UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

"ESTUDIO TERMODINÁMICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN NO FROST CON R600a"

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AUTORES:

Castillo Cabrera Byron Fernando

Puente Rodríguez Franklin Germán

DIRECTOR:

Ing. Nelson Gustavo Jara Cobos

Cuenca, febrero 2014

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

"ESTUDIO TERMODINÁMICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN NO FROST CON R600a"

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AUTORES:

Castillo Cabrera Byron Fernando

bcastilloc@est.ups.edu.ec

Puente Rodríguez Franklin Germán

fpuente@est.ups.edu.ec

DIRECTOR:

Ing. Nelson Gustavo Jara Cobos

njara@ups.edu.ec

Cuenca, febrero 2014

A nuestra progenie y amigos, recuerden que... "*con esfuerzo y dedicación los sueños se cumplen"*.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Laura por su apoyo incondicional, por sus consejos, por guiarme a cumplir mis sueños, por su amor y confianza.

A mis hermanas Mayra y Johana y mi sobrina Romina por ser las personas que complementa la alegría en nuestro hogar.

A mis tías Nancy y Teresa por brindarme todo su cariño y respaldo para concluir mi carrera.

A mi compañero y amigo Franklin por sus consejos y compañía a lo largo de nuestra vida universitaria.

A mis primos Zulay y Rubén por estar siempre presentes para ayudarme y consolarme en los momentos difíciles.

Al Ing Nelson Jara, por sus tutorías y consejos para concluir con nuestra tesis.

Al Ing Juan Molina por abrirnos las puertas de Ecasa, gestionar la donación de los refrigeradores y hacer viable este proyecto.

Al Ing César Terán por su ayuda incondicional, tiempo y conocimiento para desarrollar la parte práctica de la tesis.

A toda mi familia por sus palabras de aliento.

A mis compañeros y amigos que durante este periodo me dieron la oportunidad de conocerlos y compartir ideas.

Byron.

AGRADECIMIENTOS

El más grande y profundo agradecimiento a mi madre, gracias Silvia por tu ternura, ejemplo, apoyo y paciencia.

A mis hermanas, Gabriela, Andrea y Sarita, por su voz de ánimo y ayuda en los momentos críticos.

Al Ing. Nelson Jara por su guía, comentarios y sugerencias a lo largo de todo el desarrollo de la carrera y el proyecto.

Al Ing. César Terán, por su asesoramiento, disponibilidad y servicio, pero sobre todo por su desinterés a la hora de compartir su experiencia profesional.

Al Ing. Juan Molina, por su gestión con Ecasa para que nos otorguen la donación de los equipos de refrigeración doméstica analizados.

A mi compañero de tesis Byron, por su esfuerzo y compromiso para culminar este proyecto.

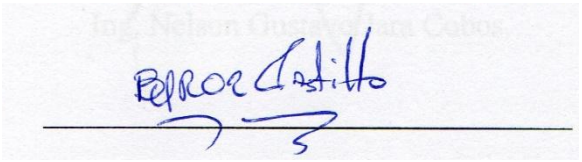
A mis amigos y compañeros de aula, por los momentos de alegría y arduo trabajo.

Franklin.

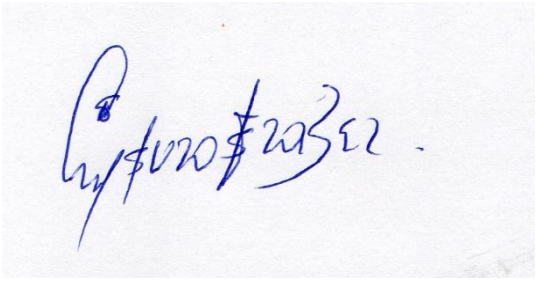
DECLARATORIA

El presente trabajo previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, es original y realizado bajo un profundo proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. Por lo tanto los criterios y fundamentos técnicos-científicos y los resultados obtenidos son exclusivamente de los autores.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de la propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.



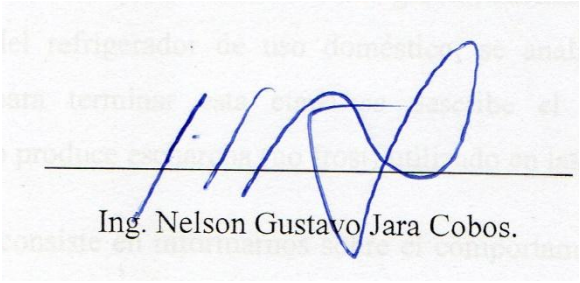
Castillo Cabrera Byron Fernando



Puente Rodríguez Franklin Germán

CERTIFICADO

El presente proyecto de tesis "*Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no frost con R600a"*, realizado por los estudiantes: Castillo Cabrera Byron Fernando y Puente Rodríguez Franklin Germán, fue dirigido por mi persona.



Prólogo

El presente documento recopila el procedimiento para realizar el estudio termodinámico de un sistema de refrigeración "no frost" que funciona con refrigerante R600a. Con este propósito iniciamos la investigación sobre los sistemas de refrigeración de uso doméstico, haciendo énfasis en los ciclos de refrigeración (ciclo de compresión de vapor) con los que operan estos equipos y el coeficiente de operación (COP) que es un parámetro para clasificar a los electrodomésticos.

Los equipos de refrigeración de uso doméstico de acuerdo a su eficiencia se clasifican desde A para los de mayor eficiencia hasta los de categoría G para los equipos que consumen excesiva energía en la realización de su trabajo.

Posteriormente se hace una descripción de las características de los refrigerantes, su clasificación y tratados internacionales para reducir o eliminar aquellos que afectan la capa de ozono y contribuyen al calentamiento global; además se realiza un estudio de la estructura del refrigerador de uso doméstico, se analiza cada uno de sus componentes y para terminar esta etapa se describe el equipo Boreal 212, refrigerador que no produce escharcha (no frost) utilizado en las pruebas.

La segunda etapa consiste en informarnos sobre el comportamiento del refrigerante R134a en un refrigerador de uso doméstico, con esta finalidad se hace una breve presentación de las propiedades y características de este gas y luego se procede a realizar el análisis del funcionamiento del equipo para compararlo posteriormente con un refrigerador cargado con R600a.

Una vez que tenemos un equipo de uso tradicional la siguiente fase se considera la más importante y relevante del proyecto, se carga R600a a un equipo de refrigeración doméstica que normalmente funciona con R134a. Conoceremos las características y propiedades de este fluido refrigerante y describimos el proceso para cargar este gas; para esta acción se toman en consideración las recomendaciones y normas de seguridad en el uso de hidrocarburos. En el mercado nacional aún no se comercializan compresores para R600a, por lo que se adaptará un compresor de R12 que contiene aceite mineral el cual es compatible con R600a.

A continuación se realiza el estudio del funcionamiento del equipo y se monitorean las variaciones de temperatura que ocurren en cada componente. Este registro se lo realizó conectando termocuplas al evaporador, gabinete del congelador, gabinete del refrigerador, condensador y compresor; los valores de las temperaturas fueron almacenadas en una base de datos mediante el uso del equipo Compac Rio.

El estudio del ciclo ideal de refrigeración se realizó con la ayuda del software especializado para termodinámica (EES), este proporciona los resultados mediante una programación de las condiciones del ciclo. Adicionalmente grafica el ciclo ideal de compresión de vapor.

Para concluir este tema, propondremos algunos cambios en los componentes del equipo Boreal 212 que mejoren su funcionamiento, dichos cambios implican la variación del diámetro y longitud del tubo capilar y el alargamiento de la tubería que conecta al condensador con el compresor. Con el fin de reducir el consumo energético se acoplará al equipo un compresor de menor potencia, y de la misma manera que con los equipos antes mencionados se hace el seguimiento a su funcionamiento.

Finalmente se realiza una comparación entre los datos obtenidos, se mencionan las ventajas, desventajas del refrigerante R600a frente al R134a y un análisis del consumo energético de cada refrigerador.

Índice

Lista de figuras ..... *xii*

Lista de tablas ..... *xvi*

1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO *1*

1.1 Introducción **1**

1.2 Termodinámica de los sistemas de refrigeración **2**

1.2.1 Ciclos termodinámicos de refrigeración 2

1.2.1.1 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor en el refrigerador doméstico 4

1.2.2 Principios termodinámicos de la refrigeración 7

1.2.2.1 Elevación de temperatura de la sustancia refrigerante (Efecto sensible) 7

1.2.2.2 Cambio de fase de la sustancia refrigerante (efecto latente) 8

1.2.3 Coeficiente de rendimiento para refrigeradores domésticos 8

1.3 Refrigerantes de uso doméstico **11**

1.3.1 Reseña histórica 11

1.3.2 Propiedades de los refrigerantes 12

1.3.2.1 Propiedades físicas 12

1.3.2.2 Propiedades químicas 12

1.3.2.3 Propiedades termodinámicas 13

1.3.2.4 Propiedades Medioambientales 14

1.3.2.4.1 Protocolo de Montreal 14

1.3.2.4.2 Protocolo de Kioto 15

1.3.3 Clasificación de los refrigerantes 15

1.3.3.1 Refrigerantes halogenados 15

1.3.3.2 Mezclas 16

1.3.3.3 Hidrocarburos (HCs) 16

1.3.3.4 Compuestos inorgánicos 16

1.4 Estructura de los refrigeradores de uso doméstico **17**

1.4.1 Introducción 17

1.4.2 Generalidades 17

1.4.3 Partes principales de un sistema de refrigeración 18

1.4.3.1 Evaporador 18

1.4.3.1.1 Tipos de evaporadores 20

1.4.3.1.2 Descongelación de la humedad acumulada 23

1.4.3.2 Compresor 24

1.4.3.2.1 Tipos de compresores 25

1.4.3.3 Relés 28
1.4.3.4 Capacitor de arranque 28
1.4.3.5 Termostato. 28
1.4.3.6 Condensador 29
1.4.3.6.1 Tipos de condensador 30
1.4.3.7 Dispositivos de expansión 31
1.4.3.7.1 Válvula de expansión termostática TXV 32
1.4.3.7.2 Válvula de expansión automática 32
1.4.3.7.3 Dosificador de tubo capilar 32
1.4.3.7.4 Filtro secador 33
1.4.3.8 Temporizador y circuito de descongelamiento "no frost" 34

1.5 Descripción del equipo de uso doméstico Boreal 212 35

1.5.1 Evaporador 36
1.5.2 Compresor para refrigerante R134a 37
1.5.3 Filtro secador 37
1.5.4 Temporizador 38
1.5.5 Condensador 38
1.5.6 Tubo capilar 39

1.6 Conclusiones 40

2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO "NO FROST" QUE UTILIZA REFRIGERANTE R134a 41

2.1 Introducción 41

2.2 Descripción del refrigerante R134a 41

2.2.1 Propiedades del refrigerante R134a 42
2.2.2 Diagrama Presión vs Entalpía del refrigerante R134a 44

2.3 Manejo y almacenamiento del refrigerante R134a 45

2.4 Carga de refrigerante en un sistema 46

2.4.1 Limpieza de un sistema de refrigeración 46
2.4.2 Montaje de compresor 49
2.4.3 Generación de vacío en el sistema y carga de refrigerante R134a 52

2.5 Almacenamiento de datos para realizar análisis 55

2.6 Obtención y análisis del ciclo de refrigeración 58

2.6.1 Cálculo del COP y obtención del ciclo de refrigeración con R134a 62

2.7 Conclusiones 67

3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO "NO FROST" QUE UTILIZA REFRIGERANTE R600a 68

3.1 Introducción 68

3.2 Descripción del refrigerante R600a 68

3.2.1 Presión y temperatura 70

3.2.2 Capacidad volumétrica 71

3.2.3 Diagrama presión entalpia 72

3.2.4 Normas de seguridad 72

3.2.5 Inflamabilidad y seguridad 73

3.2.6 Carga del refrigerante R600a 74

3.2.7 Pureza del isobutano 75

3.3 Consideraciones en el diseño de sistemas de refrigeración para refrigerante R600a 76

3.3.1 Intercambiadores de calor 76

3.3.2 Filtros deshidratadores y tubo capilar 76

3.3.3 Compresor 77

3.3.3.1 Aceite lubricante 77

3.3.4 Realización del vacío y limpieza de componentes 78

3.3.4.1 Mantenimiento 78

3.4 Prueba de funcionamiento con el refrigerante R600a 78

3.4.1 Limpieza, montaje del compresor y carga del isobutano 79

3.4.1.1 Limpieza del sistema 79

3.4.1.2 Montaje del compresor y unión de componentes 80

3.4.1.3 Vacío del sistema de refrigeración 81

3.4.1.4 Carga del refrigerante 82

3.4.2 Funcionamiento del refrigerador Boreal 212 con un compresor 1/4 hp 83

3.4.2.1 Temperaturas con diferentes cargas 84

3.4.2.1.1 Evaporador 84

3.4.2.1.2 Condensador 85

3.4.2.1.3 Compresor 87

3.4.2.2 Recolección de datos de funcionamiento 88

3.4.2.3 Análisis del ciclo termodinámico 93

3.4.3 Funcionamiento del refrigerador Boreal 212 con un compresor 1/6 hp 96

3.4.3.1 Modificaciones al sistema de refrigeración Boreal 212 97

3.4.3.2 Recolección de datos de funcionamiento 98

3.4.3.3 Análisis del ciclo termodinámico 102

3.5 Conclusiones 105

4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL REFRIGERANTE R600a FRENTE AL REFRIGERANTE R134a 107

4.1 Introducción 107

4.2 Análisis comparativo del consumo de energía de los equipos cargados con R600a y R134a 107

4.2.1 Introducción 107

4.2.2 Refrigerador doméstico cargado con R600a 108

4.2.3 Refrigerador doméstico cargado con R134a 113

4.2.4 Análisis comparativo 116

4.2.4.1 Ventajas al usar refrigerante R600a frente al R134a 116

4.2.4.2 Desventajas al usar refrigerante R600a frente al R134a 119

4.3 Conclusiones 121

5 Recomendaciones 122

6 Bibliografía 123

7 Anexos 126

7.1 Anexo A 126

7.2 Anexo B-1 133

7.3 Anexo B-2 140

7.4 Anexo C 147

7.5 Anexo D 150

7.6 Anexo E 153

Lista de figuras

Figura: 1.1 Ciclo invertido de Carnot 3
Figura: 1.2 Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de compresión de vapor. 3
Figura: 1.3 Ciclo simple de refrigeración de gas 4
Figura: 1.4 Esquema del ciclo de refrigeración por absorción 4
Figura: 1.5 Estructura y partes de un refrigerador 5
Figura: 1.6 Esquema y diagrama T-s para el ciclo real de compresión de vapor 6
Figura: 1.7 Categorías de los equipos de refrigeración según el consumo energético. 9
Figura: 1.8 Etiqueta de refrigerador según normas INEN. 10
Figura: 1.9 Refrigerador de uso doméstico de dos compartimientos 17
Figura: 1.10 Comportamiento de refrigerante en el Evaporador. 19
Figura: 1.11 Intercambio de calor entre el aire y el refrigerante 19
Figura: 1.12 Evaporador de Tiro Natural 21
Figura: 1.13 Descongelación eléctrica y por gas caliente 21
Figura: 1.14 Evaporador de tiro forzado. 22
Figura: 1.15 Evaporador Estampado 22
Figura: 1.16 Evaporador Aletado 23
Figura: 1.17 Utilización de Gas caliente para descongelar un evaporador 23
Figura: 1.18 Calentador para descongelación eléctrica de evaporadores 23
Figura: 1.19 Conductos principales de un compresor 24
Figura: 1.20 Acción Rotatoria y alternativa de un compresor 24
Figura: 1.21 Compresor accionado por bandas 25
Figura: 1.22 Accionamiento directo en un compresor 25
Figura: 1.23 Partes internas de un compresor hermético soldado. 26
Figura: 1.24 Partes móviles de un compresor hermético reparable 26
Figura: 1.25 Ensamble cigüeñal, biela y pistón 27
Figura: 1.26 Movimiento de las bolsas de gas en el espiral 27
Figura: 1.27 Eje del rotor, impulsores centrífugos y cojinetes magnéticos 27
Figura: 1.28 Relé Amperométrico. 28
Figura: 1.29 Capacitor de arranque 28
Figura: 1.30 Termostato con tubo capilar. Temperatura ambiente de -40 a 65^{o}C 29
Figura: 1.31 Líquido Subenfriado en la salida del condensador 29
Figura: 1.32 Condensador (A) de tiro natural, (B) de tiro forzado 30
Figura: 1.33 Condensador enfriado por agua 30
Figura: 1.34 Condensadores de tubo concéntrico 31
Figura: 1.35 Condensador enfriado por aire 31
Figura: 1.36 Válvula de expansión termostática 32

Figura: 1.37 Válvula de solenoide 32
Figura: 1.38 Tubo Capilar 33
Figura: 1.39 Filtros secadores. 33
Figura: 1.40 Reloj de descongelamiento. 34
Figura: 1.41 Refrigerador de uso doméstico Ecasa, modelo Boreal 212. 35
Figura: 1.42 Diagrama eléctrico del refrigerador boreal 212. 36
Figura: 1.43 Evaporador del equipo de refrigeración Boreal 212. 36
Figura: 1.44 Compresor hermético para R134a. 37
Figura: 1.45 Filtro secador (pequeños gigantes). 38
Figura: 1.46 Temporizador 20H004 38
Figura: 1.47 Condensador Boreal 212. 39
Figura: 1.48 Tubo capilar unido al filtro secador 39
Figura: 2.1 Diagrama Presión vs. Entalpía R-134a 45
Figura: 2.2 Materiales para limpiar el sistema de refrigeración 46
Figura: 2.3 Cilindro con gas nitrógeno y manómetro 47
Figura: 2.4 Limpieza del Evaporador y Tubo Capilar. 47
Figura: 2.5 Limpieza del Condensador. 48
Figura: 2.6 Residuos del sistema de Condensación. 48
Figura: 2.7 Residuos del sistema de Condensación. 48
Figura: 2.8 Tuberías del compresor Embraco 49
Figura: 2.9 Montaje de las cañerías del compresor. 49
Figura: 2.10 Ensamble de tubería y preparación de juntas. 50
Figura: 2.11 Conexión del filtro secador. 50
Figura: 2.12 Corte del tubo capilar. 50
Figura: 2.13 Enrollado del tubo capilar sobre el filtro secador. 51
Figura: 2.14 Uniones soldadas del sistema de refrigeración. 51
Figura: 2.15 Conexiones eléctricas. 52
Figura: 2.16 Bomba de vacío. 52
Figura: 2.17 Conexión de manómetro a bomba de vacío. 53
Figura: 2.18 Conexión de manómetro al compresor. 53
Figura: 2.19 Manómetro de baja presión. 53
Figura: 2.20 Conexión del vacuómetro a la bomba de vacío. 54
Figura: 2.21 Medida de vacío. 54
Figura: 2.22 Carga de refrigerante. 54
Figura: 2.23 Detección de fugas. 55
Figura: 2.24 Medidor de calidad de energía. 55
Figura: 2.25 Compac Río 56
Figura: 2.26 Conexión del medidor de calidad de energía. 56

Figura: 2.27 Compac Río con módulo de termocuplas. *57*
Figura: 2.28 Lenguaje gráfico para almacenamiento de datos en Lab View. *57*
Figura: 2.29 Conexión de termocuplas al sistema de refrigeración. *57*
Figura: 2.30 Puntos seleccionados para toma de temperatura. *58*
Figura: 2.31 Temperaturas del sistema R134a. *59*
Figura: 2.32 Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R134a. *59*
Figura: 2.33 Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R134a. *60*
Figura: 2.34 Temperatura vs.Tiempo en el Refrigerador con R134a. *60*
Figura: 2.35 Temperatura vs.Tiempo salida del compresor con R134a. *61*
Figura: 2.36 Temperatura vs.Tiempo ingreso del compresor con R134a. *61*
Figura: 2.37 Temperatura vs.Tiempo salida del condensador con R134a. *62*
Figura: 2.38 Cálculo del COP con EES. *64*
Figura: 2.39 Resultados ciclo de refrigeración R134a. *65*
Figura: 2.40 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R134a. *65*
Figura: 2.41 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R134a. *66*
Figura: 3.1 Envases comerciales de R600a *69*
Figura: 3.2 Diagrama de Mollier para R600a *72*
Figura: 3.3 Etiqueta que indica la inflamabilidad del R600a. *73*
Figura: 3.4 Relación de cantidad de refrigerante R600a frente al R134a *75*
Figura: 3.5 Montaje del compresor en un refrigerador *80*
Figura: 3.6 Unión de elementos del sistema de refrigeración al compresor. *80*
Figura: 3.7 Conexiones eléctricas de un compresor hermético. *81*
Figura: 3.8 Conexión de equipo para realizar el vacío del refrigerador. *81*
Figura: 3.9 Carga de refrigerante R600a al equipo Boreal 212. ..... *82*
Figura: 3.10 Compresor hermético de 1/4 para refrigerante R12. ..... *83*
Figura: 3.11 Puntos para medir la temperatura del evaporador. *84*
Figura: 3.12 Gráfica de temperaturas en el evaporador en función de la carga de refrigerante. *85*
Figura: 3.13 Puntos de monitoreo del condensador -Boreal 212. ..... *85*
Figura: 3.14 Gráfica de temperaturas en el condensador en función de la carga de refrigerante. *86*
Figura: 3.15 Compresor hermético indicando los puntos para medir la temperatura *87*
Figura: 3.16 Grafica de temperaturas en el compresor en función de la carga de refrigerante. *88*
Figura: 3.17 Esquema de Refrigerador Boreal 212 indicando la ubicación de los termopares. *88*
Figura: 3.18 Ventana Lab View- Temperaturas del sistema-compresor de 1/4 R600a. *89*
Figura: 3.19 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R600a-Compresor de 1/4. ..... *90*
Figura: 3.20 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R600a-Compresor de 1/4. ..... *90*
Figura: 3.21 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Refrigerador con R600a-Compresor de 1/4. ..... *91*
Figura: 3.22 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del compresor con R600a-Compresor de 1/4. ..... *91*

Figura: 3.23 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el ingreso del compresor con R600a-Compresor de 1/4. 92
Figura: 3.24 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del condensador con R600a-Compresor de 1/4. 92
Figura: 3.25. Datos de ingreso y programación en EES para calcular el COP-compresor de 1/4 hp.93
Figura: 3.26 Programación para cálculo del COP con EES-compresor 1/4 hp. 94
Figura: 3.27 Resultados del COP con EES-compresor 1/4 hp. 94
Figura: 3.28 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/4 hp. 95
Figura: 3.29 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a- compresor 1/4 hp. 95
Figura: 3.30 Compresor hermético EMI 55 ER - Embraco de 1/6 hp 96
Figura: 3.31 Ventana de Dancap- Cálculo de tubo capilar..... 97
Figura: 3.32 Modificaciones al Refrigerador Boreal 212 98
Figura: 3.33 Ventana Lab View- Temperaturas del sistema-compresor de 1/6 R600a. 99
Figura: 3.34 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R600a-Compresor de 1/6. 99
Figura: 3.35 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R600a-Compresor de 1/6. 100
Figura: 3.36 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Refrigerador con R600a -Compresor de 1/6... 100
Figura: 3.37 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del compresor con R600a-Compresor de 1/6. 101
Figura: 3.38 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el ingreso del compresor con R600a-Compresor de 1/6. 101
Figura: 3.39 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del condensador con R600a-Compresor de 1/6. 102
Figura: 3.40 Datos de ingreso y programación en EES para calcular el COP-compresor de 1/6 hp. 103
Figura: 3.41 Programación para cálculo del COP con EES-compresor 1/6 hp. 103
Figura: 3.42 Resultados del COP con EES-compresor 1/6 hp. 103
Figura: 3.43 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/6 hp. 104
Figura: 3.44 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a- compresor 1/6 hp. 104
Figura: 4.1 Consumo de energía refrigerante R600a compresor 1/4 hp. 109
Figura: 4.2 Consumo de energía refrigerante R600a compresor 1/4 hp. 109
Figura: 4.3 Energía Activa refrigerante R600a Compresor 1/6 hp. 112
Figura: 4.4 Energía Activa refrigerante R600a Compresor 1/6 hp. 112
Figura: 4.5 Consumo de energía refrigerante R134a compresor de 1/4 hp. 114

Lista de tablas

Tabla 1-1: Conversión de unidades de Refrigeración a unidades en consumo energético. 9
Tabla 1-2 Datos del refrigerador Boreal 212. 35
Tabla 1-3 Datos del Evaporador para equipo Boreal 212. 36
Tabla 1-4 Datos del compresor para R134a usado en el refrigerador Boreal 212 37
Tabla 1-5 Datos del filtro secador. 38
Tabla 1-6 Datos Temporizador. 38
Tabla 1-7 Datos del Condensador utilizado en el refrigerador Boreal 212. 39
Tabla 1-8 Datos de capilares. 39
Tabla 2-1 Propiedades Físicas R134a. 42
Tabla 2-2 Presión vs. Temperatura R134a. 43
Tabla 2-3 Datos de rendimiento R-134a 44
Tabla 2-4 Temperatura máxima y mínima en varios puntos del sistema. 58
Tabla 3-1 Propiedades del refrigerante R600a. 69
Tabla 3-2 Relación temperatura- Presión de R600a. 70
Tabla 3-3 Inflamabilidad del isobutano 73
Tabla 3-4 Especificaciones para R600a de acuerdo con la norma DIN 8960-1998. 75
Tabla 3-5 Compatibilidad del R600a con aceites lubricantes 77
Tabla 3-6 Datos del Compresor hermético de 1/4 para R12 83
Tabla 3-7 Temperaturas en el Evaporador dependiendo de la carga de refrigerante. 84
Tabla 3-8 Temperaturas en el Condensador dependiendo de la carga de refrigerante R600a. 86
Tabla 3-9: Temperaturas en el Compresor dependiendo de la carga de refrigerante. 87
Tabla 3-10 Máximos y mínimos de temperatura en el Refrigerador-compresor ¼ hp R600a. 89
Tabla 3-11 Datos del compresor hermético de 1/6 hp. 96
Tabla 3-12 Datos de los elementos cambiados al equipo de refrigeración. 97
Tabla 3-13 Máximos y mínimos de temperatura en el Refrigerador-Compresor 1/6. 98
Tabla 4-1 Registrador Trifásico Fluke 1735 108
Tabla 4-2 Tiempo de encendido y apagado equipo con R600a compresor 1/4 hp. 110
Tabla 4-3 Tiempo de encendido y apagado equipo con R134a compresor 1/4 hp. 114
Tabla 4-4 Propiedades R600a frente a R134a. 117
Tabla 4-5 Resultados análisis R600a frente a R134a. 117
Tabla 4-6 Resultados análisis R600a frente a R134a. 118
Tabla 4-7 Resultados de presiones de trabajo. 118
Tabla 4-8 Resultados análisis R134a frente a R600a. 119
Tabla 4-9 Propiedades R600a frente a R134a 119

1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO

1.1 Introducción

La refrigeración es mantener una sustancia o un cuerpo por debajo de la temperatura ambiente, poniéndola en contacto de forma directa o indirecta con otra que se encuentre por debajo de la temperatura a la que deseamos mantener la sustancia.

En las primicias de los sistemas de refrigeración mecánica, los equipos para producirla ocupaban grandes espacios, eran costosos, de alto consumo energético, de baja eficiencia y necesitaban servicio técnico continuo por lo que su aplicación se veía limitada solamente para industrias para las cuales la refrigeración era imprescindible, tales como plantas productoras de hielo, empacadoras de cárnicos, etc.

En la actualidad debido al avance tecnológico que ha desarrollado la humanidad, la refrigeración ha sido beneficiada, convirtiéndose en sistemas más eficientes de menor volumen y costo por lo que su campo de aplicación se ha extendido considerablemente; a continuación describimos algunas de las más importantes:

- Refrigeración comercial: abarca todo lo que concierne a instalaciones frigoríficas para locales comerciales como hoteles, restaurantes, supermercados que se dedican a la venta o almacenamiento de productos perecibles.

- Refrigeración industrial: como su nombre lo indica estos sistemas de refrigeración son utilizados en procesos de manufactura, se distinguen por ser de tamaño considerable y requieren asistencia técnica permanente.

- Conservación de alimentos: es la aplicación más importante que se le da a la refrigeración, por el incremento de la población y su requerimiento de alimento. En la mayoría de casos estos alimentos son producidos y procesados en zonas alejadas de la ciudad, por lo que es necesario conservar las características de los productos durante su traslado, distribución y venta.

- Refrigeración doméstica: comprende lo referente a refrigeradores y congeladores de baja potencia que varían entre 1/20 y 1/2 hp y son de tipo sellado hermético. Es la aplicación de la refrigeración más conocida y representa un gran porcentaje de la refrigeración industrial.

El presente capítulo describe la mecánica de los sistemas de refrigeración de uso doméstico desde su principio de funcionamiento, ciclo termodinámico, características y propiedades que deben tener los fluidos refrigerantes para esta aplicación.

1.2 Termodinámica de los sistemas de refrigeración

En esta sección se realizará una explicación de los ciclos de refrigeración y los principios termodinámicos en la refrigeración doméstica, para luego hacer énfasis en el coeficiente de desempeño (COP).

1.2.1 Ciclos termodinámicos de refrigeración

Esta sección describe el ciclo térmico y los parámetros de funcionamiento para que realicen un trabajo eficiente de enfriamiento.

Uno de los parámetros de mayor importancia para el funcionamiento del ciclo termodinámico es la diferencia de temperaturas de 5 a 10^{o}C que se debe mantener entre el refrigerante y el ambiente con el que intercambia calor.

Se han establecido varios ciclos de refrigeración, a continuación se presentan algunos de ellos:

1. **Ciclo invertido de Carnot:** es un ciclo totalmente reversible que se compone de dos procesos isotérmicos reversibles y de dos procesos isentrópicos, opera en sentido contrario a las manecillas del reloj. Las condiciones de funcionamiento hacen que este ciclo no sea aplicable en la realidad ya que presenta inconvenientes en los procesos de compresión y expansión debido a la presencia de humedad en estas fases, figura 1.1. En el caso del proceso 2-3 necesita un compresor que maneje dos fases y en el proceso 4-1 la presencia de pequeñas gotas líquidas tiene efectos perjudiciales en la turbina. Las modificaciones para evitar estos problemas dan como resultado el ciclo de

refrigeración por compresión de vapor. El ciclo invertido de Carnot sirve como estándar contra el cual se comparan los ciclos reales de refrigeración.

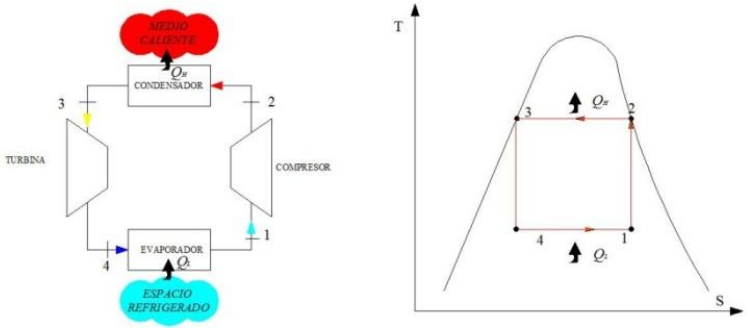


Figura: 1.1 Ciclo invertido de Carnot. Adaptada de [1].

2. **Ciclo de compresión de vapor:** su principal característica es utilizar 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 condiciones ideales de funcionamiento y el ciclo real que considera las irreversibilidades que suceden en cada componente.

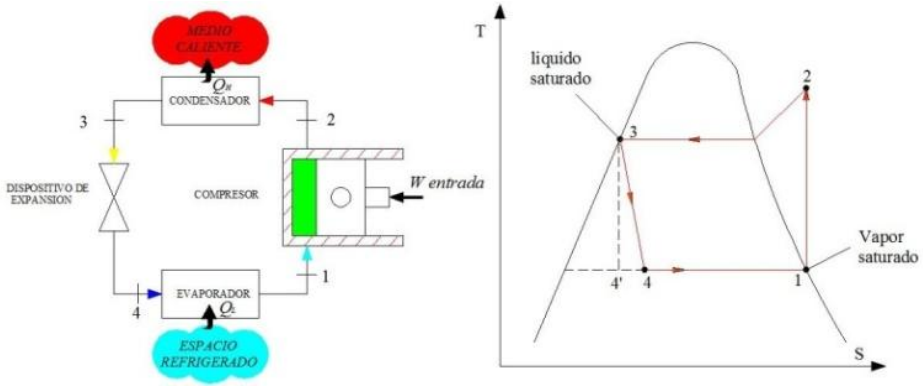


Figura: 1.2 Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de compresión de vapor. Adaptada de [1].

3. **Ciclo de refrigeración de gas (ciclo invertido Brayton):** como los ciclos anteriores funciona en 4 etapas que son, compresión de gas, rechazo de calor, expansión en una turbina y absorción de calor. Este ciclo se aplica en las instalaciones de aire acondicionado de los aviones.

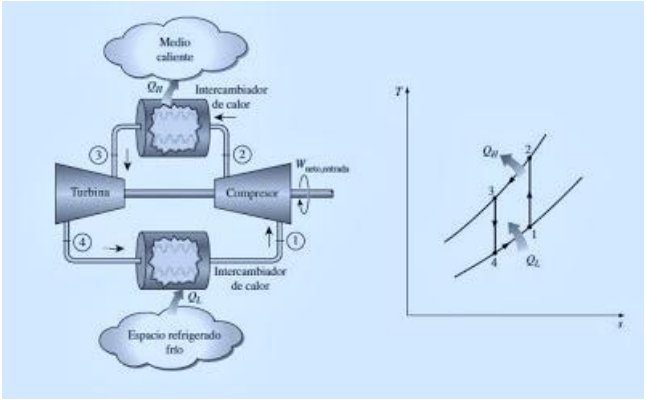


Figura: 1.3 Ciclo simple de refrigeración de gas. Fuente [2].

4. **Ciclo de refrigeración por absorción:** funciona mediante la absorción de un refrigerante por un medio de transporte, su funcionamiento es parecido al ciclo de compresión de vapor, con la diferencia que el compresor es sustituido por un mecanismo de absorción.

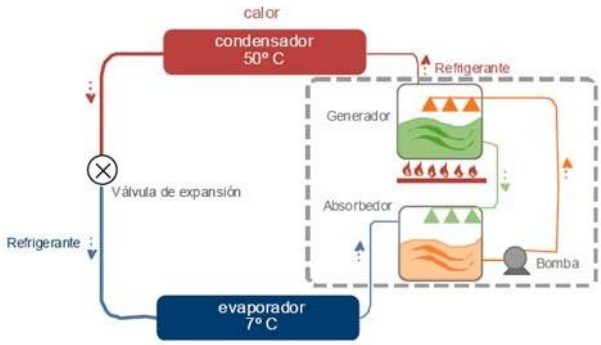


Figura: 1.4 Esquema del ciclo de refrigeración por absorción. Fuente [3].

En la industria de fabricación de equipos de refrigeración de uso doméstico, el ciclo que más se utiliza para el diseño de estos aparatos es el ciclo real de compresión de vapor, por lo eficiente, por la facilidad de funcionamiento y lo rentable que resulta su ensamblaje.

1.2.1.1 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor en el refrigerador doméstico

Para analizar el desarrollo del ciclo real de refrigeración por compresión en el equipo de uso doméstico es necesario conocer cada una de sus partes y la función que cumplen en el refrigerador, en la figura 1.5 se puede observar la estructura general de un refrigerador.

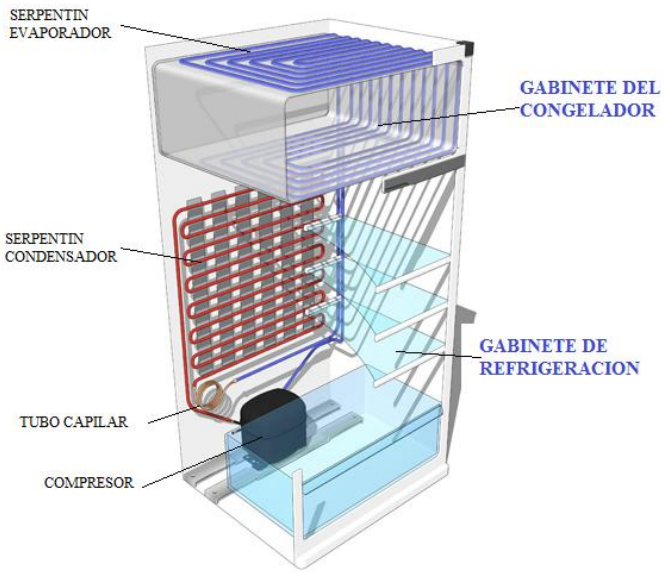


Figura: 1.5 Estructura y partes de un refrigerador. Adaptada de [4]

A continuación se realizará una breve explicación del funcionamiento de cada uno de ellos:

Compresor: comprime el refrigerante para incrementar su presión y en consecuencia su temperatura, la potencia de entrada depende de las necesidades de enfriamiento.

Condensador: al fluir el refrigerante por su serpentín cede calor al ambiente, para el caso de los equipos de uso doméstico la transferencia de calor se da entre el condensador y el aire, para que este proceso se efectué la temperatura del refrigerante debe ser mayor a la temperatura ambiente.

Dispositivo de estrangulamiento: en la mayoría de refrigeradores de uso doméstico este dispositivo es un tubo capilar, se encarga de revertir el proceso del compresor, es decir expande el refrigerante para conseguir la condición de baja temperatura y baja presión.

Evaporador: realiza la función de extracción de calor de los compartimientos de congelación y refrigeración. Mediante la transferencia de calor del refrigerante que circula por su serpentín a baja presión y a temperatura inferior a la del compartimento de congelación, este experimenta un cambio de fase a temperatura constante.

Una vez conocida la distribución de los componentes en un refrigerador y la función que realizan, en la figura 1.6 se puede ver el ciclo que realiza el refrigerante dentro de la campana de saturación, además se analiza su comportamiento durante el ciclo.

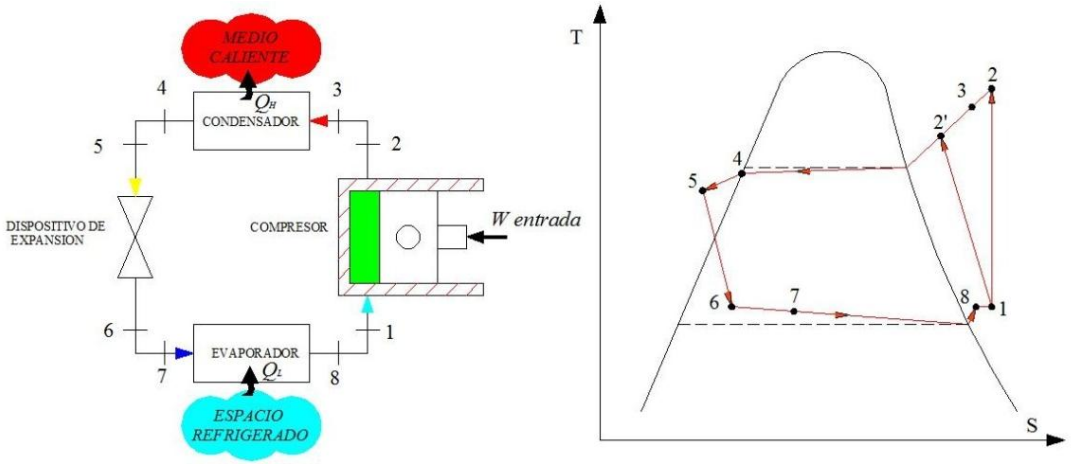


Figura: 1.6 Esquema y diagrama T-s para el ciclo real de compresión de vapor. Adaptada de [1].

En el ciclo real se toma en consideración la caída de presión que sufre el refrigerante al fluir por las tuberías del evaporador y el condensador, también se considera el subenfriamiento y el sobrecalentamiento al que es sometido el refrigerante en las cañerías de succión.

El diseño de un sistema que sobrecaliente el refrigerante ligeramente a la entrada del compresor en un equipo doméstico, se debe a que este 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 (proceso1-2'). 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 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 (proceso5-6) 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).

1.2.2 Principios termodinámicos de la refrigeración

El efecto de la refrigeración es posible gracias a la aplicación de dos principios termodinámicos fundamentales:

- **Efecto sensible:** permite que una sustancia absorba calor.
- **Efecto latente:** permite que una sustancia cambie de estado físico.

1.2.2.1 Elevación de temperatura de la sustancia refrigerante (efecto sensible)

Para realizar este procedimiento se dispone de una sustancia a menor temperatura que la carga que deseamos enfriar, para ejecutar esta acción la sustancia incrementará su temperatura mientras la temperatura de la carga disminuye. En este proceso se cumple el concepto de calor sensible.

"Calor sensible es aquel que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. En general, se ha observado experimentalmente que la cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y a la diferencia de temperaturas. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de calor específico".[1]

$$\dot{Q} = \dot{m}\, cp\, (t1 - t2)$$

Dónde:

- $\dot{Q}$= carga frigorífica
- $\dot{m}$= carga de refrigerante
- cp.= calor específico del refrigerante a presión constante
- t2= temperatura a la salida del refrigerante
- t1=temperatura a la entrada del refrigerante

[1] ORDORICA , María. *Termodinámica*. [en línea] <http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Antolog%C3%ADa_Termodin%C3%A1mica.pdf> [consulta: 02 octubre 2013]

1.2.2.2 Cambio de fase de la sustancia refrigerante (efecto latente)

Los cambios de estado de las sustancias (sublimación, fusión, evaporación) pueden utilizarse para realizar procesos de refrigeración este efecto es conocido como latente.

"El calor latente es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura; por tanto al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se libera la misma cantidad de energía".[2]

1.2.3 Coeficiente de rendimiento para refrigeradores domésticos

El coeficiente de rendimiento (operación), también llamado coeficiente de desempeño es un índice de rendimiento de un ciclo termodinámico o un sistema térmico.

Como su nombre lo indica se lo utiliza para obtener un efecto de refrigeración, y se lo conoce como COP_{ref}.

El COP_{ref} se define con la relación:

$$COPref = \frac{Efecto\ de\ enfriamiento}{Entrada\ de\ trabajo}$$

El COP de refrigeración debe cumplir la siguiente condición:

$$COP_{ref} > 0$$

Es decir que la cantidad de calor extraído del espacio refrigerado debe ser mayor que la cantidad de energía que consume para realizar ese trabajo.

La capacidad de refrigeración de cada equipo se expresa en toneladas de refrigeración, una tonelada de refrigeración hace referencia a la cantidad de calor necesaria para derretir una tonelada de hielo en 24 horas. En la tabla 1-1 se expresa la conversión de cantidad de refrigeración en consumo energético.

[2] ARENAS, Juan y otros. *Calor de fusión del hielo*. [en línea] <http://share.pdfonline.com/64cd4443b17d4f4eb703441c46da7f9f/latente.htm> [consulta: 13 octubre 2013]

Tabla 1-1: Conversión de unidades de Refrigeración a unidades en consumo energético.

TONELADA DE REFRIGERACIÓN	**BTU/HORA**
1	12000
0.5	6000
0.25	3000

En nuestro país el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, presenta normas técnicas y reglamentos que deben cumplir los artefactos de refrigeración para ser comercializados en el mercado. Las normas técnicas son las siguientes: **NTE INEN 2206** y la **NTE INEN 2 297,** estas normas hacen referencia a los requisitos de funcionamiento que deben cumplir los refrigeradores y los ensayos de comprobación a los que se deben someter.

El reglamento técnico ecuatoriano en su ordenanza **NTE INEN 2 297** hace referencia a los parámetros de eficiencia energética. En breves rasgos esta ordenanza clasifica a los equipos de refrigeración en categorías que van desde la letra A (mayor eficiencia) hasta la letra G (baja eficiencia), el parámetro para clasificarlas es la eficiencia en el consumo energético, la figura 1.7 indica los valores para cada categoría.

Figura: 1.7 Categorías de los equipos de refrigeración según el consumo energético. Fuente [5].

"Para cada categoría se toman unos electrodomésticos considerados de consumo normal clasificados en la posición D, a partir de aquí se puede reducir el consumo hasta la mitad de la referencia si llegamos a los electrodomésticos de categoría A, la más eficiente".[3]

En los últimos años por los avances de la ciencia y la tecnología, los equipos de refrigeración comercial y doméstica "*se clasifican en 9 niveles de la A a la G y los niveles A+ y A++. Estos dos niveles de eficiencia energética se añadieron debido a la presencia en el mercado, en el año 2000, de más del 50% de refrigeradores de la clase A".*[4]

- Un refrigerador A consume de media 350 kWh/ año
- Un refrigerador a A+ consume un 24% menos que uno de clase A
- Un refrigerador a A++ consume un 45% menos que uno de clase A

Para finalizar esta sección, se indica que cada refrigerador debe tener una etiqueta visible en donde se resalte la categoría del equipo, en la figura 1.8 se observa una etiqueta con todas las especificaciones que exigen las normas ecuatorianas.

Figura: 1.8 Etiqueta de refrigerador según normas INEN.

[3] UNIVERSIDAD de Costa Rica. *Eficiencia energética: El refrigerador*. [en línea] <http://www2.eie.ucr.ac.cr/~jromero/sitio-TCU-oficial/boletines/grupo04/numero-8/boletin8.html> [consultado: 13 octubre 2013].

[4] DIRECCIÓN general de Industrias, Energía y Minas de la comunidad de Madrid. *Etiquetado de los electrodomésticos. Situación del sector y planes de renove de electrodomésticos*. [en línea] < http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/etiquetado-energetico-de-los-electrodomesticos-situacion-del-sector-y-planes-renove-de-electrodomesticos-2006-2007-fenercom.pdf`> [consultado: 13 octubre 2013].

1.3 Refrigerantes de uso doméstico

1.3.1 Reseña histórica

Desde la invención de los sistemas de refrigeración estos han sido perfeccionados en su funcionamiento hasta tener en la actualidad equipos de última tecnología que cumplen con todas las normas de seguridad y ambientales, esto no fue siempre así sobre todo con los refrigerantes utilizados anteriormente ya que en sus inicios estos eran demasiado tóxicos, inflamables y con propiedades ambientales limitadas.

En 1850 fue utilizado el éter etílico como refrigerante en sistemas de refrigeración de vapor para el comercio, en esa misma época aparecieron otros como amoniaco, algunos hidrocarburos y los clorofluorocarbonos.

Los primeros refrigerantes de uso doméstico eran altamente tóxicos (dióxido de azufre, cloruro de etilio), por lo que en ocasiones se producían graves accidentes causando severas lesiones y en algunos casos la muerte a los propietarios del equipo, por lo que se decidió prohibir su uso y crear refrigerantes de uso doméstico seguros.

El Laboratorio de General Motor presenta soluciones a los problemas encontrados en los refrigeradores domésticos en 1928, con la creación del R-21, que es el primer miembro de la familia de refrigerantes CFC. Se inició su producción comercial en el año 1931, teniendo como principal producto al "Freón" (R-12). Con el transcurso de los años, los científicos notaron que estos productos tienen un impacto ambiental que causa daños irreparables. "*Debido a los problemas que presenta el uso de sustancias agotadoras del ozono, se adoptaron medidas que regulan, reducen y eliminan el uso de estas sustancias acordadas en el protocolo de Montreal".*[5]

En la actualidad se busca inventar refrigerantes más eficientes y amigables con el medio ambiente, para reemplazar a los que se utilizan.

[5] CALDERÓN Marco. *Manual de buenas prácticas en refrigeración*. [en línea] < http://www.estis.net/includes/> [consulta:16 octubre 2013].

1.3.2 Propiedades de los refrigerantes

"*Un refrigerante es un fluido capaz de transportar calor de un lado a otro en cantidades suficientes para desarrollar una transferencia de calor".*[6] Para que una sustancia refrigerante sea adecuada debe cumplir ciertas características que garanticen su calidad y utilidad. A continuación se detallan las propiedades más importantes de los refrigerantes.

1.3.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los refrigerantes obedecen especialmente a la temperatura a la que se encuentren (exceptuando la masa molecular). A continuación se describe algunas de estas propiedades:

1. **Masa molecular:** es la masa de una molécula de un compuesto. Se obtiene sumando las masas atómicas relativas de todos los átomos que forman dicha molécula.
2. **Densidad:** se define como masa por unidad de volumen. Para lo refrigerantes deben ser elevadas por la cantidad que debe ir en los sistemas de refrigeración.
3. **Calor específico:** es la cantidad de calor que hay que suministrar a toda la masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad. Debe de ser lo más alto posible para que una pequeña cantidad de líquido absorba una gran cantidad de calor.
4. **Calor latente de vaporización:** es la cantidad de calorías requeridas para trasformar un estado líquido a gas. En los refrigerantes debe ser alto, para que absorban más calor antes de cambiar de estado.

1.3.2.2 Propiedades químicas

Todos los refrigerantes deben tener las siguientes propiedades químicas.

1. **Inflamabilidad:** hace referencia a cuan inflamable es el refrigerante y su *punto de autoignición*[7].

[6] Calderón Marco, *Manual de buenas prácticas en refrigeración*, 16-Octubre-2013, http://www.estis.net/includes/.

[7] ***Punto de autoignición***: es una característica de un material inflamable (combustible) que define las condiciones (temperatura, presión, tipo de atmósfera) en que se inicia una reacción en cadena de oxidación violenta y el proceso de combustión continua sin intervención de una fuente externa de calor.

2. **Toxicidad:** esta propiedad hace referencia al grado contaminante y peligroso de cada refrigerante.
3. **Seguridad:** para comercializar los refrigerantes deben cumplir normas internacionales de seguridad.
4. **Compatibilidad de carga:** se refiere que en caso de existir una fuga del refrigerante puede entrar en contacto con el producto refrigerado contaminándolo y dejándolo inservible.
5. **Compatibilidad con los materiales:** establece la compatibilidad que tiene el refrigerante con los materiales con los que estará en contacto.
6. **Compatibilidad con el aceite:** es muy importante que tanto el refrigerante y el aceite lubricante del compresor coexistan, en caso de mezclarse no varíe ninguna de las propiedades de cada uno.
7. **Estabilidad:** como se conoce las propiedades de los refrigerantes dependen de la variación de la temperatura, es por ello se trata que los refrigerantes conserven la mayor parte de sus características al sufrir dichos cambios en la temperatura.

1.3.2.3 Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas de los refrigerantes tienen relación con la capacidad de realizar movimiento de calor, son necesarias para analizar y estudiar los ciclos termodinámicos de refrigeración. Se publican para cada refrigerante en tablas fragmentadas en dos partes, la primera hace referencia a las propiedades de saturación líquido y vapor y la segunda presenta las propiedades de vapor sobrecalentado, los parámetros de estas tablas están en función de la temperatura y presión respectivamente.

La entalpia, entropía y volumen específico, están en función de la temperatura y presión, a continuación se describe las mismas.

Presión: en un sistema de refrigeración es de extrema importancia considerarla, se recomienda que sus valores estén sobre la presión atmosférica, sobre todo en el evaporador que funciona a bajas presiones, pues en el caso de que este esté trabajando a presiones negativas se corre el riesgo de que ingrese aire al sistema por posibles fugas. Para el caso de la presión del condensador se debe elegir un valor en función de la temperatura, se recomienda que esta esté en un rango entre 5 a de $10^{o}C$

sobre la temperatura ambiente. En el caso de elegir una presión demasiado elevada, la potencia del compresor se incrementa.

Temperatura: es recomendable para los equipos de refrigeración que la *temperatura critica* [8]este por arriba de la temperatura de condensación, también es aconsejable que la temperatura de congelación sea inferior a la temperatura del evaporador y el refrigerante tenga una baja temperatura de ebullición.

1.3.2.4 Propiedades Medioambientales

Los fluidos para la refrigeración deben cumplir ciertas exigencias de normas ambientales, un refrigerante requiere tener en su composición química componentes que no destruyan la capa de ozono y causen efecto invernadero, pero si lo contienen estos deben ser reducidos a valores mínimos posibles.

En la actualidad se les exige a los productores de gases refrigerantes cumplir las siguientes propiedades medioambientales:

- Protección de la capa de Ozono.
- Evitar el incremento de la radiación ultravioleta.
- Disminuir el efecto invernadero.

Para cumplir estos requerimientos establecidos para la protección del ambiente se realizaron una serie de protocolos y tratados a continuación describiremos lo más importante de ellos.

1.3.2.4.1 Protocolo de Montreal

El protocolo de Montreal es un tratado para la disminución de sustancias que destruyen la capa de ozono, fue establecido en 1987. Este documento contiene un calendario de reducción de sustancias que deterioran la capa de ozono, entró en vigencia el 1 de enero de 1989. Desde su inicio este tratado ha sido revisado y modificado en algunas ocasiones (1990- Londres ,1992- Copenhague, 1995- Viena, 1997- Montreal y 1999- Beijing). Una característica importante es que este protocolo establece una clasificación de los refrigerantes y derivados halogenados en función de su grado contaminante al medio ambiente.

[8] ***Temperatura crítica:*** es la temperatura límite por encima de la cual un gas miscible no puede ser licuado por compresión. Por encima de esta temperatura no es posible condensar un gas aumentando la presión. La temperatura crítica es característica de cada sustancia.

Las disposiciones más importantes de este tratado son:

- El consumo y la producción anuales de las sustancias que afectan a la capa de ozono se reducirán al ochenta por ciento (80%) del nivel de 1986, a partir del primero de julio de 1993.

- En el plazo de un año contado a partir de la entrada en vigor del Protocolo, cada parte prohibirá la importación de sustancias controladas procedentes de cualquier estado que no sea parte en él. A partir del primero de enero de 1993 los países en desarrollo no podrán exportar dichas sustancias a los estados que no sean parte en el Protocolo.

1.3.2.4.2 Protocolo de Kioto

En la cuidad de Kioto el 11 de diciembre de 1997 se firmó el protocolo que lleva su nombre, este acuerdo entre los países industrializados tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que producen efectos de cambio climático. Se le dio validez el 16 de febrero del 2005.

Este documento establece una reducción de los gases de efecto invernadero en un 5.2 % entre el 2008 y 2012, en comparación a las emisiones de 1990. Entre los gases que se planea disminuir su producción están: dióxido de carbono (CO2), gas metano (CH4) y óxido nitroso (N2O), además de tres gases de uso industrial que contiene Fluor (Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF6)).

1.3.3 Clasificación de los refrigerantes

1.3.3.1 Refrigerantes halogenados

Su principal característica es tener en su estructura química moléculas de átomos de flúor, cloro o ambos; sus propiedades químicas son estables, de muy baja toxicidad y excelentes características térmicas. Son los principales compuestos que degradan la capa de ozono, actualmente se trata de dejar de utilizarlos. Se dividen en tres grupos importantes:

- Clorofluorocarbonos (CFCS):
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFCS)
- Hidrofluorocarbonos (HFCS)

1.3.3.2 Mezclas

Su estructura está formada por la unión de dos o más refrigerantes, existen dos clases de mezclas.

- **MEZCLA ZEOTRÓPICA:** están formadas por dos o más refrigerantes simples o puros, al mezclarse en cantidades determinadas, dan como resultado una sustancia que posee temperaturas de ebullición y condensación variables.

- **MEZCLA AZEOTRÓPICA:** son el resultado de unir dos o más sustancias puras, el refrigerante obtenido tiene su punto de ebullición constante y se comporta como una sustancia pura.

1.3.3.3 Hidrocarburos (HCs)

Son compuestos derivados del petróleo, con excelentes propiedades termodinámicas de refrigeración, son amigables con el medio ambiente y actualmente se los mira como los sustitutos idóneos de los compuestos halogenados. El mayor inconveniente que presentan esta clase de refrigerantes es su grado de inflamabilidad por lo que sus instalaciones deben ser seguras de fugas. Para su aplicación en la industria de la refrigeración estos compuestos deben ser de alta pureza, con un contenido bajo de humedad.

1.3.3.4 Compuestos inorgánicos

Son compuestos existentes en la naturaleza que tienen propiedades de refrigeración tales como oxígeno, nitrógeno, anhídrido carbono, amoniaco, dióxido de carbono y agua. No son muy utilizados en la industria de la refrigeración por su baja eficiencia y en el caso específico del amoniaco por ser una sustancia toxica**.**

1.4 Estructura de los refrigeradores de uso doméstico

1.4.1 Introducción

Una de las aplicaciones más valiosas de la refrigeración es la conservación de alimentos, al reducir la temperatura de un alimento hacia su *punto de congelamiento*[9], se logra disminuir el movimiento molecular logrando retardar el crecimiento de las bacterias que provocan la putrefacción.

Durante muchos años los productos lácteos y otros perecederos[10] se almacenaban en sótanos, pozos, cajas rodeadas de hielo, etc. Sin embargo a principios del siglo XX se empezó a fabricar refrigeradores domésticos los mismos que empezaron a volverse muy populares y usados en prácticamente cada hogar del mundo, hoy en la actualidad se han convertido en aparatos con tecnología de punta que incluyen dispensadores automáticos de hielo y bebidas, pantallas de televisión, e inclusive conexiones a internet.

1.4.2 Generalidades

El refrigerador es uno de los electrodomésticos más utilizados, es un dispositivo completamente ensamblado de fábrica, generalmente contiene dos compartimientos aislados térmicamente, el gabinete del congelador y el gabinete de refrigeración. "*Las temperatura de trabajo recomendada para el congelador es de -18 ^{o}C y para el refrigerador es de 6 ^{o}C*"[11].

Figura: 1.9 Refrigerador de uso doméstico de dos compartimientos. Fuente [6].

[9] *"*Para la mayoría de alimentos el ***punto de congelamiento*** es 0°F". WHITMAN, William C, y otros, Tecnología de Refrigeración y Aire acondicionado, 6ª. Edición, CengageLearning Editores, México, 2010, Tomo I, p22.

[10] ***Perecedero:*** Adjetivo. Poco durable, que ha de perecer o acabarse. Diccionario DRAE.

[11] DEPARTAMENTO de medio ambiente de CC.OO. de Aragón. *Guía sobre el consumo energético de aparatos domésticos*. [en liena] <http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random493ea37fa7d61/1228843832_Consumo_energ_Aptos_domesticos.pdf.> [consulta: 13 octubre 2013].

El funcionamiento del mismo consiste en mantener sus gabinetes a bajas temperatura mediante la extracción de calor desde el interior hacia el medio exterior continuamente gracias a una fuente de energía externa.

Se recomienda mantenerla en lugares que permanezcan a temperatura estables, no abrir los compartimentos constantemente y que el condensador tenga buena ventilación. Se debe evitar que estén cerca de fuentes de calor. Si se toma en consideración todos estos consejos nuestro equipo será más eficiente.

1.4.3 Partes principales de un sistema de refrigeración

Existen cuatro componentes principales en un sistema de refrigeración de uso doméstico: el evaporador, compresor, condensador, y el dispositivo de expansión.

1.4.3.1 Evaporador

El Evaporador es el componente que absorbe el calor en un sistema de refrigeración, esto es posible ya que la temperatura del serpentín en el evaporador es menor que la temperatura del medio que se está enfriando.

Un evaporador funciona de la siguiente manera: el refrigerante ingresa al serpentín desde la parte inferior del evaporador, y lo hace como una mezcla de aproximadamente 75% líquido y 25% vapor.

Lo lógico debido a que se está agregando calor al evaporador es que este se alimente del refrigerante desde el fondo, para asegurar que todo el líquido se convierta en vapor, este es el principal objetivo del evaporador; es decir convierte todo el líquido refrigerante en vapor justo antes del final del serpentín.

En el punto del serpentín donde ocurre este cambio de estado tenemos lo que se denomina *vapor saturado*[12], es importante garantizar que al compresor no ingresen gotas líquidas de refrigerante por lo que se suele llegar incluso a un estado de *vapor sobrecalentado*[13], figura 1.10

[12] *"*Vapor que está a punto se condensarse se llama ***vapor saturado"***. CENGEL, Yunus y BOLES Michael, *Termodinámica*, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002, p.114

[13] *"*Vapor que no está a punto de condensarse se llama ***vapor sobrecalentado***". CENGEL, Yunus y BOLES Michael, *Termodinámica*, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002, p.114.

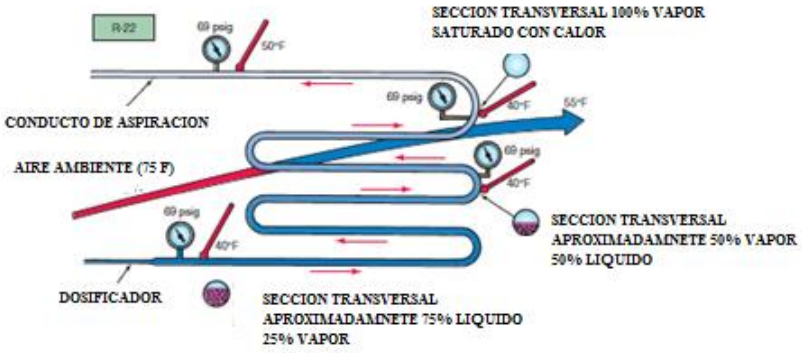


Figura: 1.10 Comportamiento de refrigerante en el Evaporador. Fuente [7].

En definitiva podemos mencionar que las funciones principales del evaporador son:

1. Absorber el calor del medio que se está enfriando.

Cuando el refrigerador está más caliente debido a que se ha introducido un alimento, el evaporador debe eliminar más calor; el evaporador remueve el calor del aire de retorno disminuyendo su temperatura y de esta manera elimina *calor sensible*[14]. Mientras que cuando se remueve humedad del aire se extrae *calor latente*[15], llamado también calor oculto porque los termómetros no lo registran, ambos son calor y deben ser eliminados. El evaporador es el responsable del intercambio de calor entre el espacio acondicionado y el refrigerante figura 1.11.

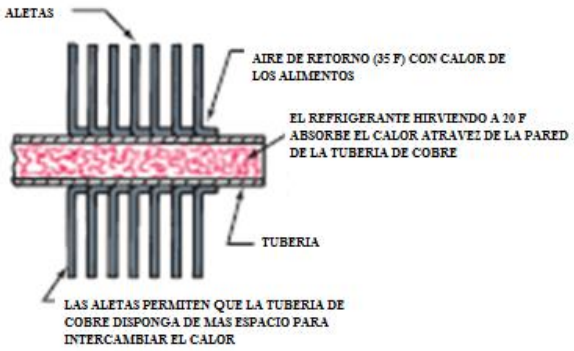


Figura: 1.11 Intercambio de calor entre el aire y el refrigerante. Fuente [7].

14 Calor disipado mediante radiación. CENGEL, Yunus y BOLES Michael, Termodinámica, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002, p.728.

15 Cantidad de calor necesaria para vaporizar un líquido. CENGEL, Yunus y BOLES Michael, Termodinámica, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002, p.114.

2. ***Permitir que el calor hierva el refrigerante líquido hasta un vapor en su interior.***

3. ***Permitir que el calor sobrecaliente al refrigerante vaporizado en su interior.***

1.4.3.1.1 Tipos de evaporadores

Existen evaporadores de varios diseños y materiales; los fabricantes sugieren el uso de uno u otro modelo dependiendo la aplicación y el intercambio de calor necesario; las principales condiciones tomadas en cuenta son:

1. El material del evaporador, puede ser de cobre, acero, latón, acero inoxidable o aluminio, por ejemplo si se necesita enfriar materiales ácidos posiblemente la mejor opción es usar un evaporador con tubos en acero inoxidable el objetivo es evitar la herrumbre u oxidación.

2. El medio con el cual se intercambia el calor, por ejemplo cuando se pasa calor del aire al refrigerante.

3. El coeficiente de película, que es la relación entre el medio que emite el calor y la superficie de intercambio de calor; este coeficiente se relaciona con la velocidad del medio que pasa por la superficie de intercambio, si la velocidad es demasiado lenta se convierte en un aislante.

4. La diferencia de temperatura entre los dos medios en los que tiene lugar el intercambio de calor. Mientras mayor es la diferencia el intercambio es más rápido.

1.4.3.1.1.1 Evaporador de tiro natural

Estos evaporadores tienen una placa plana; sobre la cual se estampan conductos generalmente de aluminio cargados del refrigerante; de esta forma el aire frío desciende desde el compartimiento de congelación hacia el compartimiento de temperatura moderada, figura 1.12.

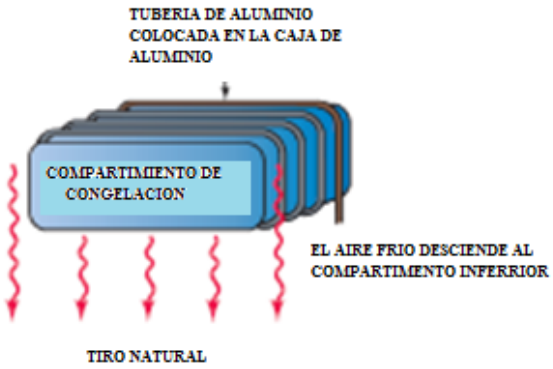


Figura: 1.12 Evaporador de Tiro Natural. Fuente [7].

Algunos modelos realizan la descongelación de forma manual, en donde es necesario apagar el refrigerador, abrir la puerta y esperar que la temperatura del ambiente derrita la escarcha del congelador; otros modelos emplean la descongelación de tipo automática (no frost), mediante elementos de calefacción eléctrica que se encuentran sobre las aletas del evaporador o por gas caliente que suministra el compresor. Con este tipo de descongelación es posible derretir hasta medio litro de agua del evaporador durante cada ciclo de descongelación, figura 1.13.

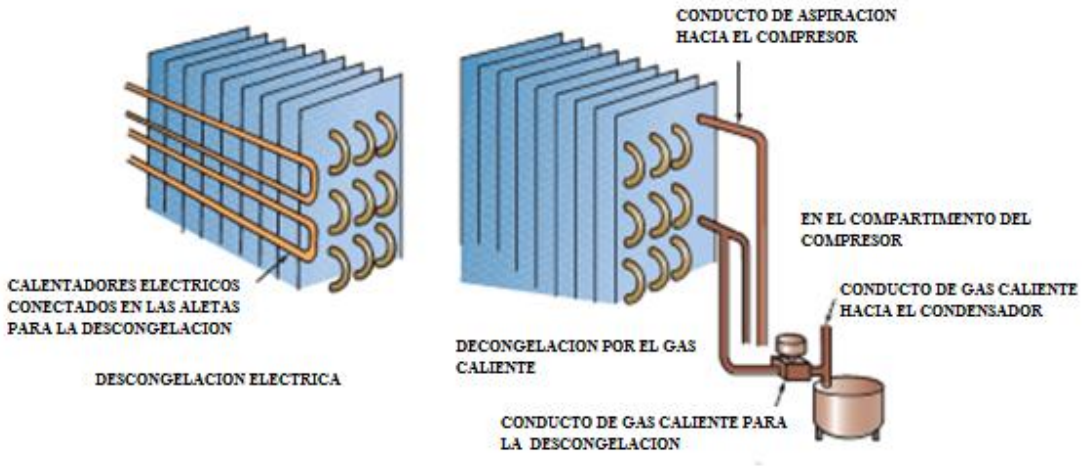


Figura: 1.13 Descongelación eléctrica y por gas caliente. Fuente [7].

1.4.3.1.1.2 Evaporador de tiro forzado

Estos evaporadores tienen un serpentín por donde fluye el refrigerante además de un ventilador que aumenta la eficiencia del evaporador, el uso de un ventilador permite colocar un evaporador mucho más pequeño logrando ahorrar espacio, este tipo de evaporadores

suelen estar empotrados por lo que no son visibles y muchos poseen aletas para aumentar su área superficial, figura 10.14.

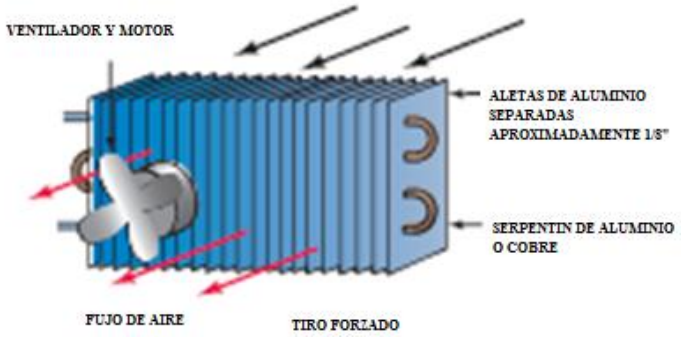


Figura: 1.14 Evaporador de tiro forzado. Fuente [7].

1.4.3.1.1.3 Evaporador estampado

Este evaporador está compuesto de dos piezas de metal sobre la cual está estampado el tubo que contiene el refrigerante; una superficie mayor que solo la del tubo en el evaporador logra mayor eficiencia en el intercambio de calor, figura 1.15.

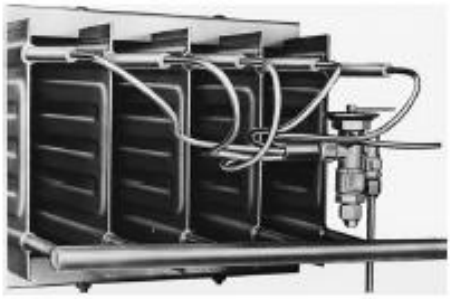


Figura: 1.15 Evaporador Estampado. Fuente [7].

1.4.3.1.1.4 Evaporador de tubo aletado

En el intercambio de calor entre aire y refrigerante el más usado actualmente es el evaporador de tubo aletado, las aletas de este tienen buen contacto con el tubo haciéndolo eficiente, figura 1.16.

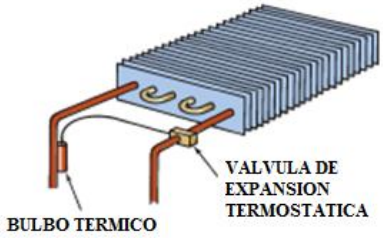


Figura: 1.16 Evaporador Aletado. Fuente [7].

1.4.3.1.2 Descongelación de la humedad acumulada

Es posible descongelar el evaporador con el calor del propio sistema; para hacerlo se debería colocar un ducto de la descarga del compresor hacia la salida de la válvula de expansión e instalar una válvula solenoide para controlar el paso del flujo, figura 1.17.

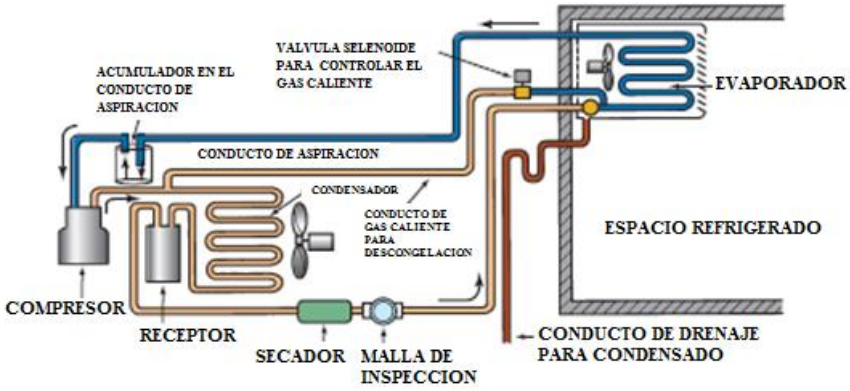


Figura: 1.17 Utilización de Gas caliente para descongelar un evaporador. Fuente [7].

Otra alternativa es mediante descongelación eléctrica, cuando el compresor se detiene la resistencia se energiza permitiendo que el hielo de los tubos en el evaporador se derritan, figura 1.18.

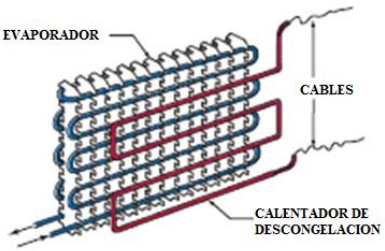


Figura: 1.18 Calentador para descongelación eléctrica de evaporadores. Fuente [7].

1.4.3.2 Compresor

El compresor es el componente que aumenta la presión en el sistema y que mueve el vapor refrigerante desde el lado a baja presión en el evaporador hasta el lado a alta presión en el condensador.

Los compresores para refrigerador de uso doméstico tienen una potencia entre 1/20 y 1/2 de hp; estos compresores generalmente tienen un conducto de aspiración, un conducto de descarga, un tubo de proceso y dos conductos de enfriamiento del aceite, figura 1.19.

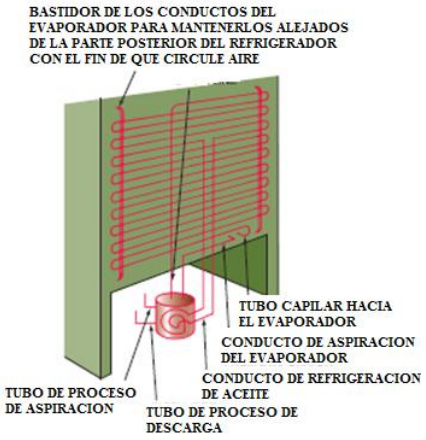


Figura: 1.19 Conductos principales de un compresor. Fuente [7].

Comúnmente se usan en la refrigeración doméstica compresores del tipo soldado herméticamente sellados, pueden ser alternativos o rotatorios. Estos compresores también conocidos como compresores de desplazamiento positivo, aumentan la presión del refrigerante al disminuir el volumen de la cámara que contiene el fluido, figura 1.20.

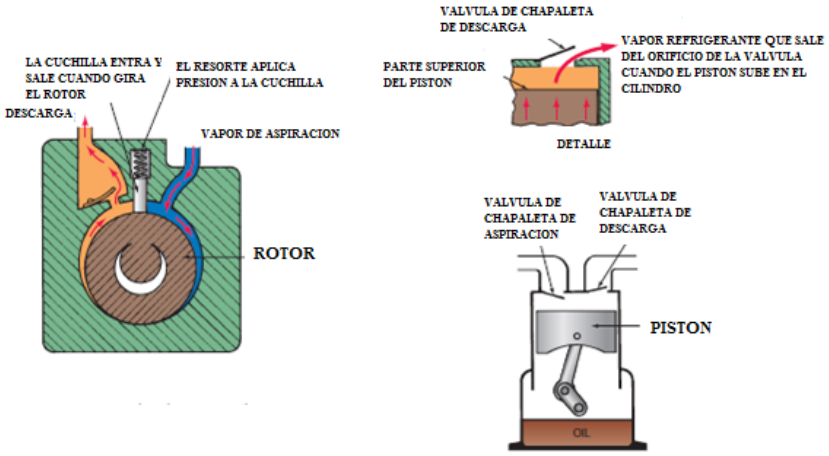


Figura: 1.20 Acción Rotatoria y alternativa de un compresor. Fuente [7]

1.4.3.2.1 Tipos de compresores

En los sistemas de refrigeración generalmente se usan los compresores: alternativos, en espiral y centrífugos; siendo el alternativo el más usado para sistemas de refrigeración doméstica.

1.4.3.2.1.1 Compresor alternativo

De acuerdo a su carcasa estos compresores pueden ser del tipo abierto ya sea con accionamiento por banda o accionamiento directo; o del tipo hermético pudiendo ser completamente soldados o semiherméticos.

En los compresores accionados por banda, el motor y el eje están dispuestos paralelos con el eje del compresor por lo que es necesario que se realice una adecuada alineación para el correcto funcionamiento del compresor, figura 1.21.

Figura: 1.21 Compresor accionado por bandas. Fuente [8].

En los compresores de accionamiento directo el eje del compresor se encuentra conectado extremo con extremo con el eje del motor, es importante señalar que el acoplamiento debe tener una correcta alineación para evitar fallas en los cojinetes o sellos, figura 1.22.

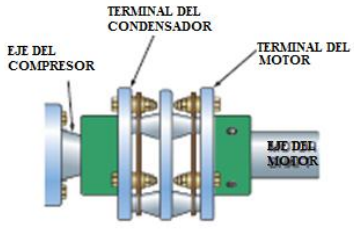


Figura: 1.22 Accionamiento directo en un compresor. Fuente [7]

En los compresores herméticos completamente soldados es muy difícil tener acceso a su interior, el eje del motor y el cigüeñal constituyen un solo eje, los pistones y las bielas se

mueven hacia afuera del cigüeñal, por lo que trabajan en un ángulo de 90˚ en relación con el cigüeñal, figura 1.23.

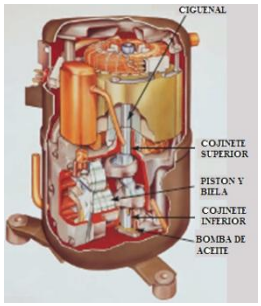


Figura: 1.23 Partes internas de un compresor hermético soldado. Fuente [7].

Los compresores herméticos reparables están fijados con pernos que facilitan su reparación y mantenimiento, generalmente el cigüeñal está en posición horizontal y las bielas y pistones se mueven hacia arriba y hacia abajo desde el centro del eje, figura 1.24.

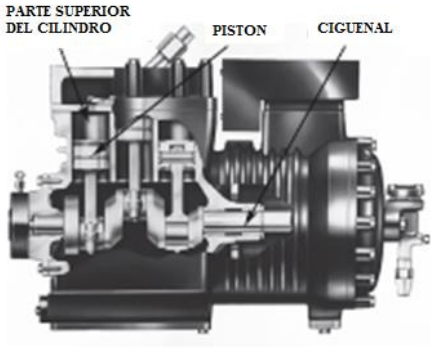


Figura: 1.24 Partes móviles de un compresor hermético reparable. Fuente [7].

El cigüeñal de un compresor alternativo es el elemento que transmite el movimiento de rotación hacia las bielas, produciendo un desplazamiento lineal hacia arriba y hacia abajo de los pistones, los cigüeñales suelen estar hechos de hierro fundido o acero dulce, mientras que las bielas suelen estar hechas de hierro, latón o aluminio.

En el compresor alternativo el pistón es el elemento que está en contacto con el vapor refrigerante, durante su movimiento descendente permite que este vapor ingrese a un cilindro y durante su movimiento ascendente logra elevar la presión del fluido al disminuir el volumen del cilindro, figura 1.25.

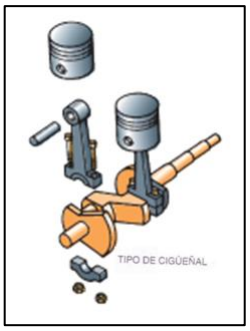


Figura: 1.25 Ensamble cigüeñal, biela y pistón. Fuente [7].

1.4.3.2.1.2 Compresor en espiral

Consiste en dos involutas en forma de espiral que se acoplan una dentro de la otra, una de las partes de forma espiral permanece estacionaria mientras que la otra gira alrededor del elemento estacionario, se crea un movimiento orbital ya que el motor está descentrado, figura 1.26

Figura: 1.26 Movimiento de las bolsas de gas en el espiral. Fuente [7].

1.4.3.2.1.3 Compresor centrífugo

Son compresores de alta eficiencia en los que cojinetes que levitan magnéticamente controlan con precisión la rotación sin fricción del eje del compresor, figura 1.27.

Figura: 1.27 Eje del rotor, impulsores centrífugos y cojinetes magnéticos. Fuente [7].

1.4.3.3 Relés

El relé tiene un papel muy importante en el arranque de los motores de compresores herméticos; en el instante de arranque del motor se conecta la bobina auxiliar, que iniciadetermina el sentido de rotación del motor y proporciona del torque necesario para inicia el movimiento. Después del arranque, se desconecta la bobina auxiliar y solamente la bobina de marcha permanece funcionando, figura 1.28.

Figura: 1.28 Relé Amperométrico. Fuente [9].

1.4.3.4 Capacitor de arranque

Los compresores eléctricos pueden tener conectado un capacitor con la finalidad de mejorar su funcionamiento.

Estos capacitores son de tipo electrolítico, encapsulados en baquelita y sellados, trabajan durante periodos cortos y su capacidad se identifica en microfaradios [µF] generalmente entre 50 y 300 µF con un voltaje de 110 o 220V. Los capacitores de arranque se conectan en serie con la bobina de arranque aportando energía únicamente en el arranque, figura 1.29.

Figura: 1.29 Capacitor de arranque. Fuente [9]

1.4.3.5 Termostato.

El dispositivo encargado de controlar el encendido y apagado del compresor es un termostato. Consiste en un diafragma metálico, uno de sus lados es una cámara hermética conectada a un tubo capilar y a un bulbo sensor. La otra cara de este diafragma acciona un

interruptor a través del cual se conecta la alimentación al compresor. El bulbo sensor se ubica en un punto del evaporador de manera que cierre un contacto a una temperatura y lo abra a otra inferior.

Figura: 1.30 Termostato con tubo capilar. Temperatura ambiente de -40 a 65°C. Fuente [9].

1.4.3.6 Condensador

El condensador es el componente que expulsa calor del sistema de refrigeración. Este recibe el gas caliente que descarga el compresor el mismo que se encuentra como vapor sobrecalentado a alta presión y alta temperatura.

El gas que sale del compresor está tan caliente que de inmediato empieza un intercambio de calor entre el gas y el aire circundante, conforme el gas se mueve por el condensador cede calor sensible al aire circundante, la caída de temperatura hace que el gas se enfríe hasta que alcanza la temperatura de condensación aproximadamente en el 90% de la longitud del condensador, el refrigerante en el tubo se convierte en líquido saturado puro, figura 1.31.

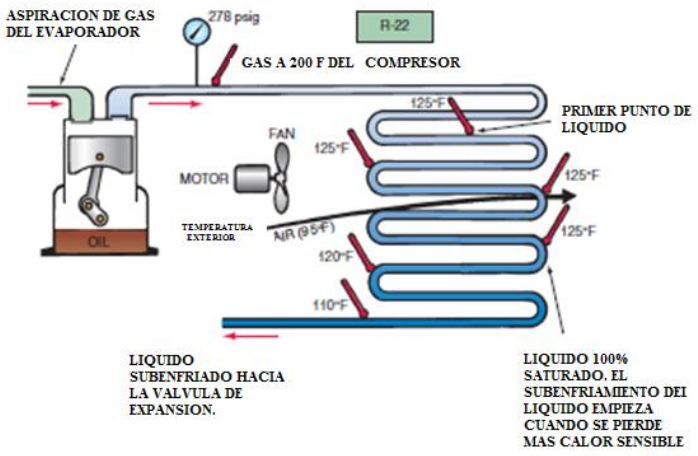


Figura: 1.31 Líquido Subenfriado en la salida del condensador. Fuente [7]

Todos los condensadores usados en la refrigeración de uso doméstico son enfriados por aire, se enfrían por convección natural o mediante ventiladores pequeños de aire forzado, figura 1.32.

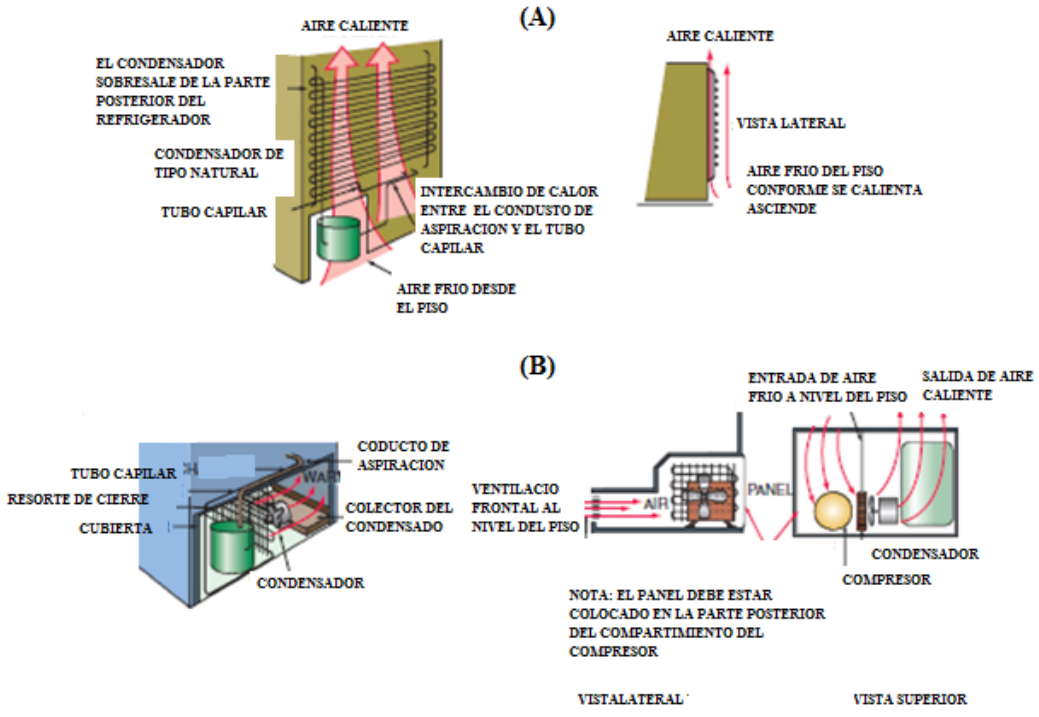


Figura: 1.32 Condensador (A) de tiro natural, (B) de tiro forzado. Adaptada de [7].

1.4.3.6.1 Tipos de condensador

En los equipos de refrigeración doméstica y comercial se puede encontraremos con algunos diseños de condensadores que presentaremos a continuación.

1.4.3.6.1.1 Condensador enfriado por agua

Pertenecen a los primeros condensadores utilizados en la refrigeración comercial, estos condensadores son más eficientes que los enfriados por aire y funcionan a temperaturas de condensación mucho más bajas, figura 1.33.

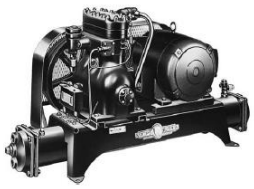


Figura: 1.33 Condensador enfriado por agua. Fuente [7].

1.4.3.6.1.2 Condensador de tubo concéntrico

Pueden ser de serpentín o de extremos bridados; en los condensadores tipo serpentín se desliza un tubo en el interior de otro, el intercambio de calor se da entre el fluido dentro del tubo exterior (refrigerante) y el fluido dentro del tubo interior (agua), figura 1.34.

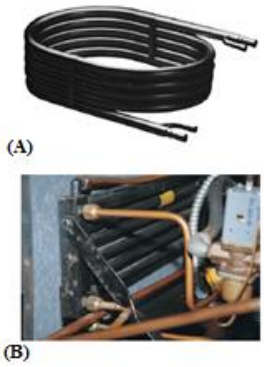


Figura: 1.34 Condensadores de tubo concéntrico. (A) En forma de serpentín (B) Embridado. Fuente [7].

1.4.3.6.1.3 Condensadores enfriados por aire

Emplean aire como el medio hacia el que se rechaza el calor; están constituidos por una tubería simple en los que el impulsor de un compresor sopla aire sobre el condensador; con la finalidad de mejorar el rendimiento en muchos diseños se amplía el área superficial con aletas figura 1.35

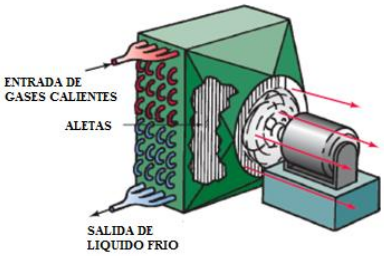


Figura: 1.35 Condensador enfriado por aire. Fuente [7].

1.4.3.7 Dispositivos de expansión

Los dispositivos de expansión denominados también dosificadores pueden ser válvulas o capilares de diámetro fijo; estos dispositivos de expansión se encargan de dosificar la cantidad correcta de refrigerante que va al evaporador el mismo que funciona mejor cuando

está lo más lleno posible de refrigerante líquido sin dejar nada en el conducto de aspiración; el dispositivo de expansión se instala entre el condensador y el evaporador.

1.4.3.7.1 Válvula de expansión termostática TXV

La gran mayoría de las unidades comerciales están equipadas con válvulas de expansión controladas por temperatura, figura 1.36. Esta válvula depende de la expansión de un gas en una cámara hermética; el bulbo sensor se posiciona a la salida del evaporador y las variaciones de temperatura controlan la apertura o cierre.

Figura: 1.36 Válvula de expansión termostática. Fuente [9]

1.4.3.7.2 Válvula de expansión automática

La válvula de expansión automática es un dispositivo de control de flujo de refrigerante líquido accionado directamente por la presión existente en el evaporador, figura 1.37. Solo actúa en respuesta a la puesta en marcha del compresor, sino permanece cerrada. A medida que la presión en el evaporador desciende la válvula se abre y permite pulverizar refrigerante evaporado dentro del evaporador.

Figura: 1.37 Válvula de solenoide. Fuente [9].

1.4.3.7.3 Dosificador de tubo capilar

El tubo capilar es el dispositivo que normalmente se emplea para regular el flujo de refrigerante desde el condensador hacia el evaporador, figura 1.38.

Los llamados capilares son los dispositivos de expansión más usados en la refrigeración doméstica; consiste en un tubo de diámetro reducido, sus medidas pueden oscilar entre 0,5 y 1,5 mm, el empleo del tubo capilar 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.

En la fase de diseño del circuito de refrigeración, puede seleccionarse algún diámetro interno disponible y luego se ajusta la longitud hasta lograr el efecto de enfriamiento en el evaporador.

Figura: 1.38 Tubo Capilar. Fuente [7].

1.4.3.7.4 Filtro secador

El filtro secador es el elemento del sistema de refrigeración que absorbe la humedad del refrigerante. Existen varias sustancias secantes y pueden presentarse en forma de gránulos o sólido poroso; la sustancia se mantiene dentro de la cápsula del filtro entre dos malla metálicas de orificios muy pequeños destinadas a detener las partículas sólidas e impedir que lleguen al tubo capilar o válvula de expansión donde interferirían con el proceso de evaporación figura 1.39.

El filtro secador debe seleccionarse en función del gas refrigerante usado en el sistema y la capacidad necesaria para absorber la humedad que puede contener la carga de refrigerante.

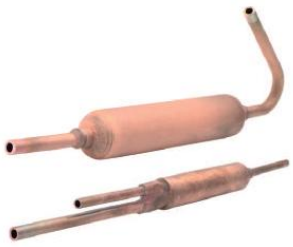


Figura: 1.39 Filtros secadores. Fuente [9].

1.4.3.8 Temporizador y circuito de descongelamiento “no frost”

El descongelamiento se logra mediante un circuito eléctrico que consiste en un temporizador el cual se ubica en un sitio accesible y externo del gabinete.

Este circuito opera como se describe a continuación:

a) Desconecta la alimentación eléctrica al compresor.

b) Simultáneamente energiza una resistencia eléctrica que está unida al evaporador en la zona de mayor acumulación de hielo, el circuito de alimentación eléctrica se cierra a través de un dispositivo de control de deshielo cuyos contactos están normalmente cerrados dentro del rango de temperaturas normales en el interior del gabinete, y que abre sus contactos desenergizando la resistencia cuando la temperatura censada por el dispositivo indica que no hay hielo presente.

c) Al concluir el período de reposo el temporizador vuelve a cerrar el circuito de alimentación del compresor (y simultáneamente abre el de alimentación de la resistencia). Entonces, si el termostato ha alcanzado la temperatura máxima y ha cerrado sus contactos, el compresor arrancará y proseguirá su ciclo de funcionamiento normal controlado por el termostato hasta que el temporizador de descongelamiento vuelva a accionarse, en un tiempo que normalmente oscila entre 6 y 8 horas, figura 1.40.

Figura: 1.40 Reloj de descongelamiento. Fuente [10].

1.5 Descripción del equipo de uso doméstico Boreal 212

El refrigerador boreal 212 del fabricante Ecasa, es el equipo seleccionado para realizar las pruebas del estudio. A continuación se describe cada componente que forma el sistema de refrigeración, figura 1.41 y en la tabla 1-2 se explica las características del equipo.

Figura: 1.41 Refrigerador de uso doméstico Ecasa, modelo Boreal 212.

Tabla 1-2 Datos del refrigerador Boreal 212.

Artefacto:	Refrigerador No frost
Modelo:	Boreal 212
Marca:	ECASA S.A
Color:	Blanco
Serie:	111026003392
Volumen Refrigerador:	182 litros
Volumen Congelador:	52 litros
Volumen Total:	234 litros
Voltaje:	115V-60Hz
Consumo de energía:	335 Kw-h/año
Capacidad de Congelamiento:	4.3Kg/24h
Refrigerante:	125gr de R134a
Peso Neto:	59Kg
Dimensiones:	1562x550x620 mm
Consumo de Energía:	Tipo A
Clase de clima:	Subtropical

En la figura 1.42 se presenta el diagrama de los componentes eléctricos del refrigerador.

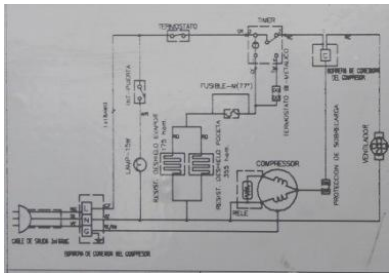


Figura: 1.42 Diagrama eléctrico del refrigerador boreal 212.

En las siguientes secciones se explicara las características de los elementos más relevantes.

1.5.1 Evaporador

La figura 1.43 presenta el diseño del evaporador que viene ensamblado en la refrigeradora Boreal 212 y en la tabla 1-3 se explican las características del mismo.

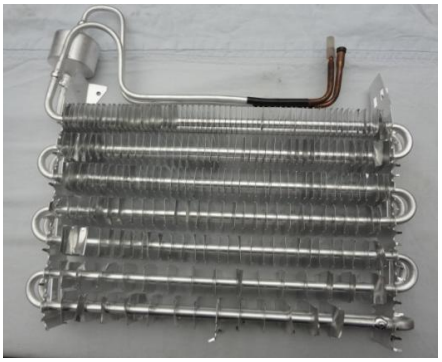


Figura: 1.43 Evaporador del equipo de refrigeración Boreal 212.

Tabla 1-3 Datos del Evaporador para equipo Boreal 212.

Tipo:	Serpentín de cobre con aletas de aluminio sujetas al tubo
Tipo de Circuito:	Un circuito refrigerante continuo
Refrigerante:	R134a-R600a
Temperatura:	Evaporador para mantener la temperatura de 6˚C a 8˚C
Observación:	Evaporador limpio y en buenas condiciones de funcionamiento

Descongelamiento:	Resistencia eléctrica
Dimensiones de las Aletas	6.x2.5cm
Dimensiones:	45x25cm
Diámetro del tubo:	¼ in
Incluye:	Resistencia eléctrica para descongelamiento.

1.5.2 Compresor para refrigerante R134a

En la figura 1.44 se muestra el compresor para R134a, y luego en la tabla 1-4 se documentan los datos técnicos.

Figura: 1.44 Compresor hermético para R134a. Fuente [11].

Tabla 1-4 Datos del compresor para R134a usado en el refrigerador Boreal 212. Fuente [11].

Compresor:	Hermético
Modelo:	EGAS80HLR
Marca:	EMBRACO
Voltaje:	110-115 Voltios, 60Hz
Desplazamiento:	6.36 cc/rev
Potencia:	1/4HP
Capacidad (-23.3˚C):	207 Kcal/h
Tipo de aceite:	ISO10
Tipo de motor:	RSIRCSIR
Peso Neto:	10.9 Kg

1.5.3 Filtro secador

La siguiente figura y tabla presentan la imagen y datos técnicos respectivamente del filtro pequeño gigante.

Figura: 1.45 Filtro secador (pequeños gigantes).

Tabla 1-5 Datos del filtro secador.

Tipo:	Grano con malla
Longitud:	13cm
Diámetro entrada y salida:	19mm
Diámetro del cuerpo:	24mm

1.5.4 Temporizador

Este dispositivo de control se muestra en la figura 1.46 y algunos de sus datos más importantes están en la tabla1-6.

Figura: 1.46 Temporizador 20H004 Fuente [12]

Tabla 1-6 Datos Temporizador. Fuente [12]

Modelo:	DBZC730-1D75
Inicio del Ciclo:	6 horas
Tiempo de Recuperación:	25 min
Voltaje:	110-120vac 60hz
Compatible Compresor:	1/3-1/2hp

1.5.5 Condensador

El condensador de la Boreal 212 se observa en la figura 1.47 y en la tabla 1-7 se presenta sus características.

Figura: 1.47 Condensador Boreal 212.

Tabla 1-7 Datos del Condensador utilizado en el refrigerador Boreal 212.

Tipo:	Enfriado por aire con aletas
Marca:	Ecasa
Diámetro de tubo:	5mm
Longitud:	9.7 m
Material:	Cobre

1.5.6 Tubo capilar

La figura 1.48 muestra la forma del tubo capilar y en la tabla 1-7 se presentan datos de los tubos capilares más utilizados para equipos de refrigeración doméstica.

Figura: 1.48 Tubo capilar unido al filtro secador. Fuente [13]

Tabla 1-8 Datos de capilares.

Material:	Cobre
Diámetro:	0.024 in - 0.027 in -0.031 in
Longitud:	3m

1.6 Conclusiones

- En la refrigeración, la aplicación domestica representa un alto porcentaje, es por ello que las industrias que se dedican a este negocio, invierten tiempo y dinero en la investigación para crear equipos de mayor calidad, tanto físicamente como en su funcionamiento.
- La capacidad de refrigeración de cada equipo, frente a la cantidad de consumo de energía, es conocida como eficiencia energética, este es el valor es importante para clasificar a los refrigeradores en categorías, siendo la clase A la más eficiente y la G la de menor eficiencia.
- Para garantizar el funcionamiento de los refrigeradores domésticos es importante que los parámetros de trabajo del ciclo estén correctamente definidos, se recomienda que la zona de baja presión no esté por debajo de la presión atmosférica, puesto que generaría un vacío en el sistema.
- En la actualidad se busca no utilizar gases refrigerantes que contribuyen al calentamiento global y al efecto invernadero, es por ello que se ha desarrollado nuevos refrigerantes que cumplan este propósito.
- El evaporador es el elemento que absorbe calor hacia el sistema de refrigeración; por esa razón el evaporador está mucho más frío que el ambiente el cual se necesita enfriar.
- El condensador es el dispositivo mediante el cual el sistema de refrigeración elimina el calor absorbido; esto es posible ya que en el condensador el refrigerante se condensa en líquido cediendo calor.
- El compresor es nombrado como el corazón de un sistema de refrigeración siendo el encargado de elevar la presión del refrigerante.
- En los sistemas de refrigeración de uso doméstico el dispositivo de expansión más usado es el tubo capilar.

2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO "NO FROST" QUE UTILIZA REFRIGERANTE R134a

2.1 Introducción

El 11 de diciembre de 1997 en la ciudad de Kyoto, los gobiernos de varios países industrializados aceptaron reducir en al menos un 5% en promedio, las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012; tomando como referencia los niveles de 1990. El objetivo principal es disminuir el cambio climático cuya base es el efecto invernadero.

"Según las cifras de la Organización de las Naciones Unidas, se piensa que la temperatura media de la superficie del planeta aumente entre 1,4 y 5,8 °C de aquí hasta el 2100; estos cambios afectarán gravemente el ecosistema y nuestras economías".[16]

Cuando comenzaron las preocupaciones por la capa de ozono, los refrigerantes más usados eran los clorofluorocarbonos R12 y R22. El primero usado principalmente en aire acondicionado de vehículos y pequeños refrigeradores; y el segundo usado en aire acondicionado, refrigeradores residenciales y comerciales. Actualmente se está empleando el R134a y ciertas mezclas que no atentan contra la capa de ozono en remplazo de los compuestos clorados.

2.2 Descripción del refrigerante R134a

El refrigerante R134a se ha convertido en un sustituto clave de los refrigerantes CFC y HCFC (Clorofluorocarbonos e Hidroclorofluorocarbonos); es seguro para el medio ambiente y no daña la capa de ozono. Como refrigerante tiene similares características de rendimiento energético y capacidad que el R12 y su toxicidad es baja.

El R134a actualmente se usa en numerosas aplicaciones de refrigeración, entre las que están incluidos las vitrinas de supermercado, las salas refrigeradas y los refrigeradores domésticos. Su uso se extiende a sistemas de aire acondicionado en el área automotriz y residencial, la refrigeración comercial e incluso enfriadores centrífugos.

16 NACIONES UNIDAS. *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. [en línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_clim %C3%A1tico> [consulta: 13 noviembre 2013].

2.2.1 Propiedades del refrigerante R134a

Para nuestra investigación estamos usando el refrigerante Genetron de la marca Honeywell; la tabla 2-1 describe las propiedades más importantes del refrigerante R134a.

Tabla 2-1 Propiedades Físicas R134a. Fuente [14].

Nombre químico	1,1,1,2 Tetrafluoroetano
Fórmula molecular	CH2FCF3
Peso molecular	102.03
Punto de ebullición [IV] (°C)	-25.9
Punto de congelación [IV] (°C)	-96.6
Temperatura critica [I] (°C)	101.06
Presión critica (kPa)	4059
Volumen critico [I] (m^3/kg)	0.002
Densidad critica [I] (kg/m^3)	511.9
Densidad del líquido [III] (kg/m^3)	1207
Capacidad térmica del líquido [III] (kJ/kg · °K)	1.425
Capacidad térmica del vapor [III,IV] (kJ/kg · °K)	0.851
Calor de evaporación en el punto de ebullición (kJ/kg)	216.98
Presión del vapor [III] (kPa)	665
Conductividad térmica del líquido [III] (W/m · °K)	0.081
Conductividad térmica del vapor [III] (W/m · °K)	0.0138
Límites de inflamabilidad en aire (% volumen)	Ninguno [II]
Temperatura de autoignición (°C)	770
Potencial de destrucción del Ozono (ODP-R11=1)	0
[I] *Refprop v6.01 (NIST).*	
[II] *Límites de inflamabilidad medidos utilizando ASTM E681 con fuente de ignición de cocina activada eléctricamente según ASHRAE norma 34.*	
[III] *Todas las mediciones hechas a 25 ˚C si no se indica lo contrario.*	
[IV] *a 101.3 kPa.*	

Otro aspecto importante es conocer las presiones a las que trabaja este refrigerante, de esto dependen los valores que se alcanzan tanto en entalpía y entropía; la tabla 2-2 muestra la variación de la presión vs la temperatura en el refrigerante R134a.

Tabla 2-2 Presión vs. Temperatura R134a. Fuente [14].

Temperatura (°F)	Presión (Psig)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
-40	14.8 ("Hg Vac)	-40.0	-0.50
-35	12.5 ("Hg Vac)	-37.5	-0.43
-30	9.8 ("Hg Vac)	-35.0	-0.35
-25	6.9 ("Hg Vac)	-32.5	-0.26
-20	3.7 ("Hg Vac)	-30.0	-0.17
-15	0.1 ("Hg Vac)	-27.5	-0.06
-10	1.9	-25.0	0.05
-5	4.1	-22.5	0.18
0	6.5	-20.0	0.32
5	9.1	-17.5	0.47
10	11.9	-15.0	0.63
15	15.0	-12.5	0.81
20	18.4	-10.0	1.00
25	22.1	-7.5	1.20
30	26.1	-5.0	1.42
35	30.4	-2.5	1.66
40	35.0	0.0	1.92
45	40.1	2.5	2.19
50	45.4	5.0	2.49
55	51.2	7.5	2.80
60	57.4	10.0	3.14
65	64.0	12.5	3.49
70	71.1	15.0	3.87
75	78.7	17.5	4.28
80	86.7	20.0	4.71
85	95.2	22.5	5.16
90	104.3	25.0	5.64
95	113.9	27.5	6.15
100	124.2	30.0	6.69
105	135.0	32.5	7.26
110	146.4	35.0	7.86
115	158.4	37.5	8.49
120	171.2	40.0	9.16
125	184.6	42.5	9.85

130	198.7	45.0	10.59
135	213.6	47.5	11.36
140	229.2	50.0	12.17
145	245.7	52.5	13.02
150	262.9	55.0	13.91

Honeywell al ser un fabricante que ha desarrollado el R134a para su comercialización nos proporciona de datos importantes a la hora de conocer este gas; la tabla 2-3 muestra datos de rendimiento del refrigerante.

Tabla 2-3 Datos de rendimiento R-134a Adaptado [14].

Presión de Evaporación.	9.10 psig	164 kPa absoluto
Presión de Condensación.	97.0 psig	770 kPa absoluto
Relación de Compresión	4.69	
Temperatura de descarga del compresor	97.9 °F	36.6 °C
Temperatura del gas de aspiración °F (°C)	5 °F	–15 °C
Volumen específico de vapor de aspiración	1.93 ft^3/lb	0.12 m^3/kg
Calor Latente de Vaporización.	90.1 Btu/lb	208.5 kJ/kg
Efecto neto de refrigeración.	63.6 Btu/lb	147.9 kJ/kg
Coeficiente de rendimiento (C.O.P.)	4.61	
HP por tonelada de refrigeración	1.02	
Flujo de refrigerante por tonelada	3.15 Lb/min	6.78 por kw(g/s)
Volumen de gas de succión del compresor	6.08 por ton (in^3/min.)	0.82 por kw (l/s)
Líquido distribuido por ton	73.3 in^3/min	5.70 por kW (ml/s)
Unidades Inglesas indican rendimiento por tonelada en condiciones estándar (5 °F evaporación y condensación 86 °F)		
Unidades SI la refrigeración de carga = 1 kw (-15 °C evaporación y 30 °C condensación).		

2.2.2 Diagrama Presión vs Entalpía del refrigerante R134a

La figura 2.1 nos muestra los valores de presión y entalpía para el refrigerante R134a; en el diagrama la presión está indicada por las líneas horizontales trazadas sobre las líneas verticales de la entalpía, en la parte central se encuentra el área del vapor húmedo, la temperatura corresponde a la temperatura de ebullición; el área de vapor húmedo está

rodeada de curvas límite con el contenido de vapor X=0 hasta X=1. A la izquierda aparece el refrigerante líquido, la temperatura está por debajo de la temperatura de ebullición; el refrigerante está subenfriado. A la derecha se muestra el refrigerante gaseoso, la temperatura está por encima de la temperatura de ebullición; el refrigerante está sobrecalentado.

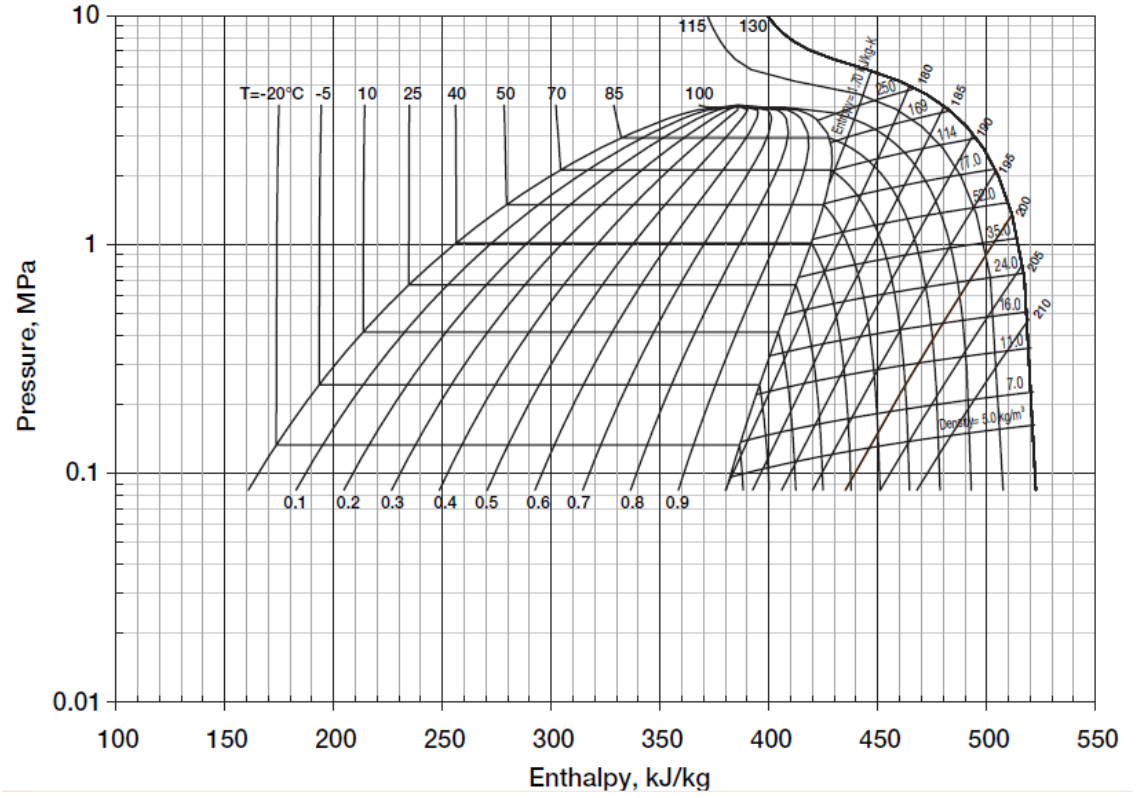


Figura: 2.1 Diagrama Presión vs. Entalpía R-134a. Fuente [14].

2.3 Manejo y almacenamiento del refrigerante R134a

Los cilindros que contienen R134a deben estar claramente identificados, se deben almacenar en un lugar ventilado, frío y seco, alejado de calor, productos químicos corrosivos, explosivos, etc. El R134a líquido se expande considerablemente cuando se calienta, esto reduce la cantidad de espacio para vapor que queda en el cilindro; una vez que el cilindro queda totalmente lleno de líquido cualquier posterior aumento de la temperatura puede causar su explosión provocando lesiones graves. No se debe permitir que el cilindro supere los 52°C.

Una vez vacío el cilindro, se debe cerrar la válvula y poner el tapón, la idea es evitar la contaminación del medio ambiente.

De acuerdo con la norma ASHRAE 34, el refrigerante R134a está clasificado en el grupo de seguridad A1, es decir, no es inflamable a la presión de 1 atmósfera (101,3 KPa) y 18°C esto lo convierte en un elemento seguro a la hora de utilizarlo.

En el caso de producirse una fuga considerable de vapor de refrigerante R134a, se debe evacuar inmediatamente la zona; los vapores pueden concentrarse en el suelo desplazando el oxígeno y causando dificultad para respirar.

2.4 Carga de refrigerante en un sistema

Antes de realizar la carga de refrigerante al sistema es necesario inspeccionar el estado del equipo y realizar la limpieza de todas las tuberías; el análisis los realizamos en refrigeradores no frost de la línea Boreal marca Ecasa, los equipos se encuentran sin el compresor instalado y se observa contaminantes en el sistema.

2.4.1 Limpieza de un sistema de refrigeración

La limpieza de las tuberías es recomendada en los casos en que existan sospechas de altos niveles de contaminación, humedad y residuos. La figura 2.2 muestra los materiales necesarios para proteger al operador y realizar la limpieza del sistema de refrigeración doméstica.

Figura: 2.2 Materiales para limpiar el sistema de refrigeración. Adaptado [9].

A continuación describiremos paso a paso el procedimiento que se debe seguir a la hora de realizar la limpieza de las tuberías que conectan tanto el evaporador como el condensador:

1. Conectar la válvula de descarga del cilindro con gas nitrógeno al puerto central del juego de manómetros y el puerto de carga de alta presión a la tubería de retorno de gas, figura 2.3.

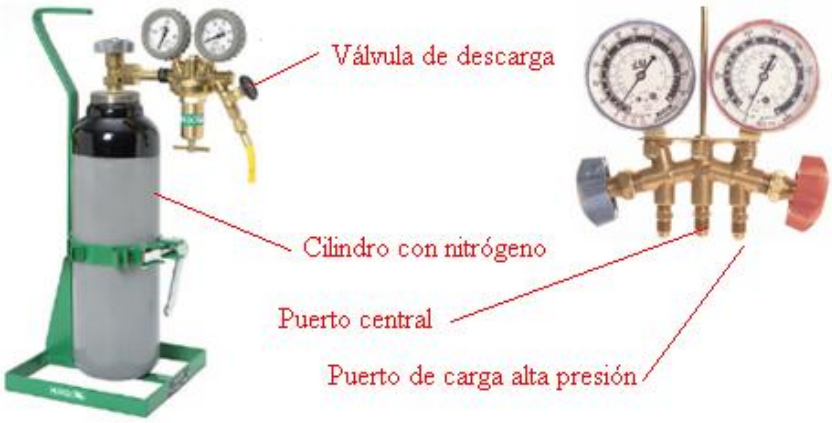


Figura: 2.3 Cilindro con gas nitrógeno y manómetros. Adaptado [9].

2. Abrir la válvula del cilindro con nitrógeno; se debe tener la precaución que la descarga no exceda los 200 psi para evitar daños en el evaporador; el nitrógeno fluye por la tubería de retorno hacia el evaporador y sale por el tubo capilar; figura 2.4.

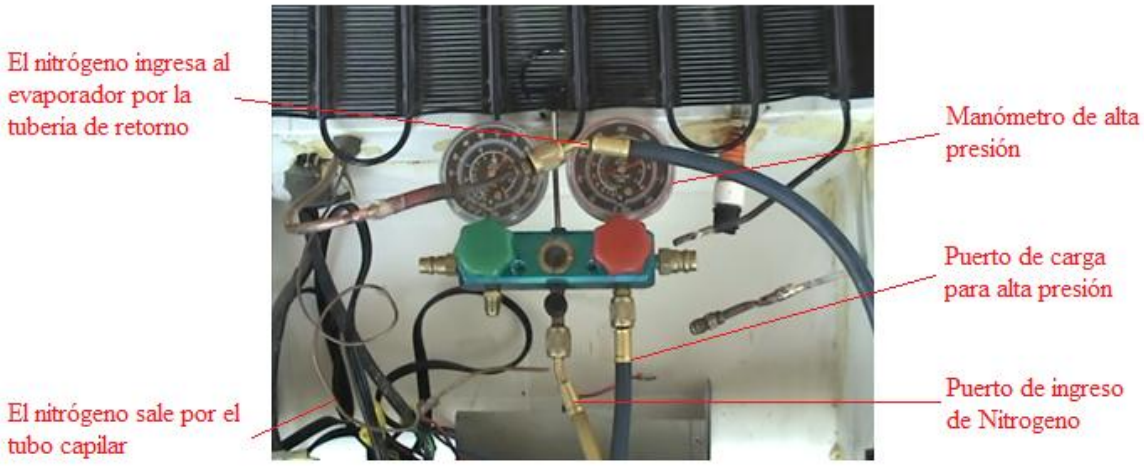


Figura: 2.4 Limpieza del Evaporador y Tubo Capilar.

3. Repetimos el proceso para la limpieza del sistema de condensación; primero conectamos la válvula de descarga del cilindro con gas nitrógeno al puerto central del juego de manómetros y el puerto de carga de alta presión a la salida del condensador, figura 2.5.
4. Abrir la válvula del cilindro con nitrógeno, el nitrógeno fluye a través de todo el condensador.

Figura: 2.5 Limpieza del Condensador.

5. Seguir el mismo procedimiento para limpiar el sistema de compensación, figura 2.6. La figura 2.7 muestra los residuos que se encontraron en el sistema de condensación.

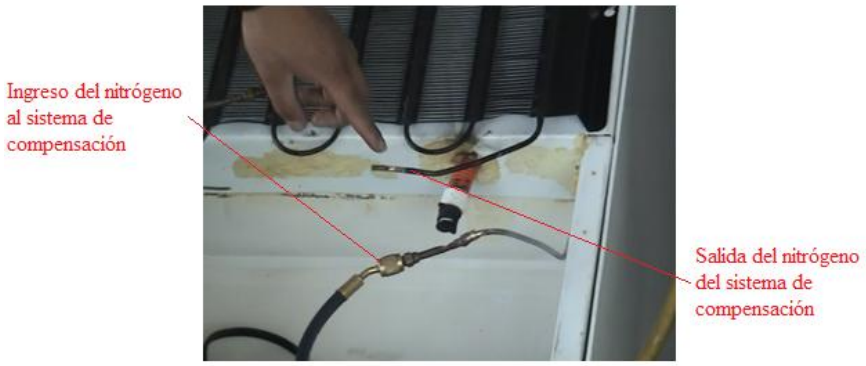


Figura: 2.6 Residuos del sistema de Condensación.

Figura: 2.7 Residuos del sistema de Condensación.

2.4.2 Montaje de compresor

Una vez limpias todas las tuberías del sistema realizamos el montaje del compresor, conexión de tuberías, generación de vacío, carga de refrigerante, detección de fugas, y finalmente el almacenamiento de datos, toma de temperaturas y consumo de energía. A continuación describiremos paso a paso el procedimiento que se debe seguir:

1. Identificar las tuberías de proceso, carga y descarga en el compresor, figura 2.8.
2. Acoplar el compresor a la base del refrigerador mediante uniones empernadas.

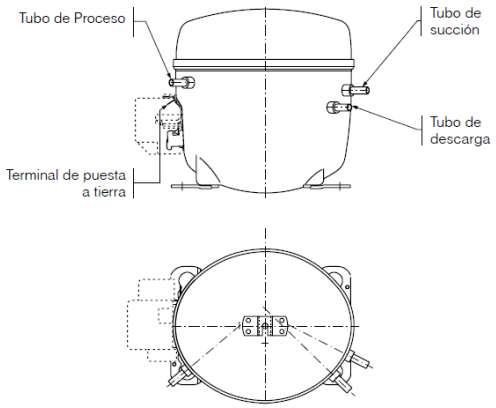


Figura: 2.8 Tuberías del compresor Embraco. Fuente [15].

3. Eliminar las tuberías averiadas; cortar y doblar la tubería de cobre de acuerdo a las dimensiones apropiadas para unir todos los componentes del sistema, figura 2.9.

Figura: 2.9 Montaje de las cañerías del compresor.

4. Preparar y limpiar las juntas para la unión por medio de soldadura con propano-oxígeno utilizando electrodo de plata al 35%, figura 2.10.

Figura: 2.10 Ensamble de tubería y preparación de juntas.

5. Conectar el ingreso del filtro secador con la salida del condensador, se debe tener la precaución de no contaminarlo, figura 2.11.

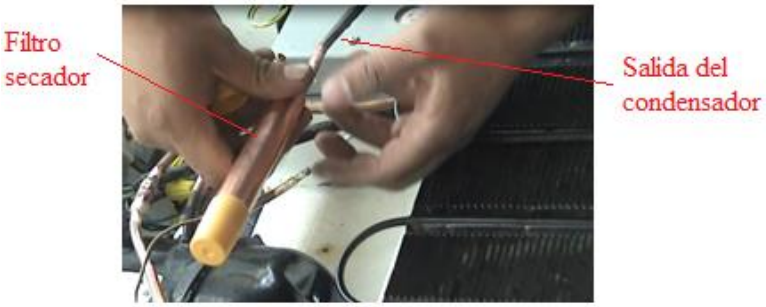


Figura: 2.11 Conexión del filtro secador.

6. Conectar la salida del filtro secador al tubo capilar, es necesario realizar un corte inclinado al capilar; este corte facilita la conexión y el ingreso del fluido refrigerante, figura 2.12.

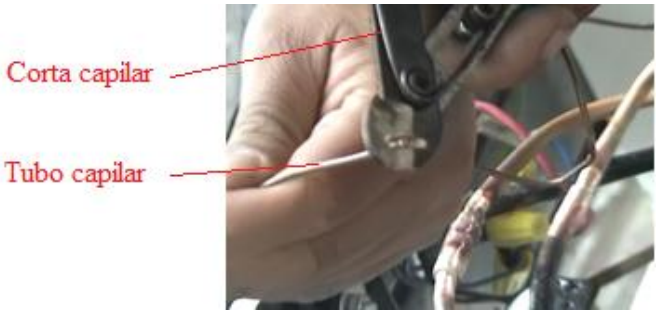


Figura: 2.12 Corte del tubo capilar.

7. Enrollar el tubo capilar alrededor del filtro secador y colocarlos en la posición adecuada; esta posición falicita el proceso de expansión, figura 2.13.

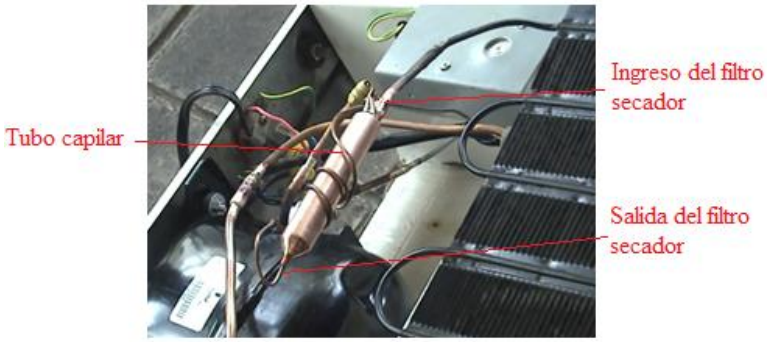


Figura: 2.13 Enrollado del tubo capilar sobre el filtro secador.

8. Soldar las tuberías de ingreso y salida acorde a lo abajo indicado, figura 2.14:

I. Tubería de desacarga del compresor al ingreso del sistema de compensación.
II. Salida del sistema de compensación al ingreso del condensador .
III. Salida del condensador al ingreso del filtro secador.
IV. Salida del filtro secador al tubo capilar.
V. Tubería de retorno del evaporador a la succion del compresor.
VI. Válvula de carga al tubo de proceso.

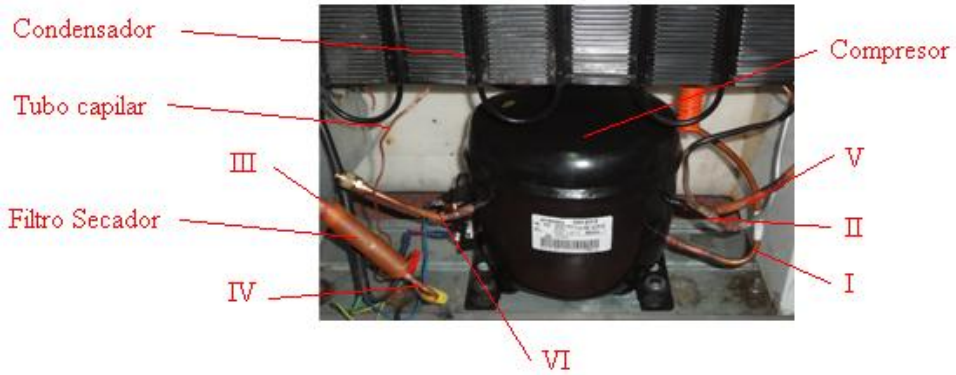


Figura: 2.14 Uniones soldadas del sistema de refrigeración.

9. Verificar el buen estado de las conexiones eléctricas, capacitor, relé, protector térmico y temporizador figura 2.15.

Figura: 2.15 Conexiones eléctricas.

2.4.3 Generación de vacío en el sistema y carga de refrigerante R134a

Una vez instalado el compresor realizamos el vacío en el sistema de refrigeración; para esto es necesario:

1. Revisar el nivel de aceite de la bomba de vacío, figura 2.16.

Figura: 2.16 Bomba de vacío.

2. Conectar el puerto central del juego de manómetros a la bomba de vacío, figura 2.17 y el puerto de carga del manómetro de baja presión a la válvula de carga del compresor, figura 2.18. La bomba succiona el vapor de agua o gotas de agua que pueda contener el sistema de refrigeración.

Figura: 2.17 Conexión de manómetro a bomba de vacío.

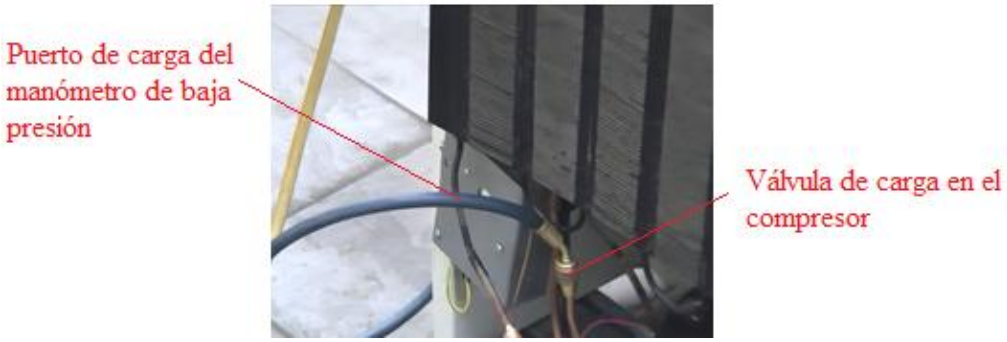


Figura: 2.18 Conexión de manómetro al compresor.

3. Encender la bomba y abrir la perilla del manómetro de baja presión, figura 2.19.

Figura: 2.19 Manómetro de baja presión.

4. Conectar la bomba de vacío a un vacuómetro, figura 2.20. El vacío se debe realizar durante 30 o 40 minutos para obtener el vacío adecuado, figura 2.21.

Figura: 2.20 Conexión del vacuómetro a la bomba de vacío.

Figura: 2.21 Medida de vacío.

5. Conectar el puerto central del juego de manómetros a la válvula de extracción que ha sido previamente instalada en la lata de refrigerante R134a, figura 2.22. El puerto de carga del manómetro de baja presión debe ser conectado a la válvula de carga del compresor, figura 2.18. Finalmente abrimos las válvulas del juego de manómetros y el gas empieza a ingresar al sistema; mediante el uso de una balanza digital se asegura que la carga sea de 120 gramos cantidad indicada por el fabricante del refrigerador.

Figura: 2.22 Carga de refrigerante.

6. Finalmente se debe detectar las fugas posibles de gas en todas las uniones soldadas, figura 2.23. En el caso de presentarse fugas realizar un nuevo vacío y volver a soldar las uniones defectuosas.

Figura: 2.23 Detección de fugas.

Para preservar las condiciones de vida en el planeta que habitamos, recomendamos que se evite la liberación de gases a la atmósfera. En el caso de haber fugas el procedimiento correcto para esta operación es recoger y posteriormente reciclar o neutralizar estos productos.

En el caso de que sea necesario retirar el compresor o cualquier accesorio, estos no deben ser arrogados al medio ambiente. Los componentes deben ser reciclados conforme la clasificación de los materiales utilizados (ferrosos, no ferrosos, polímeros, aceites).

2.5 Almacenamiento de datos para realizar análisis

Para realizar el análisis necesitamos obtener los valores del consumo de energía del equipo y las temperaturas del sistema; nos apoyamos en un medidor de calidad de energía que conectado al equipo de refrigeración almacena datos de amperaje, voltaje, consumo de potencia y energía, figura 2.24; y del equipo Compac Río con módulo de termocuplas para almacenar los valores de temperatura en varios puntos del sistema de refrigeración, figura 2.25.

Figura: 2.24 Medidor de calidad de energía.

Figura: 2.25 Compac Río.

El procedimiento para instalar los instrumento es el siguiente:

1. Conectar el medidor de calidad de energía a la línea de fase y neutro que alimentan al compresor, figura 2.26.

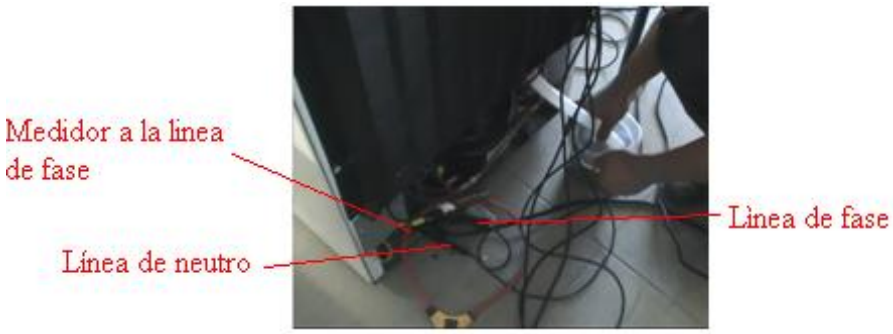


Figura: 2.26 Conexión del medidor de calidad de energía.

2. Programar el medidor de calidad de energía para que almacene los valores de potencia consumida durante 1-3 días, luego de este tiempo los datos pueden ser descargados en un archivo digital.

3. Conectar las termocuplas tipo K al módulo de termocuplas del Compac Río, figura 2.27. El equipo se encuentra conectado a un servidor el cual almacena los datos en un computador mediante programación en lab view, figura 2.28; las termocuplas están conectadas en el ingreso del evaporador, cámara de congelador, cámara de refrigeración, salida del compresor, retorno al compresor y salida del condensador, figura 2.29.

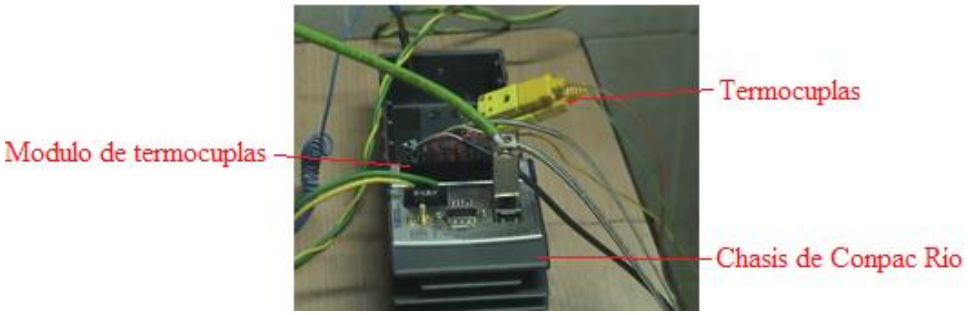


Figura: 2.27 Compac Río con módulo de termocuplas.

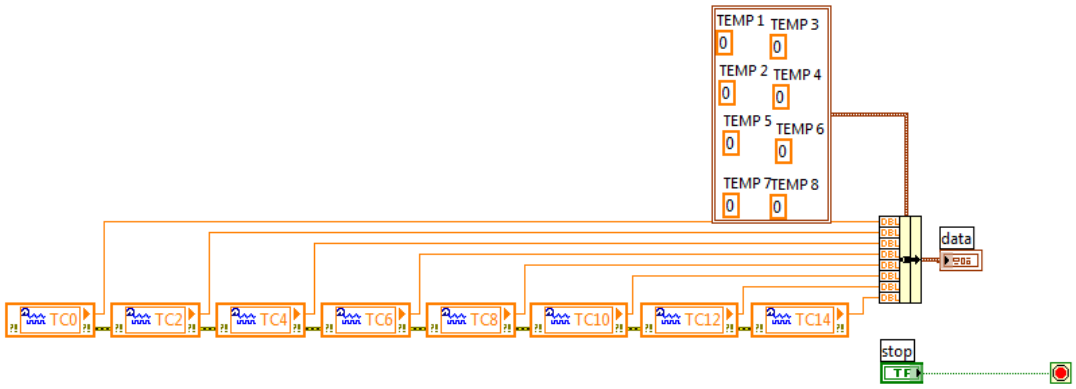


Figura: 2.28 Lenguaje gráfico para almacenamiento de datos en Lab View.

Figura: 2.29 Conexión de termocuplas al sistema de refrigeración.

2.6 Obtención y análisis del ciclo de refrigeración

Para graficar el ciclo de refrigeración del sistema en análisis, es necesario conocer las temperaturas en los puntos indicados de la figura 2.30, además con estos datos podemos calcular varios parámetros que nos permitirán conocer el COP del sistema de refrigeración.

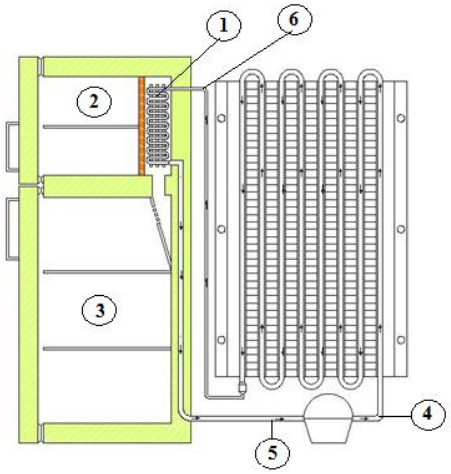


Figura: 2.30 Puntos seleccionados para toma de temperatura.

La tabla 2-4 muestra la temperatura máxima y mínima, obtenida mediante termocuplas en varios puntos del sistema de refrigeración, los datos son tomados durante un día completo, figura 2.31.

Tabla 2-4 Temperatura máxima y mínima en varios puntos del sistema.

	TEMPERATURA °C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Ingreso al Evaporador	Congelador	Refrigerador	Descarga del Compresor	Retorno al Compresor	Salida del condensador
Máximo	6.25	-7.52	5.51	62.23	31.35	33.24
Mínimo	-27.17	-17.16	3.14	25.35	-9.44	9.83

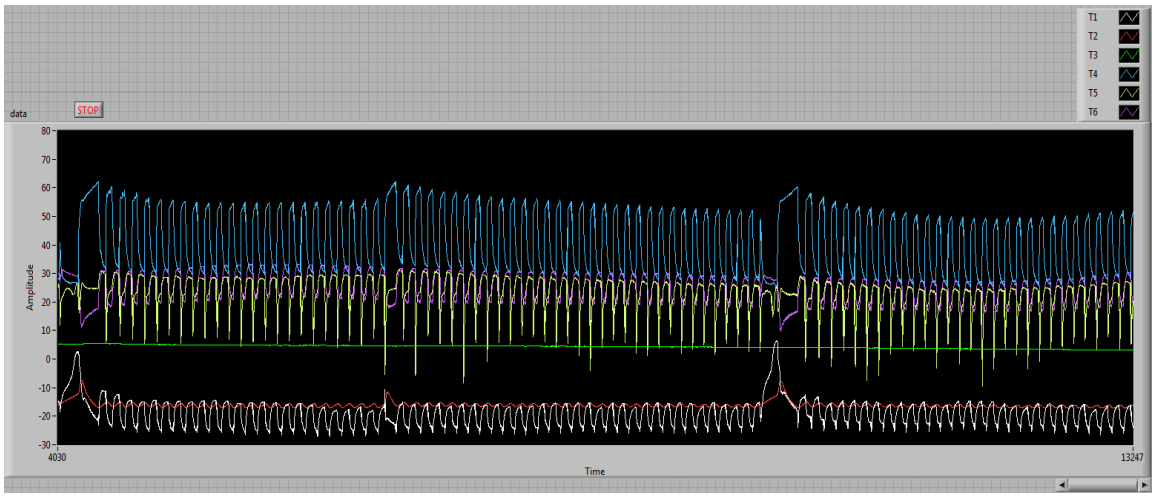


Figura: 2.31 Temperaturas del sistema R134a.

Las figura 2.32 muestra la variación de temperatura durante un día en el evaporador; el termopar utilizado para tomar estas temperaturas es tipo T (-200 °C hasta +350°C); podemos observar en la gráfica que durante el ciclo de trabajo del equipo la temperatura se encuentra entre -14°C y -27°C, existen unos picos de 2°C y 6°C que ocurren aproximadamente cada 16 horas cuando el compresor está apagado y se produce el descongelamiento del evaporador gracias a la resistencia del sistema no frost.

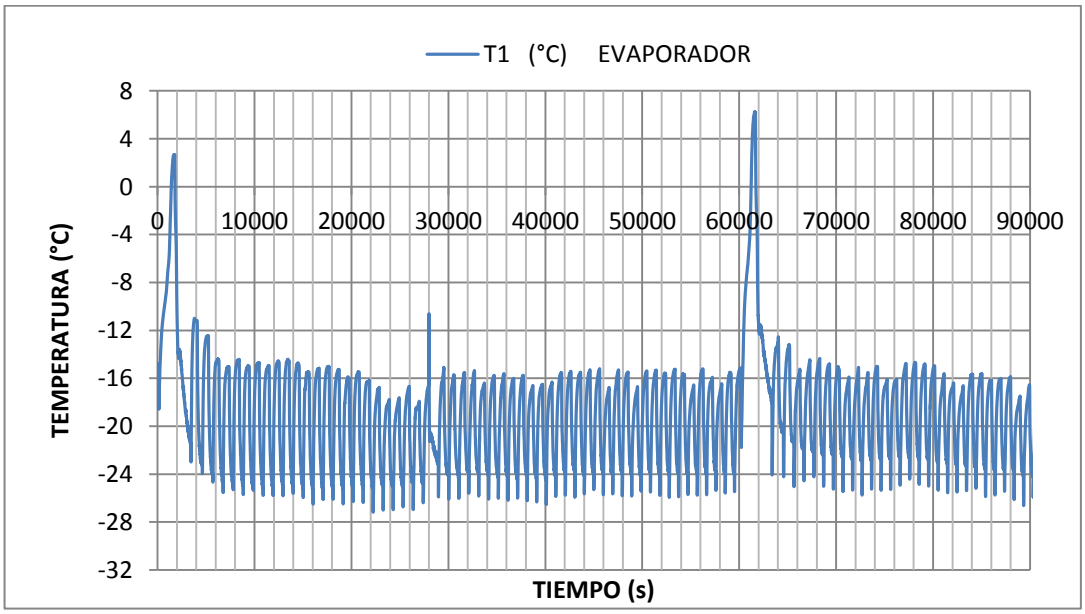


Figura: 2.32 Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R134a.

Las figura 2.33 muestra la variación de temperatura durante un día en el interior del congelador; el termopar utilizado para tomar estas temperaturas es tipo J (0 °C hasta -

760°C); podemos observar en la gráfica que durante el ciclo de trabajo del equipo la temperatura se encuentra entre -15°C y -17°C, existen unos picos de -8°C que ocurren aproximadamente cada 16 horas cuando el compresor está apagado y se produce el descongelamiento del evaporador gracias a la resistencia del sistema no frost.

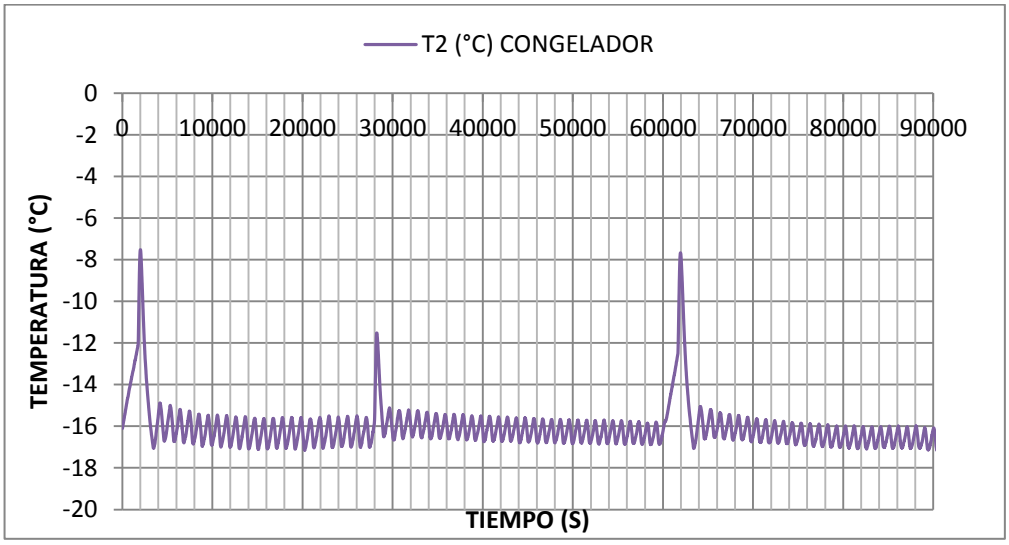


Figura: 2.33 Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R134a.

Las figura 2.34 muestra la variación de temperatura durante un día en el interior del refrigerador; el termopar utilizado para tomar estas temperaturas es tipo J (0 °C hasta -760°C); podemos observar en la gráfica que durante el ciclo de trabajo del equipo la temperatura se encuentra entre 4°C y 6°C, a diferencia de las otras gráficas no se producen picos cuando ocurre el descongelamiento del evaporador, por el contrario la temperatura permanece en ese intervalo.

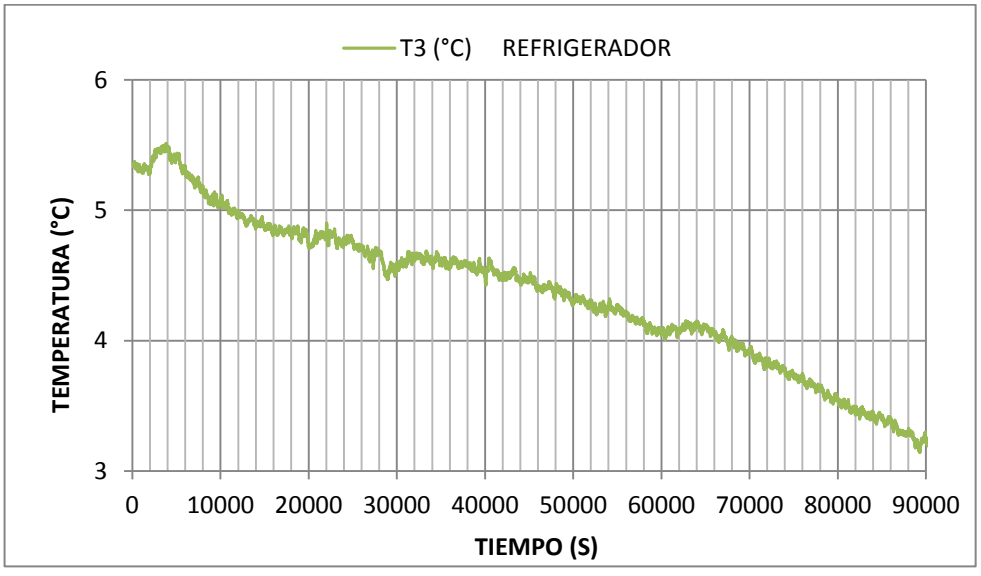


Figura: 2.34 Temperatura vs.Tiempo en el Refrigerador con R134a.

Las figura 2.35 muestra la variación de temperatura durante un día a la salida del compresor; el termopar utilizado para tomar estas temperaturas es tipo K (-200°C hasta +1370°C); podemos observar en la gráfica que durante el ciclo de trabajo del equipo la temperatura se encuentra entre 30°C y 55°C, existen unos picos de 25°C y 60°C que ocurren aproximadamente cada 16 horas cuando el compresor está apagado y se produce el descongelamiento del evaporador gracias a la resistencia del sistema no frost.

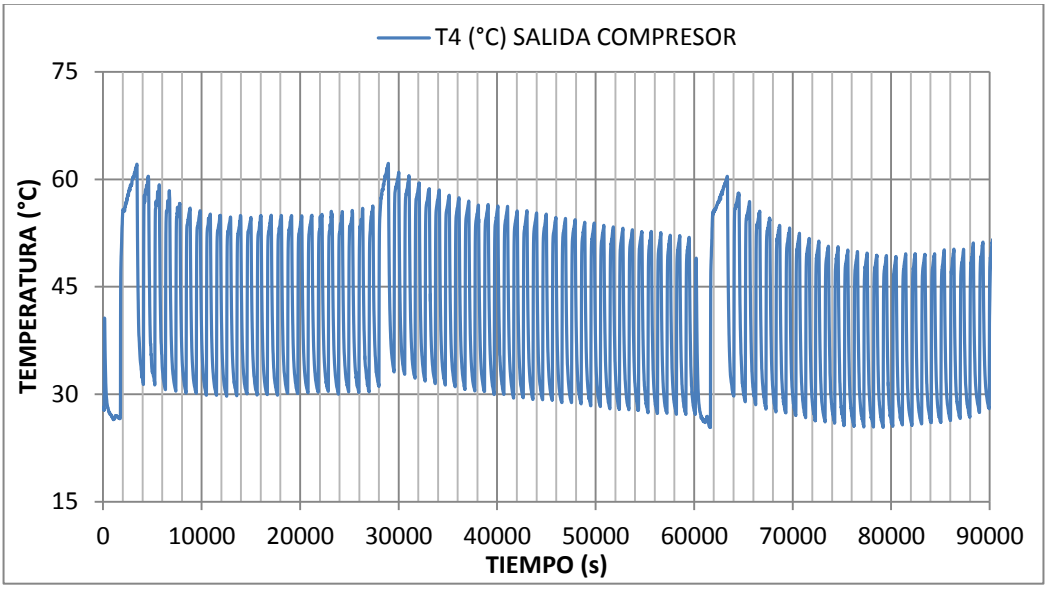


Figura: 2.35 Temperatura vs.Tiempo salida del compresor con R134a.

Las figura 2.36 muestra la variación de temperatura durante un día en el ingreso del compresor; podemos observar en la gráfica que durante el ciclo de trabajo del equipo la temperatura se encuentra entre 5°C y 30°C.

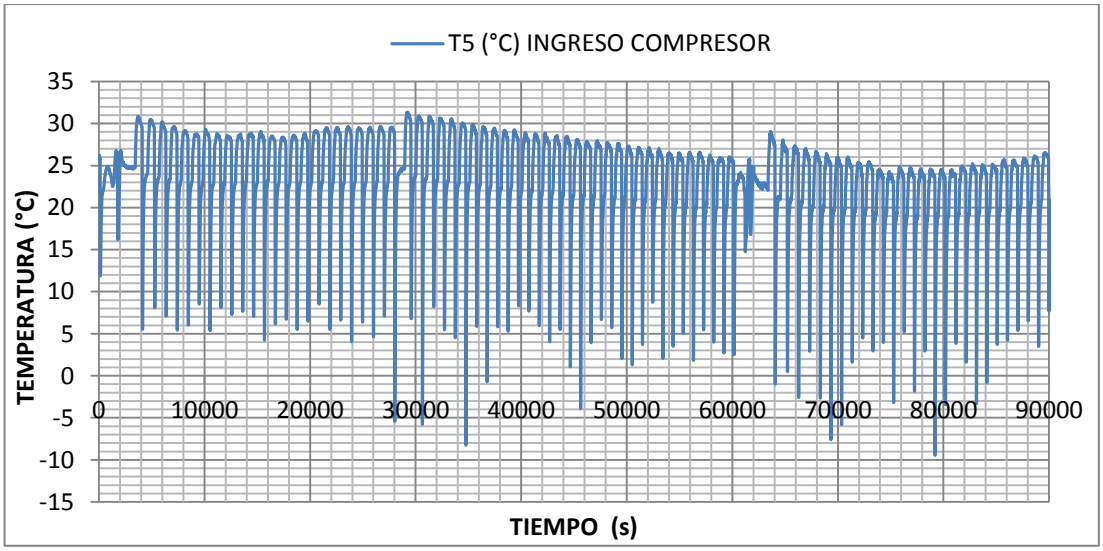


Figura: 2.36 Temperatura vs.Tiempo ingreso del compresor con R134a.

Las figura 2.37 muestra la variación de temperatura durante un día en la salida del condensador; podemos observar que la temperatura se encuentra entre 20°C y 30°C, existen unos picos de 10°C.

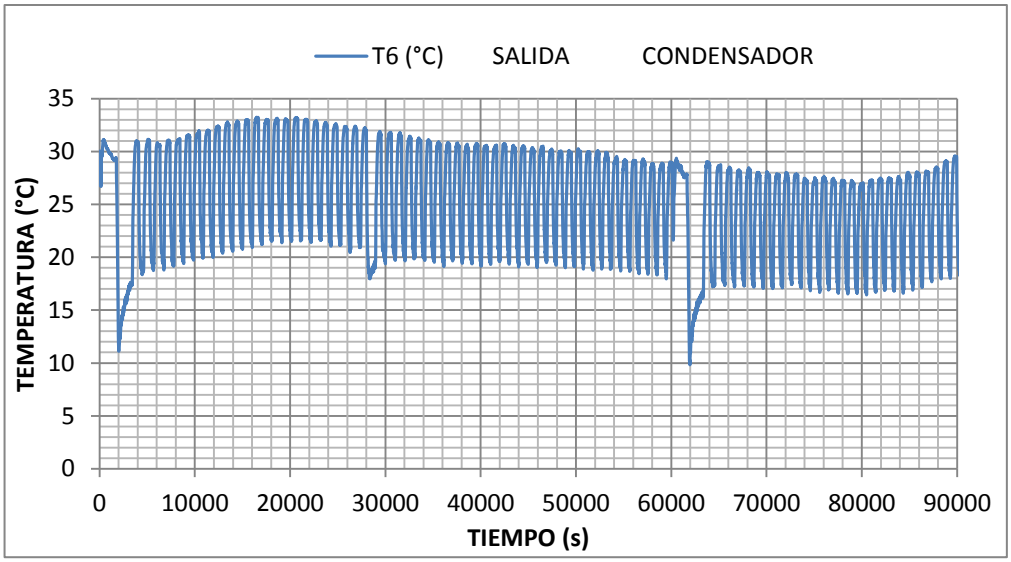


Figura: 2.37 Temperatura vs.Tiempo salida del condensador con R134a.

2.6.1 Cálculo del COP y obtención del ciclo de refrigeración con R134a

Una vez que contamos con las temperaturas del sistema, usamos esta información como datos de partida para obtener el ciclo de refrigeración y el COP, nos apoyamos en las *ecuaciones 1 la 7* [17] de la termodinámica así como también del software EES "Engineering Equation Software". Las ecuaciones necesarias son:

Entrada de potencia al compresor.

$$\dot{W}_{Entrada} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Ecuación [1].

17 CENGEL, Yunus y BOLES Michael, Termodinámica, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002

Tasa de remoción de calor del espacio refrigerado.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

Ecuación [2].

Tasa de remoción de calor del refrigerante al ambiente.

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Ecuación [3].

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{Entrada}$$

Ecuación [4].

Coeficiente de desempeño del refrigerador.

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{Entrada}}$$

Ecuación [5].

Estrangulamiento

$$h_4 \cong h_3$$

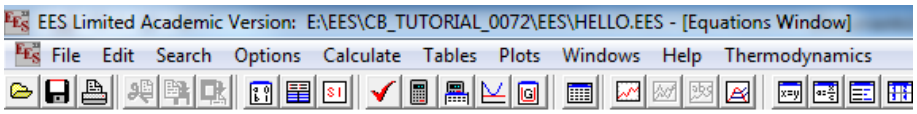
Ecuación [6].

Eficiencia térmica de una máquina térmica.

$$\eta_{Térmica} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

Ecuación [7].

Para el análisis suponemos condiciones estables de operación, e insignificantes cambios en las energías cinética y potencial. La figura 2.38 indica la programación en EES para obtener la tasa de remoción de calor del espacio refrigerado, del refrigerante al ambiente, el coeficiente de desempeño del refrigerador y la eficiencia.




```
"CICLO IDEAL DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR GAS R134a COMPRES

x[1]=1
T[1]=-9,44
P[1]=pressure(R134a; T=T[1]; x=x[1])
h[1]=enthalpy(R134a; T=T[1]; x=x[1])
s[1]=entropy(R134a; T=T[1]; x=x[1])

"PROCESO 2-3 RECHAZO DE CALOR A PRESION CONSTANTE EN UN CONDENSADOR"

s[2]=s[1]
T[2]=62,23
P[2]=pressure(R134a; T=T[2];s=s[2])
h[2]=enthalpy(R134a; T=T[2]; s=s[2])

"PROCESO 3-4 ESTRANGULAMIENTO EN EL TUBO CAPILAR"

x[3]=0
T[3]=33,24
P[3]=P[2]
h[3]=enthalpy(R134a; T=T[3]; x=x[3])
s[3]=entropy(R134a;T=T[3]; x=x[3])


"PROCESO 4-1 ABSORCION DE CALOR A PRESION CONSTANTE EN UN EVAPORADOR"

h[4]=h[3]
P[4]=P[1]
T[4]=-27,17
s[4]=entropy(R134a; T=T[4]; h=h[4])


"ENTRADA DE POTENCIA AL COMPRESOR"

C=866,6676              "KJ/h Catálogo Embraco compresor modelo EGAS80HLR"
m=((C/(h[2]-h[1]))/3600)  "Flujo másico en Kg/s"
W_Comp=m*(h[2]-h[1])    "Trabajo en Kw"

"TASA DE REMOCION DE CALOR DEL ESPACIO REFRIGERADO"

Q_Evap=m*(h[1]-h[4])      "Tasa de calor en Kw"


"TASA DE RECHAZO DE CALOR DEL REFRIGERANTE AL AMBIENTE"

Q_Cond=m*(h[2]-h[3])      "Tasa de calor en Kw"


"COEFICIENTE DE DESEMPEÑO"

COP=abs(Q_Evap/W_Comp)


"EFICIENCIA TERMICA DE LA MAQUINA TERMICA"


n_Ter=abs(1-(Q_Evap/Q_Cond))*100
```

Figura: 2.38 Cálculo del COP con EES.

Con la programación lista calculamos en el software y obtenemos los siguientes resultados, figura 2.39.

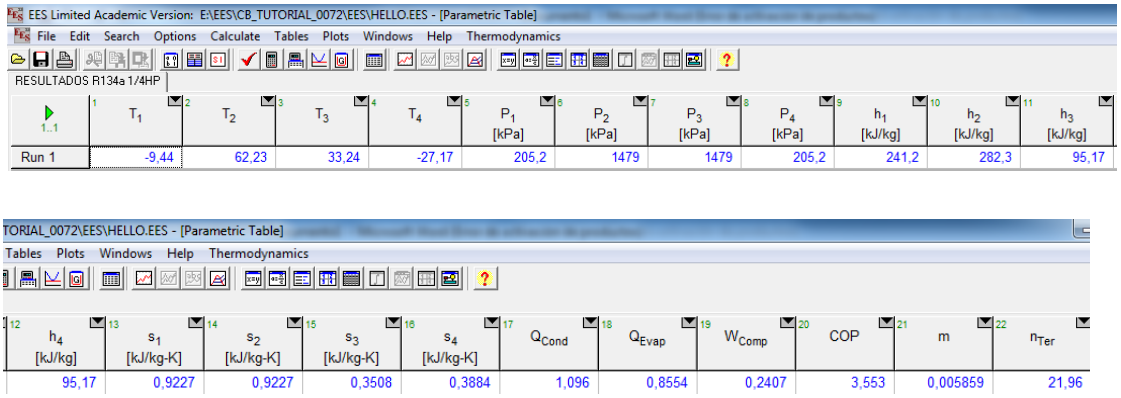


Figura: 2.39 Resultados ciclo de refrigeración R134a.

Es decir que bajo las condiciones y resultados del análisis este refrigerador elimina 3.5 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica que consume.

Además de los resultados numéricos el programa nos permite graficar los diagramas Temperatura-Entropía y Presión-Entalpía de nuestro sistema, figura 2.40 y figura 2.41.

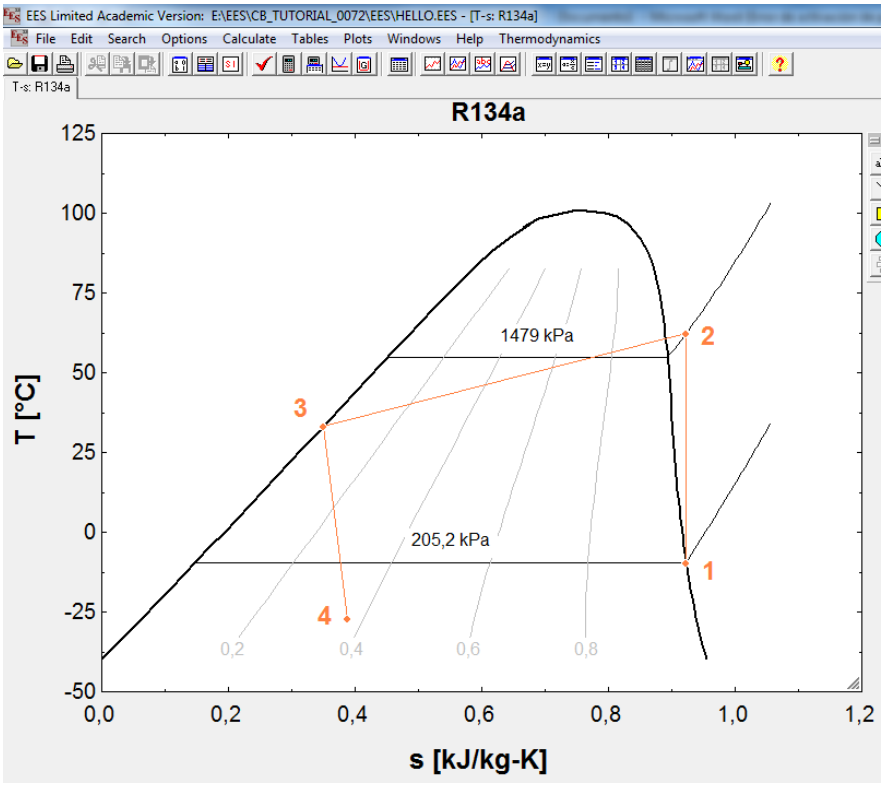


Figura: 2.40 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R134a.

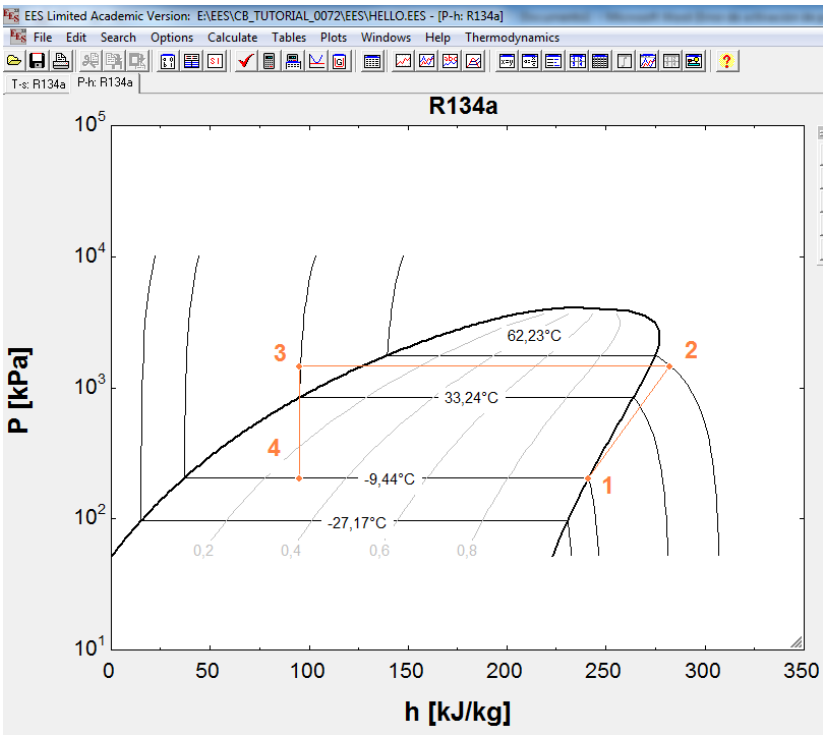


Figura: 2.41 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R134a.

2.7 Conclusiones

- La limpieza, el acoplamiento del compresor y demás elementos del sistema de refrigeración; así como el proceso de carga y verificación de fugas, requieren que el operador esté previamente capacitado y calificado para realizar la instalación, si bien es cierto el proceso no es complicado se necesitan de algunas destrezas, herramientas apropiadas y sobre todo mucha conciencia ambiental para no arrojar los desechos del sistema al ambiente.
- El uso de un software para obtener el Coeficiente de desempeño es muy útil a la hora de obtener las entalpías necesarias para resolver el problema; muchas de las veces el proceso de interpolación puede ser tedioso si lo hacemos manualmente; sin embargo es importante recordar que los principios de la termodinámica sobre la cual se basan dichos cálculos deben estar claros para una correcta programación.
- Como resultado de la investigación observamos que con una carga de 120 gramos de refrigerante R134a el equipo de refrigeración doméstica no frost analizado alcanza temperaturas en el congelador de -17.16°C, y en el refrigerador de hasta 5.51°C.
- Las temperaturas máximas alcanzadas en los elementos del sistema son: ingreso del evaporador -27.17°C, salida del compresor 62.23°C, ingreso al compresor 31.35°C y salida del condensador 33.24°C.
- El ciclo de refrigeración se desarrolla entre presiones de 205.2 kPa y 1479 kPa.
- El COP nos indica que el sistema elimina 3.5 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica que consume; la eficiencia térmica de este equipo está en 21.9 %.

3 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE USO DOMÉSTICO "NO FROST" QUE UTILIZA REFRIGERANTE R600a

3.1 Introducción

Los equipos de refrigeración domestica están presentes en un 99.5 % de los hogares americanos y europeos, los refrigerantes con los que operan estos electrodomésticos son de efectos dañinos para el medio ambiente contribuyendo al calentamiento global y al efecto invernadero. En la actualidad se buscan nuevas sustancias que realicen el mismo trabajo, pero con bajos índices de nocividad para el planeta.

Entre las soluciones aparecieron los fluidos derivados del petróleo conocidos como refrigerantes hidrocarburos, que en la actualidad son utilizados ampliamente en artefactos modernos, estos productos se ven a futuro como los posibles sustitutos de los compuestos halogenados.

Esta clase de sustancias son inflamables si se mezclan con aire y se encienden, es por ello que su uso debe cumplir las normas y precauciones de seguridad para evitar accidentes.

Entre los refrigerantes hidrocarburos está el R600a, en el presente capitulo haremos referencia a sus características, así como una aplicación práctica para analizar su comportamiento en un refrigerador de uso doméstico.

3.2 Descripción del refrigerante R600a

El isobutano es comercializado como refrigerante con el nombre R600a, es el posible sucesor de los refrigerantes que se están utilizando debido a que estos tienen un gran impacto ambiental, en la figura 3.1 se indica algunas presentaciones que se encuentran disponibles. Entre sus cualidades más significativas está la de ser un producto amigable con el medio ambiente, poseer una buena eficiencia energética y además es una sustancia que proviene de fuentes naturales.

Figura: 3.1 Envases comerciales de R600a. Adaptada de [14]

El R600a fue utilizado como refrigerante en congeladores en los años 40, en la actualidad se le ha encontrado una aplicación de mayor magnitud, sobre todo en el continente europeo donde se lo ocupa en equipos de refrigeración de uso doméstico como congeladores y refrigeradores.

El isobutano tiene propiedades diferentes a la de los compuestos halogenados, lo que involucra que los equipos deben tener un diseño adecuado para este refrigerante. En la tabla 3-1 se detallan las propiedades del R600a.

Tabla 3-1 Propiedades del refrigerante R600a. Adaptado [17].

Componente:	**HCs-600a (Isobutano)**
Nombre químico:	Metilpropano
Formula molecular:	$(CH_3)_3CH$
Peso molecular (kg/kmol)	58.1
Punto normal de ebullición (^oC)	-11.6
Temperatura critica en ^oC	135
Presión a -25 ^0C en bar abs.	0.58
Densidad del líquido a -25^oC (kg/l)	0.6
Densidad vapor entre -25/+32^oC (kg/m^3)	1.3

Capacidad volumétrica a -25/55/32 ^{o}C en kJ/m^{3})	373
Entalpia de vaporización a -25^{o}C en kJ/kg	376
Calor latente a 25 ^{o}C (kj/kg)	332
Presión a +20 ^{o}C en bar abs	3
Potencial de destrucción de la capa de ozono ()[18]	0
Potencial de calentamiento Global ()[19]	11
Temperatura de autoignicion. (^{o}C)	460

3.2.1 Presión y temperatura

Las presiones de trabajo del isobutano son más bajas que las de los compuestos halogenados por lo que los evaporadores de los refrigeradores trabajaran con presiones por debajo de la presión atmosférica. La tabla 3-2 presenta una tabla de presiones y temperaturas del R600a.

Tabla 3-2 Relación temperatura- Presión de R600a. Fuente [18]

TEMPERATURA C (F)	PRESION PSIA (kPa Abs)
-34.4 (-30)	5.4 (37.4)
-28.9 (-20)	7.0 (48.6)
-23.3 (-10)	9.0 (62.3)
-17.8 (0)	11.5 (79.0)
-12.2 (10)	14.3 (98.9)
-6.7 (20)	17.8 (122.5)

18 TECUMSEH. Technical Bulletin Hydrocarbons. [en línea] < http://www. tecumseh. com/en/south-america/library/~/media/South %20America /Files /English% 20Library/ Technical_Bulletin_Hidrocarbons_English.pdf > [consulta: 25 octubre 2013].

19 Idem.

-1.1 (30)	21.8 (150.3)
4.4 (40)	26.5 (182.7)
10.0 (50)	31.9(220.1)
15.6 (60)	38.2 (263.1)
21.1 (70)	45.3 (312.1)
26.7 (80)	53.3(367.6)
32.2 (90)	62.4 (430.3)
37.8(100)	72.6 (500.5)
43.3 (110)	83.9 (578.8)
48.9 (120)	96.6 (665.8)
54.4 (130)	110.5 (762.1)

3.2.2 Capacidad volumétrica

"El bajo nivel de presión está relacionado con una temperatura crítica elevada. Esto da una buena capacidad de enfriamiento, incluso con altas temperaturas de condensación". [20]

La capacidad volumétrica del R600a es aproximadamente un 55% la del R134a a una temperatura de condensación de 55°C, en consecuencia el volumen de barrido del compresor debe ser el doble del volumen de barrido para un compresor de R134a.

La capacidad de enfriamiento volumétrico se calcula con la densidad del gas y la diferencia de entalpia de evaporación.

20 DANFOS. *Practical Application of Refrigerant R600a Isobutane in Domestic Refrigerator Systems* . [en línea] <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/book-cep/diagrams/additional_diagrams/more_on_refrigerants/isobutane%28R600A%29-Danfos> [consulta: 10 enero 2014].

3.2.3 Diagrama presión entalpia

La figura 3.2 muestra los valores de presión y entalpia para el refrigerante R600a en el diagrama de Mollier o diagrama logarítmico. En el mismo la presión está indicada por las líneas horizontales trazadas sobre las líneas verticales de la entalpía, estas atraviesan la campana de saturación del refrigerante. En las intersecciones de las líneas de presión y entalpia podemos encontrar la temperatura de ebullición, entropía y volumen específico.

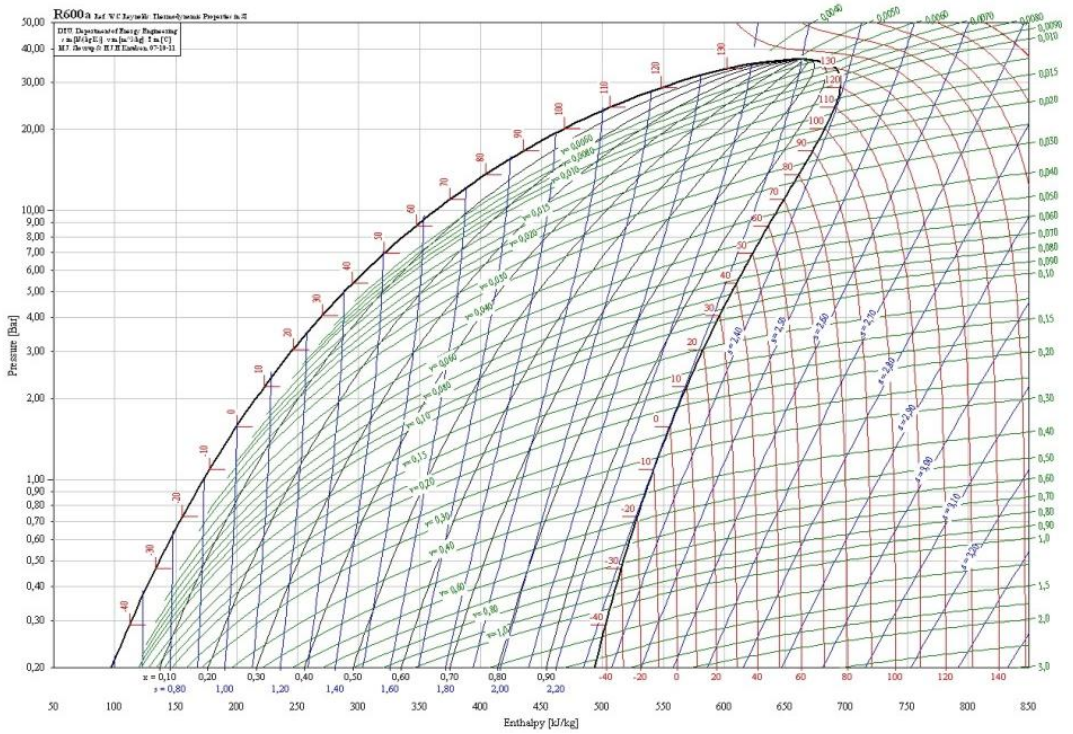


Figura: 3.2 Diagrama de Mollier para R600a. Fuente [19].

3.2.4 Normas de seguridad

En Europa se han diseñado la hoja técnica ICE TS 95006, que es una guía para pruebas de seguridad, también existe una adaptación a la norma IEC/ EN 600335-2-24, esta es una norma de seguridad eléctrica. A continuación mencionamos los criterios más importantes de estos documentos.

- Todo elemento de interruptor de corte eléctrico durante su operación normal se considera un foco de ignición. Esto incluye termostatos, contactos de puerta para luz dispositivos on/off y otros interruptores, como congelación rápida, relés de compresores, térmicos externos y relojes de desescharche.

- Todos los elementos se consideran focos de refrigerante debido a la posibilidad de fuga. Esto incluye evaporadores, condensadores, calentadores de puerta, tuberías y compresores.
- La carga máxima de refrigerante se fija en 150 gramos manteniendo la carga a un máximo de 25 % del nivel de explosión mínimo, el cual es aproximadamente 8 g/m^3 para cocinas estándares. Los riesgos de ignición son bajos aún si la distribución del refrigerante en caso de fuga es desigual.

El objetivo principal de estas consideraciones es separar los componentes que contienen refrigerante de los componentes eléctricos, para evitar una explosión en caso de fuga.

3.2.5 Inflamabilidad y seguridad

El R600a es un compuesto hidrocarburo inflamable por lo que su manejo debe cumplir con normas de seguridad estrictas. La tabla 3-3 indica los valores de inflamabilidad del R600a.

Tabla 3-3 Inflamabilidad del isobutano. Fuente [17]

Límite mínimo de explosión	1.5 %	Aprox. 38 g/m^3
Límite máximo de explosión	8.5%	Aprox. 203 g/m^3
Temperatura mínima de ignición	460 ^{o}C	

Las normas de seguridad son más escrupulosas en los procesos de producción debido a que se debe evitar que el isobutano se concentre en grandes cantidades. Es necesario que los componentes de un equipo de refrigeración para R600a sean los adecuados para este refrigerante. Los envases y compresores llevan una etiqueta de color amarillo que indica contener producto inflamable, figura 3.3.

Figura: 3.3 Etiqueta que indica la inflamabilidad del R600a. Adaptada de [17]

Tanto para su almacenamiento como su uso hay que tener ciertas consideraciones importantes que no deben pasarse por alto.

1. **Precauciones para su almacenamiento**

- Los recipientes de metal que se usan para el traslado de R600a deberían estar conectados a tierra y entre sí.
- Separar de los cilindros de oxígeno y otros oxidantes a una distancia prudente, se recomienda que esta sea aproximadamente 6 metros o separarlos con una barrera de materiales no combustibles este muro debe tener por lo menos 1.5 metros de altura y deberá contar con una resistencia al fuego de por lo menos media hora.
- Asegurar los cilindros en forma vertical para evitar que los tiren o se caigan
- Las bodegas deberán cumplir los reglamentos eléctricos nacionales para el almacenamiento de hidrocarburos.

2. **Precauciones para su uso**

- Proteja el cilindro contra averías.
- Utilizar mecanismos adecuados para su transporte ya que los cilindros no deben arrastrarse, deslizarse o dejarse caer.
- Manipular correctamente la válvula del cilindro no forzarla porque puede producir fugas.
- Es necesario tener herramientas y equipo eléctrico adecuado para trabajar con isobutano.
- Revisar la presencia de fugas con un instrumento apto para esta sustancia o realizar la prueba con una mezcla espumosa de jabón con agua. Nunca utilizar flama para hacer este proceso.

3.2.6 Carga del refrigerante R600a

La carga de R600a en un sistema de refrigeración en gramos será considerablemente menor con relación a la de otros refrigerantes, para poner un ejemplo la carga de isobutano representa un 45 % de la carga de R134a según datos empíricos. Se debe tener en cuenta que las cargas inadecuadas producen altos consumos energéticos. Para equipos pequeños, la

precisión debe ser de 1 gramo, la carga máxima de acuerdo con las normas de seguridad es de 150 gramos por refrigerador.

Figura: 3.4 Relación de cantidad de refrigerante R600a frente al R134a. Fuente [18].

3.2.7 Pureza del isobutano

La pureza del refrigerante se considera según su química y estabilidad, según la vida útil del compresor y del sistema y por supuesto desde su comportamiento termodinámico en el sistema. No existen normas internacionales que regulen la calidad para el R600a pero un referente es la norma alemana DIN 8960 que es una especificación sobre la seguridad de los hidrocarburos, en la tabla 3-4 se presentan las especificaciones para el isobutano.

Tabla 3-4 Especificaciones para R600a de acuerdo con la norma DIN 8960-1998. Fuente [17].

	Especificación	**Unidad**
Contenido de refrigerante	≥ 99.5	% masa
Impurezas orgánicas	≤ 0.5	% masa
1,3 Butadieno	≤ 5	ppm por masa
n-hexano	≤ 50	ppm por masa
Benceno	≤ 1	ppm por substancia
Azufre	≤ 2	ppm por masa
Deslizamiento de temperatura evap.	≤ 0.5	K (desde 5 a 97 % destil)
Gases no condensables	≤ 1.5	% vol. Fase vapor
Agua	≤ 25	ppm por masa

Contenido de ácidos	≤ 0.02	Mg KOH/g neutralización
Residuos de evaporación	≤ 50	ppm por masa
Partículas/ Sólidos	No	Revisión visual

3.3 Consideraciones en el diseño de sistemas de refrigeración para refrigerante R600a

En esta sección se explicara las variaciones necesarias para que un refrigerador funcione adecuadamente con isobutano.

3.3.1 Intercambiadores de calor

El tamaño del evaporador y condensador no se ve afectado por el cambio a refrigerante R600a. Aunque se recomienda hacer ciertas modificaciones internas al evaporador ya que el volumen del refrigerante se incrementa de un 50% a un 100 % debido a un mayor barrido del compresor, como consecuencia hay caída de presión en las tuberías si estas permanecen constantes, para evitar este problema es necesario ampliar el diámetro de la cañería para mantener la velocidad de flujo entre 3 y 5 m/s.

3.3.2 Filtros deshidratadores y tubo capilar

"En refrigeradores domésticos el filtro secador normalmente utilizado es un molecular sieves o zeolita"[21]. Se recomienda un material poroso de 3 A para el uso de R600a. Los filtros utilizados con R134a son perfectamente compatibles con el isobutano.

Cuando se va a sustituir Isobutano en un equipo que funciona con refrigerante R134a se recomienda realizar un incremento en la longitud o disminución del diámetro del dispositivo de expansión *"Para R600a por experiencia práctica y modelos teóricos se ha comprobado que los capilares tienen dimensiones similares a las de R12*[22]*".* Al realizar estos cambios garantizamos que la eficiencia del sistema se mantenga o mejore.

[21] DANFOS, *Practical Application of Refrigerant R600a Isobutane in Domestic Refrigerator Systems*. [en línea] <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/book-cep/diagrams/additional_diagrams/more_on_refrigerants/isobutane%28R600A%29-Danfos>[consulta:15 enero 2014].
[22] Idem.

3.3.3 Compresor

En la sección 3.2.3 se mencionó que el isobutano requiere un aumento en el desplazamiento del compresor del orden de 100% con relación al R134a para una determinada capacidad de refrigeración. Por este motivo los compresores para R600a tuvieron que realizar adecuaciones en su cámara de compresión para tener las mismas capacidades de refrigeración de los modelos equivalentes para R12 o R134a.

Enfatizaremos que para trabajar con refrigerante R600a se debe utilizar un compresor adecuado.

3.3.3.1 Aceite lubricante

El R600a en general tiene muy buena compatibilidad con cualquier clase de aceite lubricante. Los aceites minerales y sintéticos actualmente utilizados en sistemas de refrigeración con R12 son plenamente compatibles con el R600a y son los recomendados para esta aplicación. A continuación en la tabla 3-5 se presenta la compatibilidad del Isobutano con los aceites lubricantes.

Tabla 3-5 Compatibilidad del R600a con aceites lubricantes. Fuente [20].

ACEITE LUBRICANTE	COMPATIBILIDAD
MINERAL (M)	Compatible con refrigerantes de tipo hidrocarburos. Presenta excesiva solubilidad en aplicaciones de alta temperatura. Se puede compensar esta situación utilizando aceites minerales de mayor viscosidad.
ALQUILBENCENICOS (AB)	Totalmente compatibles.
SEMISINTETICOS (M+AB)	La mezcla de aceite mineral y alquilbenc'enico es la más apropiada para trabajar con este tipo de refrigerantes
POLIOL'ESTER (POE)	Demasiada solubilidad con los hidrocarburos. Puede requerir utilizar Poe de mayores viscosidades.
POLIALQUILENGLICOLES (PAG)	Solubles con hidrocarburos dependiendo de las condiciones de trabajo.
POLIALFAOLEFINAS (PAO)	Soluble con hidrocarburos, recomendado para aplicaciones de baja temperatura.

3.3.4 Realización del vacío y limpieza de componentes

Como se mencionó anteriormente una carga de R600a representa la mitad de la carga de R134a, esta relación también se aplica a la presión, por poner un ejemplo a una temperatura de -25 C^o la presión para R134a es de 1.07 bar y para R600a es de 0.58 bar. Esto implica que el contenido de gases no condensables tienen el doble de efecto negativo en el sistema de refrigeración que funciona con Isobutano, por lo que concluimos que el porcentaje de impurezas para este tipo de equipos debe ser la mitad del porcentaje para sistemas de R134a, por lo tanto el tiempo de realización del vacío del sistema, también se duplica.

Las condiciones de limpieza son semejantes a las de los que equipos de R12 y R134a. La norma DIN 8964 regula la limpieza de los componentes, esta regula el contenido máximo de solubles e insolubles y otros residuos. Por ser un refrigerante que pertenece a otra familia se están modificando la cantidad de solubles e insolubles para el R600a, pero actualmente los valores establecidos son útiles.

3.3.4.1 Mantenimiento

Para el mantenimiento y reparación de equipos que funcionan con R600a se requiere personal capacitado y equipo adecuado para este tipo de trabajo. Además se debe tomar en cuenta las normas estatales para este tipo de sustancias. La inflamabilidad del isobutano representa un factor de riesgo importante durante el trabajo, es necesario un manejo cuidadoso, buena ventilación, además se recomienda que la descarga de la bomba de vacío sea al aire libre. Los equipos de servicio técnico deben cumplir los requisitos del R600a en concepto de evacuación y precisión en la carga de refrigerante.

3.4 Prueba de funcionamiento con el refrigerante R600a

Luego de conocer las propiedades, características y normas de uso del isobutano, estudiaremos su comportamiento en un sistema de refrigeración de uso doméstico. En nuestro país no se comercializa compresores adecuados para refrigerantes hidrocarburos; por lo tanto necesitamos adaptar un compresor que contenga un aceite lubricante compatible con R600a, los compresores encontrados en el medio con esta clase de aceite son los compresores para R12, estos compresores son los que utilizaremos en el estudio práctico.

El refrigerador utilizado para realizar las pruebas es de marca Ecasa modelo Boreal 212, este trae de fábrica un compresor para R134a de 1/4 de hp, lo reemplazaremos por un compresor de igual potencia que nos permita trabajar con R600a. Una vez terminada esta etapa de investigación se analizará posibles cambios al equipo para optimizar su funcionamiento.

Antes de iniciar con la toma de datos, creemos conveniente explicar los pasos seguidos para la limpieza, cambio de compresor y carga del nuevo refrigerante en el equipo.

3.4.1 Limpieza, montaje del compresor y carga del isobutano

El objetivo de esta serie de trabajos es mantener un correcto funcionamiento del refrigerador cargado con R600a. A continuación explicaremos cada uno de ellos tomando en cuenta algunas consideraciones para la carga de refrigerantes hidrocarburos:

- Planificar el trabajo, para que el sistema no permanezca abierto más de 15 minutos.
- Las conexiones eléctricas deben estar completamente aisladas.
- No se debe exceder el límite de 8g/m^3 de refrigerante en ambientes cerrados.

3.4.1.1 Limpieza del sistema

Se recomienda que para una adecuada limpieza de los componentes del refrigerador se utilice nitrógeno a presión. Para realizar este proceso hemos dividido al sistema en dos partes la de baja y alta presión.

Los equipos necesarios para realizar este trabajo son: un cilindro de nitrógeno y un juego de manómetros.

- El primer paso es conectar el manómetro de alta presión al condensador (zona de alta presión) y el manómetro de baja presión a la parte de la cañería de succión, evaporador y tubo capilar (zona de baja presión).
- El siguiente paso es abrir la válvula del nitrógeno, luego se procede a abrir una válvula a la vez del juego de manómetros.
- Al fluir el nitrógeno por el sistema lo limpia de contaminantes, principalmente en el condensador donde se acumula aceite proveniente del compresor, la descarga de esta mezcla se la debe hacer a un depósito de desechos, para evitar la contaminación.

Se recomienda manipular correctamente las válvulas de los manómetros, pues una sobrecarga de presión provocaría serias averías en los elementos del equipo, sobre todo al evaporador.

3.4.1.2 Montaje del compresor y unión de componentes

El montaje del compresor es un trabajo sencillo, simplemente se debe verificar que los pernos estén completamente fijados, como se ve en la figura 3.5.

Figura: 3.5 Montaje del compresor en un refrigerador.

Luego se procede a unir las cañerías para cerrar el ciclo. Soldamos con un electrodo especial para realizar uniones cobre-latón, el filtro secador con la salida del condensador, el otro extremo del filtro se suelda al tubo capilar con soldadura para uniones de cobre.

Después unimos la tubería de succión a la entrada del compresor que es una unión cobre-cobre, acoplamos la salida del compresor con la entrada del condensador, esto asegura que el sistema tiene todos sus componentes unidos.

Para llenar el gas en el sistema procedemos a soldar una válvula de carga a la entrada de carga del compresor, todo lo descrito se observa en la figura 3.6.

Figura: 3.6 Unión de elementos del sistema de refrigeración al compresor.

Para finalizar efectuamos la conexión de los componentes eléctricos al compresor, el protector térmico y relé haciendo hincapié en que estas conexiones estén correctamente aisladas, en la figura 3.7 se aprecia esta acción. Terminado esto el equipo queda listo para el proceso de vacío.

Figura: 3.7 Conexiones eléctricas de un compresor hermético.

3.4.1.3 Vacío del sistema de refrigeración

Una bomba de vacío, un juego de manómetros y un vacuómetro, son las herramientas necesarias para cumplir con este trabajo. Las conexiones son las siguientes, acoplamos el manómetro de baja presión en la válvula de carga del compresor, la entrada de los manómetros al vacuómetro y este a la bomba de vacío en ala figura 3.8 se observa las conexiones terminadas.

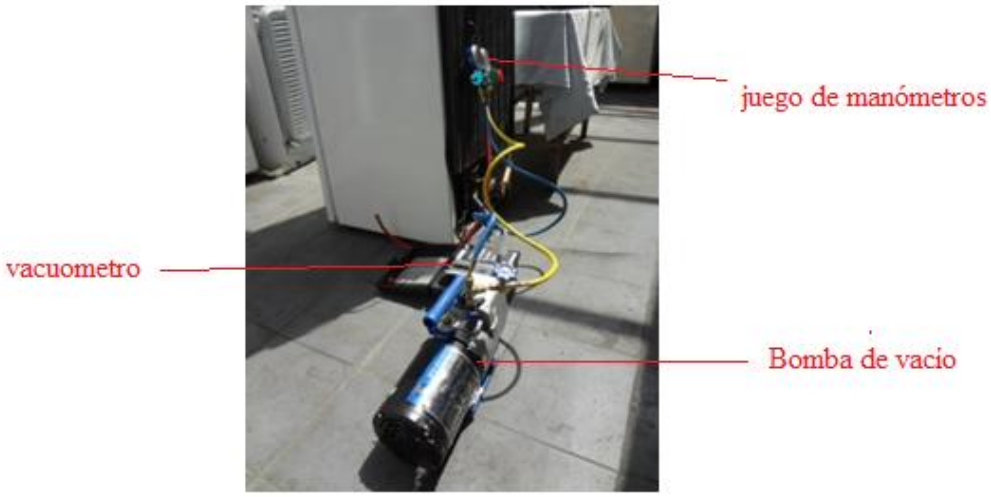


Figura: 3.8 Conexión de equipo para realizar el vacío del refrigerador.

Realizada esta instalación procedemos a encender la bomba de vacío por un periodo de media hora o hasta que el vacuómetro indique que hemos llegado al vacío máximo posible.

3.4.1.4 Carga del refrigerante

Los instrumentos necesarios para esta etapa son: una balanza, juego de manómetros, lata de refrigerante y una válvula para el bote de refrigerante.

La figura 3.9 nos indica las conexiones de las mangueras para esta acción, que es similar al proceso de vacío, simplemente la manguera que se conecta al vacuómetro va conectada a la válvula de la lata de refrigerante y este se coloca sobre la balanza para medir la cantidad de refrigerante que entra al refrigerador.

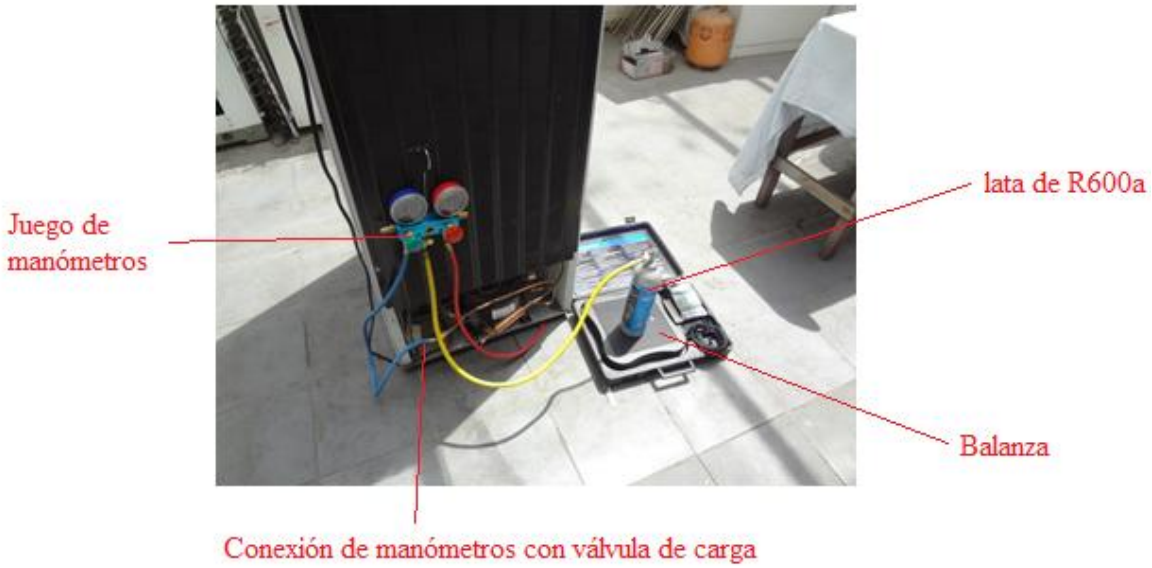


Figura: 3.9 Carga de refrigerante R600a al equipo Boreal 212.

Se procede a abrir las válvulas, dejando fluir el refrigerante hacia el compresor, transcurridos unos minutos se enciende el compresor para permitir que el gas fluya por todo el sistema, una vez que la balanza marque que hemos ingresado la carga adecuada, cerramos las válvulas y el equipo queda listo para funcionar. Los fabricantes de R600a recomiendan cargar un 45% de la carga de R134a, para el equipo la cantidad de R134a es de 120 gramos lo que nos da una carga sugerida de 56.25 gramos de isobutano, por la escala de medición de la balanza la carga será de 60 gramos. Realizada esta carga el refrigerador queda listo para funcionar.

3.4.2 Funcionamiento del refrigerador Boreal 212 con un compresor 1/4 hp

Como se indicó al inicio de esta sección el compresor utilizado no es el propicio para R600a, el compresor es para R12 si embargo se lo utilizó con isobutano. En la figura 3.10 se presenta al compresor y la tabla 3-6 contiene todos los datos del mismo.

Figura: 3.10 Compresor hermético de 1/4 para refrigerante R12.

Tabla 3-6 Datos del Compresor hermético de 1/4 para R12 Fuente [11].

Compresor:	Hermético
Modelo:	FFU 70AK
Marca:	Embraco
Voltaje:	115-127 Voltios, 60Hz
Desplazamiento:	6.36 cc/rev
Potencia:	1/4HP
Capacidad (-23.3˚C)	212 Kcal/h
Aceite:	ISO30

Para realizar el análisis de cómo influye la cantidad de refrigerante en la temperatura del equipo se tomó datos de temperatura de los componentes importantes, al realizar la carga del refrigerante.

3.4.2.1 Temperaturas con diferentes cargas

En esta sección se analizará el comportamiento de la temperatura en el sistema de refrigeración con diferentes cargas de gas, en sus principales elementos. La carga inicial será de 30 gramos de R600a, luego se irá incrementando 10g hasta llegar a una carga máxima de 60 gramos.

3.4.2.1.1 Evaporador

Para medir la temperatura del evaporador se saca la tapa del congelador, se escogió 5 puntos estratégicos indicados en la figura 3.11.

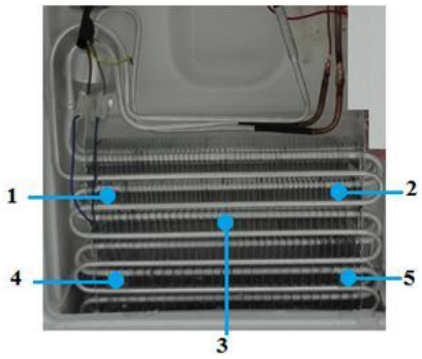


Figura: 3.11 Puntos para medir la temperatura del evaporador.

La tabla 3-7 recopila las temperaturas recolectadas en los puntos seleccionados del evaporador.

Tabla 3-7 Temperaturas en el Evaporador dependiendo de la carga de refrigerante.

	TEMPERATURAS (^{O}C)				
CARGA (gr)	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**
30	-2,8	-17,1	-19,1	-10,2	-13,5
40	-16,5	-14,5	-21,1	-19	-14
50	-17,8	-25	-16	-20	-21
60	-15	-22	-29	-23	-26

En la figura 3.12 se indica la gráfica de temperatura en cada carga. Se observa que a medida que se incrementa la cantidad de refrigerante, la temperatura en este elemento cae considerablemente.

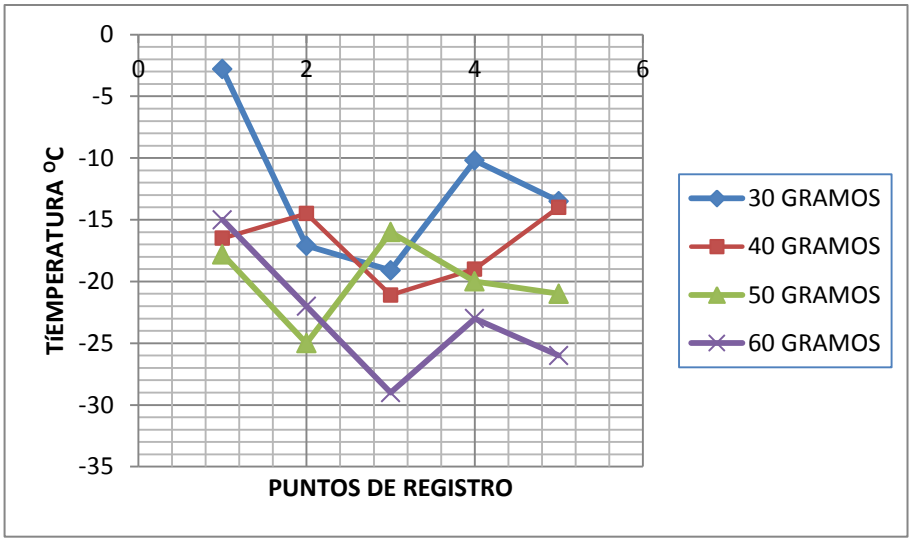


Figura: 3.12 Gráfica de temperaturas en el evaporador en función de la carga de refrigerante.

3.4.2.1.2 Condensador

En este elemento realizamos mediciones en 9 puntos estratégicos como se indica en la figura 3.13 cuyos datos están representados en la tabla 3-8.

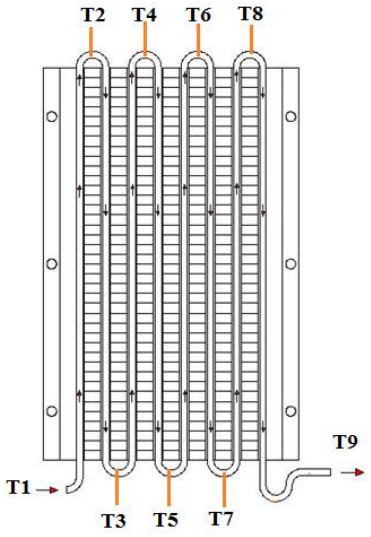


Figura: 3.13 Puntos de monitoreo del condensador -Boreal 212.

Tabla 3-8 Temperaturas en el Condensador dependiendo de la carga de refrigerante R600a.

	TEMPERATURAS (^{O}C)								
CARGA (gr)	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**T7**	**T8**	**T9**
30	32	30	31,8	29,3	27,6	28,5	27,4	25,5	25,9
40	37	30,5	33	30	30,7	30,2	30,9	28,1	28,5
50	37,4	29,8	30,1	29,4	28	28,5	28,6	28,5	29,1
60	34,5	30	30,9	31	29,4	29,2	29,1	28,7	28,6

La figura 3.14 presenta las curvas de temperatura en el condensador entre carga y carga de R600a, si comparamos la gráfica de 30 gramos con la de 60 gramos, vemos que la curva de 30 gramos va disminuyendo rápidamente entre cada punto de control, mientras que la de 60 gramos tiende a mantenerse en todos los puntos. Se dice que cuando logramos una temperatura estable en todo el condensador, el refrigerador contiene la cantidad adecuada de fluido refrigerante.

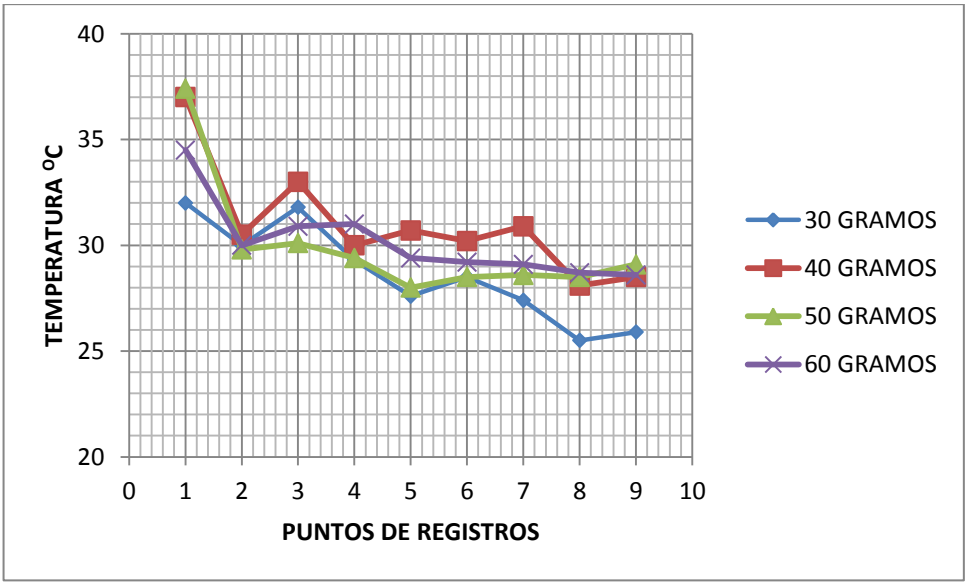


Figura: 3.14 Gráfica de temperaturas en el condensador en función de la carga de refrigerante.

3.4.2.1.3 Compresor

Es importante considerar como varia la temperatura en el compresor al cambiar la carga de gas, para este propósito se estableció 5 puntos estratégicos como se indica en la figura 3.15, para medir la variación del calor. Los datos de estas mediciones se muestran en la tabla 3-9.

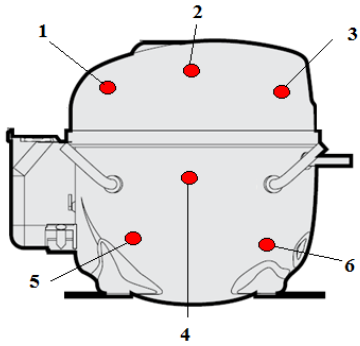


Figura: 3.15 Compresor hermético indicando los puntos para medir la temperatura. Adaptada de [11].

Tabla 3-9: Temperaturas en el Compresor dependiendo de la carga de refrigerante.

	TEMPERATURAS (^{O}C)						
CARGA (gr)	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T6**	**CORRIENTE (Am)**
30	43,5	46,5	41,9	44,2	41	42,9	1,6-1,7
40	50,9	56,9	52,6	51,8	48,9	50,4	1,6
50	52,9	60,8	58,4	57	52,2	55	1,6
60	62,3	64,3	61,4	60,5	56,1	55,1	1,6

En la figura 3.16, se graficaron las curvas de temperatura con cada carga, lo que se obsrva es que a medida que se aumenta la carga de refrigerante la temperatura del compresor se incrementa, esto se debe a que mientras más cantidad de gas exista en el sistema mayor es el trabajo del compresor.

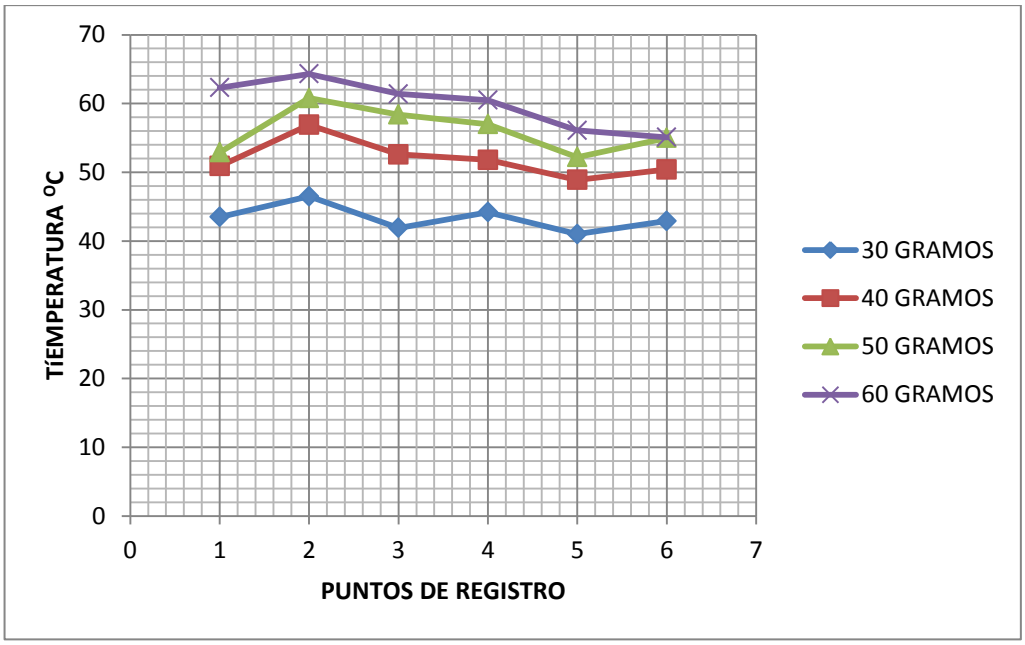


Figura: 3.16 Grafica de temperaturas en el compresor en función de la carga de refrigerante.

3.4.2.2 Recolección de datos de funcionamiento

Antes de estudiar el ciclo termodinámico del R600a, se recopiló datos que permiten establecer las condiciones del ciclo, para facilitar el trabajo se utilizó la ayuda de la tecnología colocando termopares en puntos clave del refrigerador como se observa en la figura 3.17.

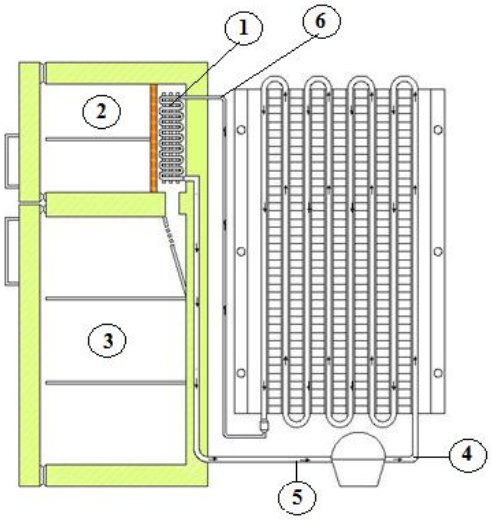


Figura: 3.17 Esquema de Refrigerador Boreal 212 indicando la ubicación de los termopares.

A continuacion se indica la ubicación de cada termo par:

1. Evaporador.
2. Congelador.
3. Refrigerador.
4. Descarga del compresor.
5. Retorno al compresor
6. Salida del condensador.

En la tabla 3-10 se presentan los valores máximos y mínimos de temperatura de cada punto durante un día de funcionamiento. Además se aprecia en la figura 3.18 la ventana del software realizando las gráficas de temperatura frente al tiempo de cada termopar.

Tabla 3-10 Máximos y mínimos de temperatura en el Refrigerador-compresor ¼ hp R600a.

	TEMPERATURA °C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Ingreso al Evaporador	Congelador	Refrigerador	Descarga del Compresor	Retorno al Compresor	Salida del condensador
Máximo	24,784	-3,68	5,42	57,83	34,62	43,39
Mínimo	-38,8411	-15,72	4,79	23,22	-14,73	18,34

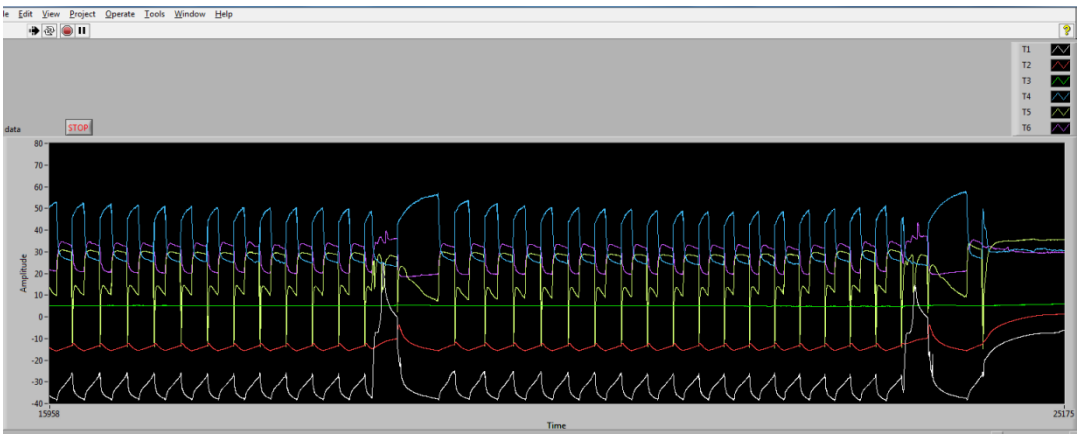


Figura: 3.18 Ventana Lab View- Temperaturas del sistema-compresor de 1/4 R600a.

Desde la figura 3.19 hasta la figura 3.24, se representa una gráfica individual de cada punto monitoreado; indican las variaciones de la temperatura respecto al tiempo. En el Anexo B-1 se encuetran los valores tomados por el programa para cada punto.

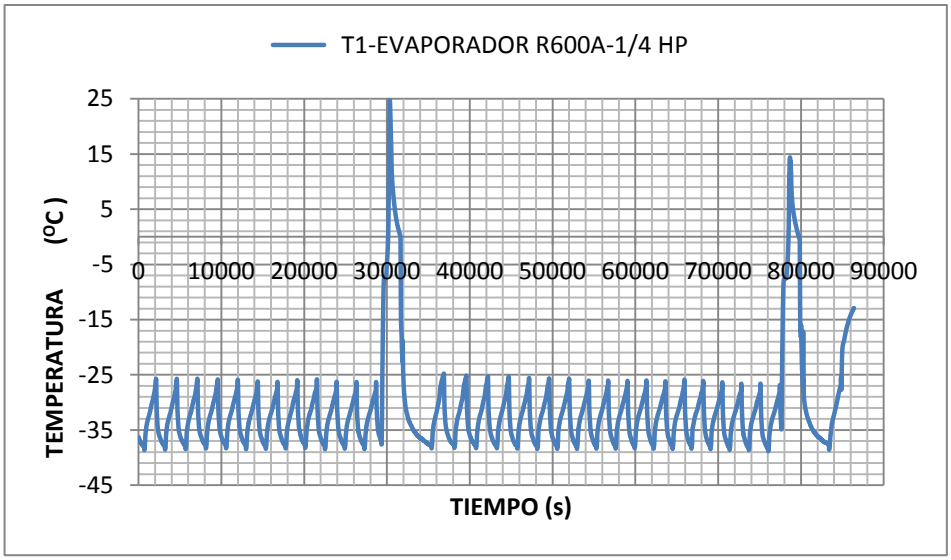


Figura: 3.19 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R600a-Compresor de 1/4.

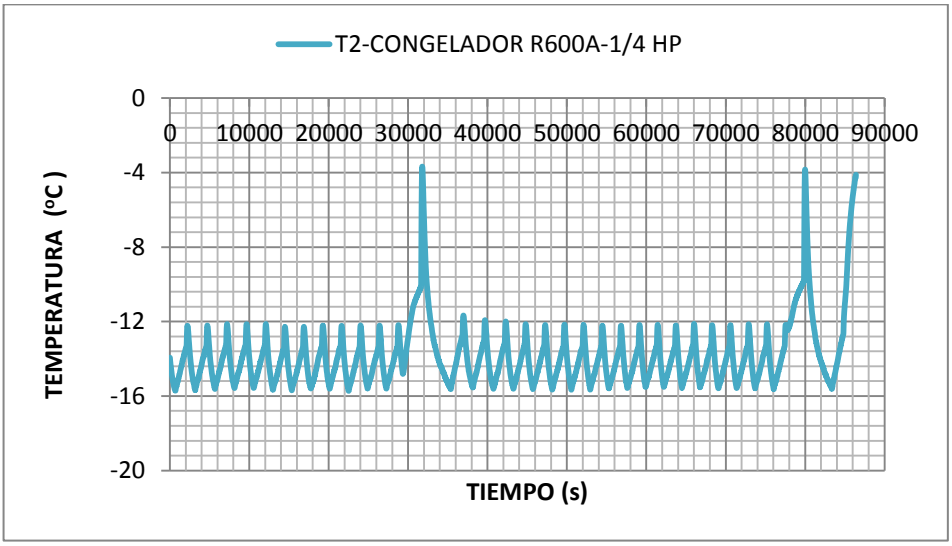


Figura: 3.20 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R600a-Compresor de 1/4.

En la figura 3.19 se observa la gráfica del comportamiento de la temperatura en el evaporador siendo -37.5^{o}C la temperatura límite alcanzada y en la figura 3.20 el comportamiento de la temperatura en el congelador con una temperatura límite de -16^{o}C. La diferencia entre estas es de 21^{o}C , y la variacion recomendada es de un maximo de 10^{o}C entre la temperatura del evaporador y el espacio refrigerado. Es decir que el evaporador está produciendo una carga térmica execiva para la que necesita el equipo.

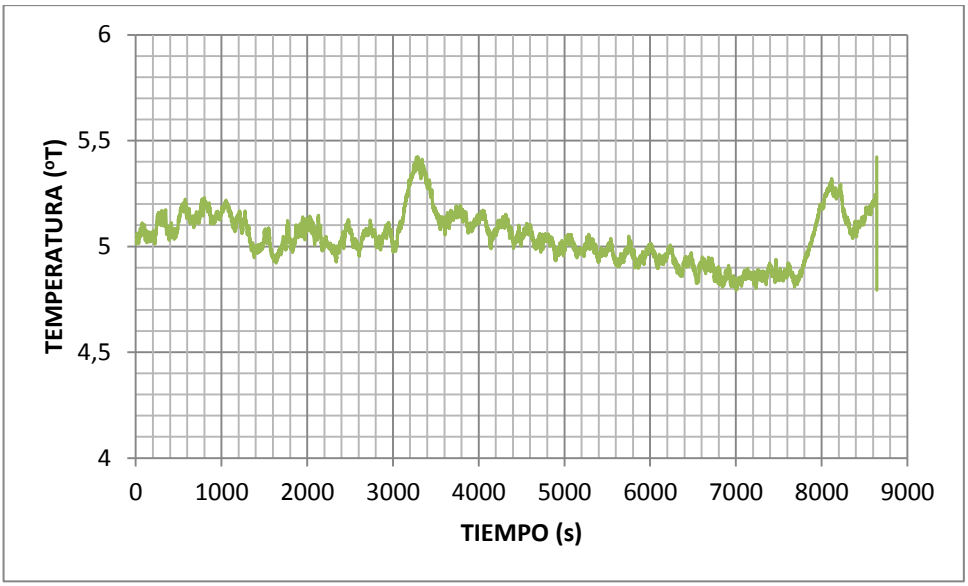


Figura: 3.21 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Refrigerador con R600a-Compresor de 1/4.

En la figura 3.21 se grafica la temperatura en el compartimiento del refrigerador esta oscila entre 5 y 5.5^{o}C este rango está dentro de los valores apropiados para el funcionamiento de este gabinete.

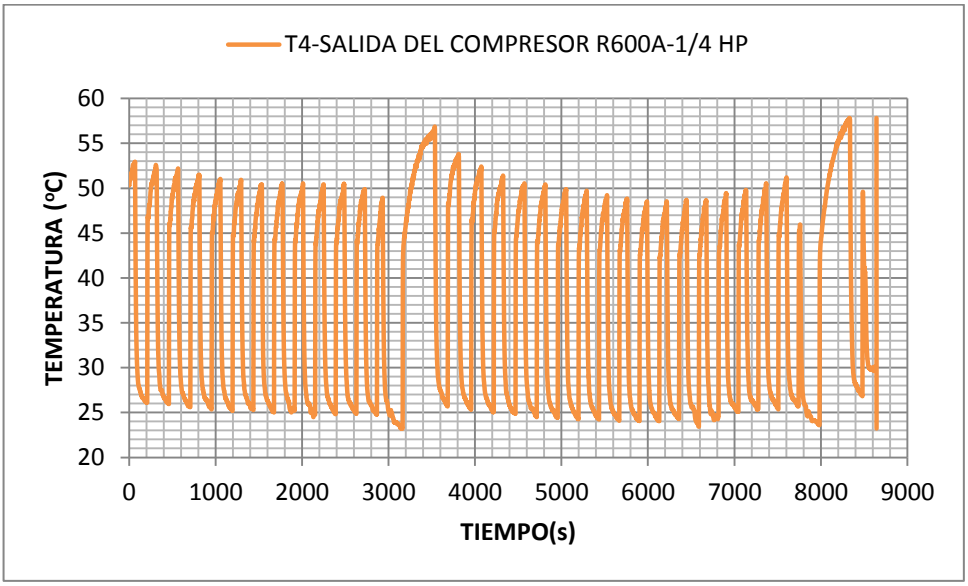


Figura: 3.22 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del compresor con R600a-Compresor de 1/4.

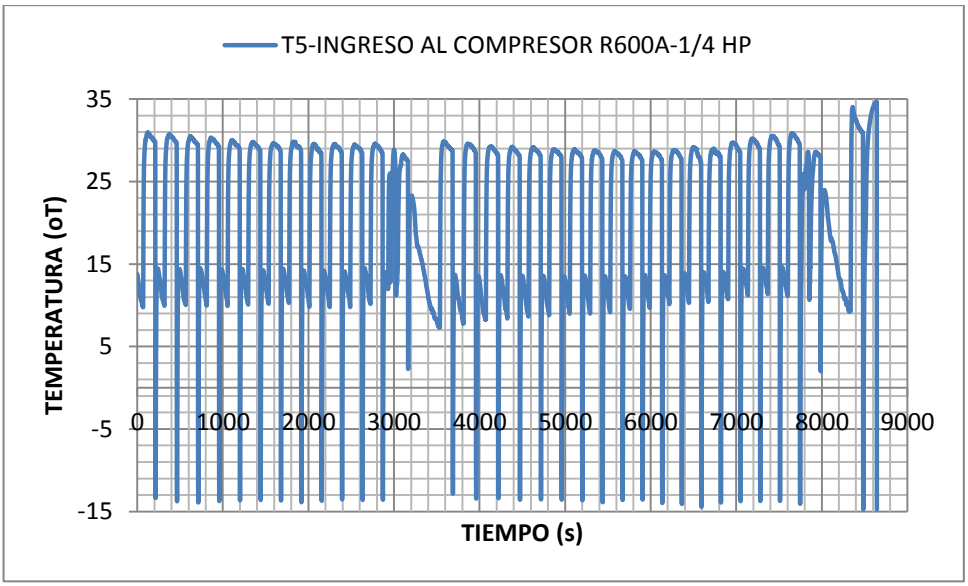


Figura: 3.23 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el ingreso del compresor con R600a-Compresor de 1/4.

Las figura 3.22 y 3.23 indican las gráficas del comportamiento de las temperaturas a la salida e ingreso del compresor respectivamente. Los valores pico de funcionamiento para estas son de 50°C para la salida y de -15°C para el ingreso del compresor.

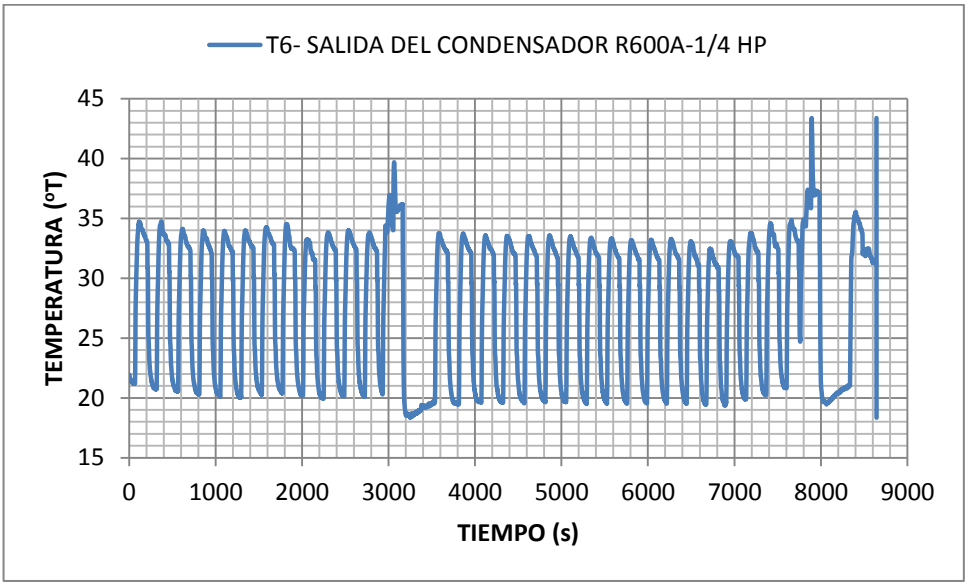


Figura: 3.24 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del condensador con R600a-Compresor de 1/4.

La figura 3.24 indica la gráfica de temperaturas a la salida condensador que tiene un valor promedio de 35°C, lo que significa que el condensador está trabajando en los valores

recomendados para este componente que es de $10^{o}C$ más como máximo sobre la temperatura ambiente ($25^{o}C$).

Con los datos obtenidos de la graficas anteriores en la siguiente sección se realizara el estudio del comportamiento termodinámico del R600a en el equipo.

3.4.2.3 Análisis del ciclo termodinámico

En el capítulo dos sección 2.6.1 se indicaron las ecuaciones necesarias para realizar el análisis del ciclo ideal de refrigeración. La figura 3.25 y 3.26 indica la programación en el software EES y los datos de entrada, para calcular principalmente su coeficiente de desempeño. Los datos presentados en la tabla 3-10 son los valores que rigen el ciclo termodinámico.

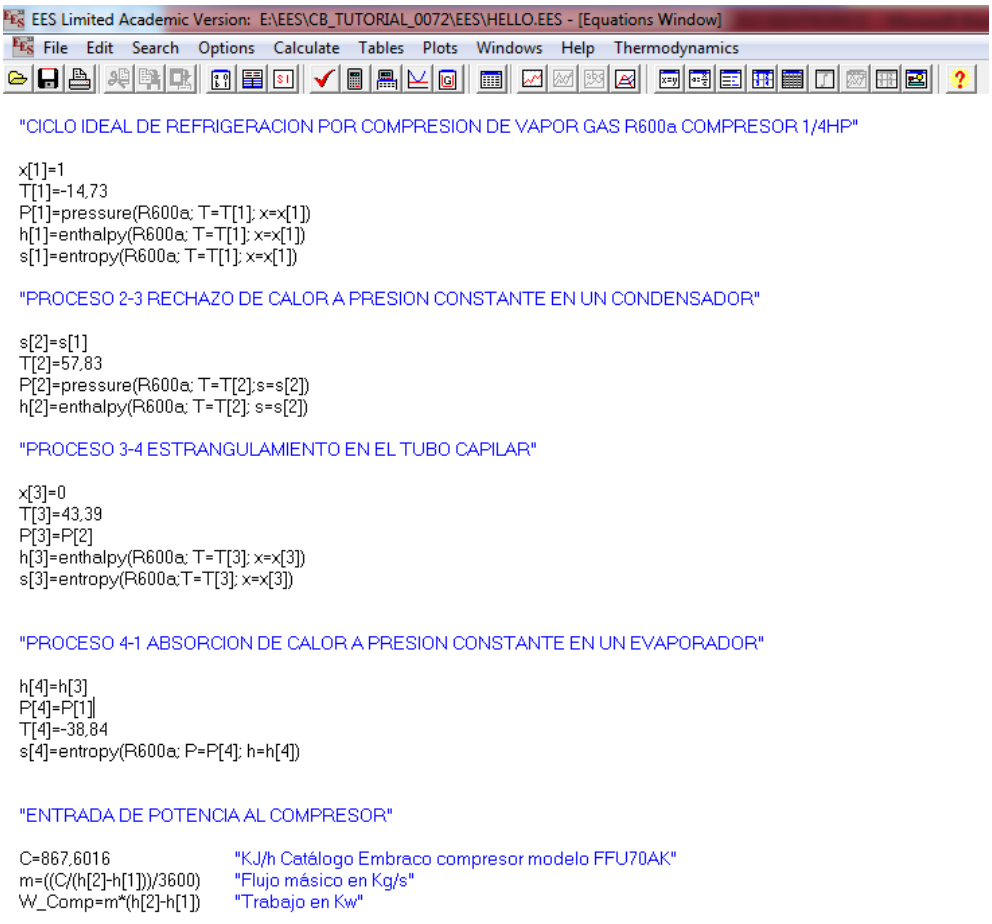


Figura: 3.25. Datos de ingreso y programación en EES para calcular el COP-compresor de 1/4 hp.

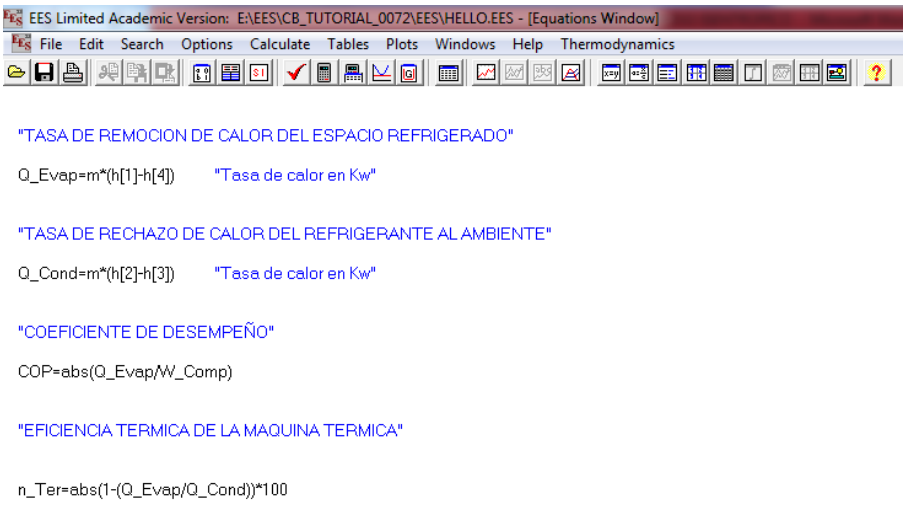


Figura: 3.26 Programación para cálculo del COP con EES-compresor 1/4 hp.

Al correr el programa se obtienen los resultados indicados en la figura 3.27.

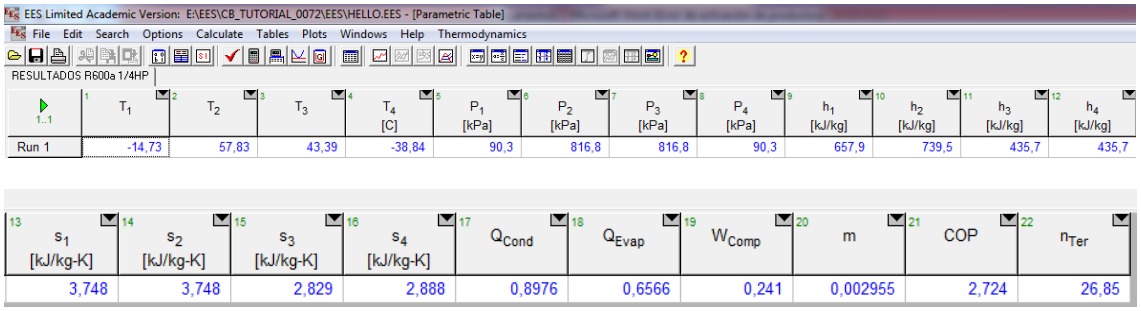


Figura: 3.27 Resultados del COP con EES-compresor 1/4 hp.

El valor del COP para esta prueba es de 2.724 lo que indica que el equipo elimina 2.7 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica que consume, se demuestra que el equipo tiene un funcionamiento deficiente porque su COP es menor al de un equipo similar cargado con R134a.

Además de los resultados numéricos, el programa permite graficar los diagramas Temperatura-Entropía y Presión-Entalpía de nuestro sistema, figura 3.28 y figura 3.29 respectivamente.

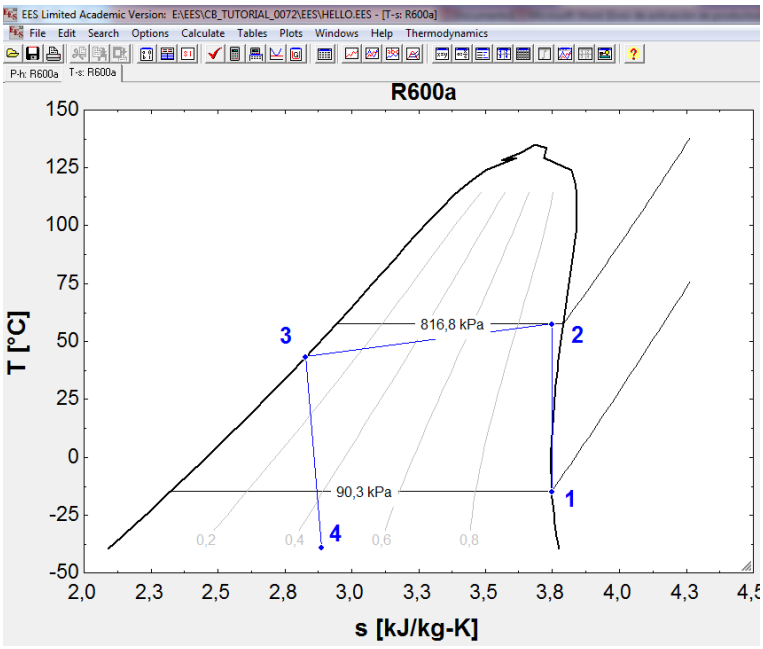


Figura: 3.28 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/4 hp.

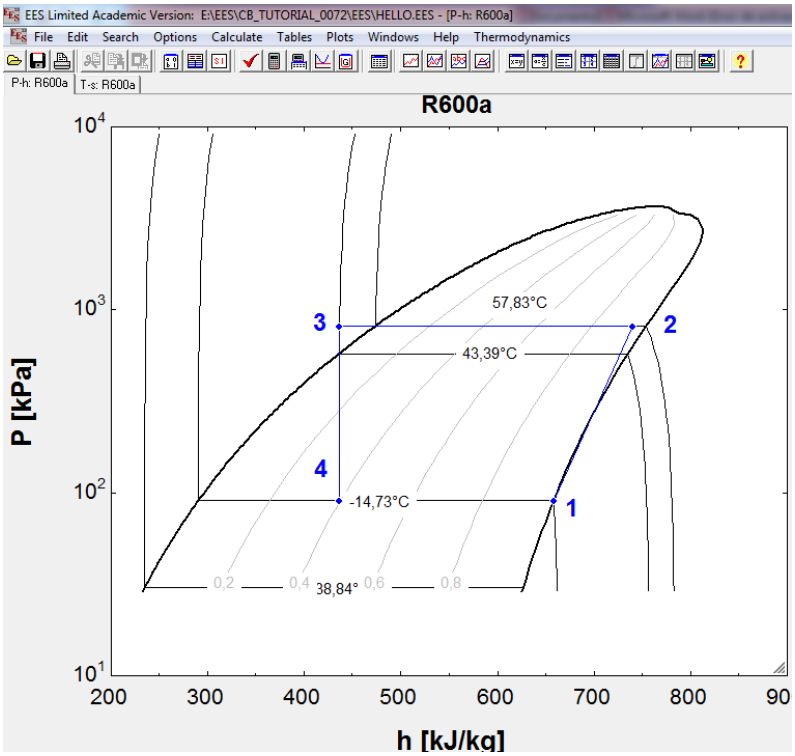


Figura: 3.29 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a- compresor 1/4 hp.

3.4.3 Funcionamiento del refrigerador Boreal 212 con un compresor 1/6 hp

Como parte final de la experimentación, se hará algunos cambios al equipo para mejorar el COP. Estas modificaciones implican instalar al refrigerador un compresor de 1/6 hp, variar el diámetro y la longitud del tubo capilar. En la figura 3.30 se indica el compresor utilizado para estas pruebas y en la tabla 3-11 se indican sus principales características.

Figura: 3.30 Compresor hermético EMI 55 ER - Embraco de 1/6 hp. Fuente [11]

Tabla 3-11 Datos del compresor hermético de 1/6 hp. Fuente [11]

Compresor:	Hermético
Modelo:	EMI 55 ER
Marca:	Embraco
Voltaje:	115-127 Voltios, 60Hz
Desplazamiento:	4.6 cc/rev
Potencia:	1/6HP
Capacidad de refrigeración	460 (BTU/Wh) (60Hz)
Eficiencia	4.25 (BTU/Wh) (60Hz)

3.4.3.1 Modificaciones al sistema de refrigeración Boreal 212

En la sección anterior se menciona las modificaciones que se le realizaron al equipo. Ahora se explicará detalladamente las condiciones de dichas variaciones.

Para encontrar un tubo capilar idóneo se utilizó el software Dancap, su interfaz se observa en la figura 3.31 con los datos necesarios para realizar el cálculo.

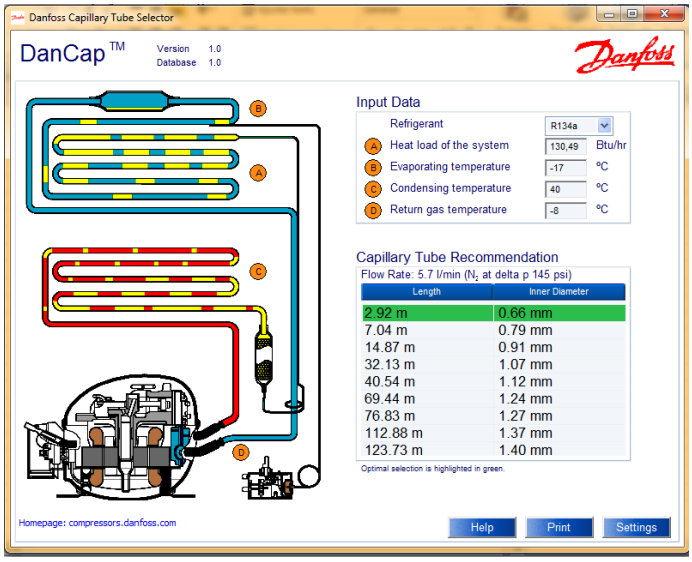


Figura: 3.31 Ventana de Dancap- Cálculo de tubo capilar. Fuente [21].

El programa nos da un tubo capilar de 0.66mm de diámetro en el mercado local se comercializan tubos con medidas en pulgadas, el diámetro aproximado a ese valor es de 0.026 in, con una longitud de 3 m.

La tabla 3-12 contiene los datos de los elementos que se cambiaron en el sistema de refrigeración y la figura 3.32 indica los cambios realizados.

Tabla 3-12 Datos de los elementos cambiados al equipo de refrigeración.

Componente	**Datos**
Compresor	Potencia 1/6hp- para R12
Tubo capilar.	Diámetro 0.026 in (0.66mm) Longitud 3m.
Cañería de succión	Diámetro 0.25 in (6.35mm) Longitud 3m
Refrigerante R600a	Carga: 60gr

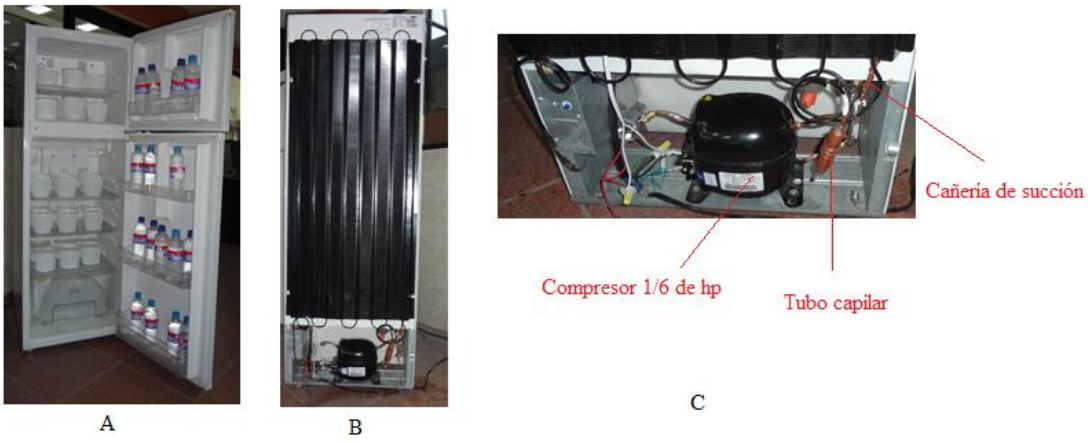


Figura: 3.32 Modificaciones al Refrigerador Boreal 212. A) Interior del refrigerador. B) Parte posterior del refrigerador. C) Cambios realizados al equipo.

Con los cambios mencionados se realiza la carga del refrigerante, la carga de refrigerante se mantiene en 60 gramos. Luego se realizó el seguimiento de las condiciones de funcionamiento que se analizan en las siguientes secciones.

3.4.3.2 Recolección de datos de funcionamiento

El seguimiento de funcionamiento del equipo se representa con el monitoreo de las temperaturas en los puntos que se indican en la figura 3.33, los resultados obtenidos se indican en la tabla 3-13.

Tabla 3-13 Máximos y mínimos de temperatura en el Refrigerador-Compresor 1/6.

	TEMPERATURA °C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Ingreso al Evaporador	Congelador	Refrigerador	Descarga del Compresor	Retorno al Compresor	Salida del condensador
Máximo	14,20	-3,36	3,86	60,73	37,53	36,75
Mínimo	-33,92	-16,31	3,15	24,78	7,07	16,46

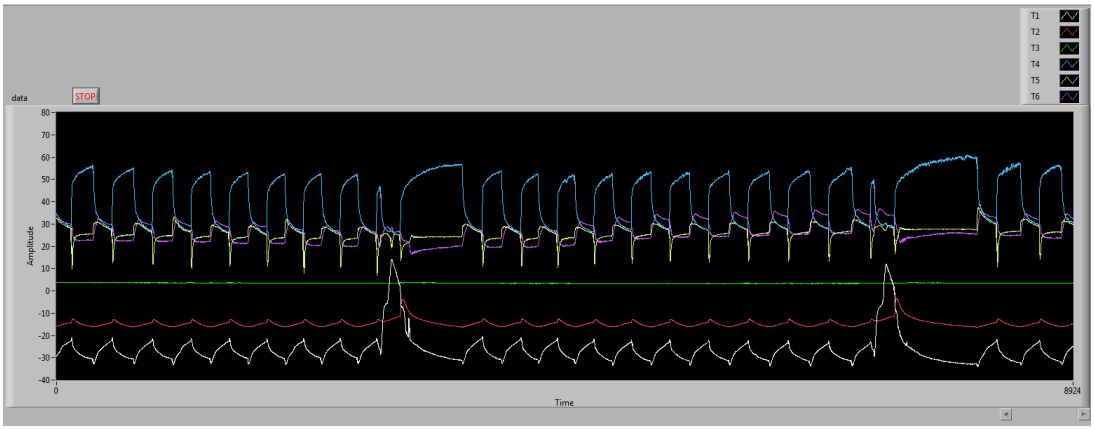


Figura: 3.33 Ventana Lab View- Temperaturas del sistema-compresor de 1/6 R600a.

Desde la figura 3.34 hasta la figura 3.39, se representa la grafica de cada punto monitoreado; indicando las variaciones que tiene la temperatura respecto al tiempo en cada uno de estos. Los valores con lo que se dibujó cada grafica están representados en el Anexo B -2.

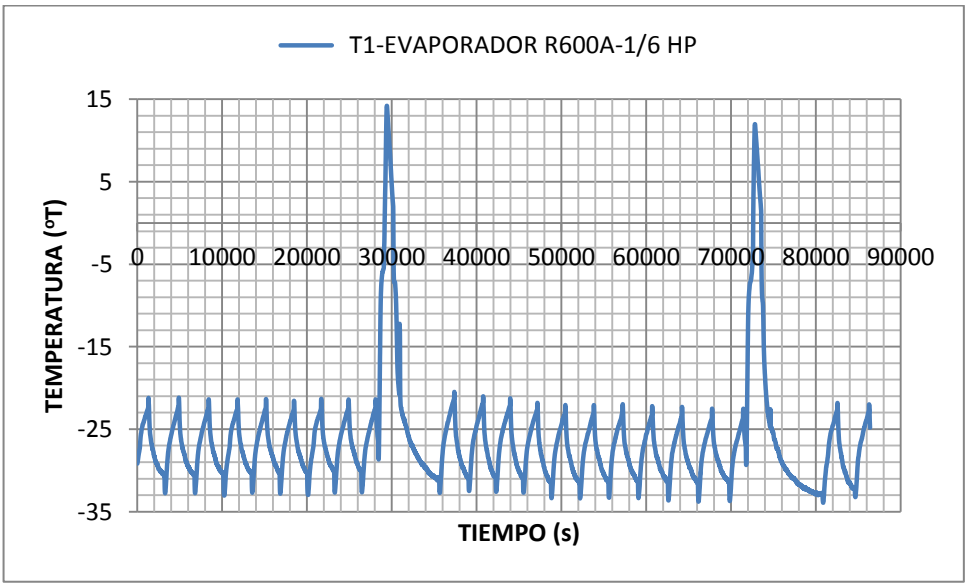


Figura: 3.34 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Evaporador con R600a-Compresor de 1/6.

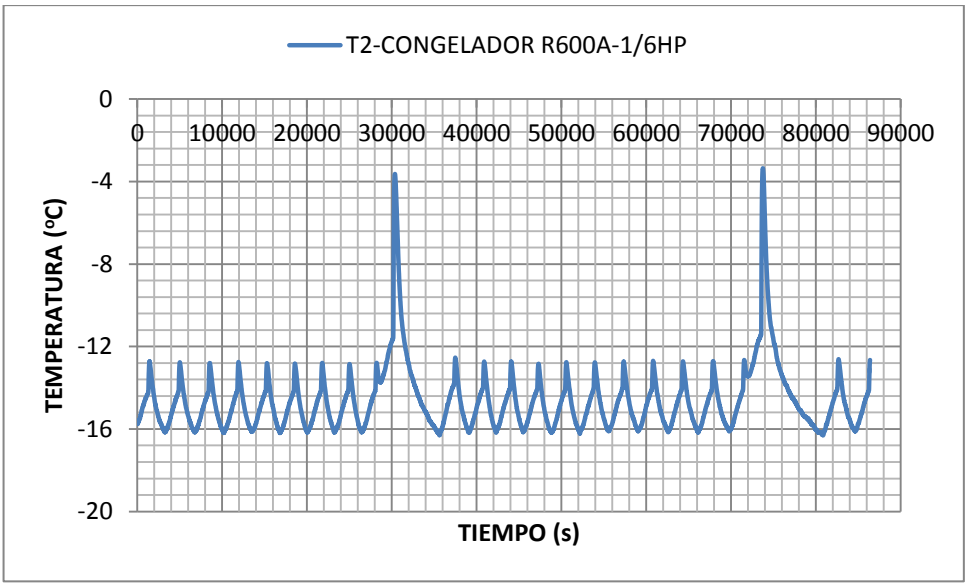


Figura: 3.35 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Congelador con R600a-Compresor de 1/6.

En la figura 3.34 se puede mirar la gráfica del comporamiento de la temperatura en el evaporador siendo -32.5^{o}C la temperatura límite alcanzada. En la figura 3.35 el comportamiento de la temperatura en el congelador con una temperatura límite de -16.5^{o}C. La diferencia entre estas es de 16^{o}C , cuatro grados menos que la diferencia de temperatura en el equipo con el compresor de mayor potencia, es decir que el equipo, es mas eficiente y se aprovecha mas la carga termica del evaporador con una menor carga de gas.

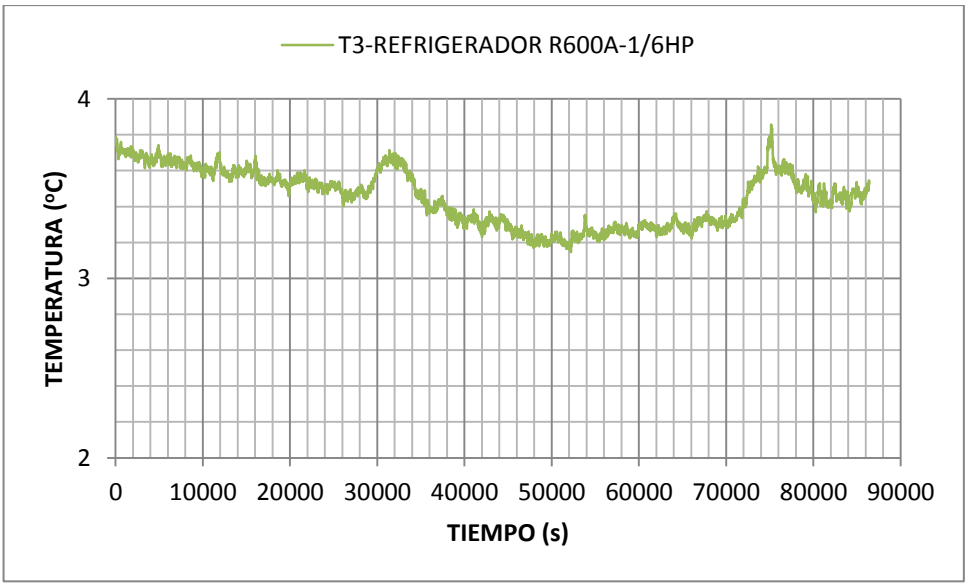


Figura: 3.36 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el Refrigerador con R600a -Compresor de 1/6.

En la figura 3.21 se grafica la temperatura en el gabinete del refrigerador esta tiene un valor promedio de 3.9°C que es una temperatura por debajo de los valores estándar para este compartimiento.

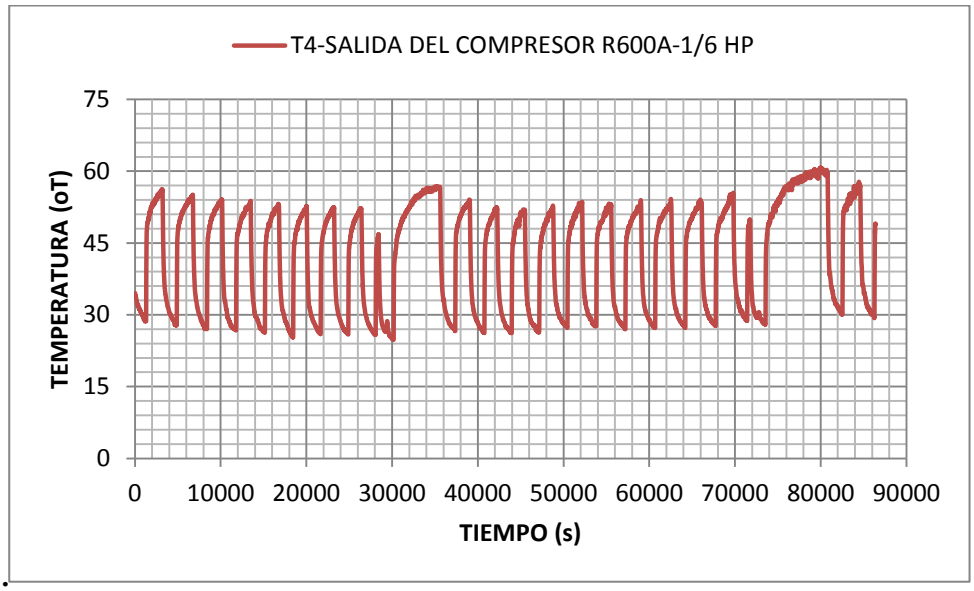


Figura: 3.37 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del compresor con R600a-Compresor de 1/6.

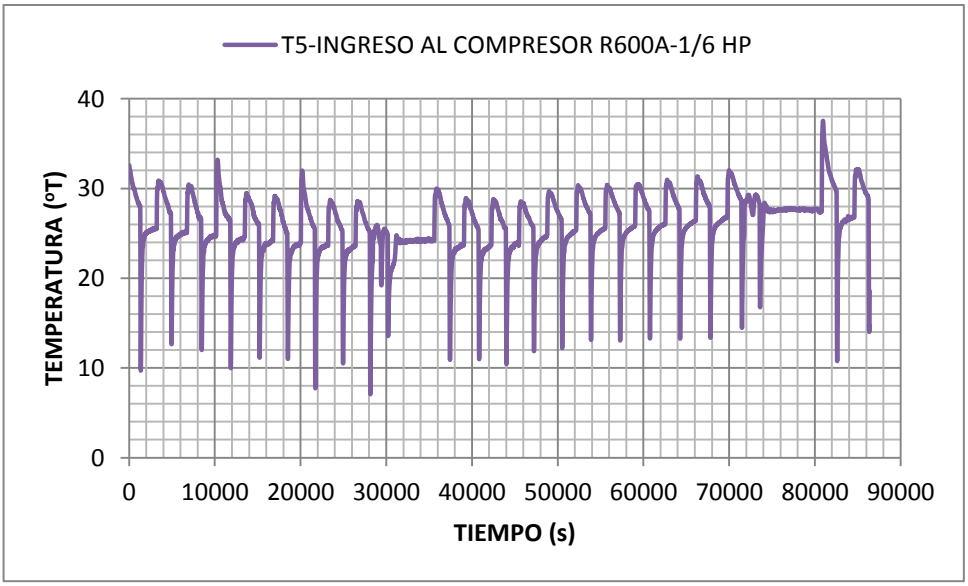


Figura: 3.38 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en el ingreso del compresor con R600a-Compresor de 1/6.

Las figura 3.37 y 3.38 indican las gráficas del comportamiento de las temperaturas a la salida e ingreso del compresor respectivamente. Los valores pico de funcionamiento para estas son de 55°C para la salida y de -10°C para el ingreso del compresor.

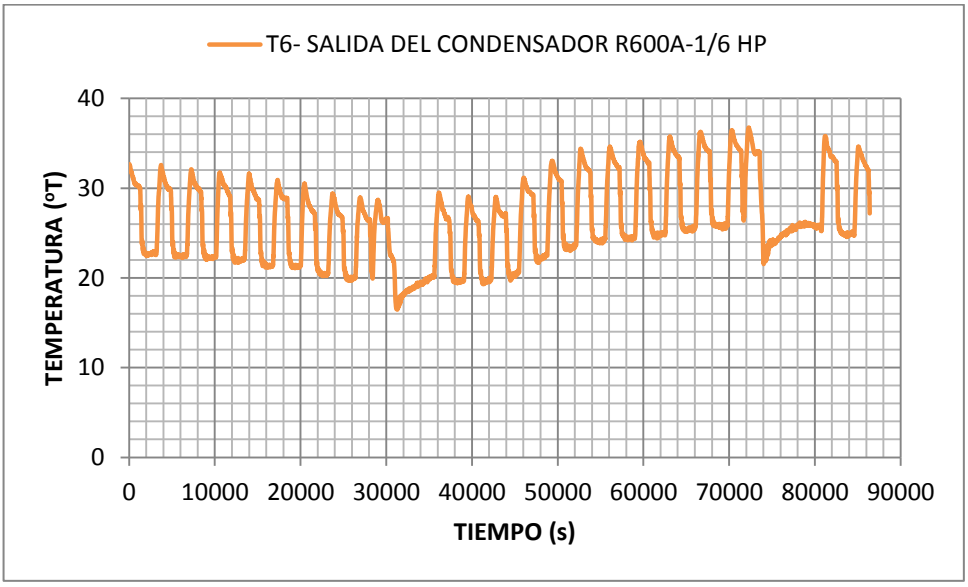


Figura: 3.39 Gráfica Temperatura vs. Tiempo en la salida del condensador con R600a-Compresor de 1/6.

La figura 3.24 indica la gráfica de temperaturas a la salida del condensador que tiene un valor promedio en funcionamiento de 32.5°C, lo que significa que el condensador está trabajando en los valores recomendados para este componente que está dentro del rango de 5 a 10°C más sobre la temperatura ambiente (25°C).

Con los datos recopilados en la siguiente sección se realizara el análisis del ciclo termodinámico.

3.4.3.3 Análisis del ciclo termodinámico

En la sección 2.6.1 del capítulo dos, se indicaron las ecuaciones necesarias para realizar el análisis del ciclo ideal. La figura 3.40 y 3.41 indica la programación en el software EES para esta sección, los datos de entrada son los que se presentan en la tabla 3-13.

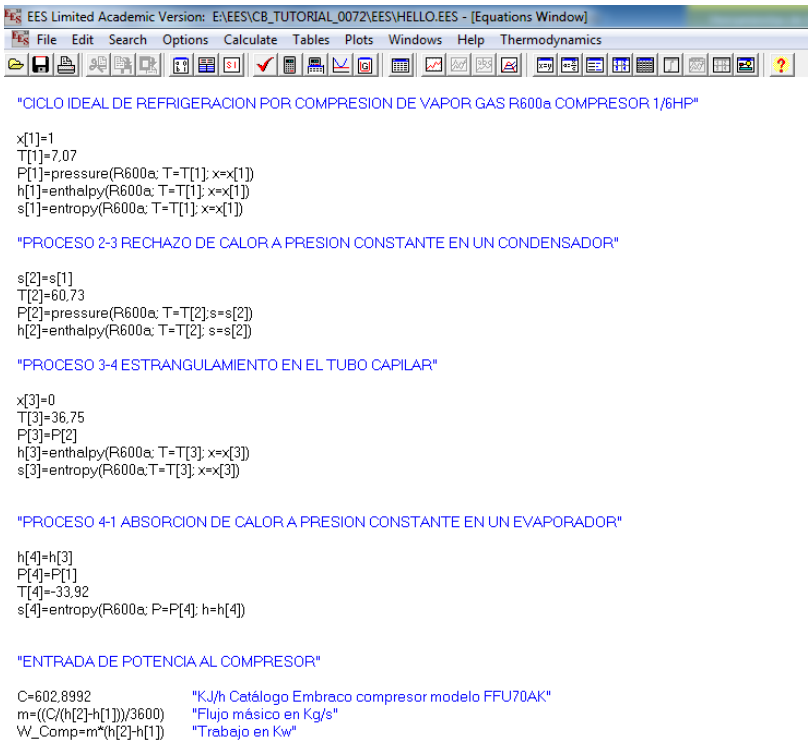


Figura: 3.40 Datos de ingreso y programación en EES para calcular el COP-compresor de 1/6 hp.

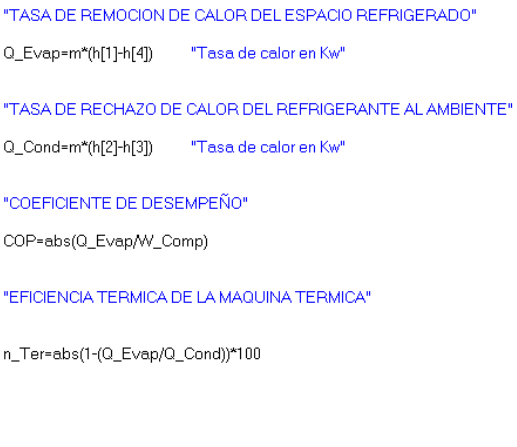


Figura: 3.41 Programación para cálculo del COP con EES-compresor 1/6 hp.

Al correr el programa se obtienen los resultados indicados en la figura 3.42

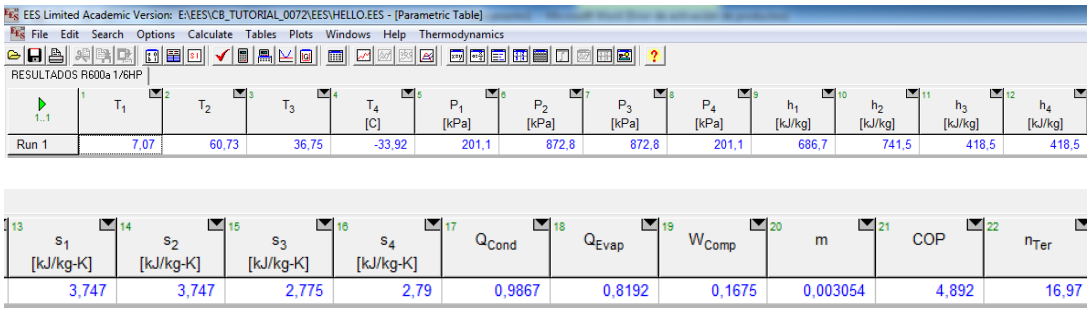


Figura: 3.42 Resultados del COP con EES-compresor 1/6 hp.

El valor del COP para esta prueba es de 4.892 lo que nos indica que el equipo elimina 4.9 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica que consume, es decir que los cambios realizados dieron resultados positivos.

Además de los resultados numéricos el programa permite graficar los diagramas Temperatura-Entropía y Presión-Entalpía de nuestro sistema, figura 3.43 y la figura 3.44.

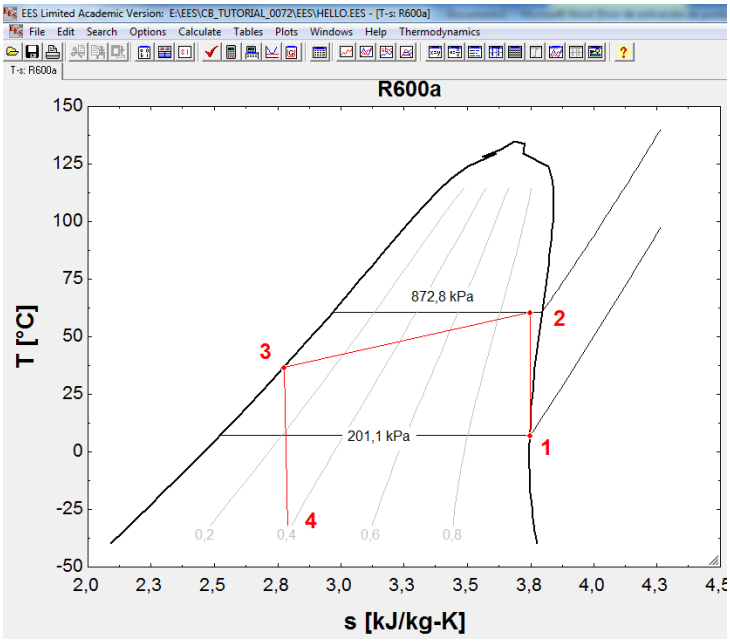


Figura: 3.43 Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/6 hp.

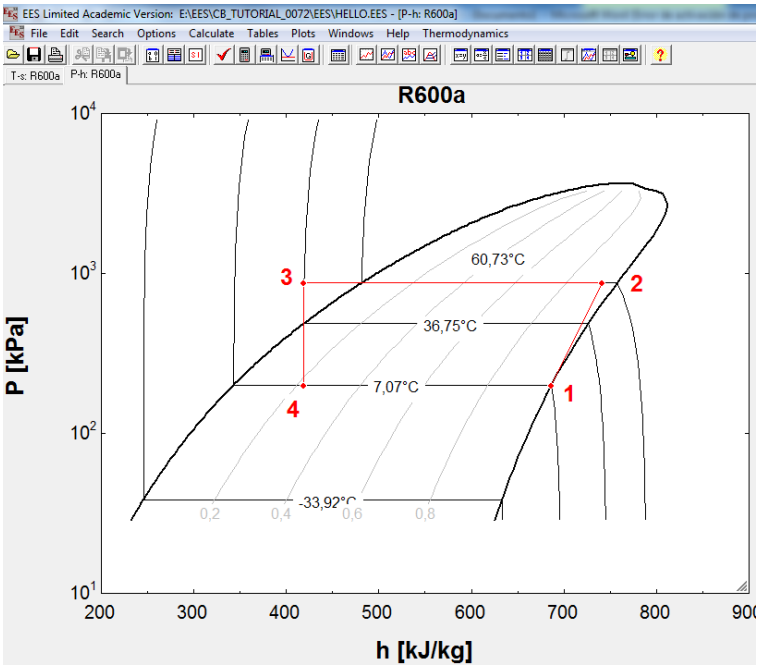


Figura: 3.44 Diagrama P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a- compresor 1/6 hp.

3.5 Conclusiones

- El refrigerante R600a es un compuesto inflamable, por lo tanto hay que considerar y respetar todas las normas e indicaciones adecuadas para utilizar esta clase de sustancia.

- Se comprobó que con 60 gramos de R600a se logra conseguir el mismo efecto de enfriamiento que con 120 gramos de R134a en un compresor de 1/4hp de potencia.

- En el presente estudio se cargó el isobutano en compresores para R12, teniendo resultados aceptables en el funcionamiento por la compatibilidad del aceite de este con el gas, aunque el fabricante del refrigerante no recomienda esta clase de adaptaciones.

- Los compresores para R12 vienen con un aceite mineral compatible con R600a, pero sus características de diseño y funcionamiento no son las adecuadas para isobutano puesto que su densidad, hace que necesite un compresor con una cámara de compresión diferente.

- En el equipo de prueba con un compresor de 1/4 hp, la temperatura límite a la que llega el evaporador es de -37^{o}C, en el gabinete del congelador la temperatura es de -16^{o}C, por lo que se demuestra que no se está aprovechando toda la carga térmica que produce el evaporador.

- El COP alcanzado en la refrigeradora funcionando con el compresor de 1/4 hp es 2.72 que es un valor aceptable para esta clase de equipos, sin embargo es menor al coeficiente de desempeño respecto al mismo equipo cargado con R134a con un compresor de la misma potencia.

- Con el compresor de 1/6hp, manteniendo la carga de 60 gramos, el funcionamiento mejoró ya que se logró tener una temperatura límite en el compartimiento del congelador de -16.5^{o}C siendo esta menor 0.5^{o}C que la obtenida con el compresor de mayor capacidad. Además se aprovecha mejor la carga térmica del evaporador.

- El COP alcanzado en el equipo con un compresor de 1/6 es de 4.89 es mayor respecto al COP alcanzado con el compresor de mayor potencia, por lo que los cambios en los componentes en el refrigerador son acertados.

- La temperatura del gabinete de refrigeración para el equipo con un compresor de 1/4hp está dentro de los valores estándar para este compartimiento, mientras que para el refrigerador con compresor de 1/6hp es de 3.5^{o}C, este valor está por debajo de los límites recomendados (5-7^{0}C), sería necesario realizar algún cambio en los ductos que comunican el congelador con el refrigerador y evitar que la temperatura baje demasiado.

- Los componentes de un equipo de refrigeración deben ser diseñados dependiendo del tipo del gas refrigerante que utilizan, ya que el comportamiento del fluido en el sistema depende de sus características. Aunque se puede modificar al equipo para que funcione con otra clase de gas, su funcionamiento no será al 100%, por ende la eficiencia también será afectada.

4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL REFRIGERANTE R600a FRENTE AL REFRIGERANTE R134a

4.1 Introducción

El estudio termodinámico realizado en los equipos de refrigeración doméstica y los resultados obtenidos nos permitirán conocer las ventajas, desventajas y los requisitos necesarios para considerar al gas R600a como un posible sustituto a los gases refrigerantes utilizados actualmente en la refrigeración doméstica.

Los parámetros que nos permitirán obtener conclusiones se enfocan en la comparación de los resultados obtenidos del coeficiente de desempeño COP, el consumo de energía y las principales propiedades termodinámicas.

4.2 Análisis comparativo del consumo de energía de los equipos cargados con R600a y R134a

4.2.1 Introducción

En el análisis realizado se han utilizado tres equipos de refrigeración doméstica no frost de la marca Ecasa modelo Boreal 212 cuya capacidad es para 234 litros; el detalle de las características del equipo de refrigeración se encuentra mencionado en la sección 1.5 de este documento.

Para conocer el consumo de energía de los equipos de refrigeración doméstica se ha utilizado un medidor de calidad de energía, la tabla 4-1 muestra las principales características del medidor fluke 1735 utilizado, en la sección 2.5 de este documento se encuentra descrito como se instaló el medidor al equipo.

Tabla 4-1 Registrador Trifásico Fluke 1735. Adaptado [22].

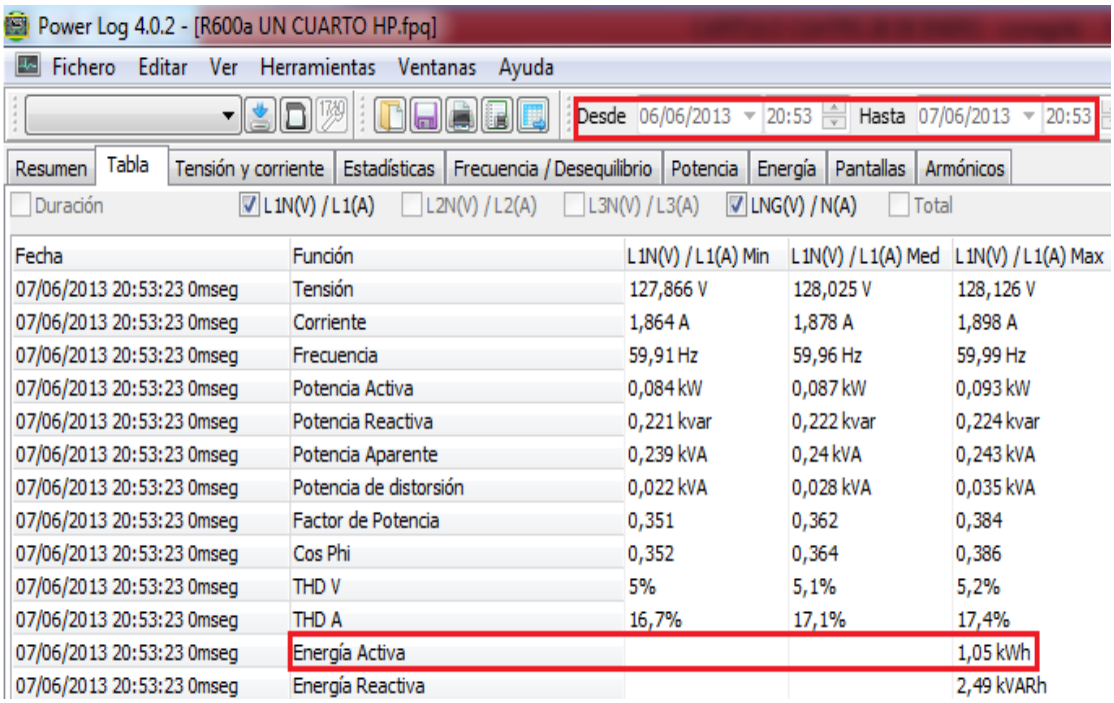
	Descripción: El registrador Fluke 1735 es un medidor de potencia ideal, ya que permite realizar estudios de la energía eléctrica, registros de datos básicos de la calidad eléctrica y comprobaciones de consumo de energía.
Calidad:	Desarrollado, diseñado y fabricado según la norma DIN ISO 9001
Alimentación eléctrica:	Juego de baterías con adaptador de CA (de 15 V a 20 V/0,8 A)
Dimensiones:	240 mm x 180 mm x 110 mm
Resolución medida energía:	De 1 W a 10 W

4.2.2 Refrigerador doméstico cargado con R600a

De igual forma para conocer el consumo de energía del equipo de refrigeración doméstico cargado con R600a utilizamos el medidor de calidad de energía Fluke 1735; en este análisis realizamos el almacenamiento de datos hasta de tres días.

En el ***anexo C*** de este documento podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía del refrigerador cargado con gas R600a y compresor de 1/4HP para el periodo de un día.

La figura 4.1 indica los valores obtenidos para el consumo de energía, potencia, tensión y corriente del equipo cargado con R600a y compresor de 1/4 HP; la información es el resultado de datos almacenados durante uno y tres días; las puertas tanto del congelador como del refrigerador fueron abiertas 4 veces al día durante 10 segundos; el valor máximo de consumo durante un día es de 1.05 KWh y durante los tres días es de 3.29 KWh figura 4.2.



Power Log 4.0.2 - [R600a UN CUARTO HP.fpq]

Fichero Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

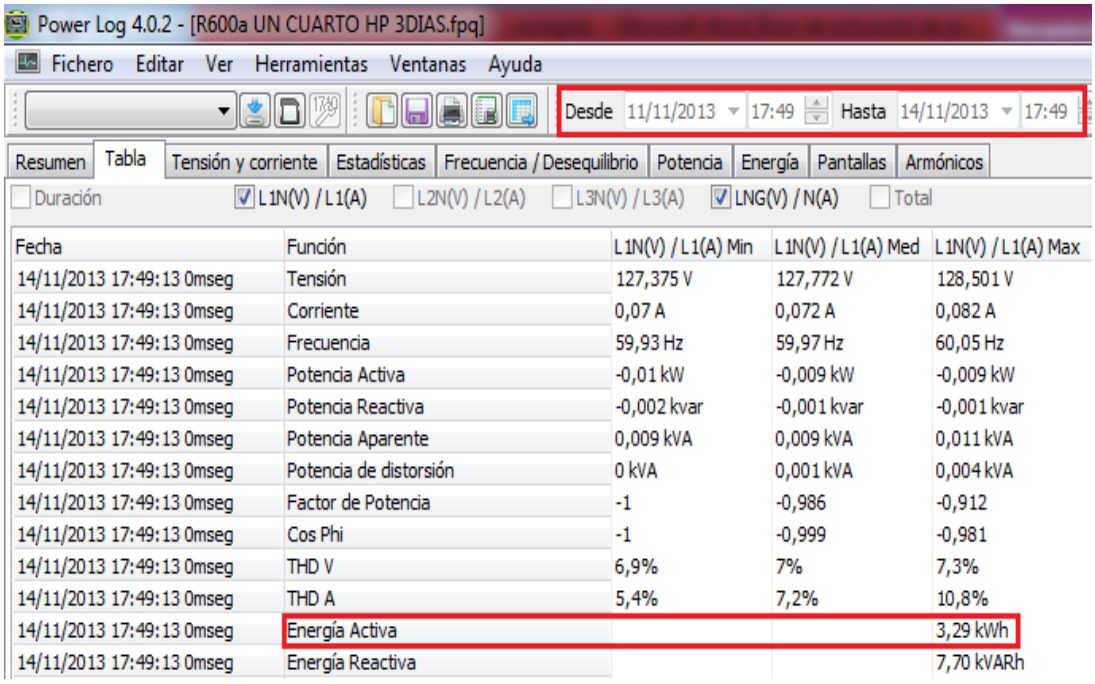
Desde 06/06/2013 20:53 Hasta 07/06/2013 20:53

Resumen | Tabla | Tensión y corriente | Estadísticas | Frecuencia / Desequilibrio | Potencia | Energía | Pantallas | Armónicos

Duración | L1N(V) / L1(A) | L2N(V) / L2(A) | L3N(V) / L3(A) | LNG(V) / N(A) | Total

Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Max
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Tensión	127,866 V	128,025 V	128,126 V
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Corriente	1,864 A	1,878 A	1,898 A
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Frecuencia	59,91 Hz	59,96 Hz	59,99 Hz
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Potencia Activa	0,084 kW	0,087 kW	0,093 kW
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Potencia Reactiva	0,221 kvar	0,222 kvar	0,224 kvar
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Potencia Aparente	0,239 kVA	0,24 kVA	0,243 kVA
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Potencia de distorsión	0,022 kVA	0,028 kVA	0,035 kVA
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Factor de Potencia	0,351	0,362	0,384
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Cos Phi	0,352	0,364	0,386
07/06/2013 20:53:23 0mseg	THD V	5%	5,1%	5,2%
07/06/2013 20:53:23 0mseg	THD A	16,7%	17,1%	17,4%
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Energía Activa			1,05 kWh
07/06/2013 20:53:23 0mseg	Energía Reactiva			2,49 kVARh

Figura: 4.1 Consumo de energía refrigerante R600a compresor 1/4 hp.



Power Log 4.0.2 - [R600a UN CUARTO HP 3DIAS.fpq]

Fichero Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

Desde 11/11/2013 17:49 Hasta 14/11/2013 17:49

Resumen | Tabla | Tensión y corriente | Estadísticas | Frecuencia / Desequilibrio | Potencia | Energía | Pantallas | Armónicos

Duración | L1N(V) / L1(A) | L2N(V) / L2(A) | L3N(V) / L3(A) | LNG(V) / N(A) | Total

Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Max
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Tensión	127,375 V	127,772 V	128,501 V
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Corriente	0,07 A	0,072 A	0,082 A
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Frecuencia	59,93 Hz	59,97 Hz	60,05 Hz
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Potencia Activa	-0,01 kW	-0,009 kW	-0,009 kW
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Potencia Reactiva	-0,002 kvar	-0,001 kvar	-0,001 kvar
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Potencia Aparente	0,009 kVA	0,009 kVA	0,011 kVA
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Potencia de distorsión	0 kVA	0,001 kVA	0,004 kVA
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Factor de Potencia	-1	-0,986	-0,912
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Cos Phi	-1	-0,999	-0,981
14/11/2013 17:49:13 0mseg	THD V	6,9%	7%	7,3%
14/11/2013 17:49:13 0mseg	THD A	5,4%	7,2%	10,8%
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Energía Activa			3,29 kWh
14/11/2013 17:49:13 0mseg	Energía Reactiva			7,70 kVARh

Figura: 4.2 Consumo de energía refrigerante R600a compresor 1/4 hp.

Con el objeto de poder comparar los tiempos de funcionamiento de los dos equipos también se ha realizado la medición del tiempo de encendido y apagado del refrigerador.

La tabla 4-2 contiene los tiempos de encendido y apagado del compresor, los valores son tomados durante aproximadamente 9 horas de funcionamiento.

Tabla 4-2 Tiempo de encendido y apagado equipo con R600a compresor 1/4 hp.

HORA	TIEMPO ON-OFF	T. AMBIENTE (˚C)	ESTADO	CORRIENTE (A)
10:15	22	19,5	APAGADO	
10:36	21	19,5	ENCENDIDO	1,53
10:56	20	20	APAGADO	
11:09	13	20	ENCENDIDO	1,84
11:30	21	20	APAGADO	
11:52	22	20,1	ENCENDIDO	1,63
12:13	21	20,1	APAGADO	
12:35	22	20,2	ENCENDIDO	1,67
12:55	20	20	APAGADO	
13:16	21	20	ENCENDIDO	1,62
13:37	21	20	APAGADO	
13:58	21	20	ENCENDIDO	1,63
14:20	22	20	APAGADO	
14:41	21	20	ENCENDIDO	1,65
15:02	21	20,2	APAGADO	
15:22	20	20,2	ENCENDIDO	1,65
15:42	20	20,2	APAGADO	
16:04	22	20,2	ENCENDIDO	1,79
16:28	24	20,2	APAGADO	
16:47	19	20,5	ENCENDIDO	1,69
17:07	20	20,4	APAGADO	
17:28	21	20,4	ENCENDIDO	1,72

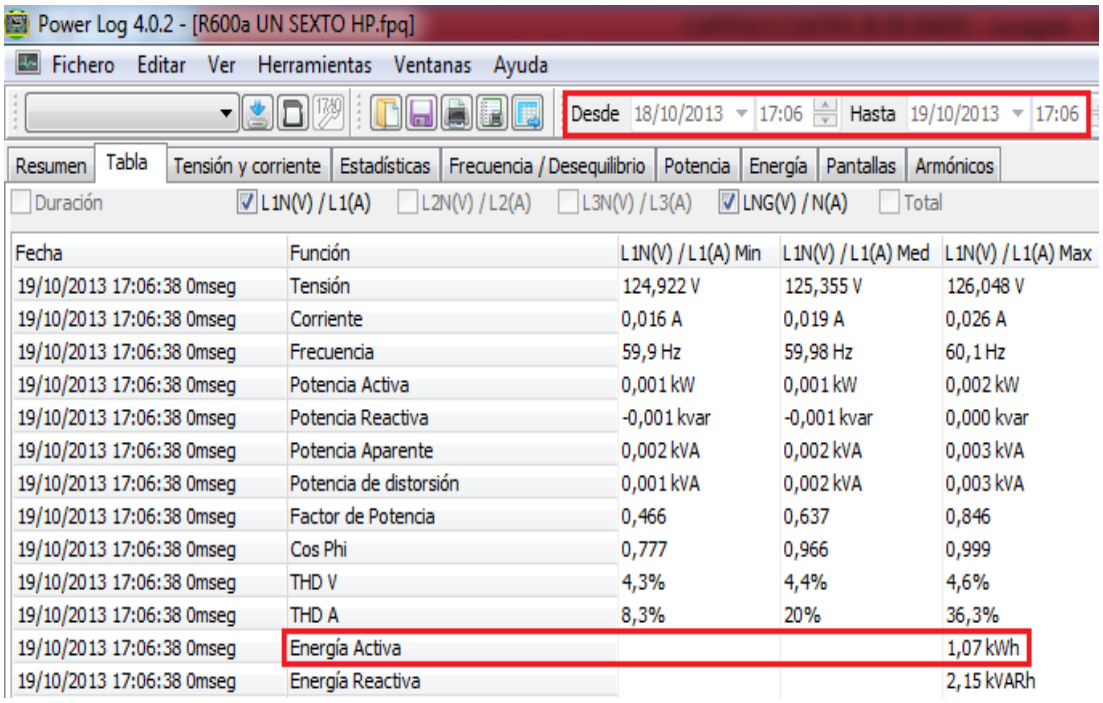
17:49	21	20,2	APAGADO	
18:10	21	20,1	ENCENDIDO	1,7
18:30	20	20,1	APAGADO	
18:51	21	20	ENCENDIDO	1,7
19:11	20	19,8	APAGADO	
19:33	22	19,8	ENCENDIDO	1,68
19:37	4	19,8	APAGADO	
20:14	37	19,8	ENCENDIDO	1,77

Observamos que el tiempo de encendido y apagado del compresor se mantiene en alrededor de 21 minutos.

Para el análisis también se utilizó el equipo de refrigeración no frost Boreal 212 cargado con R600a pero con un compresor de 1/6 HP.

En el ***anexo D*** de este documento podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía del refrigerador cargado con gas R600a y compresor de 1/6HP para el periodo de un día.

La figura 4.3 indica los valores obtenidos para el consumo de energía, potencia, tensión y corriente del equipo con R600a y compresor de 1/6 HP; la información es el resultado de datos almacenados durante uno y tres días; hemos considerado abrir las puertas tanto del congelador como del refrigerador 4 veces al día durante 10 segundos; el máximo valor del consumo de energía durante un día es de 1.07 KWh y durante los tres días es de 3.16 KWh según se indica en la figura 4.4.



Power Log 4.0.2 - [R600a UN SEXTO HP.fpq]

Fichero Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

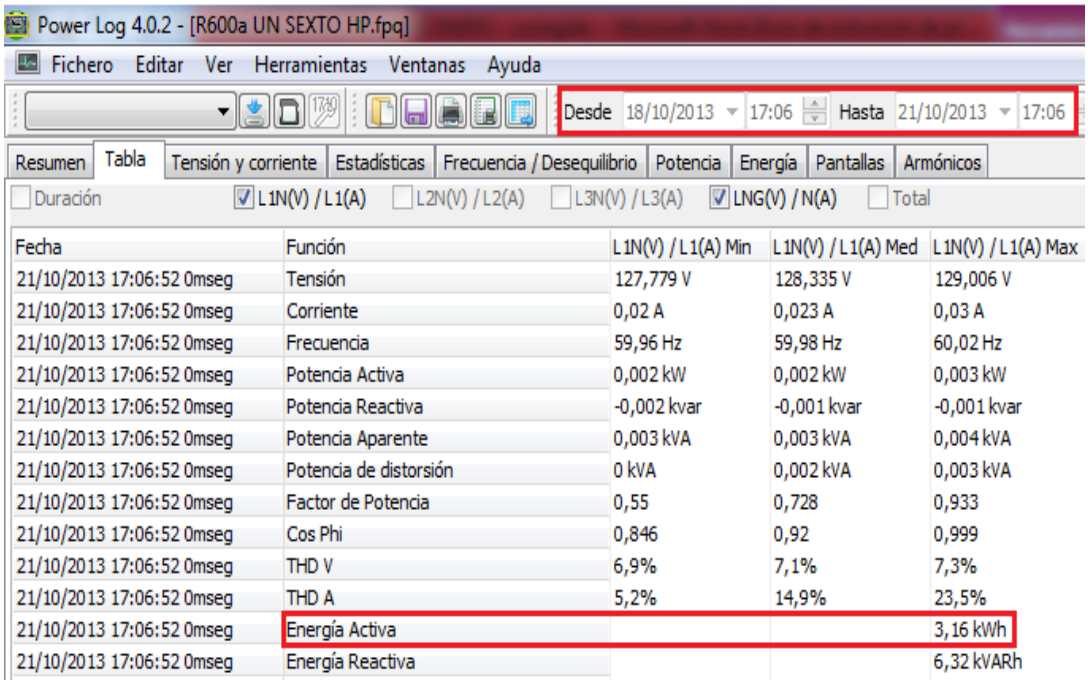
Desde 18/10/2013 17:06 Hasta 19/10/2013 17:06

Resumen | Tabla | Tensión y corriente | Estadísticas | Frecuencia / Desequilibrio | Potencia | Energía | Pantallas | Armónicos

Duración | L1N(V) / L1(A) | L2N(V) / L2(A) | L3N(V) / L3(A) | LNG(V) / N(A) | Total

Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Max
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Tensión	124,922 V	125,355 V	126,048 V
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Corriente	0,016 A	0,019 A	0,026 A
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Frecuencia	59,9 Hz	59,98 Hz	60,1 Hz
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Potencia Activa	0,001 kW	0,001 kW	0,002 kW
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Potencia Reactiva	-0,001 kvar	-0,001 kvar	0,000 kvar
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Potencia Aparente	0,002 kVA	0,002 kVA	0,003 kVA
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Potencia de distorsión	0,001 kVA	0,002 kVA	0,003 kVA
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Factor de Potencia	0,466	0,637	0,846
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Cos Phi	0,777	0,966	0,999
19/10/2013 17:06:38 0mseg	THD V	4,3%	4,4%	4,6%
19/10/2013 17:06:38 0mseg	THD A	8,3%	20%	36,3%
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Energía Activa			1,07 kWh
19/10/2013 17:06:38 0mseg	Energía Reactiva			2,15 kVARh

Figura: 4.3 Energía Activa refrigerante R600a Compresor 1/6 hp.



Power Log 4.0.2 - [R600a UN SEXTO HP.fpq]

Fichero Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

Desde 18/10/2013 17:06 Hasta 21/10/2013 17:06

Resumen | Tabla | Tensión y corriente | Estadísticas | Frecuencia / Desequilibrio | Potencia | Energía | Pantallas | Armónicos

Duración | L1N(V) / L1(A) | L2N(V) / L2(A) | L3N(V) / L3(A) | LNG(V) / N(A) | Total

Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Max
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Tensión	127,779 V	128,335 V	129,006 V
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Corriente	0,02 A	0,023 A	0,03 A
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Frecuencia	59,96 Hz	59,98 Hz	60,02 Hz
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Potencia Activa	0,002 kW	0,002 kW	0,003 kW
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Potencia Reactiva	-0,002 kvar	-0,001 kvar	-0,001 kvar
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Potencia Aparente	0,003 kVA	0,003 kVA	0,004 kVA
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Potencia de distorsión	0 kVA	0,002 kVA	0,003 kVA
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Factor de Potencia	0,55	0,728	0,933
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Cos Phi	0,846	0,92	0,999
21/10/2013 17:06:52 0mseg	THD V	6,9%	7,1%	7,3%
21/10/2013 17:06:52 0mseg	THD A	5,2%	14,9%	23,5%
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Energía Activa			3,16 kWh
21/10/2013 17:06:52 0mseg	Energía Reactiva			6,32 kVARh

Figura: 4.4 Energía Activa refrigerante R600a Compresor 1/6 hp.

Con la información recopilada podemos calcular el costo de energía que consume el equipo analizado, para esto utilizamos la ecuación [8]:

$$Costo\ de\ Energía = Consumo\ de\ Energía\ * Costo\ Unitario\ de\ cada\ Kwh$$

$Ecuación\ [8]$[23]

En este caso realizamos el cálculo del consumo anual en los tres equipos; los valores considerados son los máximos KWh consumidos en el periodo de un día, aunque cabe mencionar que los datos han sido tomados inclusive durante tres días, el valor de cada KWh consumido actualmente se encuentra en $0.08.

$$Costo\ por\ consumo\ de\ energía, equipo\ con\ gas\ R600a\ y\ compresor\ de\ \frac{1}{4}hp =$$

$$1.05\ \frac{Kwh}{día} * 0.08 \frac{\$}{Kwh} = 0.084 \frac{\$}{día} * 365 \frac{día}{año} = 30.66 \frac{\$}{año}$$

$$Costo\ por\ consumo\ de\ energía, equipo\ con\ gas\ R600a\ y\ compresor\ de\ \frac{1}{6}hp =$$

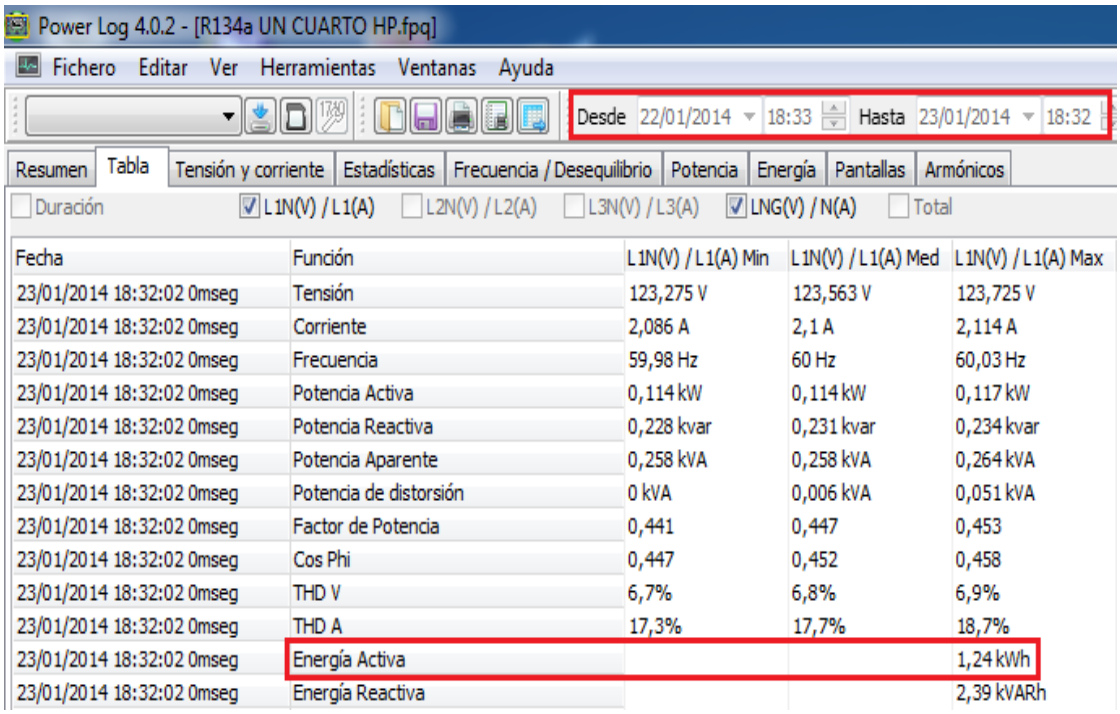
$$1.07\ \frac{Kwh}{día} * 0.08 \frac{\$}{Kwh} = 0.0856 \frac{\$}{día} * 365 \frac{día}{año} = 31.24 \frac{\$}{año}$$

4.2.3 Refrigerador doméstico cargado con R134a

A los datos almacenados en el medidor de calidad de energía los podemos descargar en un archivo digital usando el programa Power Log versión 4.0.2; en la interfaz podemos seleccionar se visualicen los datos requeridos en un periodo determinado, además podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía. En el ***anexo E*** de este documento se encuentra la información detallada del comportamiento del refrigerador cargado con gas R134a y compresor de 1/4HP para el periodo de un día.

[23] Adaptado: CENGEL, Yunus y BOLES Michael, *Termodinámica*, 5ª. Edición, Mc Graw Hill, México, 2002. 315p.

En la figura 4.5 se presentan los valores obtenidos por el consumo de energía, potencia, tensión y corriente; la información es el resultado de datos almacenados durante un día; hemos considerado abrir las puertas tanto del congelador como del refrigerador 4 veces al día durante 10 segundos; como observamos en la figura el valor máximo del consumo de energía es de 1.24 KWh para el equipo cargado con gas R134a y compresor de 1/4 HP.



Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Max
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Tensión	123,275 V	123,563 V	123,725 V
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Corriente	2,086 A	2,1 A	2,114 A
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Frecuencia	59,98 Hz	60 Hz	60,03 Hz
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Potencia Activa	0,114 kW	0,114 kW	0,117 kW
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Potencia Reactiva	0,228 kvar	0,231 kvar	0,234 kvar
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Potencia Aparente	0,258 kVA	0,258 kVA	0,264 kVA
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Potencia de distorsión	0 kVA	0,006 kVA	0,051 kVA
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Factor de Potencia	0,441	0,447	0,453
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Cos Phi	0,447	0,452	0,458
23/01/2014 18:32:02 0mseg	THD V	6,7%	6,8%	6,9%
23/01/2014 18:32:02 0mseg	THD A	17,3%	17,7%	18,7%
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Energía Activa			1,24 kWh
23/01/2014 18:32:02 0mseg	Energía Reactiva			2,39 kVARh

Figura: 4.5 Consumo de energía refrigerante R134a compresor de 1/4 hp.

Con el objeto de poder comparar los tiempos de funcionamiento de los dos equipos también se ha realizado la medición del tiempo de encendido y apagado del refrigerador.

La tabla 4-3 contiene la información de los datos almacenados durante aproximadamente 9 horas de funcionamiento.

Tabla 4-3 Tiempo de encendido y apagado equipo con R134a compresor 1/4 hp.

HORA	TIEMPO ON-OFF	T. AMBIENTE	ESTADO	CORRIENTE (A)
11:18	22	20	ENCENDIDO	3,59
11:27	9	20	APAGADO	
11:48	21	20,1	ENCENDIDO	3,86

11:54	6	20,2	APAGADO	
12:17	23	20,2	ENCENDIDO	3,57
12:23	6	20,2	APAGADO	
12:46	23	20,2	ENCENDIDO	3,83
12:52	6	20	APAGADO	
13:15	23	20	ENCENDIDO	3,83
13:22	7	20	APAGADO	
13:43	21	20	ENCENDIDO	3,85
13:50	7	20	APAGADO	
14:15	25	20	ENCENDIDO	3,86
14:20	5	20	APAGADO	
14:43	23	20,2	ENCENDIDO	3,98
14:48	5	20,2	APAGADO	
15:12	24	20,2	ENCENDIDO	3,85
15:18	6	20,2	APAGADO	
15:40	22	20,2	ENCENDIDO	3,92
15:48	8	20,2	APAGADO	
16:08	20	20,2	ENCENDIDO	4,05
16:15	7	20,2	APAGADO	
16:37	22	20,2	ENCENDIDO	3,94
16:44	7	20,3	APAGADO	
17:07	23	20,4	ENCENDIDO	4,09
17:13	6	20,3	APAGADO	
17:36	23	20,2	ENCENDIDO	3,93
17:43	7	20,2	APAGADO	
18:05	22	20,1	ENCENDIDO	4,02
18:11	6	20,1	APAGADO	
18:34	23	20,1	ENCENDIDO	4,3
18:41	7	20	APAGADO	
19:04	23	19,8	ENCENDIDO	4,13
19:10	6	19,8	APAGADO	

19:34	24	19,8	ENCENDIDO	4,02
19:41	7	19,8	APAGADO	
20:03	22	19,8	ENCENDIDO	3,98

Observamos que el tiempo de encendido del compresor se mantiene en alrededor de 22 minutos y el de apagado en alrededor de 7 minutos.

De idéntica forma con la información recopilada podemos calcular el costo de energía que consume el equipo analizado, para esto utilizamos la ecuación [4-1]:

$$Costo\ por\ consumo\ de\ Energía, equipo\ con\ gas\ R134a\ y\ compresor\ de\ \frac{1}{4}hp =$$

$$1.24\ \frac{Kwh}{día} * 0.08 \frac{\$}{Kwh} = 0.0992 \frac{\$}{día} * 365 \frac{día}{año} = 36.21 \frac{\$}{año}$$

Facilmente podemos observar que existe una reducción significativa en el costo anual por el consumo de energía cuando utilizamos el refrigerante R600a.

4.2.4 Análisis comparativo

Para identificar las ventajas al utilizar el R600a como sustituto en la refrigeración doméstica frente al R134a, es necesario comparar los datos medidos y calculados en los equipos donde se realizó la investigación, a continuación enunciamos varios aspectos que permiten comparar estos dos gases desde el punto de vista medio ambiental y un resumen de los cálculos realizados.

4.2.4.1 Ventajas al usar refrigerante R600a frente al R134a

1. **Potencial de calentamiento atmosférico**

El uso de los refrigerantes HFC actualmente se encuentra bajo control ya que tienen un importante potencial de calentamiento atmosférico (PCA), las investigaciones están dirigidas a encontrar posibles sustitutos que no contaminen el medio ambiente. De esta forma los hidrocarburos (HC) se presentan como buenos candidatos.

El potencial de agotamiento del ozono (PAO) de un refrigerante es un número que indica el potencial de destruir el ozono con respecto al gas refrigerante R-11, el cual tiene valor 1, mientras tanto el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) se refiere al potencial que tiene un gas de incrementar la temperatura media global a través del efecto invernadero, haciendo equivalencia en peso al CO2. En la tabla 4-4 observamos que el PCA para el gas R134a es 1200, un valor mucho mayor que para el gas R600a que tan solo es 8; esto y su menor tiempo de vida en la atmósfera lo convierten en un refrigerante mucho más amigable con el medio ambiente.

Tabla 4-4 Propiedades R600a frente a R134a. Adaptado [23].

Refrigerante	R600a	R134a
Potencial de destrucción de la capa de ozono.	0	0
Potencial de calentamiento atmosférico.	8	1200
Tiempo de vida en la atmósfera (años).	<1	16

2. Adecuada temperatura del congelador y refrigerador

Para las pruebas de refrigeración realizadas los equipos han sido cargados con masas de agua las cuales son una buena simulación de carga térmica que debe ser refrigerada; en total fueron introducidos 18 recipientes con 0.85 Kg de agua cada uno, 9 botellas con 0.6 Kg de agua cada una y finalmente una bolsa con 9.35 Kg de agua ubicada en el recipiente de verduras, todo lo antes mencionado hace un total de 30 Kg distribuidos en el refrigerador y congelador de forma idéntica en los tres equipos.

Considerando toda esta carga de agua observamos en la tabla 4-5 que las temperaturas en el equipo que usa R600a tanto en el refrigerador como en el congelador se encuentran en los rangos adecuados para la conservación de alimentos. Esto nos permite decir que con solo 60 gramos de gas R600a y un compresor de 1/6 HP podemos alcanzar las temperaturas que maneja el R134a con 120 gramos de gas y compresor de 1/4HP en las cámaras de refrigeración.

Tabla 4-5 Resultados análisis R600a frente a R134a.

Refrigerante	R600a		R134a
Compresor.	1/4HP	1/6HP	1/4HP
Carga de gas.	60 gramos	60 gramos	120 gramos
Temperatura del Congelador.	-15.73°C	-16.51°C	-17.14°C
Temperatura del Refrigerador.	5.98°C	3.06°C	4.47°C

3. Cambio de coeficiente de desempeño y eficiencia

Los datos con los cuales construimos el diagrama Presión-Entalpía y Temperatura-Entropía permitieron que obtengamos los coeficientes de desempeño y eficiencias, tabla 4-6; estos valores claramente nos indican que al utilizar el R600a el COP del refrigerador cambia, en el caso del refrigerador con R600a y compresor de 1/4 HP el COP es de 2.7 y con el compresor de 1/6 HP es de 4.8.

Tabla 4-6 Resultados análisis R600a frente a R134a.

Refrigerante	**R600a**		**R134a**
Compresor.	1/4HP	1/6HP	1/4HP
Carga de gas.	60 gramos	60 gramos	120 gramos
COP-Ciclo Ideal.	2.72	4.89	3.55
Eficiencia de la máquina-Ciclo Ideal.	26.85%	16.97%	21.96%

4. Presión de trabajo

Una de las mayores diferencias entre estos dos refrigerantes son las bajas presiones en las que opera el equipo con R600a esto hace posible que los compresores sean menos ruidosos, tabla 4-7.

Tabla 4-7 Resultados de presiones de trabajo.

Refrigerante	**R600a**		**R134a**
Compresor.	1/4HP	1/6HP	1/4HP
Carga de gas.	60 gramos	60 gramos	120 gramos
Presión (kPa)	90.3;816.8	201.1;872.8	205.2;1479

5. Menor consumo de energía

La ventaja más notable que consideramos es un aporte de esta investigación es indicar que al usar R600a el consumo de energía de los equipos analizados es menor, ver tabla 4-8; este consumo de energía incide directamente en el costo anual por funcionamiento de un

refrigerador doméstico. Observamos que usando el compresor de 1/4HP con R600a el costo anual es de $30.66 dólares y usando el compresor de 1/6 hp es de $31.24 dólares; por otra parte cuando utilizamos el compresor de 1/4HP con gas R134a el costo por el consumo de energía es de $36.21 dolares. Podemos pensar entonces que el desarrollo de esta tecnología en sistemas de refrigeración a nivel industrial sería de gran importancia al considerar ahorro de energía.

Tabla 4-8 Resultados análisis R134a frente a R600a.

Refrigerante	R600a		R134a
Compresor.	1/4HP	1/6HP	1/4HP
Carga de gas.	60 gramos	60 gramos	120 gramos
Consumo de Energía por día.	1.05 KWh	1.07 KWh	1.24 KWh

4.2.4.2 Desventajas al usar refrigerante R600a frente al R134a

Con todo lo antes mencionado también es necesario identificar las desventajas de usar R600a como refrigerante en los equipos de refrigeración doméstica.

1. Inflamabilidad

La principal desventaja del R600a es su inflamabilidad, ver tabla 4-9. Esto implica un manejo adecuado a la hora de su utilización y almacenaje; se debe tener especial cuidado en aplicaciones cuando existen concentraciones grandes de isobutano.

Para que se produzca un accidente se tienen que cumplir dos condiciones; una es la mezcla inflamable de gas y aire y la otra es el tipo de ignición a ciertos niveles de energía o temperatura. Estas dos condiciones se deben presentar juntas para la combustión, por lo que se debe evitar esta combinación.

Tabla 4-9 Propiedades R600a frente a R134a. Adaptado [23].

Refrigerante	R600a	R134a
Límite máximo de explosión.	8.5% de volumen Aprox. 203 g/m^3	No inflamable
Límite mínimo de explosión.	1.5% de volumen Aprox. 38 g/m^3	
Temperatura mínima de ignición.	460°C	

2. Incremento en el costo por cambios en el diseño del equipo

Danfoss como proveedor de refrigerantes y compresores no recomienda la conversión de sistemas R12 o R134a a R600a, estos sistemas no están diseñados para la utilización de refrigerantes inflamables.

Sería necesario elaborar nuevos diseños en los que se considere realizar la unión de los componentes a las cañerías mediante acoples soldados en frío y protecciones a todos los componentes eléctricos que pueden generar chispa; estos cambios inciden en el costo total del equipo. Para pruebas de seguridad en los refrigeradores domésticos y aplicaciones similares en Europa se ha establecido como estándar la hoja técnica IEC TS 95006 y una adaptación a la norma IEC / EN 60335-2-24, estas son normas de seguridad eléctrica.

En cuanto al costo del gas la carga de 60 gramos de R600a nos cuesta $5.40 mas $200 dólares por traerlo desde España mientras que la carga de 120 gramos de R134a cuesta $4.80 dólares y podemos conseguirlo a nivel local; como nos damos cuenta realizar la inversión de traer el gas para aplicaciones individuales no resulta conveniente, la idea será entonces desarrollar la tecnología a nivel de la industria para reducir costos e importar el gas a un menor precio.

4.3 Conclusiones

- Como se ha demostrado el gas R600a es un buen candidato para reemplazar al R134a en la refrigeración doméstica, su bajo tiempo de vida en la atmósfera menor a un año y su bajo potencial de calentamiento atmosférico menor a 8 lo muestran como un refrigerante ideal y amigable con el medio ambiente.

- Aunque en los talleres de mantenimiento y refacción de equipos de uso doméstico no se manejan grandes cantidades de gas; si pensamos en grandes producciones y almacenamiento será necesario regirse extrictamente a las norma de seguridad para evitar explosiones, a nivel de latinoamérica aún no se ha establecido una norma para uso de estos gases en refrigeración; sin embargo podemos aplicar la hoja técnica IEC TS 95006 y una adaptación a la norma IEC / EN 60335-2-24 que son normas de seguridad eléctrica.

- Una de las mayores diferencias entre estos dos refrigerantes son las bajas presiones en las que opera el equipo con R600a; estas bajas presiones hacen posible que los compresores sean menos ruidosos, sin embargo como se necesita de mayores desplazamientos para alcanzar el frío deseado se generan vibraciones que producen otros ruidos, además le necesidad de un mayor volúmen desplazado produce ruidos en el evaporador, podemos entonces pensar que es posible realizar un estudio en donde se considere aumentar el diámetro de los tubos del evaporador o su longitud.

5 Recomendaciones

- El uso de gas R600a en quipos de refrigeración doméstica nos permitirá consumir menos energía, esto se traduce en una reducción de hasta un 15% en el costo de energía consumida. Lo antes mencionado nos hace pensar en desarrollar tecnologías que nos permitan usar como refrigerantes a los HC serán de gran utilidad tanto para la refrigeración doméstica como para la refrigeración a nivel industrial.

- Actualmente conocemos que hay ciertas empresas que han introducido al mercado europeo y asiático diseños de compresores fabricados para R600a, recomendamos se realice un estudio similar usando este tipo de compresor, ya que los compresores diseñados para R600a tienen una mayor capacidad de desplazamiento.

- Los componentes del equipo de refrigeracion debe ser el apropiados para cada refrigerante, se recomienda para presentes estudios analizar las caracteristicas para el evaporador, condensador y tubo capilar par uso exclusivo de R600a.

6 Bibliografía

[1] CENGEL, Yunus A. y Boles, Michael A. *Termodinámica.* 5ª edición. México, McGraw Hill, 2002. 988p.

[2] LAMELA, Josué. *Ciclo Brayton Invertido*. [en línea] <http://termo2-1mi131.blogspot.com/2013/11/ciclo-brayton-invertido.html> [consulta: 10 octubre 2013].

[3] IDOIA, Caloryfrío. *Sistema de refrigeración por absorción*. [en línea] <http://www.caloryfrio.com/200810222795/aire-acondicionado/bomba-de-calor-reversible/sistema-de-refrigeracion-por-absorcion.html> [consulta: 10 octubre 2013].

[4] SKETCHUP, Diseños. *Componentes de un frigorífico*. [en línea] <http://sketchnovando.blogspot.com/p/disenos-sketchup.html> [consulta: 13 octubre 2013].

[5] UNIVERSIDAD de Costa Rica. *Eficiencia energética: El refrigerador*. [en línea] <http://www2.eie.ucr.ac.cr/~jromero/sitio-TCU-oficial/boletines/grupo04/numero-8/boletin8.html> [consulta: 13 octubre 2013].

[6] STIKY. *Cómo reducir el consumo energía del refrigerador*. [en línea] <http://www.ahorroenenergia.com/como-reducir-el-consumo-de-energia-del-refrigerador/> [consulta: 13 octubre 2013].

[7] WHITMAN, William C. y otros. *Tecnología de Refrigeración y Aire acondicionado*. 6ª edición. México, Cengage Learning Editores, 2010.

[8] INGERSOLL Rand. *Compresores de aire reciprocantes pequeños*. [en línea] <http://www.ingersollrandproducts.com/am-es/products/air/small-reciprocating-air-compressors/electric-driven-single-stage> [consulta: 15 enero 2013].

[9] DEUTSCHE GTZ. *Buenas prácticas de refrigeración.* Eschborn, Alemania. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 2010. 181p.

[10] QE Quality. Domésticos relojes de desescarche. [en línea] <http://es.qequality.com/categories/165/TEMPORIZADORES/products/106/DOMESTICOS_RELOJES_DE_DESESCARCHE_PARAGON.aspx> [consulta: 27 enero 2013].

[11] EMBRACO. *Catálogo electrónico*. [en línea] <http://www.embraco.com/catalog/Default.aspx?language=ES> [consulta: 27 enero 2014].

[12] BELLINI Hnos. *Catálogo de temporizadores*. [en línea] <http://www.bellinihnos.com.ar/padmin/catalogos/Bellini-Hnos_TIMERS.pdf> [consulta: 16 noviembre 2013].

[13] INNERCO. *El tubo capilar con filtro*. [en línea] <http://www.innerco.com/esp/index.asp> [consulta: 27 enero 2014].

[14] HONEYWELL. *Genetron R134a Properties, Uses, Storage, and Handling*. [en línea] <https://www.honeywell.com/sites/servlet/com.merx.npoint.servlets.DocumentServlet?docid=D05FCC22B-9F6A-8971-BE36-DEF311739081> [consulta: 6 de noviembre 2013].

[15] EMBRACO. *Manual de aplicación de compresores*. [en línea] <http://www.embraco.com/desktopmodules/downloadsAdmin/arquivos/O7aPHEzzQu.pdf> [consulta: 8 de julio 2013].

[16] PUEBLA, Jorge. *Manual de Buenas Prácticas de Refrigeración*. 1ª edición. Venezuela, Fondo de Reconversión de Venezuela, 2006. 156p.

[17] DANFOSS, *Aplicación práctica del refrigerante R600a isobutano en sistemas refrigerados domésticos*. [en línea] <http://www.construmatica.com/archivos/27579/4_catalogo_compresores_danfoss/informacion_tecnica.pdf> [consulta: 17 de abril 2013].

[18] TECUMSEH. *Technical Bulletin Hydrocarbons*. [en línea] <http://www.tecumseh.com/en/south-america/library/~/media/South%20America/Files/English%20Library/Technical_Bulletin_Hidrocarbons_English.pdf> [consulta: 25 octubre 2013].

[19] EXTREMECOOLING. *Diagrama Presión-Entalpía R600a.* [en línea] <http://www.extremecooling.de/forum/threads/174-K%C3%A4ltemittel-Daten-Diagramme-und-Mehr!> [consulta: 25 octubre 2013].

[20] CONSTRUNARIO. *Ficha técnica del isobutano*. [en línea] <http://www.construnario.com/ebooks/6730/fluidos%20frigoríficos/refrigerantes%20naturales%20(hidrocarburos)/isobutano%20o%20r600a/ficha%20técnica/files/publication.pdf> [consulta: 26 diciembre 2013].

[21] DANFOSS. *Dancap.* [en línea] <http://www.danfoss.com/spain/businessareas/refrigeration+and+air+conditioning/product+selection+tools+details/dancap.htm> [consulta: 20 noviembre 2013].

[22] FLUKE. *Registrador Trifásico Fluke 1735*. [en línea] <http://www.fluke.com/Fluke/mxes/Medidores-de-Calidad-de-la-Energia-Electrica/Logging-Power-Meters/Fluke-1735.htm?PID=56028> [consulta: 04 febrero 2014]

[23] MACLAINE CROSS, Ian. *Performance and safety of LPG refrigerants*. [en línea] <http://www.hychill.com.au/pdf/pasolpgr.pdf> [consulta: 26 octubre 2013].

[24] MACLAINE CROSS, Ian. *Why Hydrocarbons save energy*. [en línea] <http://www.duracool.com/PWR_ENG/WHY_HYDROCARBONS_SAVE_ENERGY.pdf> [consulta: 26 octubre 2013].

[25] VILLAMIL, Herwin M. y Piamba Oscar E. *Estudio y aplicación de ciclos de refrigeración-Refrigerantes Alternativos.* [en línea]. <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231117496005.pdf> [consulta: 10 Octubre 2013].

[26] CRINCOLI, Claudio A. *Refrigerantes Hidrocarburos como alternativa para los sitemas de refrigeración*. [en línea] <http://www.estis.net/includes/file.asp?site=lac-ozone&file=EA7670C3-C5B2-459B-A320-71188CA0E69F> [consulta: 26 octubre 2013].

7 Anexos

7.1 Anexo A

En este anexo observamos los valores de las temperaturas en el equipo cargado con R134a obtenidas con el Compac Río y módulo de termocuplas durante los primeros 25 minutos.

Tiempo (s)	T1 (°C) Evaporador	T2 (°C) Congelador	T3 (°C) Refrigerador	T4 (°C) Salida del Compresor	T5 (°C) Ingreso del Compresor	T6 (°C) Salida del Condensador
10	-14,76	-16,11	5,36	28,18	26,23	30,02
20	-14,79	-16,10	5,35	28,13	26,22	29,99
30	-14,83	-16,08	5,34	28,10	26,19	29,97
40	-14,87	-16,06	5,34	28,02	26,15	29,98
50	-14,88	-16,02	5,34	28,03	26,14	30,00
60	-14,89	-15,99	5,35	27,98	26,12	30,01
70	-14,92	-15,96	5,36	27,93	26,05	30,02
80	-14,94	-15,95	5,35	27,94	25,98	29,97
90	-14,93	-15,92	5,34	27,79	25,83	29,88
100	-14,95	-15,89	5,35	27,84	25,91	29,90
110	-14,97	-15,86	5,35	27,78	25,91	29,96
120	-15,91	-15,85	5,34	31,67	23,99	29,34
130	-17,79	-15,81	5,35	38,17	15,96	27,50
140	-18,57	-15,80	5,35	40,63	11,87	26,69
150	-18,14	-15,77	5,35	40,57	12,11	27,04
160	-17,59	-15,75	5,35	40,02	13,05	27,35
170	-17,13	-15,72	5,34	39,09	14,22	27,85
180	-16,82	-15,72	5,35	38,10	15,28	28,45
190	-16,66	-15,69	5,35	37,12	16,22	29,21
200	-16,52	-15,64	5,36	36,11	17,04	29,84

210	-16,23	-15,62	5,35	35,22	17,65	29,89
220	-16,03	-15,61	5,36	34,63	18,22	29,78
230	-15,78	-15,58	5,35	33,87	18,75	29,66
240	-15,37	-15,55	5,36	33,30	19,21	29,55
250	-15,11	-15,50	5,37	32,73	19,62	29,57
260	-14,95	-15,49	5,37	32,16	20,11	29,55
270	-14,77	-15,47	5,35	31,54	20,60	29,67
280	-14,55	-15,45	5,34	31,17	20,95	29,81
290	-14,37	-15,41	5,34	30,82	21,20	30,00
300	-14,22	-15,41	5,33	30,51	21,41	30,18
310	-13,99	-15,38	5,32	30,22	21,50	30,33
320	-13,77	-15,36	5,34	29,92	21,52	30,45
330	-13,60	-15,34	5,33	29,64	21,61	30,56
340	-13,44	-15,29	5,35	29,56	21,73	30,66
350	-13,27	-15,26	5,35	29,38	21,78	30,81
360	-13,13	-15,24	5,34	29,25	21,88	30,96
370	-12,96	-15,21	5,34	29,11	21,99	31,07
380	-12,81	-15,18	5,35	28,92	22,00	30,98
390	-12,68	-15,17	5,34	28,76	21,96	30,99
400	-12,53	-15,14	5,34	28,69	22,02	30,99
410	-12,39	-15,12	5,34	28,61	22,11	31,07
420	-12,23	-15,08	5,33	28,50	22,14	31,14
430	-12,09	-15,06	5,34	28,43	22,17	30,97
440	-11,99	-15,04	5,31	28,31	22,21	31,01
450	-11,91	-15,00	5,33	28,15	22,29	31,06
460	-11,80	-14,98	5,33	28,19	22,42	31,04
470	-11,71	-14,95	5,35	28,18	22,53	31,08

480	-11,63	-14,93	5,33	28,14	22,64	31,04
490	-11,54	-14,91	5,33	28,11	22,75	30,98
500	-11,45	-14,88	5,34	28,07	22,88	30,94
510	-11,39	-14,87	5,33	28,03	22,99	30,96
520	-11,29	-14,83	5,33	27,90	23,13	30,96
530	-11,22	-14,79	5,34	27,86	23,26	30,89
540	-11,14	-14,78	5,34	27,81	23,39	30,82
550	-11,05	-14,74	5,35	27,74	23,50	30,77
560	-10,99	-14,72	5,35	27,67	23,61	30,76
570	-10,91	-14,70	5,36	27,65	23,72	30,79
580	-10,85	-14,69	5,34	27,64	23,91	30,77
590	-10,77	-14,67	5,34	27,54	23,94	30,76
600	-10,69	-14,64	5,33	27,48	23,99	30,77
610	-10,63	-14,64	5,31	27,48	24,01	30,70
620	-10,57	-14,61	5,30	27,42	24,05	30,72
630	-10,51	-14,60	5,31	27,44	24,21	30,63
640	-10,44	-14,58	5,31	27,45	24,34	30,65
650	-10,40	-14,57	5,29	27,38	24,34	30,62
660	-10,32	-14,55	5,30	27,35	24,34	30,57
670	-10,27	-14,51	5,30	27,35	24,47	30,55
680	-10,21	-14,49	5,31	27,32	24,52	30,53
690	-10,14	-14,46	5,31	27,25	24,53	30,47
700	-10,08	-14,43	5,33	27,19	24,58	30,48
710	-10,03	-14,41	5,32	27,18	24,61	30,40
720	-9,96	-14,39	5,32	27,24	24,65	30,38
730	-9,89	-14,35	5,34	27,25	24,71	30,39
740	-9,84	-14,32	5,34	27,17	24,70	30,32

750	-9,77	-14,30	5,34	27,19	24,74	30,31
760	-9,71	-14,27	5,35	27,20	24,76	30,34
770	-9,65	-14,25	5,35	27,19	24,83	30,31
780	-9,58	-14,23	5,35	27,16	24,86	30,28
790	-9,54	-14,20	5,34	27,14	24,87	30,30
800	-9,47	-14,17	5,35	27,10	24,87	30,26
810	-9,41	-14,16	5,35	27,06	24,85	30,25
820	-9,34	-14,15	5,33	26,99	24,82	30,23
830	-9,26	-14,13	5,33	27,01	24,82	30,27
840	-9,19	-14,12	5,32	27,03	24,83	30,22
850	-9,13	-14,08	5,32	27,00	24,83	30,22
860	-9,06	-14,07	5,32	26,97	24,79	30,20
870	-9,02	-14,06	5,30	26,92	24,80	30,19
880	-8,95	-14,02	5,32	26,83	24,79	30,19
890	-8,89	-14,02	5,32	26,82	24,71	30,19
900	-8,81	-13,98	5,32	26,86	24,77	30,17
910	-8,74	-13,95	5,33	26,86	24,76	30,15
920	-8,65	-13,93	5,33	26,85	24,71	30,11
930	-8,56	-13,91	5,32	26,81	24,68	30,09
940	-8,42	-13,88	5,32	26,73	24,57	30,08
950	-8,31	-13,86	5,31	26,75	24,50	30,03
960	-8,20	-13,85	5,30	26,75	24,55	29,93
970	-8,08	-13,83	5,30	26,75	24,53	29,95
980	-7,98	-13,81	5,30	26,66	24,47	29,90
990	-7,84	-13,77	5,30	26,57	24,41	29,93
1000	-7,73	-13,75	5,30	26,61	24,42	29,92
1010	-7,65	-13,73	5,30	26,60	24,43	29,88

1020	-7,51	-13,70	5,31	26,57	24,39	29,86
1030	-7,37	-13,67	5,30	26,50	24,23	29,83
1040	-7,27	-13,67	5,30	26,44	24,14	29,82
1050	-7,15	-13,63	5,30	26,49	24,10	29,88
1060	-7,07	-13,61	5,30	26,53	24,08	29,85
1070	-6,97	-13,59	5,29	26,55	24,11	29,88
1080	-6,88	-13,58	5,29	26,49	24,03	29,85
1090	-6,78	-13,56	5,29	26,51	24,01	29,86
1100	-6,74	-13,54	5,30	26,52	23,96	29,85
1110	-6,67	-13,52	5,30	26,49	23,86	29,81
1120	-6,59	-13,49	5,31	26,52	23,80	29,76
1130	-6,51	-13,47	5,30	26,54	23,70	29,75
1140	-6,43	-13,45	5,30	26,61	23,69	29,76
1150	-6,34	-13,43	5,32	26,66	23,67	29,79
1160	-6,24	-13,40	5,32	26,62	23,55	29,76
1170	-6,13	-13,38	5,31	26,67	23,49	29,76
1180	-6,00	-13,35	5,32	26,74	23,44	29,77
1190	-5,88	-13,35	5,32	26,77	23,34	29,75
1200	-5,76	-13,34	5,31	26,78	23,26	29,70
1210	-5,58	-13,33	5,30	26,78	23,14	29,73
1220	-5,41	-13,31	5,28	26,82	23,03	29,71
1230	-5,21	-13,29	5,29	26,86	22,91	29,67
1240	-4,90	-13,26	5,31	26,88	22,84	29,68
1250	-4,65	-13,22	5,31	26,96	22,77	29,62
1260	-4,39	-13,21	5,32	27,01	22,69	29,63
1270	-4,18	-13,20	5,30	26,94	22,61	29,58
1280	-3,86	-13,18	5,31	26,98	22,51	29,57

1290	-3,50	-13,14	5,32	26,98	22,52	29,51
1300	-3,17	-13,13	5,33	26,96	22,52	29,46
1310	-2,88	-13,08	5,33	27,00	22,57	29,45
1320	-2,59	-13,06	5,35	27,00	22,62	29,45
1330	-2,44	-13,03	5,34	27,00	22,65	29,41
1340	-2,20	-13,00	5,35	27,00	22,71	29,40
1350	-1,96	-12,99	5,35	26,99	22,76	29,39
1360	-1,58	-12,97	5,36	26,94	22,81	29,34
1370	-1,32	-12,97	5,33	26,91	22,86	29,35
1380	-1,08	-12,92	5,35	26,90	22,87	29,32
1390	-0,83	-12,89	5,35	26,94	22,86	29,34
1400	-0,45	-12,89	5,34	26,92	22,86	29,34
1410	-0,19	-12,86	5,34	26,88	22,89	29,30
1420	-0,03	-12,83	5,34	26,91	23,00	29,31
1430	0,29	-12,81	5,34	26,92	23,16	29,30
1440	0,47	-12,80	5,34	26,88	23,31	29,28
1450	0,65	-12,81	5,32	26,84	23,55	29,27
1460	0,83	-12,78	5,31	26,83	23,86	29,23
1470	0,97	-12,75	5,31	26,86	24,18	29,23
1480	1,04	-12,74	5,32	26,82	24,45	29,21
1490	1,19	-12,72	5,31	26,80	24,72	29,22
1500	1,38	-12,67	5,33	26,80	25,02	29,22
1510	1,48	-12,64	5,34	26,77	25,28	29,15
1520	1,63	-12,62	5,34	26,77	25,51	29,18
1530	1,74	-12,61	5,32	26,77	25,68	29,19
1540	1,85	-12,60	5,32	26,74	25,85	29,17
1550	1,96	-12,57	5,32	26,67	26,01	29,17

1560	2,06	-12,54	5,31	26,66	26,11	29,20
1570	2,17	-12,51	5,33	26,70	26,19	29,23
1580	2,27	-12,49	5,33	26,68	26,34	29,25
1590	2,34	-12,49	5,32	26,68	26,42	29,30

7.2 Anexo B-1

En este anexo observamos los valores de las temperaturas en el equipo cargado con R600a con un compresor de 1/4 de hp de potencia, obtenidas con el Compac Río y módulo de termocuplas durante los primeros 25 minutos.

Tiempo (s)	T1 (°C) Evaporador	T2 (°C) Congelador	T3 (°C) Refrigerador	T4 (°C) Salida del Compresor	T5 (°C) Ingreso del Compresor	T6 (°C) Salida del Condensador
10	-36,28	-13,94	5,02	50,31	13,75	21,94
20	-36,32	-14,00	5,01	50,41	13,71	21,87
30	-36,38	-14,04	5,02	50,38	13,64	21,89
40	-36,42	-14,09	5,01	50,52	13,52	21,85
50	-36,44	-14,12	5,03	50,69	13,43	21,83
60	-36,48	-14,17	5,02	50,81	13,37	21,79
70	-36,54	-14,21	5,03	51,00	13,29	21,71
80	-36,58	-14,27	5,02	51,10	13,18	21,65
90	-36,60	-14,32	5,02	50,93	13,05	21,68
100	-36,62	-14,33	5,03	50,87	12,95	21,65
110	-36,64	-14,35	5,04	50,94	12,85	21,65
120	-36,70	-14,38	5,05	51,00	12,80	21,59
130	-36,76	-14,40	5,06	51,10	12,77	21,51
140	-36,80	-14,45	5,06	51,15	12,76	21,48
150	-36,83	-14,49	5,06	51,20	12,70	21,48
160	-36,87	-14,52	5,06	51,19	12,64	21,48
170	-36,91	-14,56	5,06	51,22	12,58	21,47
180	-36,93	-14,59	5,06	51,03	12,49	21,49
190	-36,98	-14,64	5,05	51,22	12,42	21,50
200	-37,03	-14,66	5,05	51,31	12,32	21,47

210	-37,06	-14,70	5,05	51,41	12,21	21,43
220	-37,10	-14,73	5,04	51,43	12,12	21,45
230	-37,12	-14,79	5,04	51,49	12,00	21,42
240	-37,15	-14,81	5,04	51,60	11,93	21,36
250	-37,18	-14,86	5,04	51,57	11,77	21,33
260	-37,20	-14,89	5,03	51,66	11,66	21,34
270	-37,25	-14,91	5,03	51,49	11,53	21,35
280	-37,27	-14,93	5,02	51,42	11,41	21,36
290	-37,29	-14,97	5,03	51,41	11,32	21,34
300	-37,32	-14,99	5,03	51,75	11,24	21,36
310	-37,34	-15,02	5,03	51,78	11,14	21,33
320	-37,41	-15,05	5,02	51,83	11,08	21,32
330	-37,39	-15,08	5,03	51,59	11,04	21,31
340	-37,43	-15,12	5,01	51,46	11,01	21,29
350	-37,47	-15,12	5,03	51,78	10,99	21,31
360	-37,49	-15,14	5,05	51,96	10,95	21,31
370	-37,49	-15,14	5,06	52,07	10,88	21,28
380	-37,52	-15,18	5,05	52,12	10,85	21,27
390	-37,54	-15,20	5,04	52,12	10,84	21,24
400	-37,55	-15,24	5,03	52,15	10,80	21,27
410	-37,55	-15,25	5,03	52,08	10,74	21,27
420	-37,59	-15,27	5,04	52,10	10,70	21,29
430	-37,61	-15,28	5,05	52,45	10,67	21,26
440	-37,64	-15,30	5,05	52,54	10,61	21,25
450	-37,66	-15,34	5,05	52,60	10,63	21,26
460	-37,68	-15,36	5,05	52,55	10,60	21,25
470	-37,67	-15,38	5,06	52,42	10,57	21,26

480	-37,70	-15,40	5,05	52,40	10,51	21,28
490	-37,74	-15,42	5,05	52,46	10,45	21,23
500	-37,78	-15,44	5,06	52,50	10,47	21,19
510	-37,78	-15,44	5,08	52,45	10,45	21,19
520	-37,78	-15,45	5,08	52,54	10,41	21,18
530	-37,79	-15,46	5,09	52,46	10,38	21,22
540	-37,84	-15,48	5,07	52,47	10,30	21,24
550	-37,86	-15,51	5,07	52,40	10,26	21,27
560	-37,88	-15,54	5,05	52,41	10,19	21,28
570	-37,87	-15,55	5,06	52,55	10,15	21,26
580	-37,89	-15,58	5,06	52,80	10,05	21,27
590	-37,89	-15,60	5,05	52,61	9,99	21,24
600	-37,92	-15,62	5,05	52,48	9,97	21,25
610	-37,95	-15,63	5,06	52,57	9,95	21,22
620	-37,98	-15,64	5,06	52,60	9,92	21,20
630	-37,99	-15,66	5,07	52,71	9,89	21,22
640	-38,00	-15,66	5,07	52,68	9,88	21,24
650	-37,99	-15,69	5,06	52,86	9,93	21,20
660	-37,99	-15,68	5,08	52,82	9,85	21,21
670	-37,99	-15,69	5,08	52,77	9,78	21,21
680	-38,01	-15,70	5,10	52,95	9,76	21,23
690	-38,37	-15,71	5,09	52,16	10,83	21,68
700	-38,63	-15,71	5,09	50,36	13,14	22,15
710	-38,60	-15,70	5,09	48,45	16,00	22,96
720	-38,51	-15,69	5,09	46,55	18,62	24,14
730	-38,38	-15,66	5,10	44,77	20,90	25,53
740	-38,24	-15,62	5,11	43,07	22,79	26,63

750	-38,12	-15,60	5,11	41,67	24,14	27,42
760	-37,98	-15,58	5,11	40,26	25,19	27,94
770	-37,80	-15,56	5,09	39,12	25,95	28,29
780	-37,52	-15,55	5,09	38,00	26,60	28,58
790	-37,18	-15,53	5,09	36,86	27,08	28,85
800	-36,87	-15,53	5,08	35,99	27,44	29,12
810	-36,54	-15,50	5,08	35,03	27,73	29,41
820	-36,22	-15,48	5,07	34,13	28,01	29,77
830	-35,96	-15,45	5,09	33,64	28,22	30,11
840	-35,76	-15,43	5,09	33,13	28,47	30,40
850	-35,59	-15,42	5,08	32,57	28,67	30,69
860	-35,46	-15,42	5,07	32,20	28,79	30,93
870	-35,31	-15,41	5,09	31,84	29,02	31,23
880	-35,19	-15,41	5,06	31,48	29,18	31,47
890	-35,08	-15,38	5,06	31,16	29,31	31,71
900	-34,98	-15,37	5,05	30,85	29,43	31,91
910	-34,85	-15,35	5,07	30,53	29,52	32,17
920	-34,71	-15,34	5,06	30,30	29,60	32,43
930	-34,60	-15,31	5,06	30,07	29,74	32,70
940	-34,47	-15,27	5,09	29,85	29,84	32,90
950	-34,37	-15,24	5,09	29,71	29,96	33,06
960	-34,27	-15,23	5,09	29,47	30,02	33,20
970	-34,20	-15,23	5,06	29,26	30,03	33,34
980	-34,11	-15,22	5,07	29,10	30,01	33,50
990	-34,04	-15,22	5,05	28,95	30,11	33,62
1000	-33,97	-15,19	5,07	28,83	30,18	33,68
1010	-33,88	-15,15	5,09	28,68	30,21	33,74

1020	-33,80	-15,13	5,10	28,57	30,28	33,82
1030	-33,72	-15,11	5,10	28,46	30,32	33,90
1040	-33,65	-15,11	5,09	28,34	30,38	34,00
1050	-33,59	-15,10	5,07	28,21	30,41	34,11
1060	-33,53	-15,09	5,06	28,16	30,46	34,22
1070	-33,48	-15,09	5,06	28,08	30,51	34,30
1080	-33,41	-15,08	5,06	28,08	30,55	34,43
1090	-33,35	-15,07	5,04	28,06	30,61	34,49
1100	-33,29	-15,06	5,04	28,04	30,64	34,49
1110	-33,25	-15,06	5,03	27,98	30,68	34,46
1120	-33,18	-15,01	5,04	27,87	30,75	34,56
1130	-33,11	-14,99	5,03	27,81	30,77	34,65
1140	-33,03	-14,96	5,05	27,82	30,78	34,69
1150	-32,96	-14,94	5,06	27,83	30,81	34,68
1160	-32,90	-14,91	5,07	27,78	30,85	34,73
1170	-32,82	-14,88	5,08	27,72	30,86	34,73
1180	-32,78	-14,87	5,07	27,71	30,83	34,70
1190	-32,73	-14,87	5,06	27,67	30,87	34,70
1200	-32,69	-14,85	5,05	27,67	30,89	34,70
1210	-32,65	-14,84	5,04	27,64	30,91	34,70
1220	-32,61	-14,82	5,04	27,61	30,88	34,69
1230	-32,56	-14,82	5,04	27,57	30,86	34,67
1240	-32,50	-14,80	5,04	27,58	30,95	34,64
1250	-32,45	-14,79	5,03	27,53	30,94	34,60
1260	-32,39	-14,77	5,02	27,45	30,91	34,58
1270	-32,34	-14,75	5,02	27,36	30,87	34,58
1280	-32,29	-14,71	5,04	27,37	30,83	34,58

1290	-32,22	-14,68	5,05	27,38	30,86	34,56
1300	-32,17	-14,66	5,05	27,36	30,86	34,53
1310	-32,11	-14,63	5,07	27,28	30,84	34,51
1320	-32,07	-14,62	5,06	27,24	30,83	34,53
1330	-32,03	-14,61	5,06	27,15	30,82	34,53
1340	-31,96	-14,59	5,05	27,18	30,78	34,51
1350	-31,88	-14,57	5,06	27,14	30,72	34,44
1360	-31,83	-14,55	5,07	27,08	30,69	34,36
1370	-31,78	-14,54	5,04	27,05	30,72	34,24
1380	-31,71	-14,53	5,04	27,02	30,73	34,16
1390	-31,66	-14,53	5,04	26,99	30,70	34,10
1400	-31,58	-14,50	5,04	26,93	30,67	34,07
1410	-31,52	-14,47	5,04	26,93	30,64	34,06
1420	-31,45	-14,46	5,04	26,91	30,63	34,05
1430	-31,37	-14,43	5,05	26,91	30,60	34,04
1440	-31,30	-14,42	5,04	26,87	30,61	34,04
1450	-31,24	-14,40	5,04	26,84	30,59	34,03
1460	-31,16	-14,37	5,05	26,80	30,60	34,07
1470	-31,11	-14,38	5,04	26,83	30,55	34,05
1480	-31,04	-14,35	5,05	26,84	30,58	34,04
1490	-30,99	-14,34	5,03	26,76	30,59	34,02
1500	-30,92	-14,33	5,02	26,69	30,57	34,04
1510	-30,84	-14,31	5,03	26,70	30,55	34,05
1520	-30,78	-14,28	5,03	26,67	30,54	34,05
1530	-30,68	-14,26	5,04	26,67	30,54	34,08
1540	-30,62	-14,23	5,05	26,66	30,52	34,07
1550	-30,55	-14,20	5,06	26,70	30,51	34,02

1560	-30,46	-14,17	5,07	26,68	30,51	34,00
1570	-30,40	-14,15	5,05	26,63	30,48	34,02
1580	-30,33	-14,13	5,06	26,60	30,44	33,99
1590	-30,26	-14,11	5,05	26,61	30,40	33,94

7.3 Anexo B-2

En este anexo observamos los valores de las temperaturas en el equipo cargado con R600a con un compresor de 1/6 de hp de potencia, obtenidas con el Compac Río y módulo de termocuplas durante los primeros 25 minutos.

Tiempo (s)	T1 (°C) Evaporador	T2 (°C) Congelador	T3 (°C) Refrigerador	T4 (°C) Salida del Compresor	T5 (°C) Ingreso del Compresor	T6 (°C) Salida del Condensador
10	-29,17	-15,76	3,78	34,54	32,59	32,60
20	-29,08	-15,75	3,79	34,33	32,52	32,62
30	-29,02	-15,74	3,77	34,30	32,43	32,63
40	-28,95	-15,73	3,78	34,00	32,38	32,67
50	-28,92	-15,75	3,76	33,87	32,26	32,65
60	-28,85	-15,75	3,74	33,97	32,23	32,56
70	-28,78	-15,72	3,75	34,02	32,20	32,54
80	-28,69	-15,70	3,77	34,03	32,16	32,49
90	-28,62	-15,70	3,76	33,93	32,14	32,47
100	-28,53	-15,69	3,76	33,86	32,07	32,41
110	-28,46	-15,67	3,76	33,71	32,00	32,44
120	-28,39	-15,67	3,74	33,68	31,98	32,41
130	-28,30	-15,64	3,76	33,51	31,95	32,40
140	-28,23	-15,64	3,76	33,43	31,94	32,20
150	-28,16	-15,61	3,78	33,38	31,90	32,05
160	-28,09	-15,61	3,77	33,26	31,83	31,98
170	-28,03	-15,60	3,76	33,22	31,74	31,93
180	-27,97	-15,60	3,75	33,14	31,65	31,93
190	-27,90	-15,58	3,75	33,07	31,59	31,95
200	-27,85	-15,58	3,74	32,98	31,48	31,99

210	-27,81	-15,58	3,73	32,73	31,41	31,99
220	-27,75	-15,57	3,72	32,67	31,30	31,98
230	-27,70	-15,56	3,71	32,60	31,30	31,85
240	-27,64	-15,54	3,71	32,56	31,24	31,83
250	-27,56	-15,54	3,71	32,42	31,22	31,78
260	-27,49	-15,52	3,71	32,35	31,19	31,71
270	-27,43	-15,51	3,71	32,33	31,14	31,72
280	-27,40	-15,51	3,69	32,29	31,06	31,74
290	-27,36	-15,51	3,67	32,15	30,94	31,74
300	-27,26	-15,50	3,67	32,01	30,86	31,75
310	-27,14	-15,48	3,67	31,99	30,80	31,74
320	-26,99	-15,47	3,68	32,00	30,79	31,63
330	-26,85	-15,46	3,66	32,06	30,73	31,59
340	-26,69	-15,45	3,68	31,92	30,67	31,56
350	-26,52	-15,41	3,69	31,96	30,69	31,49
360	-26,35	-15,38	3,70	31,95	30,66	31,44
370	-26,22	-15,38	3,70	31,90	30,63	31,41
380	-26,09	-15,34	3,70	31,86	30,57	31,34
390	-25,98	-15,34	3,70	31,89	30,54	31,27
400	-25,88	-15,30	3,72	31,89	30,52	31,22
410	-25,79	-15,30	3,72	31,82	30,46	31,23
420	-25,71	-15,30	3,69	31,69	30,40	31,23
430	-25,61	-15,27	3,71	31,51	30,30	31,23
440	-25,54	-15,26	3,71	31,41	30,33	31,18
450	-25,50	-15,25	3,71	31,39	30,28	31,20
460	-25,48	-15,24	3,69	31,31	30,20	31,21
470	-25,42	-15,23	3,69	31,17	30,10	31,19

480	-25,32	-15,20	3,70	31,20	30,05	31,13
490	-25,22	-15,17	3,72	31,30	30,05	31,10
500	-25,15	-15,16	3,73	31,33	30,06	31,03
510	-25,09	-15,13	3,73	31,23	30,03	31,04
520	-25,06	-15,13	3,72	31,15	30,01	30,96
530	-25,00	-15,10	3,73	31,16	30,02	30,88
540	-24,94	-15,08	3,72	31,22	30,03	30,84
550	-24,93	-15,08	3,71	31,23	30,02	30,78
560	-24,88	-15,07	3,71	31,22	29,97	30,77
570	-24,84	-15,07	3,72	31,10	29,95	30,72
580	-24,74	-15,03	3,73	30,99	29,97	30,73
590	-24,67	-15,00	3,74	31,00	29,99	30,69
600	-24,62	-14,99	3,74	30,95	29,97	30,65
610	-24,53	-14,94	3,76	30,94	29,96	30,57
620	-24,50	-14,94	3,75	30,93	29,93	30,52
630	-24,48	-14,94	3,74	30,95	29,89	30,51
640	-24,48	-14,93	3,74	30,90	29,86	30,48
650	-24,44	-14,93	3,73	30,67	29,77	30,50
660	-24,40	-14,91	3,73	30,60	29,72	30,47
670	-24,38	-14,90	3,71	30,62	29,68	30,43
680	-24,35	-14,89	3,71	30,63	29,61	30,41
690	-24,32	-14,88	3,71	30,44	29,54	30,43
700	-24,31	-14,89	3,70	30,42	29,50	30,44
710	-24,29	-14,88	3,70	30,47	29,49	30,42
720	-24,23	-14,85	3,71	30,45	29,46	30,41
730	-24,18	-14,82	3,72	30,37	29,40	30,42
740	-24,15	-14,81	3,72	30,29	29,36	30,45

750	-24,12	-14,80	3,72	30,24	29,33	30,47
760	-24,09	-14,79	3,72	30,20	29,30	30,50
770	-24,08	-14,80	3,70	30,21	29,23	30,51
780	-24,05	-14,77	3,71	30,14	29,20	30,52
790	-24,00	-14,75	3,72	30,15	29,22	30,46
800	-23,96	-14,74	3,72	30,22	29,17	30,40
810	-23,92	-14,71	3,72	30,19	29,12	30,44
820	-23,90	-14,71	3,72	30,11	29,09	30,47
830	-23,87	-14,70	3,70	30,02	29,05	30,46
840	-23,82	-14,69	3,71	30,02	29,04	30,45
850	-23,80	-14,69	3,70	30,01	29,01	30,44
860	-23,77	-14,66	3,70	29,92	29,01	30,37
870	-23,74	-14,65	3,72	29,97	28,96	30,32
880	-23,69	-14,64	3,71	29,84	28,89	30,33
890	-23,65	-14,62	3,72	29,77	28,87	30,37
900	-23,62	-14,61	3,72	29,80	28,86	30,36
910	-23,54	-14,57	3,72	29,78	28,86	30,35
920	-23,53	-14,58	3,72	29,62	28,80	30,33
930	-23,53	-14,58	3,70	29,57	28,76	30,31
940	-23,53	-14,57	3,71	29,55	28,72	30,28
950	-23,46	-14,54	3,70	29,57	28,71	30,24
960	-23,44	-14,54	3,70	29,56	28,68	30,25
970	-23,44	-14,54	3,69	29,53	28,65	30,24
980	-23,44	-14,53	3,70	29,46	28,61	30,27
990	-23,40	-14,51	3,70	29,27	28,59	30,29
1000	-23,35	-14,50	3,70	29,22	28,55	30,32
1010	-23,33	-14,49	3,70	29,18	28,52	30,33

1020	-23,31	-14,50	3,69	29,11	28,45	30,32
1030	-23,24	-14,47	3,70	29,00	28,42	30,34
1040	-23,19	-14,45	3,72	29,03	28,43	30,31
1050	-23,15	-14,45	3,71	29,19	28,44	30,26
1060	-23,13	-14,45	3,70	29,21	28,42	30,24
1070	-23,09	-14,44	3,71	29,23	28,41	30,24
1080	-23,07	-14,43	3,69	29,15	28,35	30,27
1090	-23,04	-14,42	3,70	29,13	28,36	30,28
1100	-23,00	-14,41	3,71	29,16	28,39	30,28
1110	-22,95	-14,39	3,71	29,16	28,34	30,23
1120	-22,92	-14,38	3,71	29,19	28,37	30,19
1130	-22,86	-14,36	3,72	29,19	28,37	30,13
1140	-22,85	-14,36	3,70	29,13	28,32	30,13
1150	-22,83	-14,36	3,69	29,00	28,27	30,13
1160	-22,83	-14,36	3,68	28,87	28,18	30,16
1170	-22,79	-14,35	3,69	28,63	28,11	30,22
1180	-22,77	-14,35	3,68	28,72	28,17	30,16
1190	-22,74	-14,35	3,68	28,77	28,16	30,12
1200	-22,71	-14,33	3,68	28,73	28,01	30,17
1210	-22,67	-14,31	3,69	28,73	28,08	30,12
1220	-22,63	-14,31	3,68	28,73	28,07	30,04
1230	-22,60	-14,30	3,69	28,76	28,09	30,00
1240	-22,56	-14,28	3,70	28,78	28,08	29,96
1250	-22,53	-14,28	3,69	28,81	28,05	29,95
1260	-22,51	-14,27	3,69	28,75	28,06	29,98
1270	-22,44	-14,25	3,70	28,71	28,06	29,95
1280	-22,39	-14,24	3,71	28,71	28,07	29,97

1290	-22,36	-14,22	3,71	28,65	28,05	29,99
1300	-22,24	-14,22	3,71	28,80	27,76	29,98
1310	-21,54	-14,15	3,70	32,32	25,19	29,37
1320	-21,23	-13,99	3,71	36,79	21,34	29,23
1330	-21,21	-13,79	3,72	40,50	16,59	28,51
1340	-21,48	-13,61	3,71	43,11	12,59	27,73
1350	-21,78	-13,44	3,71	44,98	10,47	27,57
1360	-21,95	-13,30	3,71	46,22	9,70	27,65
1370	-22,16	-13,16	3,72	47,23	9,71	27,86
1380	-22,44	-13,04	3,72	47,62	10,47	28,02
1390	-22,71	-12,95	3,71	47,72	11,64	28,12
1400	-23,10	-12,88	3,70	48,06	13,06	27,94
1410	-23,50	-12,82	3,71	48,34	14,47	27,61
1420	-23,86	-12,77	3,71	48,56	15,81	26,97
1430	-24,15	-12,75	3,72	48,80	16,92	26,25
1440	-24,40	-12,73	3,72	48,93	17,90	25,40
1450	-24,64	-12,73	3,71	49,17	18,76	24,71
1460	-24,74	-12,72	3,72	49,28	19,46	24,23
1470	-24,99	-12,75	3,72	49,26	20,11	24,00
1480	-25,14	-12,79	3,70	49,24	20,63	23,87
1490	-25,30	-12,81	3,70	49,32	21,04	23,78
1500	-25,45	-12,85	3,70	49,29	21,40	23,86
1510	-25,58	-12,89	3,69	49,39	21,69	23,95
1520	-25,68	-12,91	3,69	49,53	22,00	24,05
1530	-25,70	-12,95	3,70	49,75	22,32	24,09
1540	-25,80	-12,99	3,70	49,67	22,57	24,14
1550	-25,87	-13,01	3,72	49,78	22,82	24,09

1560	-25,95	-13,05	3,70	49,99	23,10	23,87
1570	-26,04	-13,07	3,71	50,17	23,40	23,54
1580	-26,10	-13,12	3,69	50,10	23,47	23,31
1590	-26,19	-13,15	3,70	50,15	23,51	23,12

7.4 Anexo C

Información del instrumento

Número de modelo	FLUKE 1735
Número de serie	N/D
Revisión de firmware	N/D

Información de software

Versión de Power Log	4.0.2
Versión FLUKE 345 DLL	11.20.2006
Versión FLUKE 430 DLL	1.8.0.0
Versión FLUKE 430-II DLL	1.0.0.19

Información general

Lugar de medida	LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA
Cliente	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Notas	ANEXO C
	En este anexo podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía del refrigerador cargado con gas R600a y compresor de 1/4HP para el periodo de un día.

Resumen de medición

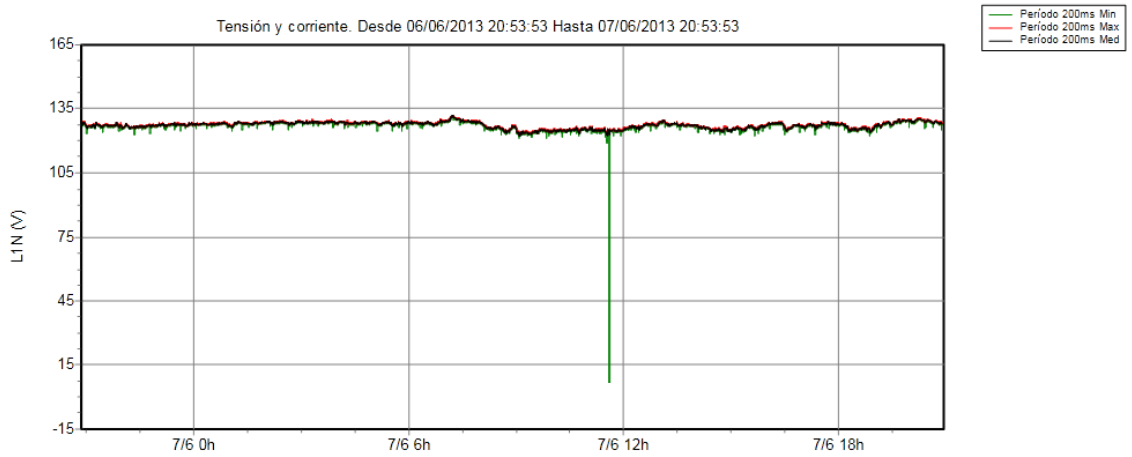
Modo de aplicación	N/D
Primera medida	06/06/2013 20:53:53
Ultima medida	08/06/2013 8:52:53
Intervalo de grabación	0h 0m 30s 0mseg
Tensión nominal	127 V
Corriente nominal	50 A
Frecuencia nominal	60 Hz

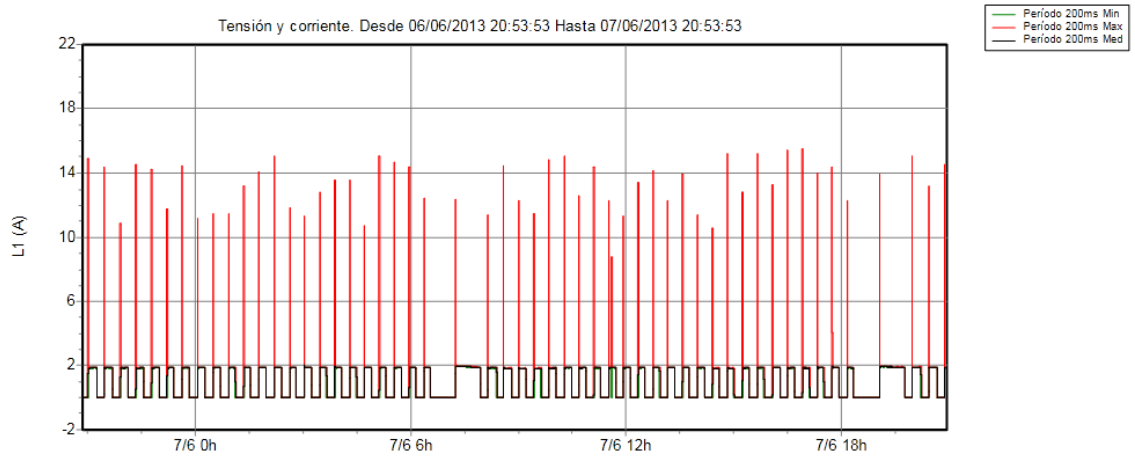
Resumen de registros

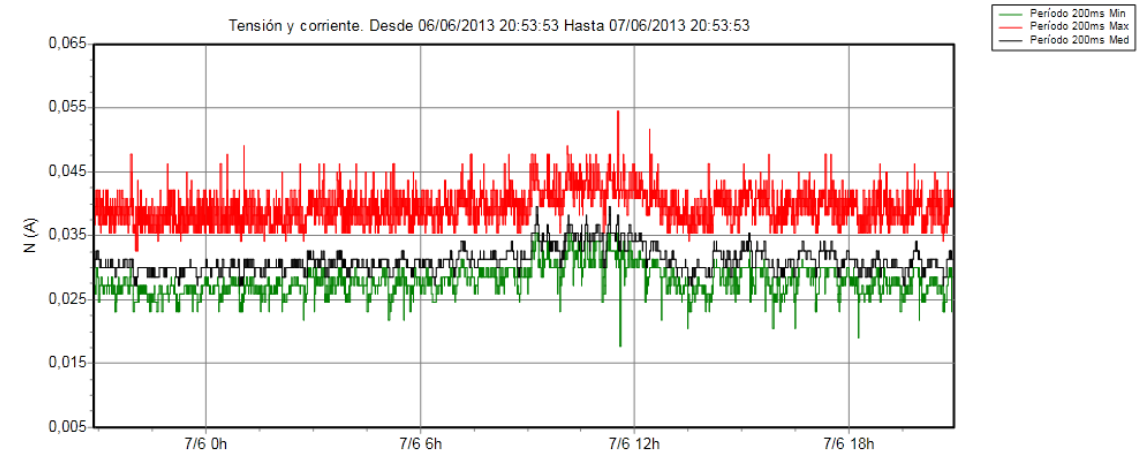
Registros RMS	4319
Registros DC	0
Registros de frecuencia	4319
Registros de desequilibrios	0
Registros de armónicos	0
Registros de armónicos de potencia	0
Registros de potencia	4319
Registros de desequilibrios de potencia	0
Registros de energía	4319
Registros de pérdidas de energía	0
Registros de parpadeos	0
Registros de señalización de la red principal	0

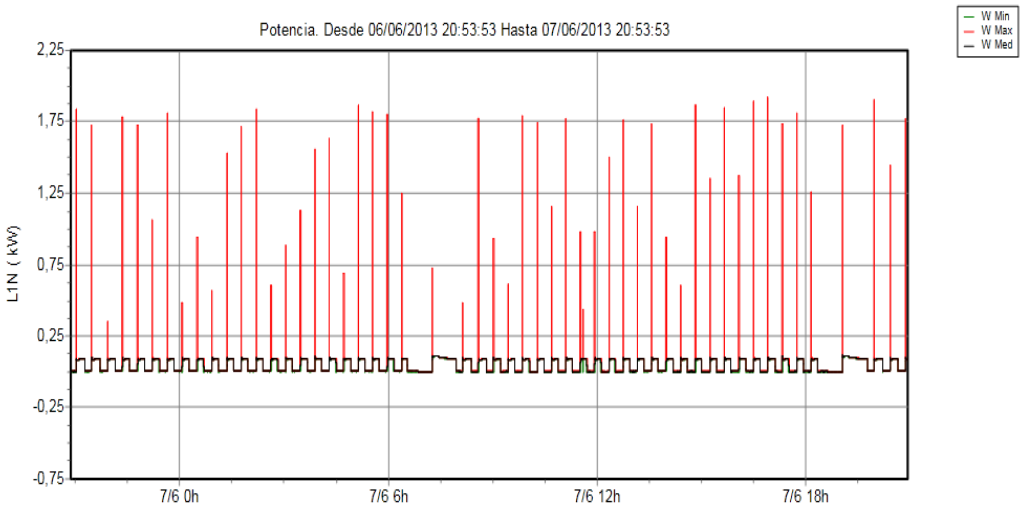
Resumen de eventos

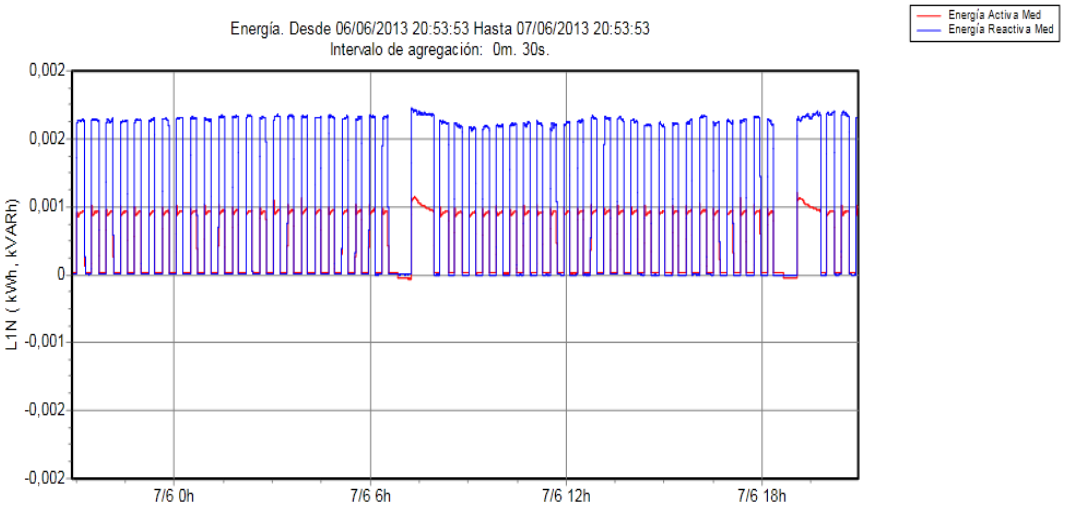
Caídas de tensión	0
Subidas de tensión	0
Transitorios	0
Interrupciones	0
Perfiles de tensión	0
Variaciones rápidas de tensión	0
Pantallas	32
Formas de onda	0
Intervalos sin mediciones	0
Gráficos de corriente de arranque	0
Eventos de onda	0
Eventos RMS	0


Tensión y corriente. Desde 06/06/2013 20:53:53 Hasta 07/06/2013 20:53:53
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1 N (V)
165
135
105
75
45
15
-15
7/6 0h
7/6 6h
7/6 12h
7/6 18h


Tensión y corriente. Desde 06/06/2013 20:53:53 Hasta 07/06/2013 20:53:53
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1 (A)
22
18
14
10
6
2
-2
7/6 0h
7/6 6h
7/6 12h
7/6 18h


Tensión y corriente. Desde 06/06/2013 20:53:53 Hasta 07/06/2013 20:53:53
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
N (A)
0,065
0,055
0,045
0,035
0,025
0,015
0,005
7/6 0h
7/6 6h
7/6 12h
7/6 18h


Potencia. Desde 06/06/2013 20:53:53 Hasta 07/06/2013 20:53:53
W Min
W Max
W Med
L1N (kW)
2,25
1,75
1,25
0,75
0,25
-0,25
-0,75
7/6 0h
7/6 6h
7/6 12h
7/6 18h


Energía. Desde 06/06/2013 20:53:53 Hasta 07/06/2013 20:53:53
Intervalo de agregación: 0m. 30s.
Energía Activa Med
Energía Reactiva Med
L1N (kWh, kVARh)
0,002
0,002
0,001
0
-0,001
-0,002
-0,002
7/6 0h
7/6 6h
7/6 12h
7/6 18h

7.5 Anexo D

Información del instrumento

Número de modelo	FLUKE 1735
Número de serie	S112912164B7
Revisión de firmware	V01.09

Información de software

Versión de Power Log	4.0.2
Versión FLUKE 345 DLL	11.20.2006
Versión FLUKE 430 DLL	1.8.0.0
Versión FLUKE 430-II DLL	1.0.0.19

Información general

Lugar de medida	LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA
Cliente	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Notas	ANEXO D
	En este anexo podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía del refrigerador cargado con gas R600a y compresor de 1/6HP para el periodo de un día.

Resumen de medición

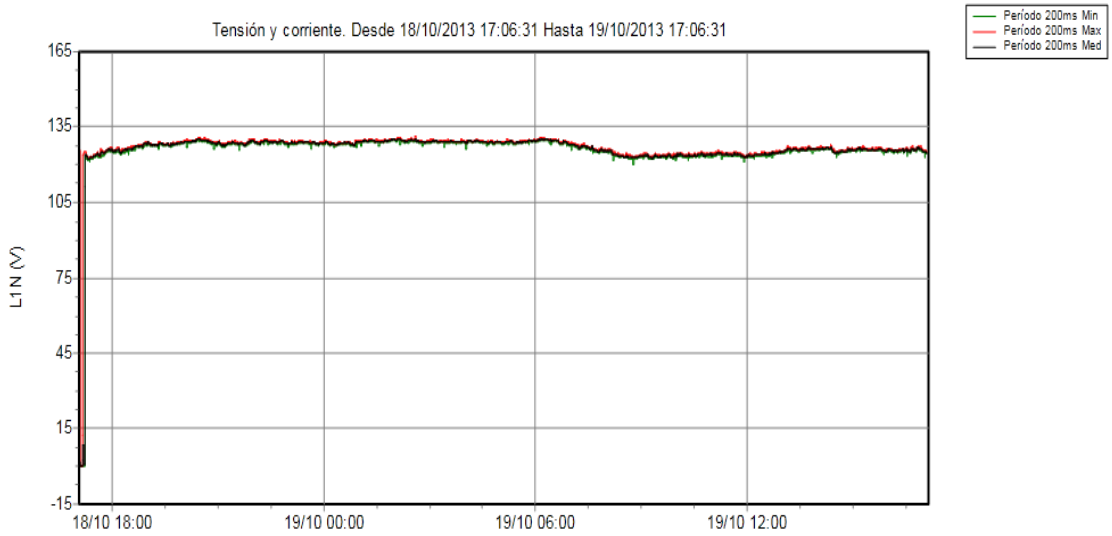
Modo de aplicación	N/D
Primera medida	18/10/2013 17:06:31
Ultima medida	21/10/2013 20:15:01
Intervalo de grabación	0h 1m 11s 0mseg
Tensión nominal	127 V
Corriente nominal	50 A
Frecuencia nominal	60 Hz

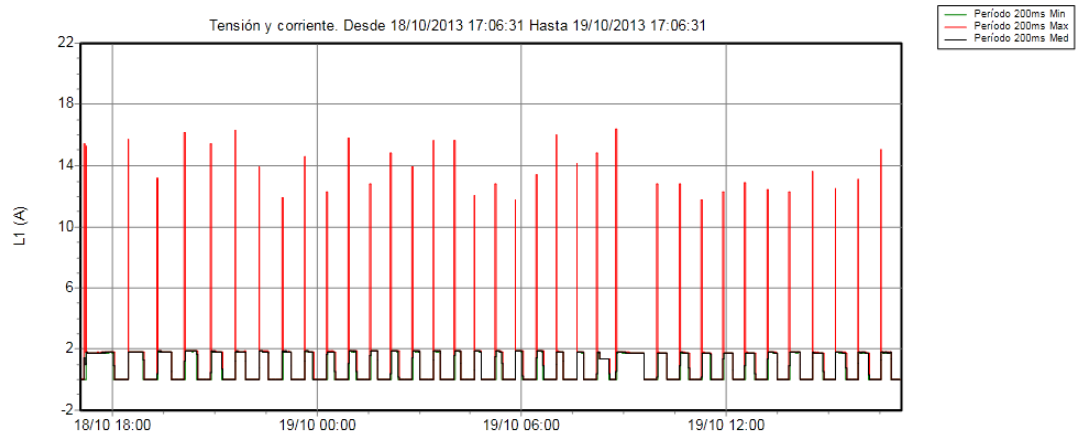
Resumen de registros

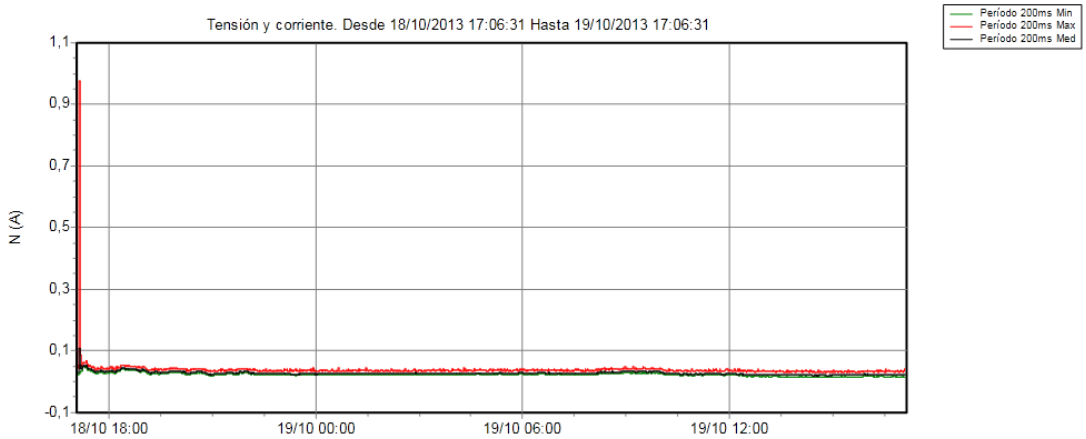
Registros RMS	3811
Registros DC	0
Registros de frecuencia	3811
Registros de desequilibrios	0
Registros de armónicos	0
Registros de armónicos de potencia	0
Registros de potencia	3811
Registros de desequilibrios de potencia	0
Registros de energía	3811
Registros de pérdidas de energía	0
Registros de parpadeos	0
Registros de señalización de la red principal	0

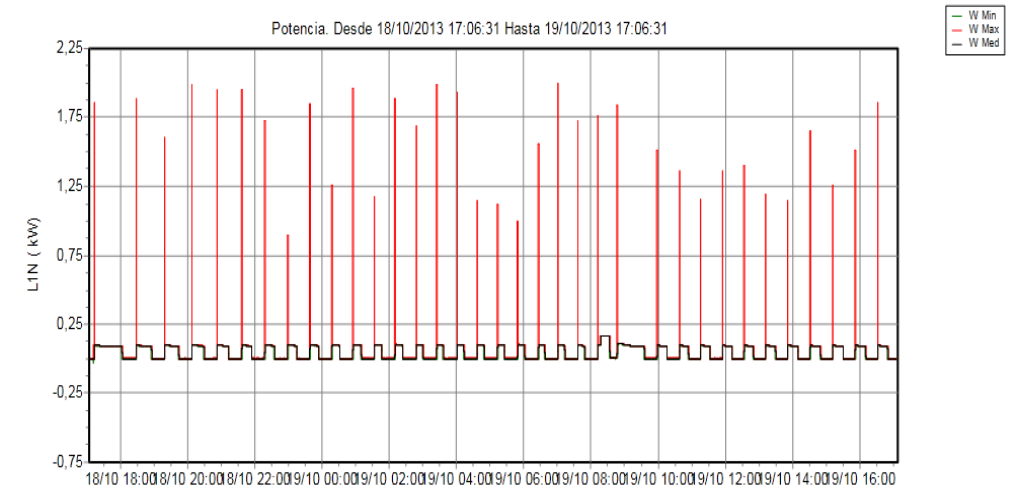
Resumen de eventos

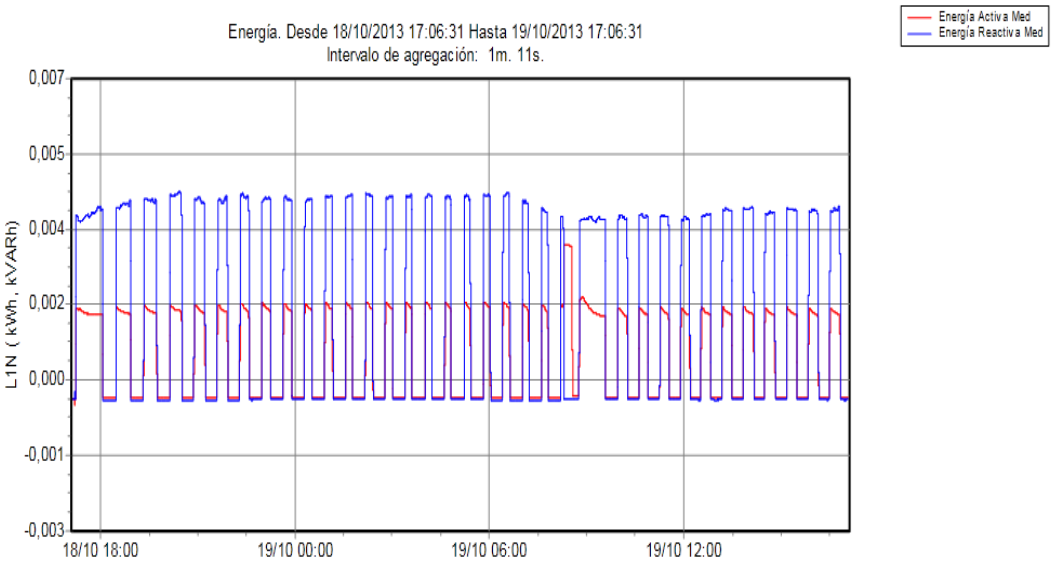
Caídas de tensión	0
Subidas de tensión	0
Transitorios	0
Interrupciones	0
Perfiles de tensión	0
Variaciones rápidas de tensión	0
Pantallas	30
Formas de onda	0
Intervalos sin mediciones	0
Gráficos de corriente de arranque	0
Eventos de onda	0
Eventos RMS	0


Tensión y corriente. Desde 18/10/2013 17:06:31 Hasta 19/10/2013 17:06:31
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1 N (V)
165
135
105
75
45
15
-15
18/10 18:00
19/10 00:00
19/10 06:00
19/10 12:00


Tensión y corriente. Desde 18/10/2013 17:06:31 Hasta 19/10/2013 17:06:31
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1 (A)
22
18
14
10
6
2
-2
18/10 18:00
19/10 00:00
19/10 06:00
19/10 12:00


Tensión y corriente. Desde 18/10/2013 17:06:31 Hasta 19/10/2013 17:06:31
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
N (A)
1,1
0,9
0,7
0,5
0,3
0,1
-0,1
18/10 18:00
19/10 00:00
19/10 06:00
19/10 12:00


Potencia. Desde 18/10/2013 17:06:31 Hasta 19/10/2013 17:06:31
W Min
W Max
W Med
L1N (kW)
2,25
1,75
1,25
0,75
0,25
-0,25
-0,75
18/10 18:00
18/10 20:00
18/10 22:00
19/10 00:00
19/10 02:00
19/10 04:00
19/10 06:00
19/10 08:00
19/10 10:00
19/10 12:00
19/10 14:00
19/10 16:00


Energía. Desde 18/10/2013 17:06:31 Hasta 19/10/2013 17:06:31
Intervalo de agregación: 1m. 11s.
Energía Activa Med
Energía Reactiva Med
L1N (kWh , kVARh)
0,007
0,005
0,004
0,002
0,000
-0,001
-0,003
18/10 18:00
19/10 00:00
19/10 06:00
19/10 12:00

7.6 Anexo E

Información del instrumento

Número de modelo	FLUKE 1735
Número de serie	S112912165B7
Revisión de firmware	V01.09

Información de software

Versión de Power Log	4.0.2
Versión FLUKE 345 DLL	11.20.2006
Versión FLUKE 430 DLL	1.8.0.0
Versión FLUKE 430-II DLL	1.0.0.19

Información general

Lugar de medida	LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA
Cliente	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Notas	ANEXO E En este anexo podemos visualizar valores mínimos, medios, máximos y varias gráficas de cómo se comporta la corriente, voltaje, potencia y energía del refrigerador cargado con gas R134a y compresor de 1/4HP para el periodo de un día

Resumen de medición

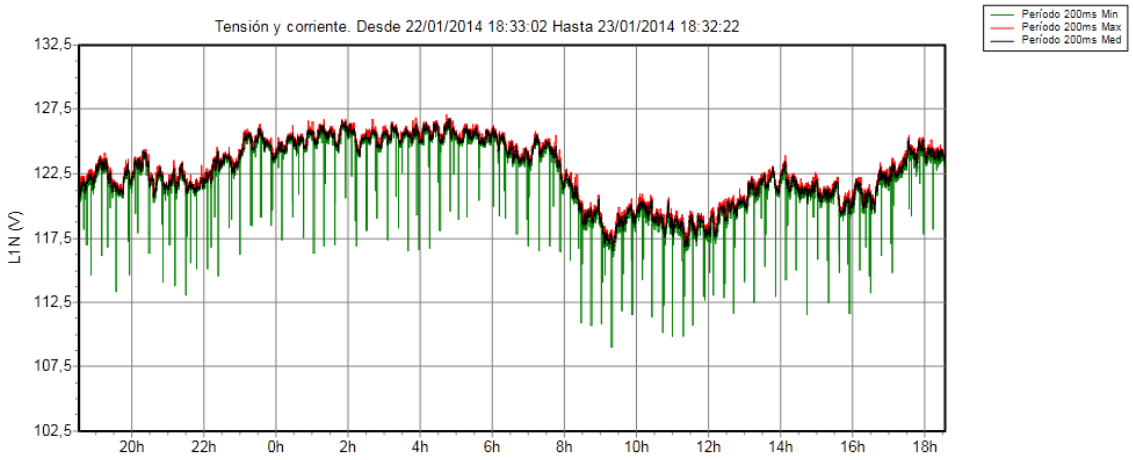
Modo de aplicación	N/D
Primera medida	22/01/2014 18:33:02
Ultima medida	23/01/2014 18:32:22
Intervalo de grabación	0h 0m 20s 0mseg
Tensión nominal	220 V
Corriente nominal	51 A
Frecuencia nominal	60 Hz

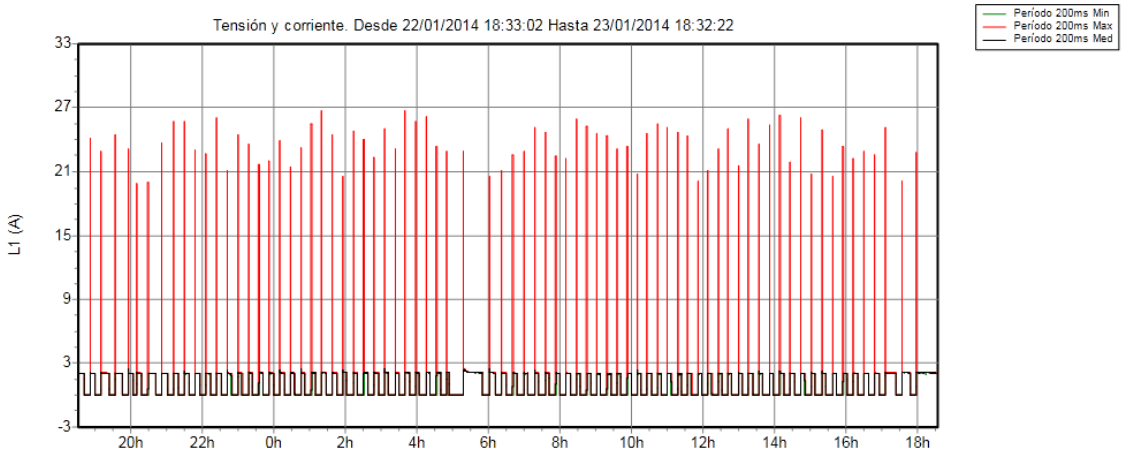
Resumen de registros

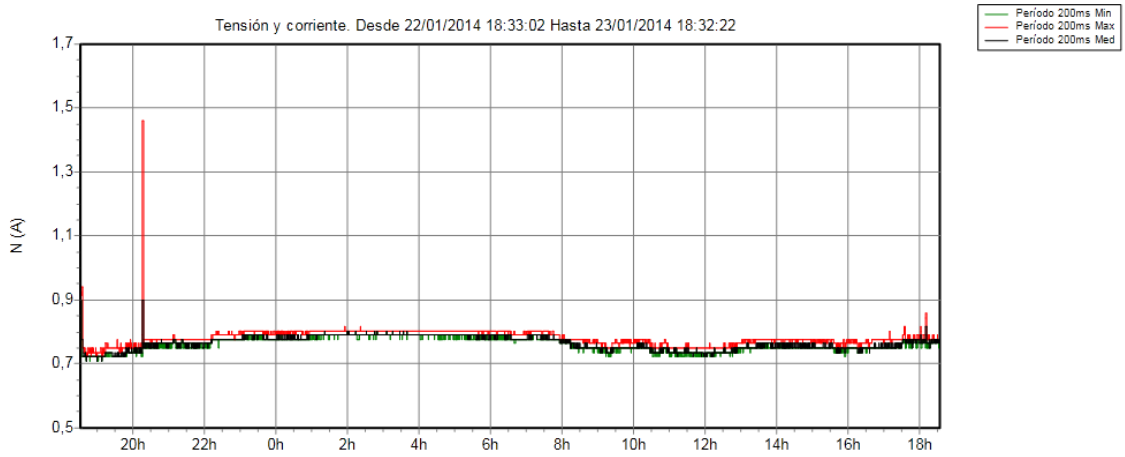
Registros RMS	4319
Registros DC	0
Registros de frecuencia	4319
Registros de desequilibrios	0
Registros de armónicos	0
Registros de armónicos de potencia	0
Registros de potencia	4319
Registros de desequilibrios de potencia	0
Registros de energía	4319
Registros de pérdidas de energía	0
Registros de parpadeos	0
Registros de señalización de la red principal	0

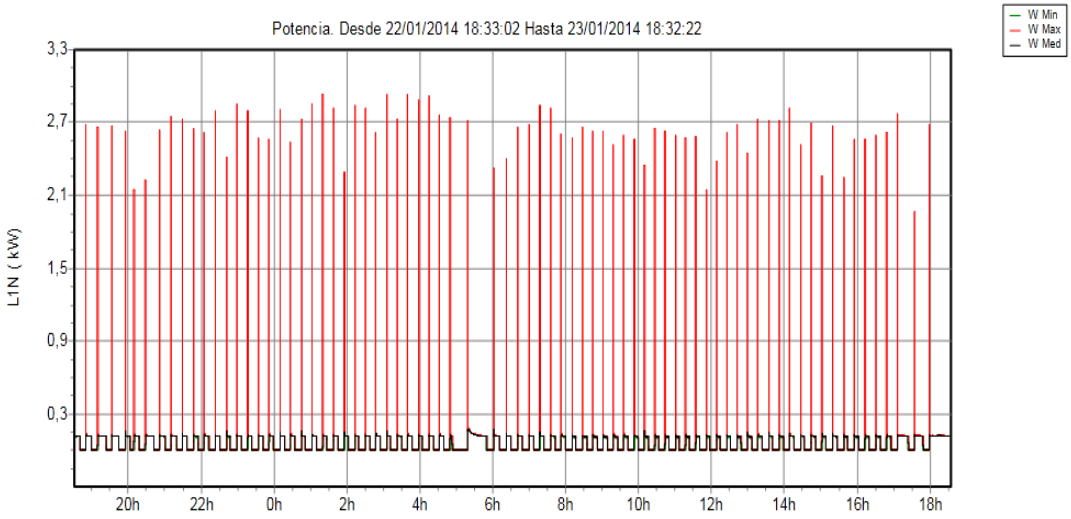
Resumen de eventos

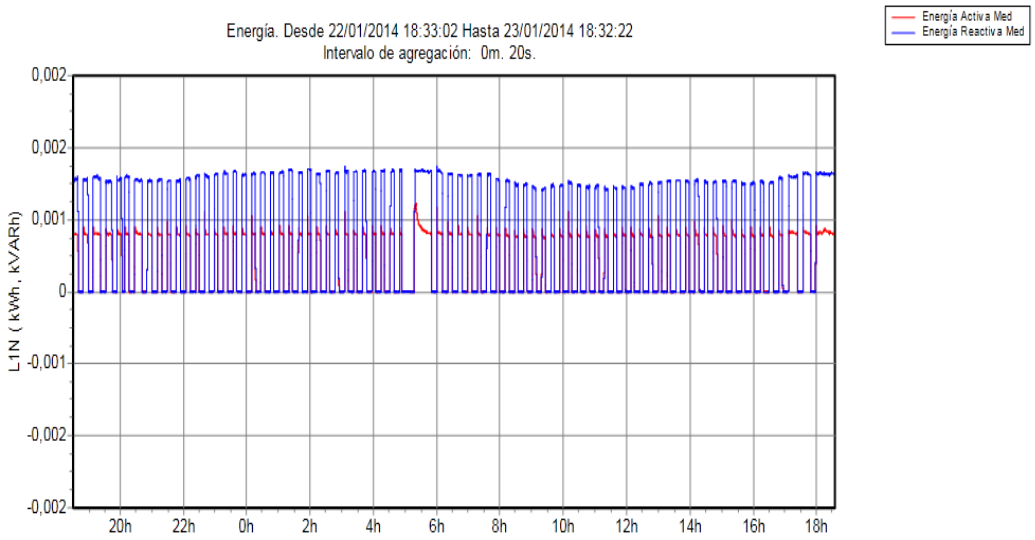
Caídas de tensión	0
Subidas de tensión	0
Transitorios	0
Interrupciones	0
Perfiles de tensión	0
Variaciones rápidas de tensión	0
Pantallas	57
Formas de onda	0
Intervalos sin mediciones	0
Gráficos de corriente de arranque	0
Eventos de onda	0
Eventos RMS	0


Tensión y corriente. Desde 22/01/2014 18:33:02 Hasta 23/01/2014 18:32:22
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1N (V)
132,5
127,5
122,5
117,5
112,5
107,5
102,5
20h
22h
0h
2h
4h
6h
8h
10h
12h
14h
16h
18h


Tensión y corriente. Desde 22/01/2014 18:33:02 Hasta 23/01/2014 18:32:22
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
L1 (A)
33
27
21
15
9
3
-3
20h
22h
0h
2h
4h
6h
8h
10h
12h
14h
16h
18h


Tensión y corriente. Desde 22/01/2014 18:33:02 Hasta 23/01/2014 18:32:22
Período 200ms Min
Período 200ms Max
Período 200ms Med
N (A)
1,7
1,5
1,3
1,1
0,9
0,7
0,5
20h
22h
0h
2h
4h
6h
8h
10h
12h
14h
16h
18h


Potencia. Desde 22/01/2014 18:33:02 Hasta 23/01/2014 18:32:22
W Min
W Max
W Med
L1N (kW)
3,3
2,7
2,1
1,5
0,9
0,3
20h
22h
0h
2h
4h
6h
8h
10h
12h
14h
16h
18h


Energía. Desde 22/01/2014 18:33:02 Hasta 23/01/2014 18:32:22
Intervalo de agregación: 0m. 20s.
Energía Activa Med
Energía Reactiva Med
L1N (kWh, kVARh)
0,002
0,002
0,001
0
-0,001
-0,002
-0,002
20h
22h
0h
2h
4h
6h
8h
10h
12h
14h
16h
18h