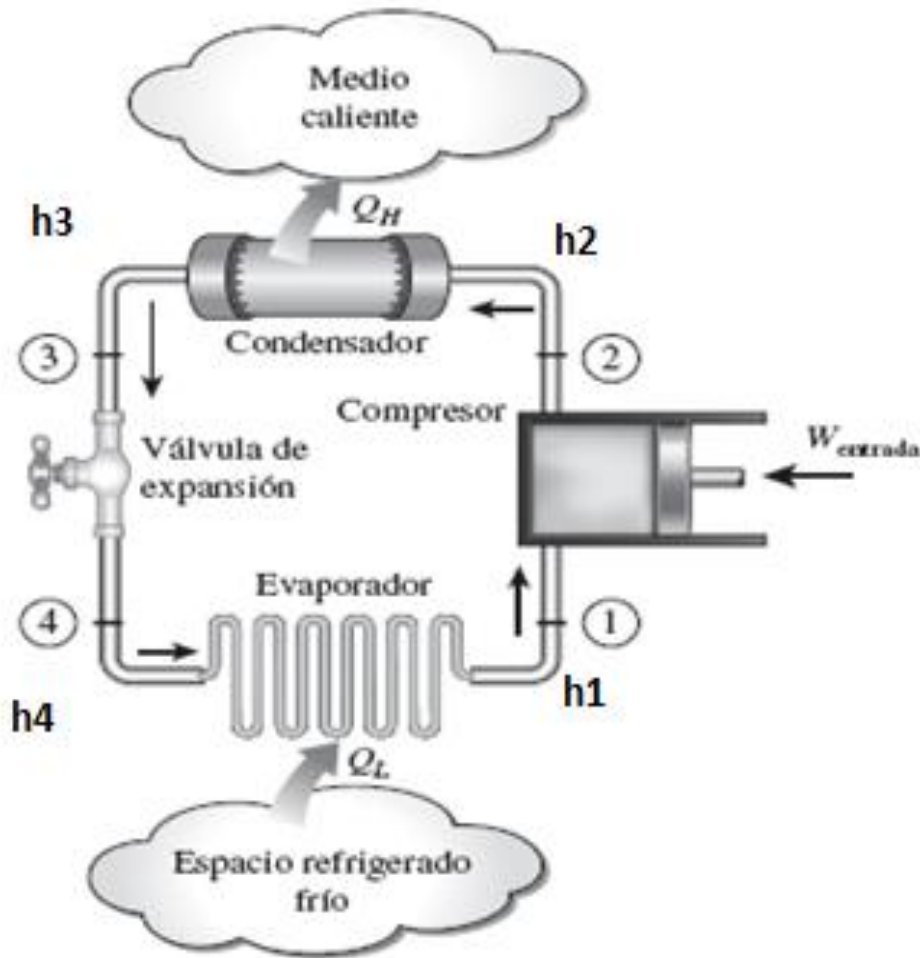


Fuente: Castillo, B. F., & Puente, R. F. (2014). *Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6223/1/UPS-CT002826.pdf>

El Coeficiente de Operación (COP) se relaciona con el intercambio de calor en el evaporador y el trabajo entregado por el compresor.

En la figura 7 se logra determinar la comparación entre el Diagrama Temperatura y la isotropía calculada en el ciclo ideal de la refrigeración por compresión de vapor.

Figura 7. Diagrama Temperatura Vs isotropía para el ciclo ideal de la refrigeración por compresión de vapor.



Fuente: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.

2.5. Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor

En el ciclo real mostrado en la figura 8, se toma en consideración “la caída de presión que sufre el refrigerante al fluir por las tuberías del evaporador y el condensador, también es importante el subenfriamiento y el sobrecalentamiento al que es sometido el refrigerante en las cañerías de succión” (Castillo & Puente, 2014, p. 6).

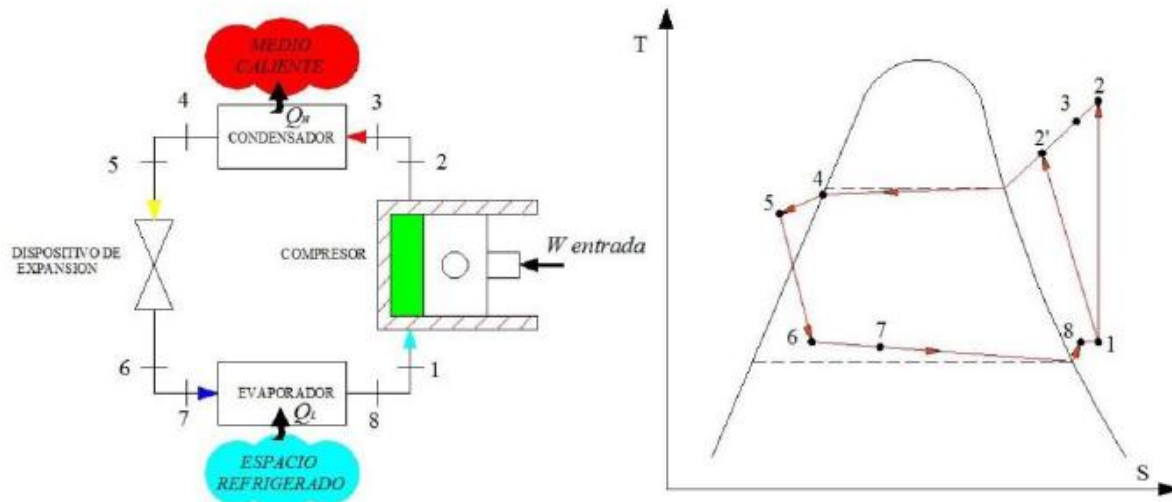
El diseño de un sistema que sobrecalienta el refrigerante ligeramente a la entrada del compresor en un equipo doméstico, se debe a que éste sobrecalentamiento (proceso 8-1) nos asegura que el refrigerante está completamente evaporado cuando ingresa al compresor.

En el proceso de compresión se analiza los efectos de fricción que causan la caída de presión, estos incrementan la entropía y la transferencia de calor, lo que aumenta (proceso 1-2) o disminuye la entropía al ingresar al condensador (proceso 1-2'). El proceso 1-2' es el más deseable puesto que la entrada de trabajo del compresor es más pequeña en este caso.

En el condensador es inevitable tener una caída de presión, también es complicado que se realice el proceso de condensación con precisión para obtener líquido saturado al final de la tubería, es preferible tener un líquido subenfriado (proceso 4-5) en el tubo capilar ya que un refrigerante sin condensarse completamente, puede disminuir la vida útil del componente antes mencionado.

Al realizar la expansión (proceso 5-6) del refrigerante en el tubo capilar, este ingresa al evaporador con una entalpía inferior y por ello absorbe más calor del espacio refrigerado (proceso 7-8). (Castillo & Puente, 2014, p. 6)

Figura 8. Esquema y Diagrama Temperatura Vs isotropía para el ciclo REAL de la refrigeración por compresión de vapor.



Fuente: Castillo, B. F., & Puente, R. F. (2014). *Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6223/1/UPS-CT002826.pdf>

El evaporador ubicado en la zona de baja presión que opera como intercambiador de calor, por cuyo interior fluye el refrigerante cambiando su estado de líquido a vapor, permite absorber el calor de los alrededores y de esta manera el gas al abandonar el evaporador lo hace con una energía interna notablemente superior debido al aumento de su entalpía, cumpliéndose así el fenómeno de refrigeración. El flujo de refrigerante en estado líquido es controlado por un dispositivo o válvula de expansión la cual genera una abrupta caída de presión en la entrada del evaporador. En los sistemas de expansión directa, esta válvula despiden una fina mezcla de líquido y vapor a baja presión y temperatura. Debido a las propiedades termodinámicas de los gases refrigerantes, este descenso de presión está asociado a un cambio de estado y, lo que es más importante aún, al descenso en la temperatura del mismo.

De esta manera, el evaporador absorbe el calor sensible del medio a refrigerar transformándolo en calor latente el cual queda incorporado al refrigerante en estado de vapor. Este calor latente será disipado en otro intercambiador de calor del sistema de refrigeración por compresión conocido como condensador dentro del cual se genera el cambio de estado inverso, es decir, de vapor a líquido. (Puebla, 2006, p. 125)

3. Metodología

Es importante entender que hay investigaciones de corte cuasi experimental, siendo aquella que no cumple con todo el rigor exigido en la experimental, por ejemplo, aquellos estudios que no se pueden controlar todas las variables o que no se puede tener un tratamiento.

Como método cuasi experimental, este proyecto demandó la utilización de elementos para las pruebas y los correspondientes equipos para controlar las principales variables (Temperaturas y tiempos), los cuales se describen a continuación:

- Compresor hermético recíprocante (125 W, 120V AC, para refrigerante 134a, 6.21A nominales)
- Evaporadores
- Tubos capilares (válvulas de expansión)
- Válvulas de paso
- Capacitor de arranque
- Protector térmico o aislantes térmicos
- Termorregulador de temperatura (controles térmicos)
- Sensores de temperatura
- Soldadura de plata

- Soldador a gas desechable
- Condensador
- ventilador de convección forzada: con la siguiente ficha técnica.
 - Modelo: 10-20/794
 - Voltaje In :110/127 V
 - Frecuencia :60 Hz
 - Clase: B
 - Potencia Out: 10 Watts
 - Potencia In: 46 Watts
 - Corriente In: 0.62 A
 - Revoluciones Por Minuto: 1550
- Base para componentes
- Relevos eléctricos

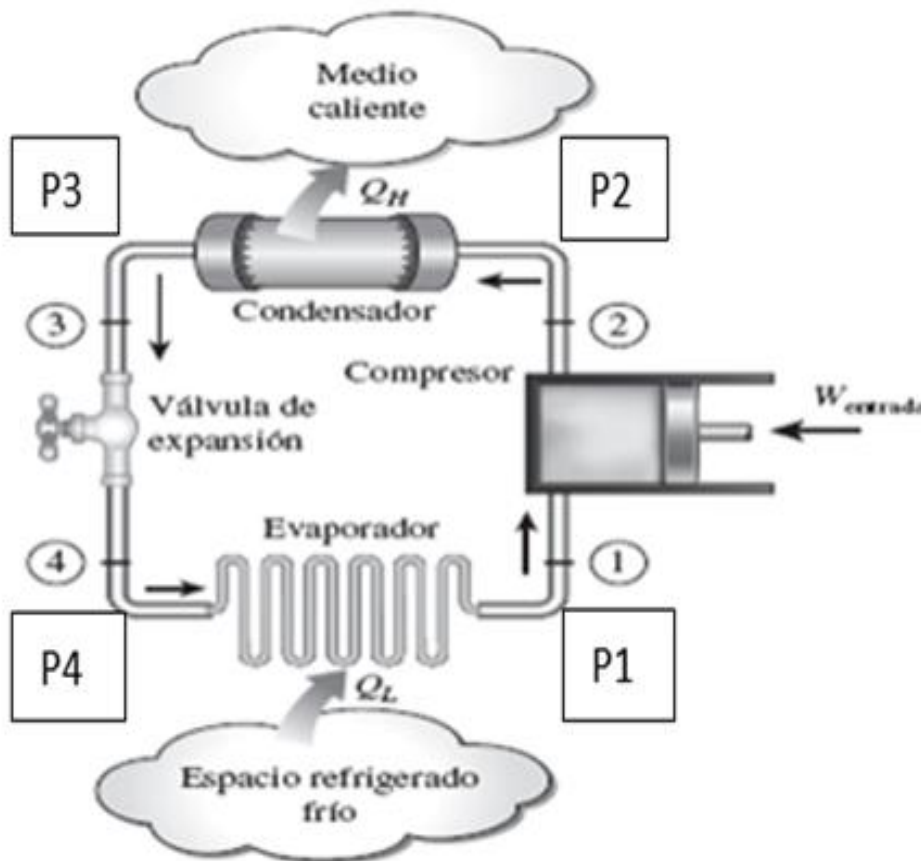
Sistema eléctrico y de control del proyecto

Elementos eléctricos utilizados en el control

- 1 Contactor a 110 voltios
- 1 Relé a110 voltios
- 1 Pulsador de emergencia tipo Hongo
- 1 Selector de 3 posiciones
- 3 Controladores de temperatura
- 2 Sensores de temperatura tipo PT100
- 1 Termocupla tipo J
- 15 Metros cable de control calibre # 18

- 1 Ventilador de refrigeración de 19 mm de diámetro a 110 voltios
- 1 Compresor de 1/6 hp a 110 voltios
- Presiones. Éstas fueron calculadas a partir del programa EES (Versión Académica), ya que la maqueta no cuenta con los puntos físicos para instalar manómetros y tomar datos correspondientes de presión, la figura 9 muestra los 4 puntos de presión calculados. Los datos iniciales para el cálculo de estas presiones (IDEALES), fueron hallados a partir de tablas por calidades, entalpías y temperaturas.

Figura 9. Diagrama y Presiones calculadas por programa EES (Versión Académica).



Fuente: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). Termodinámica. 7a ed. México: McGraw-Hill.

Presiones evaporador convencional

$P1 = 193,7 \text{ kPa}$

$$P2 = 1341 \text{ kPa}$$

$$P3 = 1017 \text{ kPa}$$

$$P4 = 195 \text{ kPa}$$

Presiones evaporador modificado

$$P1 = 198,4 \text{ kPa}$$

$$P2 = 1254 \text{ kPa}$$

$$P3 = 1017 \text{ kPa}$$

$$P4 = 197 \text{ kPa}$$

- Datos técnicos del equipo (*Ver Anexo A. Equipos: Compresor, Controladores de Temperatura*)

Con respecto al pulsador de emergencia es utilizado para interrumpir toda la alimentación eléctrica de potencia y control del circuito. El selector de 3 posiciones, se utiliza para habilitar el control eléctrico del refrigerador a trabajar, conjuntamente con la manipulación de las válvulas de cierre rápido instaladas antes de las válvulas de expansión de los respectivos refrigeradores; los controladores de temperatura, controlaran el encendido y apagado del compresor, retroalimentados por las señales de los respectivos sensores de temperatura PT-100 instalados al interior de cada refrigerador, de acuerdo a la temperatura de set point (-2 Grados Celsius) programada en los mismos; el ventilador de refrigeración instalado en el evaporador, es manejado por el controlador de temperatura, retroalimentados por la señal de la termocupla tipo J, instalada en el condensador, de acuerdo a la temperatura de set point (23 Grados Celsius) programada para el mismo .

Para poder evidenciar la eficiencia del evaporador modificado, fue necesario realizar varias pruebas en ambos evaporadores, en estas pruebas se registraron los principales datos con ayuda de

sensores de temperatura, cronómetros para el control del tiempo de refrigeración y cámaras para los registros digitales de dichas pruebas.

Con un solo compresor el cual genera la presión y el movimiento del refrigerante para los dos sistemas, aclarando que cada sistema tiene su válvula de direccionamiento del refrigerante y trabajan independientes, con esta se selecciona a cuál evaporador se le registran los datos.

Los pasos demandados en la intervención fueron 4:

- **Paso 1:** Con el compresor apagado y las válvulas de los sistemas abiertos, se activa el control y se registran los datos de temperatura de cada evaporador, de la salida del condensador, de la salida del compresor y la succión del compresor.

- **Paso 2:** Se cierra la válvula del evaporador modificado y se activa el compresor, se espera a que disminuya al mínimo la temperatura de succión del compresor y se registran todos los datos para calcular el COP.

- **Paso 3:** Se espera que se restablezcan las condiciones de operación en el sistema, desactivando el compresor y abriendo las dos válvulas para que se homogenicen los dos sistemas y el refrigerante nuevamente este a temperatura ambiente, para que las condiciones iniciales de los dos sistemas sean las mismas.

- **Paso 4:** Con el compresor apagado, las válvulas de los sistemas abiertos y el control encendido para monitorear el cambio de las temperaturas en los diferentes puntos, se cierra la válvula del evaporador Modificado, se activa el compresor y se espera a que descienda a la mínima temperatura de succión del compresor y nosotros registrábamos todos los datos para calcular el COP del evaporador modificado.

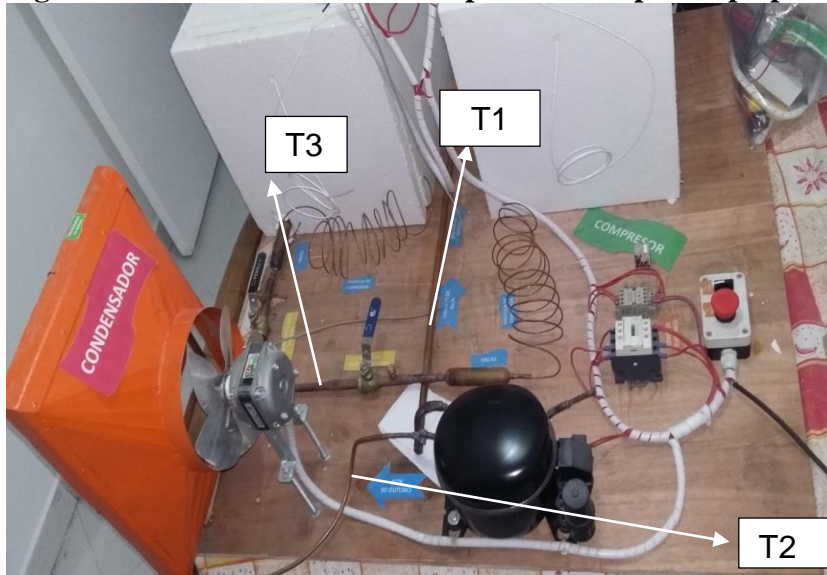
- Estos procedimientos se realizaron en varias ocasiones para disminuir el nivel de incertidumbre en los registros y de los datos arrojados por los sensores para hacer más confiable el cálculo del coeficiente de operación (COP).

Al momento de tomar los datos se tuvo en cuenta de no registrar el tiempo de estabilización del sistema, ya que como éste inicia a refrigerar un espacio cerrado y aislado térmicamente desde la temperatura ambiente se demora más tiempo para alcanzar los -2°C (set-point), en cambio cuando éste era homogéneo solo tenía que bajar de 2°C a -2°C y en ese rango se toman todos los datos. Con relación al tiempo de muestreo de las tablas 7 y 8, se tomó aleatoriamente este tiempo y se detiene el muestreo al momento de alcanzar el mínimo valor de temperatura programado en el set point del control (-2°C).

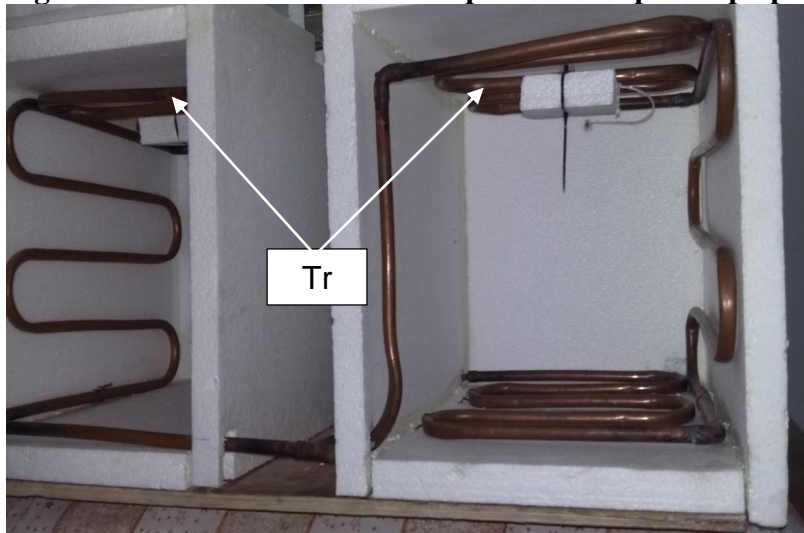
4. Resultados y discusión

4.1. Cálculo del Coeficiente de Operación (COP)

Se visualizó en los controladores de temperatura como se muestra en la figura 9 y 10, la entrada y salida del compresor de refrigeración, la salida del condensador a la entrada de la válvula de expansión del refrigerador convencional y la de salida del condensador a la entrada de la válvula de expansión del refrigerador modificado. Estas temperaturas serán fundamentales para calcular las entalpías en los puntos donde la calidad es igual a uno, o sea vapor saturado, y la calidad es igual a cero, o sea, líquido comprimido. Conocida la temperatura de la salida del condensador y calculada la entropía en la succión que es la misma de la descarga por sistema Isentropico (ideal), con estas temperaturas se calcula la entalpía en la descarga. Con esos cálculos encontrados con el programa EES (Versión Académica), se calcula el coeficiente de operación.

Figura 10. Puntos de toma de temperatura en prototipo para calcular el COP.

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Puntos de toma de temperatura en prototipo para calcular el COP.

Fuente: elaboración propia.

Para poder tomar las temperaturas, se aíslan los sensores y la parte del capilar en ambos evaporadores, para evitar la perturbación de las medidas de temperatura, además se conserva los mismos volúmenes del área a refrigerar en ambos evaporadores.

El motor del ventilador para la convección forzada del condensador que se activa con el controlador de temperatura se conecta con el motor del compresor en paralelo (ambos conectados

en el mismo circuito) como funciona realmente una nevera convencional. Estos dos motores (compresor y ventilador) siguen siendo controlados por el controlador de la temperatura en el evaporador que se esté seleccionando.

4.1.1. Medición de temperatura en el evaporador convencional. Inicialmente se toman las temperaturas en el evaporador convencional, se activa únicamente el control para observar las temperaturas iniciales. Después se habilita la potencia de los motores del sistema (compresor y ventilador), se deja que la temperatura del evaporador baje a su mínimo y se toman las temperaturas alcanzadas en el sistema como se observan en la tabla 1, luego se calculan las otras variables con el programa EES (Versión académica).

Tabla 1. Temperaturas iniciales y alcanzadas del evaporador convencional.

TEMPERATURAS EVAPORADOR CONVENCIONAL		
TEMPERATURAS	TEMPERATURAS INICIALES	TEMPERATURAS ALCANZADAS
A	(°C)	(°C)
Tr	26	-11,2
T1	24,3	-10,9
T2	25,1	58
T3	26	40
Tr	Temperatura refrigerante	
T1	Temperatura succión compresor	
T2	Temperatura descarga compresor	
T3	Temperatura salida condensador entrada evaporador convencional	

Fuente: elaboración propia.

Después de introducir las variables conocidas al programa EES (Versión Académica) como es la temperatura alcanzada y la calidad, el programa calcula las demás, como se aprecia en la tabla

2.

Tabla 2. Cálculo de variables con EES (versión académica) para el evaporador convencional.

EVAPORADOR CONVENCIONAL					
TEMPERATURAS ALCANZADAS (°C)	TEMPERATURAS ALCANZADAS (°C)	CALIDAD CONOCIDA (ADIMENSIONAL)	EES (versión académica)		
			h (kJ/kg)	s(kJ/kgK)	P (kPa)
Tr	-11,2				
T1	-10,9	x1=1	244	0,9385	193,7
T2	58		284,4	0,9385	1341
T3	40	x3=0	108,3	0,3949	
	COP =	3,358910891			

Fuente: elaboración propia.

Se procede con los cálculos de las entalpías h1, h2 y h3 a calcular el coeficiente de operación.

$$\frac{h1 - h4}{h2 - h1} = \text{COP evaporador convencional}$$

h3=h4

$$\frac{244(\text{kJ/kg}) - 108.3(\text{kJ/kg})}{284.4(\text{kJ/kg}) - 244(\text{kJ/kg})} = \text{COP evaporador convencional}$$

$$\frac{135.7(\text{kJ/kg})}{40.4(\text{kJ/kg})} = \text{COP evaporador convencional}$$

COP evaporador convencional = **3.3589**

4.1.2. Medición de temperatura en el evaporador modificado. Se realiza el mismo procedimiento del punto 4.1.1 pero seleccionando el interruptor del evaporador modificado. Se enciende únicamente el control para observar las temperaturas iniciales. Después se habilita la potencia de los motores del sistema (compresor y ventilador), se deja que la temperatura del evaporador baje a su mínimo y se toman las temperaturas alcanzadas en el sistema como se observan en la tabla 3, luego se calculan las otras variables con el programa EES (Versión académica).

Tabla 3. Temperaturas iniciales y alcanzadas del evaporador modificado.

TEMPERATURAS EVAPORADOR MODIFICADO		
TEMPERATURA	TEMPERATURAS INICIALES (°C)	TEMPERATURAS ALCANZADAS (°C)
Tr	26	-11,1
T1	24,3	-10,3
T2	25,1	55
T3	26	40
Tr	Temperatura refrigerante	
T1	Temperatura succión compresor	
T2	Temperatura descarga compresor	
T3	Temperatura salida condensador entrada evaporador convencional	

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 4, después de introducir las variables conocidas al EES (versión académica) como es la temperatura alcanzada y la calidad, el programa calcula las demás.

Tabla 4. Cálculo de variables con EES (versión académica) para el evaporador convencional.

EVAPORADOR MODIFICADO					
TEMPERATURA A	TEMPERATURAS ALCANZADAS (°C)	CALIDAD CONOCIDA (ADIMENSIONAL)	EES (versión académica)		
			h (kJ/kg)	s(kJ/kg K)	P (kPa)
Tr	-11,1				
T1	-10,3	x1=1	244,4	0,938	198,4
T2	55		282,9	0,938	1254
T3	40	x3=0	108,3	0,3949	
	COP =	3,535064935			

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se procede con los cálculos de las entalpías h1, h2 y h3 a calcular el coeficiente de operación.

$$\frac{h1 - h4}{h2 - h1} = \text{COP evaporador modificado}$$

h3=h4

$$\frac{244.4 \text{ (kJ/kg)} - 108.3 \text{ (kJ/kg)}}{282.9 \text{ (kJ/kg)} - 244.4 \text{ (kJ/kg)}} = \text{COP evaporador modificado}$$

$$\frac{136.1 \text{ (kJ/kg)}}{38.5 \text{ (kJ/kg)}} = \text{COP evaporador modificado}$$

COP Evaporador modificado = **3.5350**

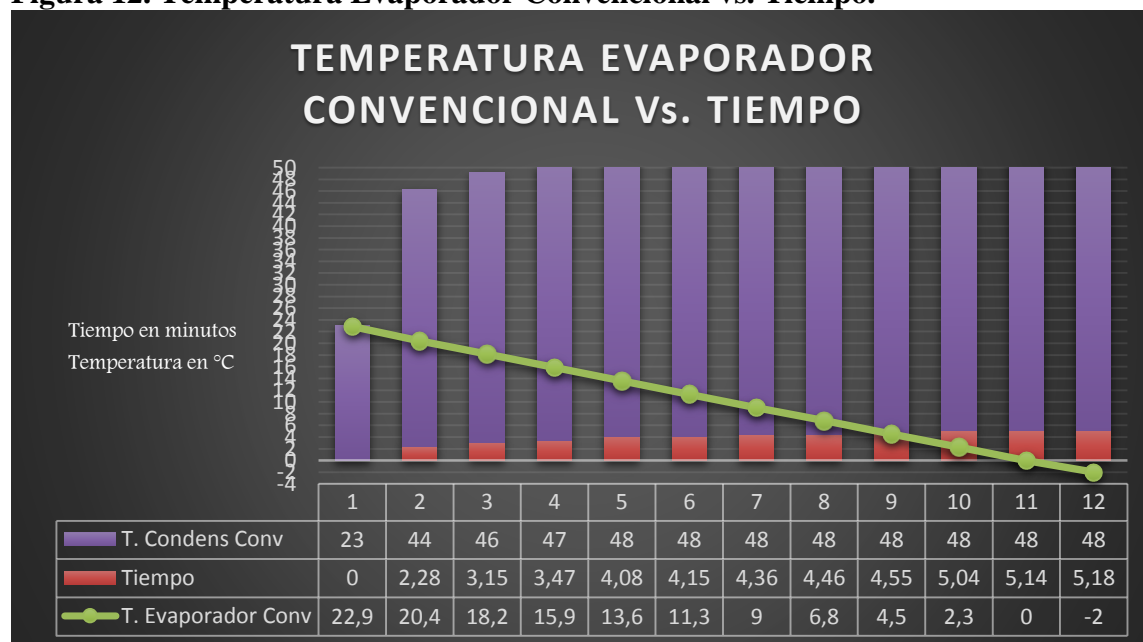
Con estos dos cálculos se puede determinar que el coeficiente de operación del evaporador modificado es 3,5350. Éste coeficiente es superior a 3,3589, que fue el correspondiente al del evaporador convencional. Por lo tanto, el evaporador Modificado es más eficiente.

4.2. Datos de temperatura y tiempo en el evaporador convencional y modificado

Atendiendo el estudio correspondiente al registro de las variables de temperatura y tiempo de refrigeración. A continuación, se presentan los 12 datos tomados de forma aleatoria con respecto a la temperatura del Evaporador Convencional y Modificado ante la variable Tiempo (t).

Inicialmente se aprecia en la figura 12, los resultados obtenidos al poner a prueba el Evaporador Convencional. Se observa que, al iniciar el proceso de refrigeración desde una temperatura de 22,9°C, se alcanza la mínima temperatura ajustada de -2°C a los 5,18 minutos.

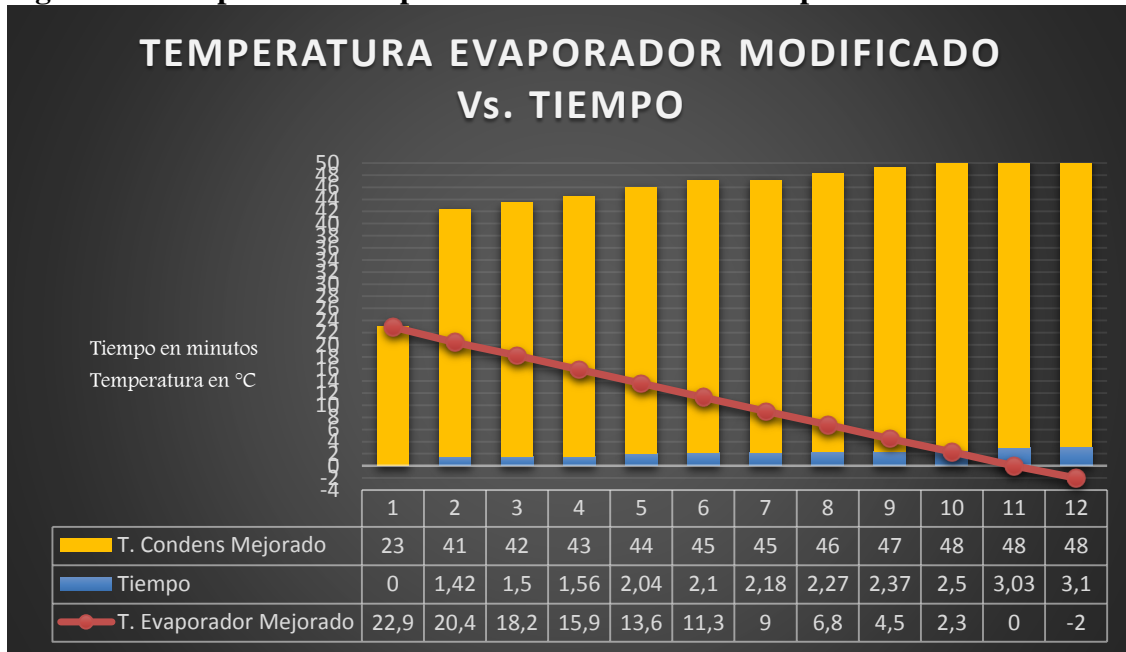
Figura 12. Temperatura Evaporador Convencional vs. Tiempo.



Fuente: elaboración propia.

Se opera el evaporador modificado y se observa en la figura 13 el proceso de refrigeración desde una temperatura de 22,9°C (la misma temperatura ambiente de inicio en el ciclo de refrigeración convencional), se alcanza la mínima temperatura ajustada de -2°C a los 3,1 minutos.

Figura 13. Temperatura Evaporador Modificado vs. Tiempo.

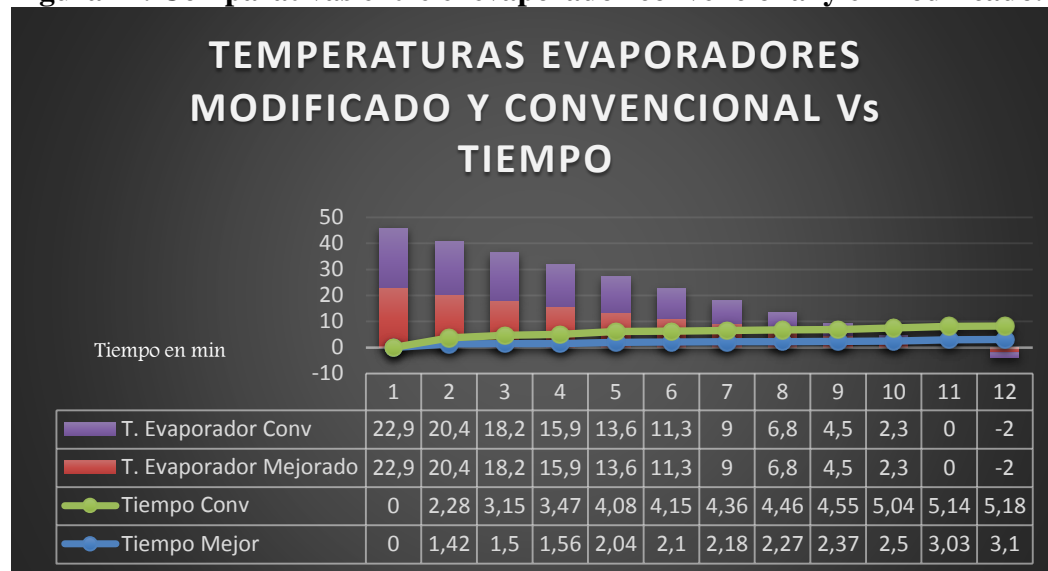


Fuente: elaboración propia.

Por último, se fusionan ambos resultados para el Evaporador Convencional y Modificado, y se consolidan los resultados para dar respuesta a este trabajo, la cual fue la de modificar la orientación de las placas del evaporador que conforman un refrigerador doméstico convencional, para optimizar los tiempos de refrigeración y su uso eficiente de la energía eléctrica.

En las figuras 14, se puede evidenciar la disminución del tiempo de refrigeración del Evaporador Modificado con respecto al Convencional.

Figura 14. Comparativas entre el evaporador convencional y el Modificado.



Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior se demuestra que el tiempo de refrigeración se disminuye 2,08 minutos en el Refrigerador Modificado para llegar a la misma temperatura que el Refrigerador Convencional.

4.3. Ahorro energético

En las tablas 5 a 8, se hace referencia a los datos tomados para la prueba en ambos Evaporadores considerando diversos niveles de temperatura, con esto concluye el cálculo del consumo de ahorro energético del Evaporador Convencional en comparación al Modificado.

En esta parte del trabajo se toman 6 registros de temperaturas. Estos son diferentes a los 12 datos tomados en el numeral anterior. En la tabla 5 se muestra la temperatura y el tiempo por cada minuto transcurrido, se observa que el comportamiento no es igual ya que difiere la hora en que se realizaron las pruebas de toma de datos.

La tabla 5 ilustra los datos tomados en un ciclo de refrigeración del evaporador convencional con una temperatura inicial de 28°C hasta la temperatura final de -2°C. Para un tiempo total de 4,37 minutos y un amperaje promedio de 2,2A.

Tabla 5. Datos tomados en un ciclo de refrigeración del evaporador convencional con una temperatura inicial de 28°C hasta la temperatura final de -2°C.

DATOS DE UN CICLO DE OPERACIÓN DEL EVAPORADOR CONVENCIONAL (28°C a -2°C) (23 de abril 2016, 7 pm)				
DATO	TEMPERATURA EVAPORADOR (°C)	TIEMPO (min)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CORRIENTE (A)
1	28	0	28	2,6
2	27	1	28	2,6
3	3	2	28	2,1
4	4	3	28	2,1
5	5	4	28	2,1
6	-2	4,37	28	2,1
CORRIENTE PROMEDIO				2,2

Fuente: elaboración propia.

La tabla 6 ilustra los datos tomados en un ciclo de refrigeración del evaporador modificado con una temperatura inicial de 27,9°C hasta la temperatura final de -2°C. Para un tiempo total de 4,36 minutos y un amperaje promedio de 2,2A.

Tabla 6. Datos tomados en un ciclo de refrigeración con una temperatura inicial de 27,9°C hasta la temperatura final de -2°C.

DATOS DE UN CICLO DE OPERACIÓN DEL EVAPORADOR MODIFICADO (27,9°C a -2°C) (23 de abril 2016, 8 pm)				
DATO	TEMPERATURA EVAPORADOR (°C)	TIEMPO (min)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CORRIENTE (A)
1	27,9	0	28	2,6
2	27,6	1	28	2,3
3	26,3	2	28	2,2
4	18,1	3	28	2,2
5	3,4	4	28	2,2
6	-2	4,36	28	2,1
CORRIENTE PROMEDIO				2,2

Fuente: elaboración propia.

La tabla 7 refleja los datos obtenidos en el evaporador convencional durante 10 minutos de funcionamiento. Se observa, que el equipo realiza 4 ciclos durante este tiempo para un diferencial de temperatura de 2°C a -2°C. De aquí se determina el consumo energético del evaporador, durante este tiempo transcurrido.

Tabla 7. Datos obtenidos en el evaporador convencional durante 10 minutos de funcionamiento.

CANTIDAD DE CICLOS EN 10 MINUTOS DE L EVAPORADOR CONVENCIONAL (2°C a -2°C) (23 de abril 2016, 7 pm)				
CICLO	TEMPERATURA EVAPORADOR (°C)	TIEMPO (min)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CORRIENTE (A)
1	2	0	28	2,3
	-2	1,3	28	2,1
2	2	0	28	2,3
	-2	1,41	28	2,1
3	2	0	28	2,3
	-2	1,57	28	2,1
4	2	0	28	2,3
	-2	2,29	28	2,1
		TIEMPO PROMEDIO:1,642min	CORRIENTE PROMEDIO:	2,2

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, al calcular el consumo energético del Evaporador Convencional en 10 minutos, éste realiza 4 ciclos, en 1 hora el equipo funciona 24 veces para un diferencial de temperatura de 2°C a -2°C.

Los cálculos son los siguientes:

$$N = \frac{4 \text{ ciclos}}{10 \text{ min}}$$

$$N \text{ ciclos } h = \frac{4 \text{ ciclos}}{10 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = \frac{24 \text{ ciclos}}{1 \text{ h}}$$

$t_{promedio}$ =tiempo promedio de funcionamiento en 10 min

$$t_{promedio}=1,642 \text{ min}$$

$t_{fun.hora}$ =tiempo de funcionamiento en 1 hora

$$t_{fun.hora}=N \text{ ciclos } h * t_{promedio}$$

$$t_{fun.hora}=24 \text{ ciclos} * 1,642 \text{ min}$$

$$t_{fun.hora}=39,42 \text{ min} = 0,657 \text{ h}$$

$$t(\text{tiempo 1 dia}) = t_{fun.hora} * 24 = 15,77 \text{ h}$$

$$t(\text{tiempo 1 dia}) = 0,657h * 24 = 15,77h$$

$$t(\text{tiempo 1 mes}) = 15,77h * 30 = 473,04h$$

$$\text{consumo kWh mes} = P(\text{potencia compresor}) * t(\text{tiempo 1 mes})$$

$$P(\text{potencia compresor}) = V * I$$

$$V(\text{Voltaje compresor}) = 115v$$

$$I(\text{Corriente compresor}) = 2,2A$$

$$P(\text{potencia compresor}) = 115v * 2,2A$$

$$P(\text{potencia compresor}) = 253W = 0,253kW$$

$$\text{consumo kWh mes} = 0,253kW * 473,04h/\text{mes}$$

$$\text{consumo kWh mes} = 119,68 \text{ kWh/mes}$$

Nota: un mes tiene 720h de las cuales 473,04h va a estar funcionando el evaporador convencional

La tabla 8, suministra los datos obtenidos en el evaporador modificado durante 10 minutos de funcionamiento. Se observa, que el equipo realiza 3 ciclos durante este tiempo para un diferencial de temperatura de 2°C a -2°C, Con un amperaje promedio de 2,2A. De aquí se determinar el tiempo que permanece encendido el compresor en una hora.

Tabla 8. Cantidad de ciclos en 10 minutos del Evaporador Modificado (2°C a -2°C).

CANTIDAD DE CICLOS EN 10 MINUTOS DE L EVAPORADOR MODIFICADO (2°C a -2°C) (23 de abril 2016, 8 pm)				
CICLO	TEMPERATURA EVAPORADOR (°C)	TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	CORRIENTE (A)
1	2	0	28	2,3
	-2	1,22	28	2,14
2	2	0	28	2,3
	-2	1,33	28	2,19
3	2	0	28	2,3
	-2	1,45	28	2,2
		TIEMPO PROMEDIO: 1,33min	CORRIENTE PROMEDIO:	2,2A

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, al calcular el consumo energético del Evaporador Modificado, se observa que en 10 minutos el equipo realiza 3 ciclos, en 1 hora funciona 18 veces para un diferencial de temperatura de 2°C a -2°C.

Los cálculos son los siguientes:

$$N = \frac{3 \text{ ciclos}}{10 \text{ min}}$$

$$N \text{ ciclos } h = \frac{3 \text{ ciclos}}{10 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = \frac{18 \text{ ciclos}}{1 \text{ h}}$$

$t_{promedio}$ = tiempo promedio de funcionamiento en 10 min

$$t_{promedio} = 1,33 \text{ min}$$

$t_{fun.hora}$ = tiempo de funcionamiento en 1 hora

$$t_{fun.hora} = N \text{ ciclos } h * t_{promedio}$$

$$t_{fun.hora} = 18 \text{ ciclos} * 1,33 \text{ min}$$

$$t_{fun.hora} = 23,94 \text{ min} = 0,399 \text{ h}$$

$$t(\text{tiempo 1 dia}) = t_{fun.hora} * 24 = 15,77 \text{ h}$$

$$t(\text{tiempo 1 dia}) = 0,399 \text{ h} * 24 = 9,576 \text{ h}$$

$$t(\text{tiempo 1 mes}) = 9,576 \text{ h} * 30 = 287,28 \text{ h}$$

$$\text{consumo kWh mes} = P(\text{potencia compresor}) * t(\text{tiempo 1 mes})$$

$$P(\text{potencia compresor}) = V * I$$

$$V(\text{Voltaje compresor}) = 115 \text{ v}$$

$$I(\text{Corriente compresor}) = 2,2 \text{ A}$$

$$P(\text{potencia compresor}) = 115 \text{ v} * 2,2 \text{ A}$$

$$P(\text{potencia compresor}) = 253 \text{ W} = 0,253 \text{ kW}$$

$$\text{consumo kWh mes} = 0,253 \text{ kW} * 287,28 \text{ h/mes}$$

consumo kWh mes = 72,68 kWh/mes

Nota: un mes tiene 720h de las cuales 287,28h va a estar funcionando el evaporador modificado

Se observa que en cuanto al tiempo que esta encendido el compresor, se logra optimizar una cantidad de energía que consume este tipo de electrodoméstico, el ahorro energético aproximado es de un 60.7 % del Evaporador Modificado. Todos estos cálculos parten del valor consumido en una hora y esto se proyectó a un mes y luego a un año.

4.4. Ahorro económico

Con respecto al Modelo Convencional. A continuación, se demuestra el valor ahorrado al mes con el evaporador modificado en términos de pesos colombianos, partiendo del consumo energético de ambos evaporadores se puede calcular el costo del consumo de la energía mensual de 119,68 kWh correspondiente al evaporador convencional y el costo del consumo de 72,68 kWh del evaporador modificado (en periodos de 30 días).

Se toma como base la tabla de precios que facilita EPM (empresas públicas de Medellín) para el estrato 4 en diciembre 2015.

La tabla 9 nos ilustra las tarifas del kWh correspondientes a esa fecha.

Tabla 9. Tarifas y costo de energía eléctrica EPM mercado regulado.

Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado - diciembre de 2015				
Información Monomía				
Activos B.T. / Conectados a nivel II		Propiedad EPM	Compartido	Propiedad Cliente
Tarifa Residencial		Nivel I - \$/kWh		
Estrato 1.	Rango 0 - CS	177.53	170.49	164.10
	Rango > CS	435.94	419.62	403.00
Estrato 2.	Rango 0 - CS	221.91	213.12	205.12
	Rango > CS	435.94	419.62	403.00
Estrato 3.	Rango 0 - CS	370.55	356.67	342.55
	Rango > CS	435.94	419.62	403.00
Estrato 4.	Todo el consumo	435.94	419.62	403.00
Estrato 5 y 6.	Todo el consumo	523.13	503.54	483.60
Tarifa No Residencial		Nivel I - \$/kWh		
Industrial y Comercial		523.13	503.54	483.60
ESPD*		479.54	461.58	443.30
Oficial y Exentos de Contribución		435.94	419.62	403.00
Tarifa Áreas Comunes		Nivel I - \$/kWh		
Con contribución		523.13	503.54	483.60
Sin contribución		435.94	419.62	403.00
Costo unitario: $CU_v = G_{m,i} + T_m + D_{n,m} + CV_{m,i} + PR_{n,m,i} + R_{m,i}$ $CU_f = Cf_m$				
CU CREG 158-2015		435.94	419.62	403.00
CU total		428.11	411.35	394.60
Costo compra: $G_{m,i}$		161.84	161.84	161.84
Cargo transporte STN: T_m		25.23	25.23	25.23
Cargo transporte SDL: $D_{n,m}$		160.28	143.52	126.76
Margen comercialización: $CV_{m,i}$		48.43	48.43	48.43
Costo G, T, pérdidas: $PR_{n,m}$		29.50	29.50	29.50
Restricciones: R_m		2.84	2.84	2.84

Fuente: Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2015). *Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado - diciembre de 2015*. Recuperado de <http://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/tarifas/2015/Publicaci%C3%B3n%20diciembre%2014%20de%202015%20Opci%C3%B3n.pdf>

4.4.1. Costos kWh del evaporador convencional. Teniendo como base la tarifa mensual del kWh suministrado en el estrato 4 por EPM (ya que este estrato es el valor pleno cobrado) se procede a calcular el valor del costo mensual por el consumo de energía eléctrica del evaporador convencional. Éste cálculo se hace con el valor correspondiente a dicho estrato, cuya tarifa es \$435,94 /kWh. Estos cálculos se realizaron a partir de la potencia del compresor y del tiempo que permanece encendido en un mes. Luego se comparan con los datos arrojados por medio del mismo procedimiento en cálculos del tiempo que permanece encendido el compresor cuando trabaja con

el circuito del evaporador modificado. Este procedimiento fue realizado para el cálculo del costo del consumo energético de los dos evaporadores.

$VMCEC = \text{valor mensual de consumo evaporador convencional}$

$VMCEC = \text{consumo kWh} * \text{valor kWh estrato 4 (Mensual)}$

$\text{Consumo kWh evaporador convencional (Mensual)} = 119,68 \text{ kWh}$

$\text{Valor kWh EPM estrato 4 (Mensual)} = \$ 435$

$VMCEC = 119,68 \text{ kWh} * \$ 435$

$VMCEC = \$ 52.173 \text{ (pesos mensuales)}$

4.4.2. Ahorro económico del evaporador modificado. (El mismo procedimiento descrito anteriormente)

$VMCEM = \text{valor mensual de consumo evaporador modificado}$

$VMCEM = \text{consumo kWh mes} * \text{valor kWh estrato 4 (Mensual)}$

$\text{Consumo kWh evaporador modificado} = 72,68 \text{ kWh}$

$\text{valor kWh estrato 4 (mensual)} = \$ 435$

$VMCEM = 72,68 \text{ kWh} * \$ 435$

$VMCEM = \$ 31.684 \text{ (pesos mensuales)}$

$\text{valor ahorrado} = VMCEC - VMCEM$

$\text{valor ahorrado} = \$ 52.173 - \$ 31.684 = \$ 20.524$

Es evidente de los anteriores cálculos, que el ahorro económico es de \$ 20.524 pesos del evaporador modificado con respecto al convencional.

4.5. Impacto ambiental

Las emisiones de CO₂ son las principales responsables del calentamiento global y por ende su regulación es un aspecto importante para los gobiernos y la reducción de los gases de efecto invernadero, como fue lo establecido en el protocolo de Kyoto en 1997.

Es importante estudiar la relación entre el consumo de energía y las emisiones de CO₂. Estos patrones de consumo de energía inciden de manera considerable sobre las emisiones de CO₂. En efecto, si el impacto es importante se deben implementar mecanismos en pro de la conservación y uso eficiente de la energía.

El crecimiento económico es atribuido en gran parte por los hogares y las fábricas, ya que, a través de la producción de bienes y servicios de las firmas, están a su vez tratando de satisfacer las necesidades de los bienes y servicios en el hogar. Ahora bien, la una dependerá de la otra directamente. El inconveniente aquí es que dicho aumento productivo generara impactos externos tanto negativos y positivos, además de los excesos referentes a los recursos ambientales. Por eso lo importante de las repercusiones que tienen que ver con el incremento del consumo de energía y las emisiones de CO₂.

Para poder ejercer un control sobre estas dos variables (Consumo energético y CO₂), es conveniente conocer sobre el factor de emisión FEG (factor de emisiones de gases efecto invernadero). Este factor puede ser utilizado para proyectos y mediciones específicas, siguiendo lo establecido en la norma ISO 14067 y el Protocolo GHG y la cuantificación de emisiones GEI por unidad generada promedio (la cual es una herramienta de fácil aplicación y cálculo ya que la información de la generación y consumo de combustibles utilizados puede ser consultado fácilmente en los portales oficiales). (Herrera, s.f).

4.5.1. Factor de emisión del sistema eléctrico de proyectos DML (mecanismo de desarrollo limpio).

El factor de emisión en la generación FEG se calcula a partir de las emisiones de CO₂ provenientes del consumo de combustible divididas entre la cantidad de electricidad generada FEG: emisiones totales de CO₂ de la generación/electricidad generada.

VENTAJAS

1. Es más sencillo de calcular y está ampliamente disponible en fuentes públicas nacionales e internacionales.
2. Se basa en un enfoque comúnmente utilizado para calcular la intensidad de emisiones, por ejemplo, emisiones por unidad de producción generada (Herrera, s.f).

4.5.2. Consumo eléctrico (datos de actividad). El dato de actividad será el consumo de electricidad procedente de proveedores externos del año para el que se esté realizando el cálculo. Por lo tanto, los datos a emplear son los kWh reflejados en las facturas de electricidad del año en cuestión.

Cabe destacar que existen pérdidas por transporte y distribución en la red, de manera que para que un consumidor pueda disponer de una cantidad determinada de kWh, ha tenido que ser producida una cantidad mayor y la diferencia son las pérdidas por transporte y distribución (T&D).

Algunas metodologías indican que para evitar una doble contabilidad entre las emisiones asignadas al consumidor y las emisiones asignadas al productor, los consumidores finales de la electricidad no deben incluir las emisiones debidas a las pérdidas por transporte y distribución (Herrera, s.f).

4.5.2.1. Factores de emisión. Para calcular las emisiones asociadas al consumo eléctrico, debe aplicarse el factor de emisión atribuible a la comercializadora con la que se tenga contratado

el suministro eléctrico para el año de cálculo. Este dato se puede encontrar en las facturas de la compañía suministradora o bien en el documento “Mix Comercial y Factores de Impacto Medio Ambiental” que se encuentra en la web de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) 24, en el que se indica, para el año que se seleccione, el dato “Emisiones de CO₂ (kg CO₂/kWh)” según la comercializadora. El valor habrá de incluir dos números decimales” (Herrera, s.f).

Cualquier actividad realizada por organizaciones y personas que impliquen consumo de energía, quema de combustibles fósiles (gasolina, carbón, gas natural, fuel oil) producción de metano y demás, generan el GEI (Gases de efecto invernadero).

EPM realizó un inventario de emisiones con la metodología del protocolo GEI que fueron generadas por sus actividades, además realizó una recolección de información con otras firmas por medio de los principales métodos para estimar las emisiones y estos fueron calculados a partir de los factores de emisión definidos por la UPME (unidad de planeación minero energético).

Para la UPME el factor de emisión de CO₂ es la cantidad estimada de CO₂ emitidas a la atmosfera por cada unidad de MWh de energía eléctrica generada por una planta de generación.

Para proceder con los cálculos del impacto ambiental positivo que genera este trabajo, se sabe que la ciudad de Medellín cuenta con una empresa comercializadora de energía llamada EPM, la cual suministra información detallada acerca del factor de emisión de CO₂ o factor marginal de emisión de gases de efecto invernadero del sistema interconectado nacional definido por el ministerio de minas y energía como se ilustra en la figura 14. El factor de emisión de CO₂ para proyectos aplicables al mecanismo de desarrollo limpio es 0,221 TCO₂/MWh (2015) y el factor de emisión es 0,0567 tCO₂/MWh (2015)

Este dato es importante para determinar el impacto ambiental a un año, al relacionar $kg\ CO_2/kWh$.

Tabla 10. Factor de emisión de EPM / Factor de emisión del SIN.

Factor de emisión EPM / Factor de emisión del SIN			
Factor de emisión	Ton CO ₂ / MWh 2013	Ton CO ₂ / MWh 2014	Ton CO ₂ / MWh 2015
Factor de emisión EPM	0.0206	0.0246	0,0567
Factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN)	0.1920	0.2000	0,221

Fuente: EPM

El factor de emisión de EPM por energía generada para el 2015 (0.0567 tCO₂/MWh) está por debajo del factor de emisión del SIN (0.221 tCO₂/ MWh) cumpliendo con el compromiso suscrito en la declaratoria de Cambio Climático de EPM desde 2012. El factor de emisión del sistema eléctrico colombiano pasó de 0.200 tCO₂/MWh en 2014 a 0.221 tCO₂/MWh en 2015. Esto significa un ligero aumento que se refleja en el aumento de las emisiones por consumo de energía eléctrica de EPM (alcance 2), así se mantengan los mismos consumos de energía eléctrica.

Fuente: Grupo EPM. (2015). *Gestión de la estrategia*. Recuperado de <http://www.sostenibilidadgrupoepm.com.co/gestion-social-y-ambiental/nuestra-gestion/temas-materiales/estrategia-climatica/gestion-de-la-estrategia/>

4.5.2.2. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador convencional. Para determinar el factor de emisión, se basaron los cálculos partiendo del resultado que arrojó el consumo de energía eléctrica de los dos evaporadores en un mes y este se calculó proyectado a un año, debido a que como se explicó anteriormente la norma ambiental que regula la emisión de gases de efecto invernadero por toneladas de CO₂ por cada Megavatio hora anual que genera una planta eléctrica (TCO₂/MWh). Y luego se relaciona con el factor que entrega el proveedor de energía eléctrica que en nuestro caso es EPM y según el ministerio del medio ambiente se encuentra por debajo del establecido.

$$\text{Consumo kWh evaporador convencional mes} = 119,68 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo kWh evaporador convencional a un año} = 119,68 \text{ kWh} * 12$$

Consumo kWh evaporador convencional a un año = 1436,16kWh Año

factor de emisión EPM = 0,0567 kg CO₂/kWh (2015)

FEEC = factor de emisión evaporador convencional

*FEEC = kWh Año * factor emision EPM (2015)*

*FEEC = 1436,16kWh * 0,0567 kg CO₂/kWh (2015)*

FEEC = 81,4 kg de CO₂ en el 2015

De la figura 16 se puede apreciar que por 1436 kWh que son consumidos por el evaporador convencional durante un año de funcionamiento (2015), hay una emisión de CO₂ por consumo eléctrico de 81,4 kg de CO₂, este dióxido de carbono están afectando la atmosfera y por ende al cambio climático del planeta.

Tabla 11. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador convencional.

	Consumo anual	Unidades de medida fisica	Factor de emisión (Kg de CO ₂ eq/kWh)		Kg de CO ₂ eq
Electricidad	1436,16	kWh	0,0567	Kg de CO₂ eq/kWh	81,430272

Fuente: elaboración propia.

4.5.2.3. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador modificado. Para estos cálculos se utilizó la misma metodología explicada en el cálculo del factor de emisión del evaporador convencional, para así llegar a la diferencia entre los dos sistemas y definir la reducción de emisiones de gases efecto invernadero que se da gracias al menor consumo eléctrico del sistema de refrigeración del evaporador con configuración modificada.

Consumo kWh evaporador modificado = 72,68 kWh

*Consumo kWh evaporador modificado a un año = 72,68 kWh * 12*

Consumo kWh evaporador modificado a un año = 872,16 kWh Año

factor de emisión EPM = 0,0567 kg CO₂/kWh (2015)

FEEM = factor de emisión evaporador convencional

*FEEM = kWh Año * factor emision EPM (2015)*

*FEEM = 872,16kWh * 0,0567 kg CO₂/kWh (2015)*

FEEM = 49,4 kg de CO₂ en el 2015

De la figura 17 se puede apreciar que por 872,16 kWh que son consumidos por el evaporador modificado durante un año de funcionamiento (2015), hay una emisión de CO₂ por consumo eléctrico de 49,4 kg de CO₂, este dióxido de carbono están afectando la atmosfera y por ende al cambio climático del planeta.

Tabla 12. Factor de emisión de consumo eléctrico del evaporador modificado.

	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de emisión (Kg de CO ₂ eq/kWh)		Kg de CO ₂ eq
Electricidad	872,16	kWh	0,0567	Kg de CO ₂ eq/kWh	49,4514

Fuente: elaboración propia.

Resultado de impacto ambiental:

Disminución de CO₂ = CO₂ evaporador convencional * CO₂ evaporador modificado

Disminución de CO₂ = 81,4 kg deCO₂ – 49,4 kg de CO₂

Disminución de CO₂ = 31,9 kg de CO₂

Como respuesta a este trabajo en el aspecto ambiental, se puede notar que hay un aporte positivo al calentamiento global de nuestro planeta y reducir el GEI (Gas efecto invernadero) anual que se produce en la tierra.

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

- En este trabajo se demostró que, solo modificando la posición del evaporador en un sistema de refrigeración convencional, se puede lograr un aumento en el COP o eficiencia energética reacias al aumento de la transferencia de calor en el compartimiento del congelador.

- Se puede generar un ahorro de energía eléctrica por medio de la reorientación de las caras del evaporador, aprovechando la transferencia de calor por medio de los gases calientes que se sitúan en la parte superior del volumen del congelador.

- Este ahorro de energía se demostró con el cálculo de los kWh al mes que consume el del evaporador Convencional con respecto al del evaporador Modificado, debido a que el tiempo que permanece encendido el compresor cuando se está trabajando con el circuito de enfriamiento del evaporador modificado es mucho menor que con el circuito del evaporador convencional.

- Mientras el entorno sea más frío es mucho mejor la eficiencia del trabajo del sistema, disminuyendo los tiempos de refrigeración y al ser más caliente el medio ambiente donde esté situado el refrigerador se necesitará mayor convección forzada para el condensador, lo que hace que disminuya un poco la eficiencia del mismo, pero en cualquier caso va a ser más eficiente que el convencional.

- Por medio del cálculo del COP se demostró comparativamente que el refrigerador modificado es más eficiente que el convencional. De un **COP CONVENCIONAL** de **3.359** a un **COP MODIFICADO** de 3.535 se registró un aumento del 5,2 %.

Este COP puede aumentar realizando las algunas modificaciones que se describen en las recomendaciones a continuación.

- El modelo final se debe implementar con circuitos de refrigeración totalmente independientes, teniendo dos compresores de las mismas características y así serán los retornos

independientes. Para que, al aumentar el tiempo de ciclos de refrigeración por circuito, (refrigerador convencional y refrigerador Modificado), no se observe una disminución en la temperatura mínima alcanzada.

- Todo el circuito tanto el de succión como el de descarga se deben aislar con material aislante térmico, para evitar las pérdidas de energía por convección natural y por radiación cuando el refrigerante este circulando por la tubería.

- Los circuitos de refrigeración deben tener la misma geometría o posicionamiento de los elementos a la misma distancia para poder aumentar más el porcentaje de eficiencia.

- El área del condensador se puede aumentar, para lograr una temperatura más baja a la entrada del evaporador y así tener una diferencia de entalpías entre los puntos h_4 y h_1 (QL), una mayor capacidad de absorción de calor.

- En la actualidad es de vital importancia el cuidado del medio ambiente, por lo que en este proyecto también se contempló este aspecto, ya que el ahorro de energía que se obtiene al utilizar el sistema de refrigeración con el evaporador Modificado, ayuda notablemente a disminuir el CO_2 y gases de efecto invernadero por la generación eléctrica de la empresa proveedora de dicho suministro.

Referencias

- Aburto, A. (junio, 2006). La licuefacción de los gases o hacia las bajas temperaturas. *Ciencias*, (82), 52-81. Recuperado de <http://www.ejournal.unam.mx/cns/no82/CNS000008206.pdf>
- Castillo, B. F., & Puente, R. F. (2014). *Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6223/1/UPS-CT002826.pdf>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill.
- Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda – CONAFOVI. (2006). *Aumento de la eficiencia en el consumo energético de un refrigerador doméstico*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/301862486/Guia-Energia>
- Control de temperatura. (s.f). Recuperado de http://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/Controles_de_temperatura_96x48_mm_MC-5538-201_MAXTHERMO_Catalogo_Ingles.pdf
- Dossat, R. J. (1991). *Principios de refrigeración*. México D.F.: Compañía Editorial Continental.
- Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2015). *Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado - diciembre de 2015*. Recuperado de <http://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/tarifas/2015/Publicaci%C3%B3n%20Diciembre%2014%20de%202015%20Opci%C3%B3n.pdf>
- Grupo EPM. (2015). *Gestión de la estrategia*. Recuperado de <http://www.sostenibilidadgrupoepm.com.co/gestion-social-y-ambiental/nuestra-gestion/temas-materiales/estrategia-climatica/gestion-de-la-estrategia/>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. (5 ed.). México: McGraw-Hill.

Herrera, H. F. (s.f). *Factores de emisión del S.I.N. Sistema Interconectado Nacional Colombia 2013*. Recuperado de http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Calculo_FE_SIN_2013_Nov2014.pdf

Jutglar, L., & Miranda, L. Á. (2008). *Técnicas de refrigeración*. Colección: Técnicas de climatización – Tomo 1. Barcelona: Marcombo, S.A.

Mendoza, O. E. (2014). *Propuesta para reducir el consumo energético en un refrigerador doméstico*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3049/Tesis.pdf?sequence=1>

Pita, E. G. (1991). *Principios y sistemas de Refrigeración*. México D.F.: Limusa.

Puebla, J. (2006). *Manual de buenas prácticas de refrigeración*. Venezuela: Fondo de Reconversión de Venezuela.

Rasti, M., Aghamiri, S., & Hatamipour, M. S. (2013). Energy efficiency enhancement of a domestic refrigerator using. *International Journal of Thermal Sciences*, 74, 86-94.

Stamateris, B., & Oliviera-Fuentes, C. (1996). *A procedure for the calculation of alpha function coefficients for the attraction parameter of van der Waals equations of state*. The 5th World Congress of Chemical Engineering, San Diego.

Stoecker, W. F. (1999). *Refrigeración y Acondicionamiento de Aire*. México: McGraw Hill.

Tropical Compressor. (s.f). Recuperado de <http://www.hvacusa.com/media/datasheetfiles/102G3432HS.pdf>

Viseka, M., Joppoloa, C. M., Molinarolia, L., & Olivaniib, A. (2014). Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization. *International Journal of Refrigeration*, 43, 71-79.

Whitman, B., Tomczyk, J., Johnson, B., & Silberstein, E. (2010). *Tecnología de refrigeración y aire acondicionado*. 6ª ed. México D.F.: Cengage Learning Editores.

Wikipedia. (s.f). *Eficiencia energética*. Recuperado de http://www.fundacionrepsol.com/sites/default/files/publicaciones/observatorio_de_energia_2015_fundacion_repsol.pdf

Apéndices

Apéndice A. Fotos correspondientes al prototipo y medidas de temperatura y tiempo tomadas durante las pruebas realizadas con ambos evaporadores.

Figura A15. Medición de temperaturas.



Fuente: elaboración propia.

Figura A16. Prototipo evaporador.



Fuente: elaboración propia.

Figura A17. Ubicación de los sensores de temperatura del refrigerante en ambos evaporadores.



Fuente: elaboración propia.

Figura A18. Temperatura inicial del refrigerante en ambos evaporadores y condensador.



Fuente: elaboración propia.

Figura A19. Temperatura mínima del evaporador convencional.

Fuente: elaboración propia.

Figura A20. Temperatura alcanzada por el condensador y temperatura mínima del evaporador convencional.

Fuente: elaboración propia.

Figura A21. Temperaturas iniciales para tomar temperatura mínima de evaporador modificado.



Fuente: elaboración propia.

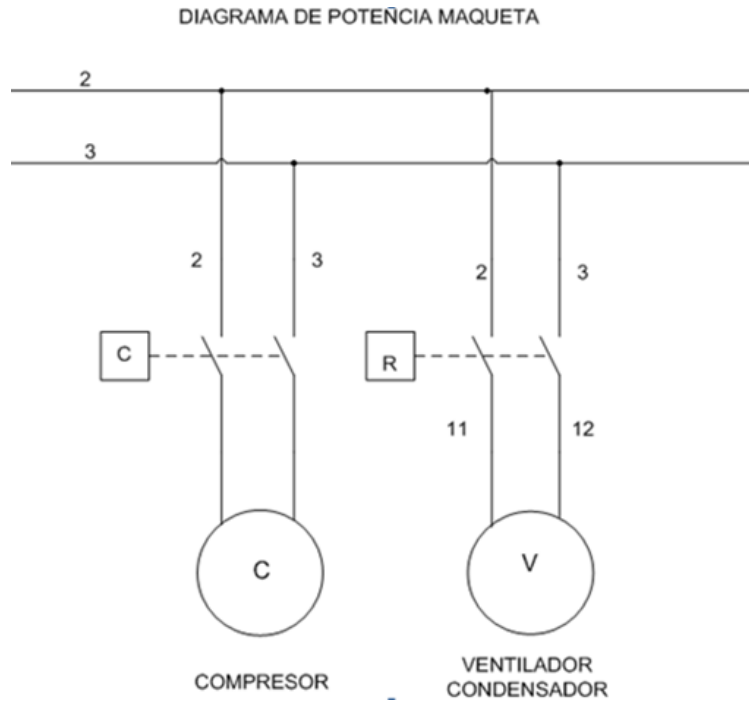
Figura A22. Temperatura alcanzada por el condensador y la temperatura mínima del evaporador modificado.



Fuente: elaboración propia.

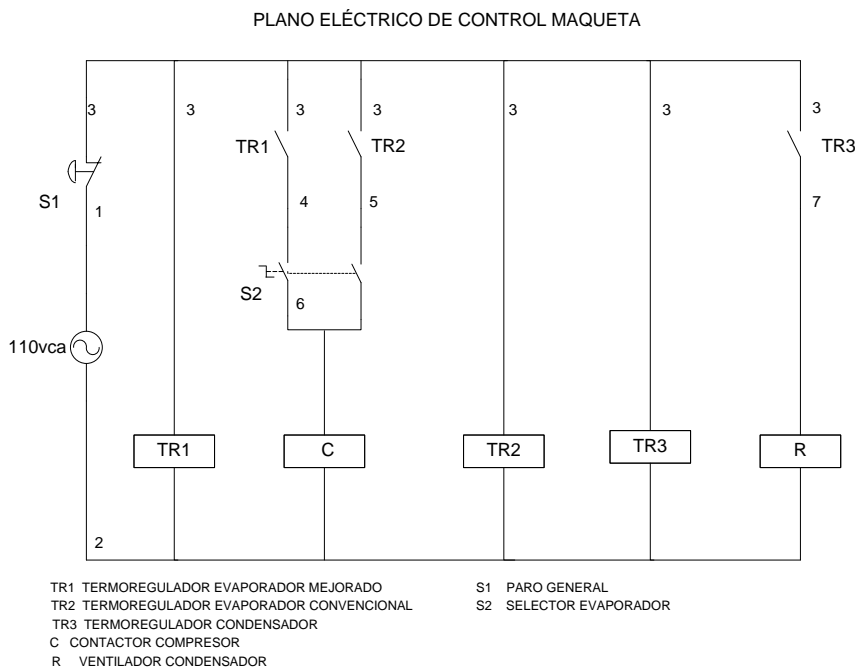
Apéndice B. Planos eléctricos y vistas isométricas con el acotado del condensador, evaporador convencional y Modificado.

Figura B23. Diagrama de potencia del prototipo.



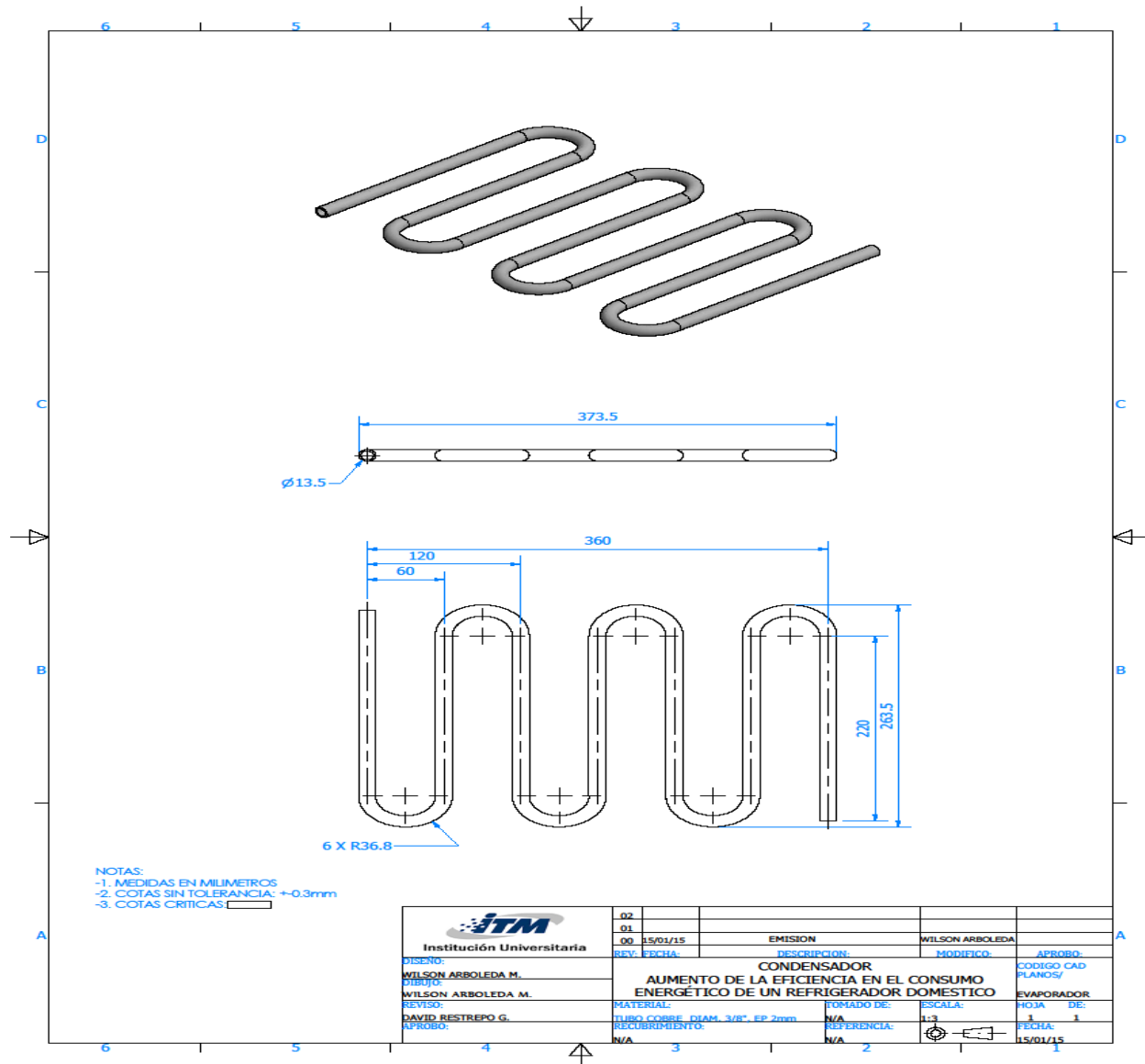
Fuente: elaboración propia.

Figura B24. Diagrama de control del prototipo.



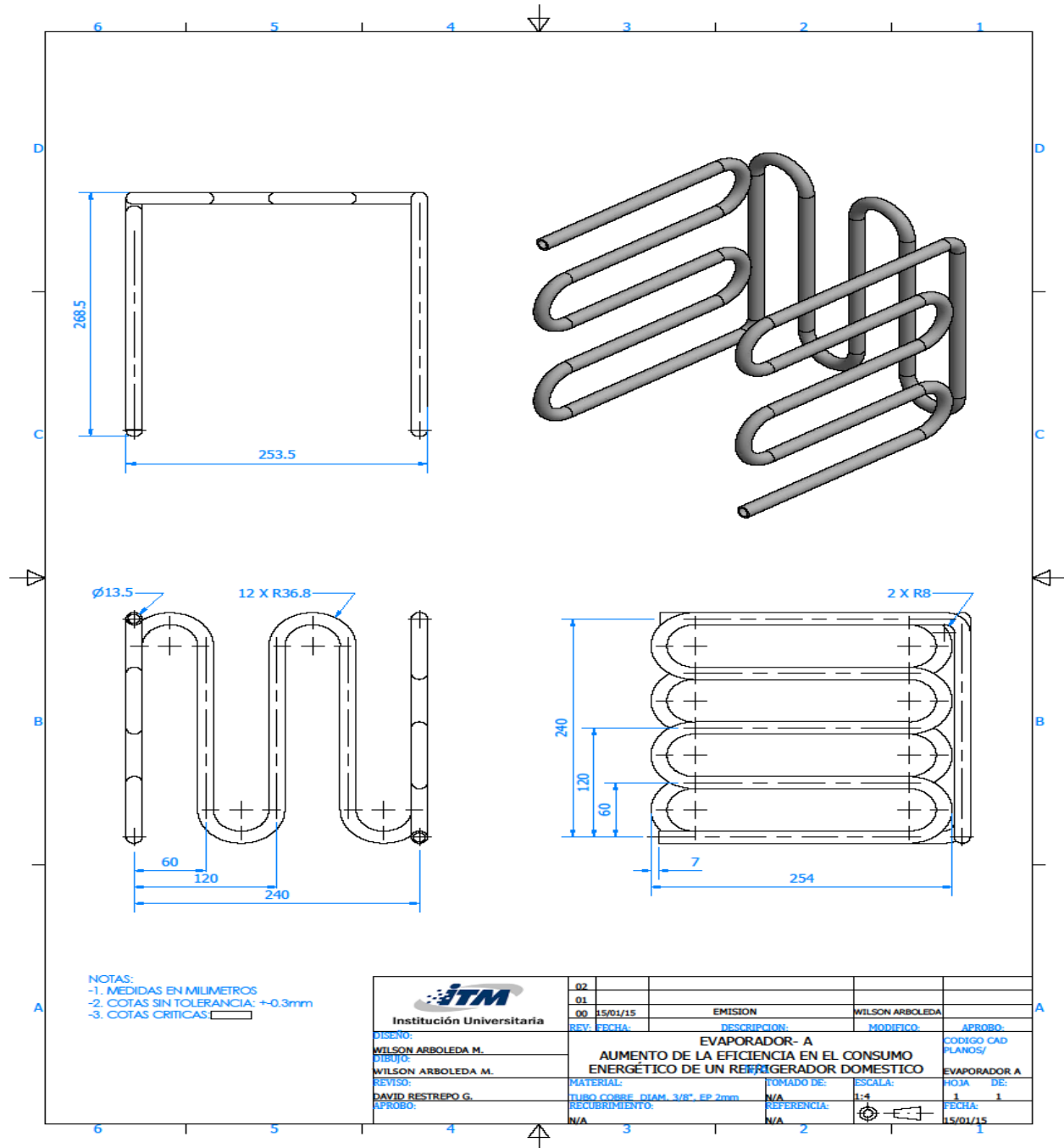
Fuente: elaboración propia.

Figura B25. Plano condensador.



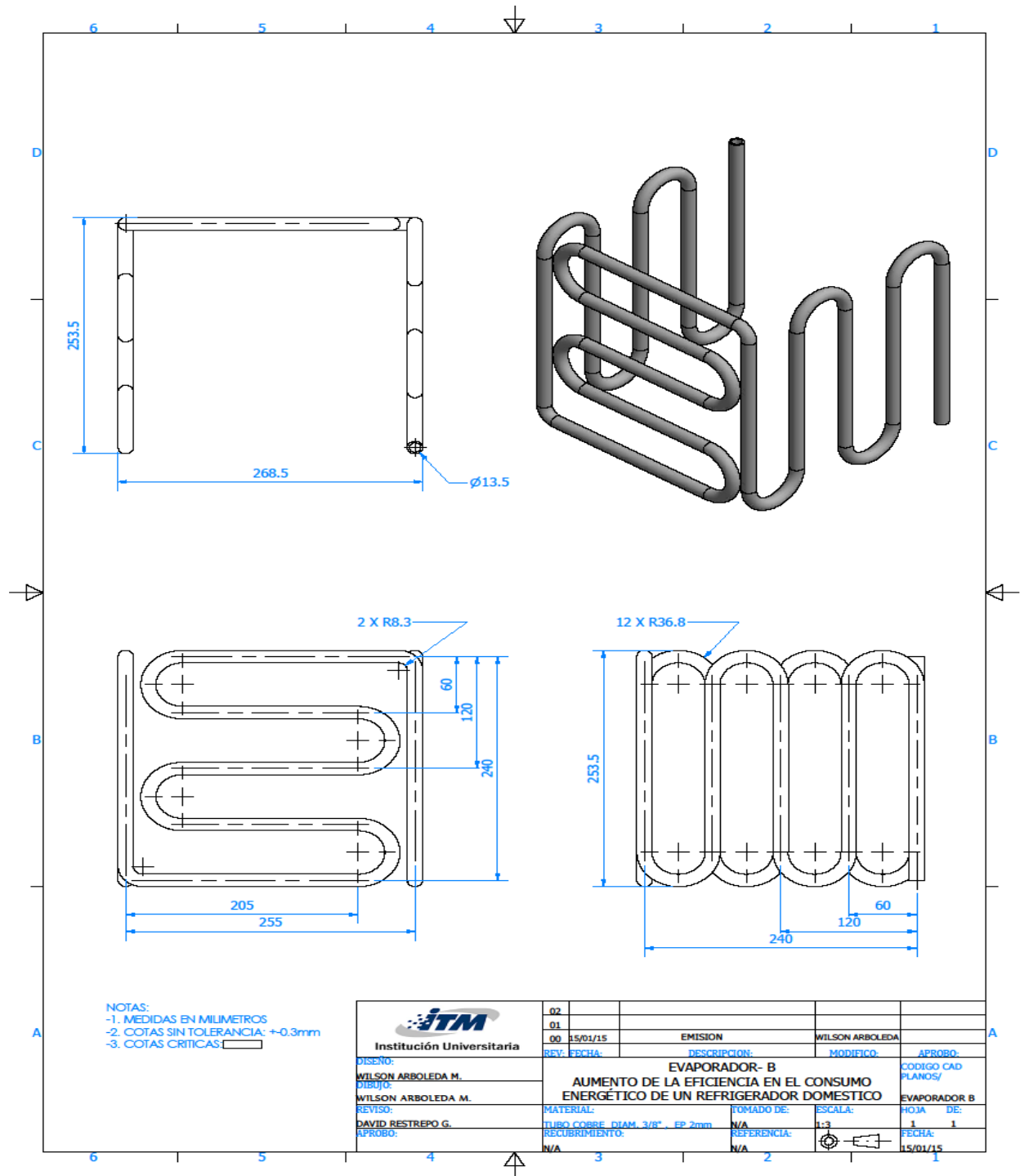
Fuente: elaboración propia.

Figura B26. Plano evaporador convencional.



Fuente: elaboración propia.

Figura B27. Plano evaporador modificado.



Fuente: elaboración propia.

Anexos

Anexo A. Equipos: Compresor, controladores de temperatura.

R134a
115-127V 60Hz

Data Sheet (Replaces CD.42.R7.22)

General

Compressor		TFS4.5FT
Connector-material	Sealing	Code number
Copper-plated steel	Aluminium caps	102G3452
Copper-plated steel	Rubber plugs	102G3432
Copper	Rubber plugs	102G3438

Application

Application		LBP/MBP
Evaporating temperature range	*F (*C)	-31 to 45 (-35 to 7.2)
Voltage range	V/Hz	95 - 135 /60
Motor type		RSIR/CSIR*
Max. ambient temperature	*F (*C)	110 (43)
Comp. cooling at max. ambient temperature	110°F (43°C)	F ₁

*In capillary tube systems where non-equalized pressures may occur at compressor start, or in areas with short power supply drop-outs, a starting capacitor can be used for ensuring a successful start (CSIR).

Design

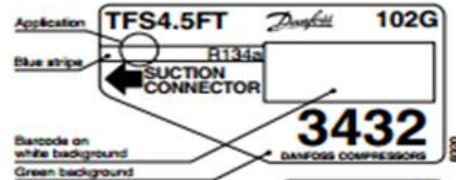
Displacement	cu.in. (cm ³)	0.29 (4.63)
Oil quantity	fl.oz. (cm ³)	9.5 (280)
Maximum refrigerant charge	oz. (g)	14.0 (400)
Free gas vol. in compressor housing	fl.oz. (cm ³)	57.3 (1690)
Weight without electrical equipment	lbs. (kg)	14.9 (6.8)

Motor

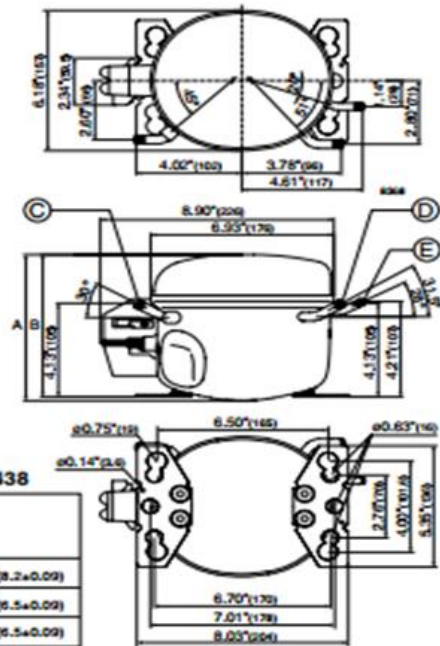
Motor size	watt	160
LRA (rated after 4 sec.UL984) LST	A	20.1
Cut-in current LST	A	20.1
Resistance, main and start winding (77°F)	Ω	3.3/8.8
Approvals		UL984/CSA-C22.2

Dimensions

		102G3452/32	102G3438
Height	in. (mm)	A 6.81 (173)	
		B 6.65 (169)	
Suction connector location/V.D.	in. (mm)	C 0.252-0.259 (6.5±0.09)	0.320-0.327 (8.2±0.09)
Process connector location/V.D.	in. (mm)	D 0.252-0.259 (6.5±0.09)	0.252-0.259 (6.5±0.09)
Discharge connector location/V.D.	in. (mm)	E 0.202-0.205 (5.0-5.126±0.20)	0.252-0.259 (6.5±0.09)
Compressors on a pallet	pcs.	125	



- S = Static cooling normally sufficient
- O = Oil cooling
- F₁ = Fan cooling 1.5 m/s (compressor compartment temp. equal to ambient temperature)
- F₂ = Fan cooling 3.0 m/s necessary



Fuente: Tropical Compresor. (s.f). Recuperado de <http://www.hvacusa.com/media/datasheetfiles/102G3432HS.pdf>

Capacity (ASHRAE) Btu/h

Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
TFS4.5FI	245	340	431	477	654	875	974	1135	1445	1793	1987

Capacity (EN 12900/CECOMAF) watt

Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
TFS4.5FT	58	80	102	113	155	208	231	269	343	425	471

Power consumption watt

Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
TFS4.5FT	90	108	121	127	148	172	182	197	225	254	270

Current consumption A

Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
TFS4.5FT	1.88	1.94	1.99	2.02	2.12	2.25	2.31	2.41	2.60	2.83	2.96

EER (ASHRAE) Btu/Wh

Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
TFS4.5FT	2.72	3.16	3.56	3.75	4.40	5.09	5.36	5.76	6.43	7.06	7.37

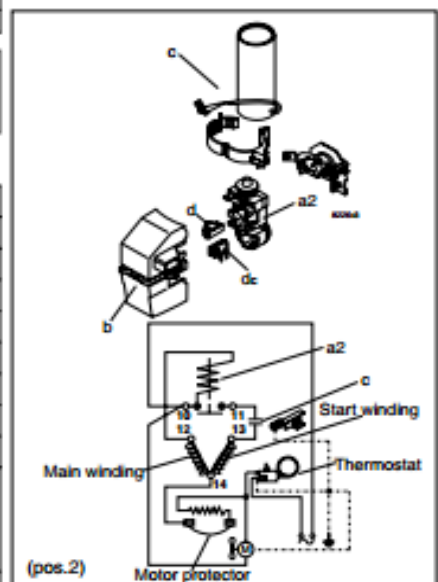
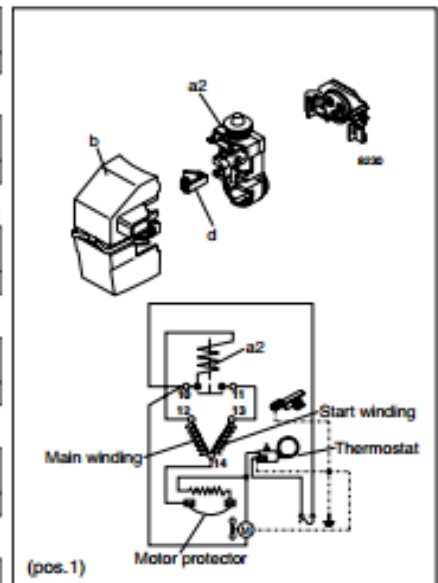
COP (EN 12900/CECOMAF) W/W

Comp.°C	-34.4	-28.9	-25	-23.3	-17.8	-12.2	-10	-6.7	-1.1	4.4	7.2
Comp.°F	-30	-20	-13	-10	0	10	14	20	30	40	45
TFS4.5FT	0.64	0.75	0.84	0.89	1.04	1.21	1.27	1.37	1.52	1.67	1.74

Test conditions	ASHRAE	EN 12900/CECOMAF	NOTE: Starting capacitor can not be mounted on compressor 102G3452 (different fence).
Condensing temperature	130°F (54.4°C)	55°C (131°F)	
Ambient and suction gas temp.	90°F (32°C)	32°C (90°F)	
Liquid temperature	90°F (32°C)	55°C (131°F)	
Static cooling, 115V 60Hz			

Accessories

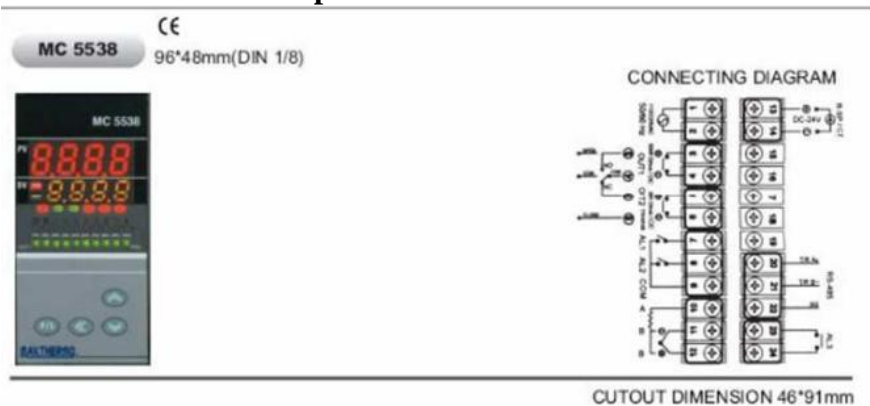
Devices	Fig.	TFS4.5FT
Starting relay (protector incl.)	a2	117U4113
Protector 3/4" Texas Instruments	(pos.1)	MRP39AIL-6
Starting relay (protector incl.)	a2	117U4126*
Starting capacitor 320 µF	c	117U5022*
Protector 3/4" Texas Instruments	(pos.2)	MRP39AIL-6
Cover	b	117U1021
Cord relief	d	117U0349
Cord relief capacitor	dc	117U0349
Mounting accessories (102G3432/38)	Ø in. (mm)	
Bolt joint in for one compressor	5/8 (16)	118-1946
Bolt joint in for one compressor	3/4 (19)	118-1949
Snap-on in for one compressor	5/8 (16)	118-1947
Mounting accessories (102G3452)	Ø in. (mm)	
Bolt joint in for one compressor	5/8 (16)	118-1917
Bolt joint in quantities	5/8 (16)	118-1918
Snap-on in quantities	5/8 (16)	118-1919



*In capillary tube systems where non-equalized pressures may occur at compressor start, or in areas with short power supply drop-outs, a starting capacitor can be used for ensuring a successful start (CSIR).

Danfoss can accept no responsibility for possible errors in catalogues, brochures and other printed material. Danfoss reserves the right to alter its products without notice. This also applies to products already on order provided that such alterations can be made without subsequent changes being necessary in specifications already agreed. All trademarks in this material are property of the respective companies. Danfoss and the Danfoss logotype are trademarks of Danfoss A/S. All rights reserved.

Controladores De Temperatura



Control de temperatura PID 96x48mm MC5538-201 MAXTHERMO Catálogo Inglés www.visindustrial.com



Display:

Digital display: 7 segments / Measured value (PV) Red LED 4 digits, Set value (SV) Yellow LED 4 digits
 Display accuracy: ± (0.3% FS+1 digit) at 23±5 °C Refer to Table of Measuring Range Codes.
 Display resolution: Depends on measuring range (0.001,0.01,0.1,1)
 Sampling cycle: 0.3 sec
 Action display / colors: LED lamp indication:
 Control output (OUT) / Green, alarm / Red, Auto tuning (AT) / Red, Manual control (MAN) / Green, Output percentage / Green, Program (PRG) / Red.

Setting

Setting: By 4 fort key switches
 Setting range: Same as measuring range
 Setting limit: Higher / lower limits individual setting as desired within measuring range (lower limit value < higher limit value)

Input

External resistance: K,J,T,R,E,S,B,N,RTD,Linear (Multi-input, multi-range: Refer to Table of Measuring Range Codes.)
 Input impedance: 100 Ω max.
 Burnout: 600k Ω min.
 Cold junction temperature Compensation accuracy: Standard feature (upscale) ±1 °C (-5 ~70 °C)
 Cold junction temperature Compensation accuracy: ±1 °C (-5 ~70 °C)

Amperage: Approx. 0.25mA
 Lead wire tolerable resistance: 5 Ω max.
 Voltage: -10~10, 0~10, 0~20, 0~50, 0~100mV DC or 0~1, 0~2, 0~5, 1~5, 0~10V DC (Multi input, programmable range: Refer to Table of Measuring Range Codes.)
 Input impedance: 500k Ω min.
 Current: 4~20, 0~20mA DC (Multi input, programmable range: Refer to Table of Measuring Range Codes.)
 Receiving impedance: 250 Ω
 Sampling cycle: 0.3 sec
 PV bias: -2000~2000 unit
 PV filter: 0.001~1.000
 Isolation: Insulated between input and output (not insulated between input and system, SV bias and CT input)

Control

Control mode: Auto-tuning PID
 Proportional band (P): 0-3000 unit (0=On-Off action)
 Integral time (I): 0-3600 sec (0=P, PD action)
 Derivative time (D): 0-900 sec (0=P, PI action)
 On-Off hysteresis: 0.0~2000 unit
 Proportional cycle: 0~150 sec
 Higher and lower output limit: 0.0~100.0% (lower limit < higher limit)

Control output type / rating

Contact output: 240V AC 6A / resistive load
 Current output: 4-20mA DC / load resistance: 600 Ω max.
 SSR drive voltage output: 24 ±2V DC / load current: 20mA max.
 Voltage output: 0~10V DC / load current: 2mA max.
 Isolation: Insulated between control output and system and input (not insulated between control output, PV and analog output)



Manual control

Output setting range: 0.0-100.0% (setting resolution: 0.1%)
 Within range of higher / lower output limits
 Output resolution: 0.1%

Additional Functions (Optional)

Alarm output

Alarm method: Individual setting and **individual** output, higher and lower limit alarms
 Alarm type: Deviation value alarm or absolute value alarm is selectable.
 Alarm setting range: Deviation value: ± 2000 unit
 Absolute value: 0-2000 unit
 Alarm action: On-Off action
 Action hysteresis: 1-999 unit (both higher and lower limits)
 Inhibit mode: Selectable (both higher and lower limits)
 Alarm output / rating: Contact 1a (common) / 240V AC 6A (resistive load)

Heater break alarm (optional)

Alarm action: Heater amperage detected by externally attached CT (CT provided)
 Alarm output On upon detection of heater break while output is On.
 Alarm output On upon detection of heater loop alarm while output is Off.
 Current setting range: 0.1-100.0A (Alarm action stops when Hba is disabled)
 Setting resolution: 0.1A
 Amperage display: 0.0-100.0A
 Display accuracy: 1%FS
Minimum time for action confirmation: On time: 250 msec. Minimum
 Alarm output / rating: Contact 1a / 240V AC 6A (resistive load)
 Sampling cycle: 0.3 sec
 Isolation: Insulated between CT input and output (not insulated between CT input and system and other inputs)

Analog output

Number of analog outputs: 1 point
 Analog output type: Selectable between process value (PV), set value (SV), Manipulated output value (MV), and absolute value of $- PV-SV -$
 Analog output: 0-10mV DC, Output resistance: 10 Ω
 0-10V DC, Load current: 2mA max.
 4-20 mA DC, Load resistance: 300 Ω max.
 Output accuracy: $\pm 0.3\%$ (of displayed value)
 Output resolution: Approx. 0.1%
 Output updating cycle: 0.2 sec
 Output scaling: Within measuring range
 Isolation: Insulated between analog output and system and input (not insulated between analog output and control output I)

Set value bias

Setting range: -2000-2000 unit
 Setting resolution: Same as display resolution
 Isolation: Insulated between set value bias input and output (not insulated between set value bias input and system and other inputs)

Fuente: Control de temperatura. (s.f). Recuperado de http://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/Controles_de_temperatura_96x48_mm_MC-5538-201_MAXTHERMO_Catalogo_Ingles.pdf

Anexo B. Cantidad de energía consumida por electrodomésticos.

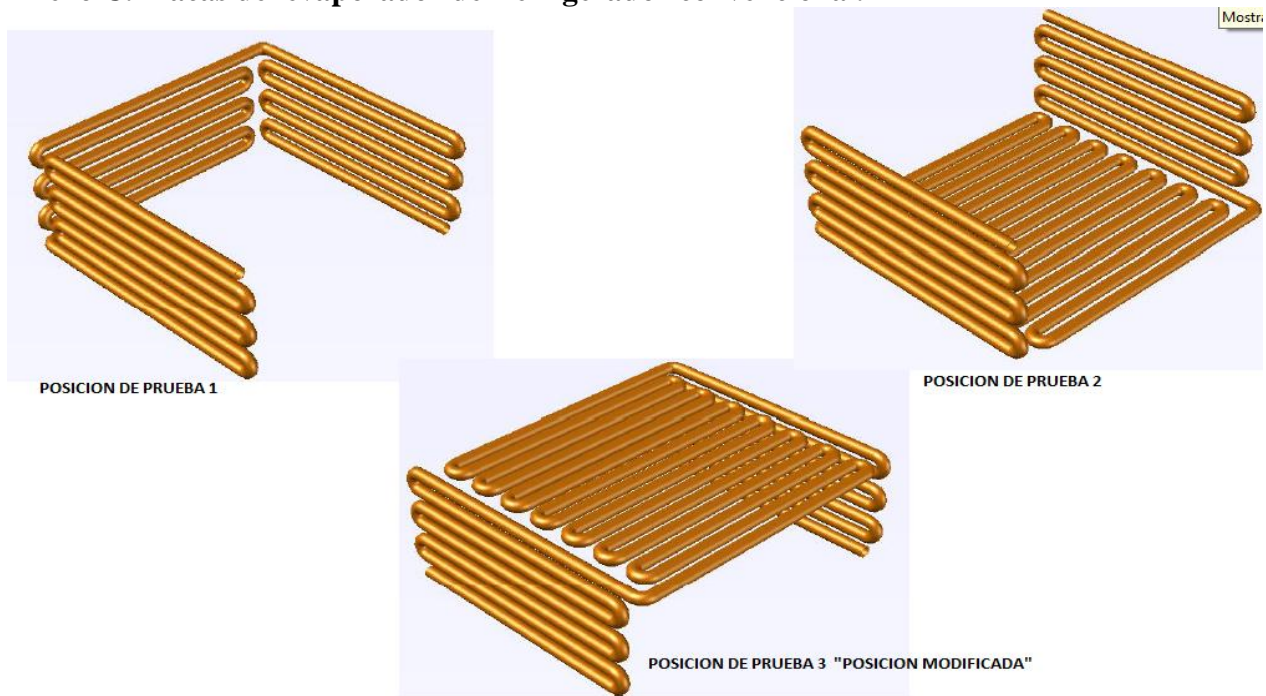
ELECTRODOMÉSTICO	NÚMERO DE UNIDADES	POTENCIA ELÉCTRICA [Watts]	TIEMPO DE USO AL DÍA [Periodos típicos]	CONSUMO O DIARIO [kWh/día]	CONSUMO MENSUAL [kWh]
Lámpara de iluminación	10	23	5 horas/día	1.15	34.5
Televisor LCD 32"	2	130	5 horas/día	1.3	39
Computadora portátil	1	70	3 horas/día	0.21	6.3
Computadora de escritorio	1	120	4 horas/día	0.48	14.4
Horno de microondas	1	800	0.5 horas/día	0.4	12
Horno eléctrico	1	1000	0.5 horas/día	0.5	15
Equipo de sonido	1	60	2 horas/día	0.12	3.6
Refrigerador	1	290	8 horas/día	2.32	69.6
Bomba de agua	1	350	0.3 horas/día	0.105	3.15
Plancha	1	1000	0.3 horas/día	0.3	9
Lavadora	1	400	4 horas/semana	0.22	6.6
Reproductor de video	1	25	5 horas/semana	0.018	0.54
Consola de videojuegos	1	90	2 horas/día	0.18	5.4
Secadora de pelo	1	1600	0.15 horas/día	0.24	7.2
Licuada	1	350	0.15 horas/día	0.0525	1.575
Aspiradora	1	750	0.3 horas/día	0.225	6.75

Total = 243.615 [kWh/mes]

Fuente: Mendoza, O. E. (2014). *Propuesta para reducir el consumo energético en un refrigerador doméstico*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3049/Tesis.pdf?sequence=1>

En esta tabla se confirma lo que se ha dicho en párrafos anteriores de este trabajo, que el mayor consumo de energía eléctrica en un hogar convencional lo genera el refrigerador. Estos datos son tomados en un periodo de 30 días y damos por sentado que el clima o la temperatura ambiente promedio en la ciudad, no exige que los hogares utilicen aire acondicionado, quedando solamente como mayor consumo en un 29.6 % del 100%.

Anexo C. Placas del evaporador del refrigerador convencional.



Fuente: Mendoza, O. E. (2014). *Propuesta para reducir el consumo energético en un refrigerador doméstico*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3049/Tesis.pdf?sequence=1>

Las placas que conforman el evaporador en el área del congelador, normalmente se encuentran colocados en una disposición característica (cara inferior, cara lateral y cara superior). Estas placas generan la temperatura del área de congelación y a veces se encuentran compartiendo con el área de refrigeración (sin aislante térmico entre el área de congelación y la de conservación).

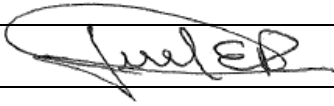
Anexo D. Carga Térmica de los alimentos.

Producto	Masa [lb]	Calor específico [Btu/lb °F]	ΔT [°F]	Q [Btu]
Agua	2.2	1	57.6	126.98
Papas	2.2	0.86	57.6	109.2
carne de res	2.2	0.5	57.6	95.24
Pescado	2.2	0.76	57.6	96.5
Cerdo	2.2	0.68	57.6	86.35
Pollo	2.2	0.79	57.6	100.32
Cerveza	2.2	1	57.6	126.98
Helado	2.2	0.77	57.6	97.78
TOTAL				839.35

Fuente: Mendoza, O. E. (2014). *Propuesta para reducir el consumo energético en un refrigerador doméstico*. (Tesis inédita de Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3049/Tesis.pdf?sequence=1>

Para que el sistema sea eficiente y el sensor de temperatura logre captar una disminución de esta en un corto lapso de tiempo y así apagar por medio del controlador el compresor, se debe aislar el área del congelador a la del área de refrigeración.

Por medio de un sensor de temperatura ubicado estratégicamente dentro de la cámara de congelación, se permite que el controlador el cual está configurado a un set point, apague y encienda el compresor para mantener una temperatura de congelación deseada y poder así medir los tiempos que requiere cada uno de los compartimientos (Evaporador modificado y evaporador convencional), para llegar al set point y poder detectar cual es la eficiencia conseguida en la refrigeración con el cambio de la disposición de las placas del evaporador.

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Wilson Arboleda Muñoz</u>
	<u></u>
FIRMA ASESOR	<u>Adrián F. Martínez</u>
	FECHA ENTREGA: <u>15-6-16</u>

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD	_____	
RECHAZADO__	ACEPTADO____	ACEPTADO CON MODIFICACIONES_____
		ACTA NO. _____
		FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD	_____
	ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: 16-06-16