

# Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a

Phd. Cesar Isaza Roldán  
Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín  
Colombia  
cesar.isaza@upb.edu.co

Phd (c). Nelson Jara Cobos  
Universidad Politécnica Salesiana  
Ecuador.  
njjara@ups.edu.ec

Fecha Recepción: 28/07/15 - Fecha Aprobación: 19/08/15

**Resumen:** Este artículo presenta un análisis comparativo de tres refrigeradores no frost de iguales características, que funcionan con refrigerante HC R600a y refrigerante HFC R134a. Para el análisis se midió las temperaturas de funcionamiento, además se determinó el consumo de energía y, por último, se calculó el coeficiente de desempeño (COP) para cada caso. Los tres refrigeradores domésticos utilizados fueron de igual modelo y capacidad, con la diferencia que en el primero se utilizó un compresor de 1/4 hp cargado con R134a, mientras en los otros dos refrigeradores se utilizó compresores de 1/4 hp y 1/6 hp cargados con R600a. De esta dinámica se determinó que el COP del refrigerador con R600a y compresor de 1/4 hp es de 2.7 y con el compresor de 1/6 hp es de 4.8, mientras que con el refrigerante R134a y compresor de 1/4 hp es de 3.5; además las temperaturas máximas alcanzadas en los elementos del sistema de refrigeración cargado con R600a y compresor de 1/6 hp fueron de  $-33.92^{\circ}\text{C}$  al ingreso del evaporador,  $60.73^{\circ}\text{C}$  a la salida del compresor,  $37.53^{\circ}\text{C}$  al ingreso del compresor y  $36.75^{\circ}\text{C}$  a la salida del condensador.

**Palabras clave:** Consumo de energía, refrigerante R600a, refrigerante R134a, sistema de refrigeración no frost.

**Abstract:** This article presents a comparative analysis of three no frost refrigerators same characteristics that work with refrigerant HC R600a and HFC R134a. For analyzing the measured operating temperature, also the power consumption is determined and finally the coefficient of performance (COP) for each set is calculated. The three domestic refrigerators used were the same model and capacity with the difference that a 1/4 hp compressor charged with R134a used in the first and in the other two coolers compressors used 1/4 hp and 1/6 hp charged with R600a. From this it was determined that the COP of the refrigerator with R600a and 1/4 hp compressor is 2.7 and to 1/6 hp compressor is 4.8, whereas with R134a and 1/4 hp compressor is 3.5 ; also the maximum temperatures reached on the elements of the cooling system and charged with R600a 1/6 hp compressor were  $-33.92^{\circ}\text{C}$  to the evaporator income,  $60.73^{\circ}\text{C}$  at the outlet of the compressor,  $37.53^{\circ}\text{C}$  to the compressor income and  $36.75^{\circ}\text{C}$  at the condenser outlet.

**Keywords:** Energy consumption, refrigerant R600a, R134a, no frost refrigeration system.

## 1. Introducción

El Protocolo de Montreal y el Protocolo de Kyoto han establecido la eliminación de sustancias que agotan el ozono y la reducción de sustancias denominadas "gases de efecto invernadero", entre las cuales se encuentran todos los CFCs, HCFCs y HFCs, ampliamente utilizados en el campo de la refrigeración doméstica como el caso del R12, el R22 y el R143a [1] [2].

En el Ecuador todas las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos utilizan el refrigerante R134a

en sus neveras, pese a que éste está clasificado en el grupo de las sustancias que aportan al calentamiento global y están sujetas a regulaciones que han establecido los países en función de los protocolos y sus políticas. Este problema ambiental proyecta un escenario futuro para las próximas dos décadas de un incremento en  $0.2^{\circ}\text{C}$  por década y si la situación se mantiene constante, para el 2100 la temperatura puede incrementarse entre  $1.8$  a  $4.0^{\circ}\text{C}$  por encima del promedio [1]; estos cambios afectarán gravemente el ecosistema y nuestras economías.

Con el propósito de reducir las emisiones contaminantes se han desarrollado varias investigaciones para encontrar refrigerantes sustitutos que sean menos contaminantes. En este sentido, se ha determinado a los hidrocarburos como el HC R600a y el HC R290, como una alternativa viable para la refrigeración doméstica, ya que poseen un menor impacto ambiental y además presentan mejores condiciones de operación en el sistema [3]–[7].

Existen varios estudios en los que se han comparado el rendimiento de un sistema de refrigeración por compresión de vapor utilizando varios refrigerantes ecológicos como el HFC152A, HFC32, HC290, HC1270, HC600a y RE170 con respecto al rendimiento del refrigerante R134a proyectándose como posibles sustitutos alternativos [8].

Además, a través de una serie de mediciones del consumo de energía eléctrica en los refrigeradores domésticos que trabajan con HC, se ha determinado una disminución importante específicamente utilizando el R600a [9], el cual representa en el funcionamiento un ahorro del consumo eléctrico de hasta un 20% con respecto del R134a y R12 [3].

Sin lugar a dudas los hidrocarburos y, en especial, el isobutano son los candidatos idóneos para sustituir a los refrigerantes CFCs, HCFCs y HFCs [9]. En la tabla 1 se muestran las principales propiedades del refrigerante isobutano.

Tabla 1. Propiedades del refrigerante R600a. adaptado [10]

Componente	HC-R600a Isobutano
Nombre químico	Metilpropano
Fórmula molecular	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> CH
Peso molecular (kg/kmol)	58.1
Punto normal de ebullición (°C)	-11.6
Temperatura crítica (°C)	135
Presión a -25 °C (bar abs.)	0.58
Capacidad volumétrica a -25/55/32°C (kJ/m <sup>3</sup> )	373
Entalpia de vaporización a -25°C (kJ/kg)	376
Calor latente a 25°C (kJ/kg)	332
Presión a +20°C (bar abs.)	3

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron tres refrigeradores marca Boreal 212 del fabricante Ecasa. En la tabla 2 se detallan las características y capacidad de estos equipos.

Tabla 2. Características del refrigerador Boreal 212

Artefacto	Refrigerador No frost
Serie	1,11026E+11
Volumen refrigerador	182 litros
Volumen congelador	52 litros
Volumen total	234 litros
Voltaje	115V-60Hz
Consumo de energía	335 kWh/año
Capacidad de congelamiento	4.3kg/24h
Refrigerante	125gr de R134a
Peso neto	59kg
Dimensiones	1562x550x620mm
Consumo de energía	Tipo A
Clase de clima	Subtropical

Fuente: autores

El refrigerador cargado con R134a funciona con un compresor de 1/4 hp y en los refrigeradores cargados con R600a se utilizaron compresores de 1/4 hp y otro de 1/6 hp, diseñados para funcionar con el refrigerante R12. En la tabla 3 se presentan las características de los compresores utilizados.

Tabla 3. Compresores herméticos utilizados en los refrigeradores de estudio [11]

Refrigerante que mueve:	R134a	R600a	R600a
Modelo:	EGAS80HLR	FFU 70AK	EMI 55 ER
Marca:	Embraco	Embraco	Embraco
Voltaje:	110-115 Voltios, 60Hz	115-127 Voltios, 60Hz	115-127 Voltios, 60Hz
Desplazamiento:	6.36 cc/rev	6.36 cc/rev	4.6 cc/rev
Potencia:	1/4hp	1/4 hp	1/6 hp
Capacidad (-23.3°C):	207 kcal/h	212 kcal/h	144 kcal/h
Tipo de aceite:	ISO10	ISO32	ISO32

## Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a

Se tomó la decisión de cargar R600a en este tipo de compresor, fundamentalmente por la compatibilidad que presenta el aceite mineral con el refrigerante R600a [12] y, especialmente, porque no se comercializan en el Ecuador los compresores específicos para el R600a.

Para el análisis se miden las temperaturas en varios puntos del sistema (ver figura 1); estos datos fueron utilizados para la obtención del ciclo ideal de refrigeración y el cálculo del COP. Las temperaturas se obtuvieron mediante termopares tipo "J" y tipo "K" que conectadas al equipo Compac Rio con un módulo de termopares, almacenan la información durante un periodo de 24 horas.

Para obtener el consumo energético en los tres refrigeradores domésticos se utiliza el medidor de calidad de energía Fluke Modelo 1735 [13]. Este equipo permite almacenar datos de voltaje, corriente, potencia y energía consumida durante tres días, 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.

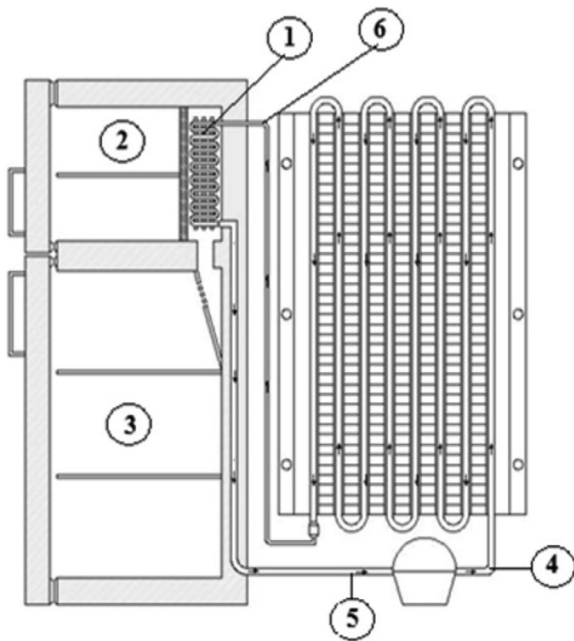


Figura 1. Ubicación de termopares en el sistema de refrigeración. Fuente: autores.

La carga en gramos del refrigerante R600a en un sistema de refrigeración será considerablemente menor con relación a la de otros refrigerantes [10] [15], es así que la carga de isobutano para el caso de

este estudio representó un 50 % de la carga de 120 gramos del R134a. Los refrigeradores que utilizaron R600a, se colocó 60 gramos de gas tanto para el equipo con compresor de 1/4 hp como para el equipo con compresor de 1/6 hp.

Con la intención de conocer el comportamiento del refrigerante R600a operando en un sistema de refrigeración que fue diseñado para R134a se realizó cargas parciales desde 30 gramos hasta 60, con incrementos de 10 gramos de refrigerante y se tomaron los datos de temperatura en cada una de las cargas.

Se han seleccionado cinco puntos en el evaporador, para medir la temperatura con las diferentes cargas. Durante la operación se tomaron los valores de temperatura en cada carga (ver figura 2).

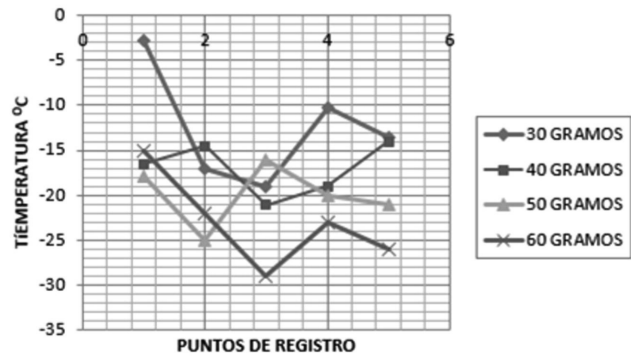


Figura 2. Temperatura en el evaporador en función de la carga. Fuente: autores.

De igual forma, se han seleccionado nueve puntos en el condensador para medir la temperatura con las diferentes cargas, (ver figura 3).

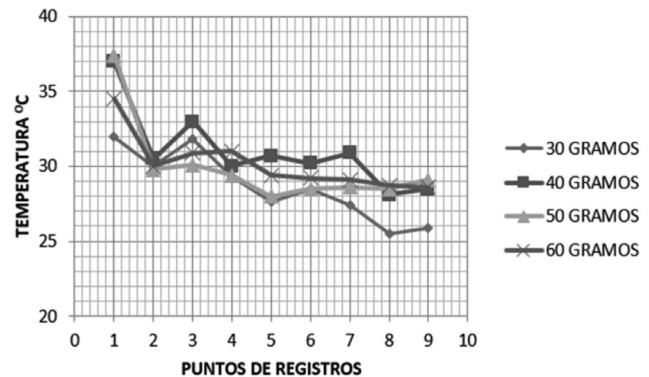


Figura 3. Temperatura en el condensador en función de la carga. Fuente: autores.

Para el compresor, de forma similar se han seleccionado seis puntos para medir la temperatura con las diferentes cargas (ver figura 4).

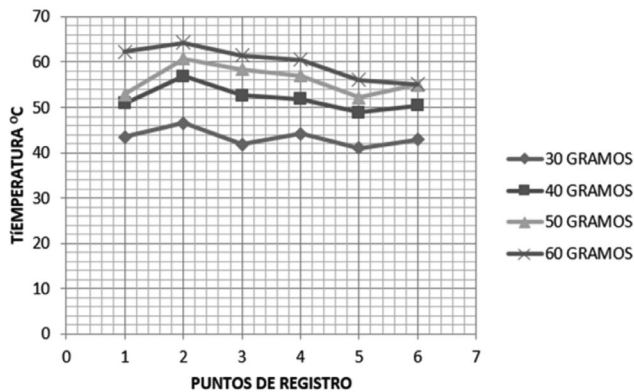


Figura 4. Temperatura en el compresor en función de la carga. Fuente: autores.

El equipo Compac Río con módulo de termopares permite exportar los datos almacenados a un archivo Excel; en la Figura 5 muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en varios puntos del evaporador, los datos aparecen en un periodo aproximado de 6 horas luego de lo cual se produce el descongelamiento del evaporador, gracias a la resistencia eléctrica del sistema no frost y se repite el ciclo.

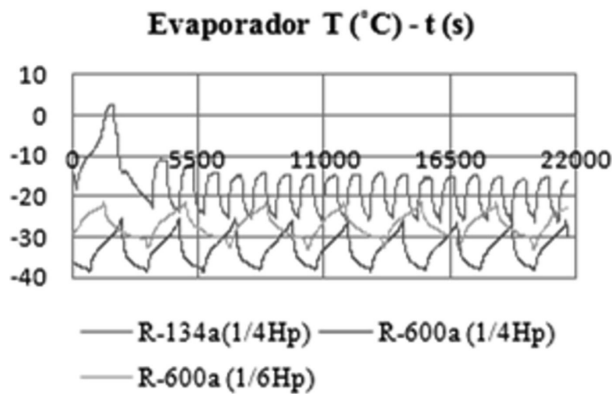


Figura 5. Gráfica de Temperatura vs. Tiempo en el evaporador. Fuente: autores.

En la Figura 6 se muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en varios puntos del compartimento de alimentos frescos.

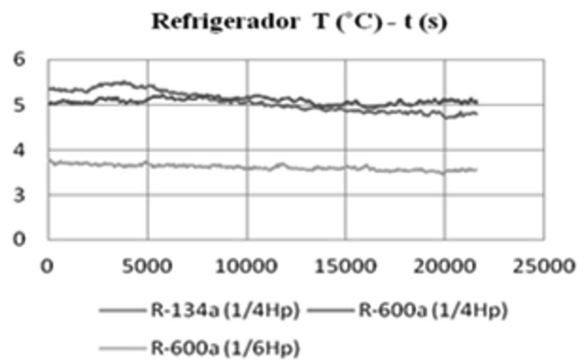


Figura 6. Gráfica de temperatura vs. tiempo en el refrigerador. Fuente: autores.

En la Figura 7 se muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en varios puntos del compartimento del congelador.

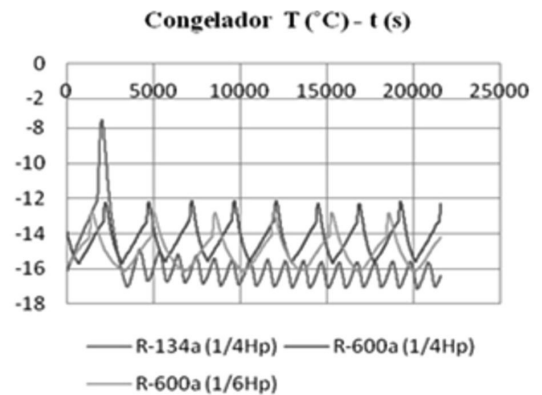


Figura 7. Gráfica de temperatura vs. tiempo en el congelador. Fuente: autores.

En la Figura 8 se muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en varios puntos al ingreso del compresor.

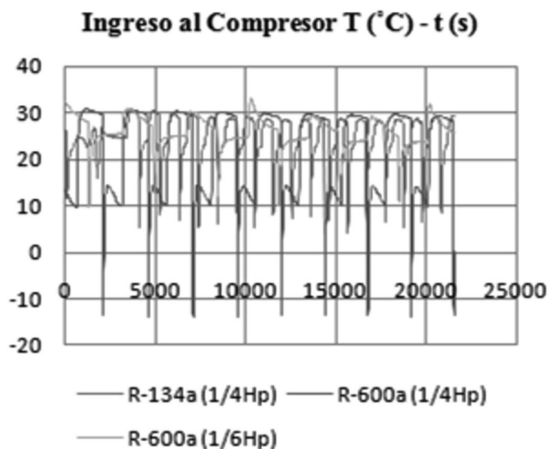


Figura 8. Gráfica temperatura vs. tiempo ingreso al compresor. Fuente: autores.



**Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a**

En la Figura 9 se muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en varios puntos de la salida del condensador.

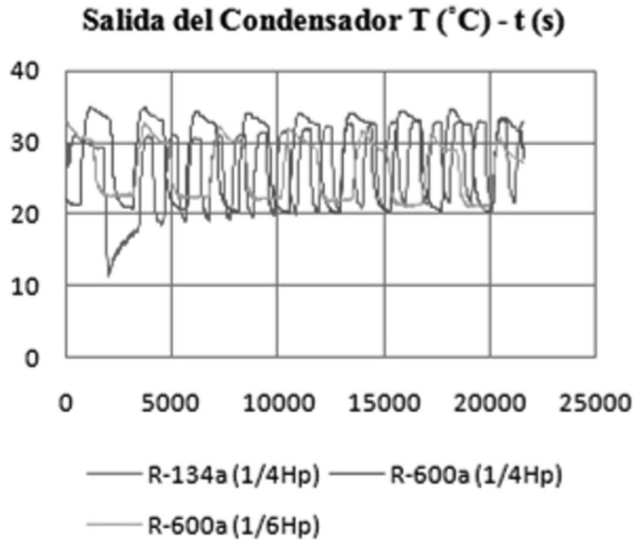


Figura 9. Gráfica de temperatura vs. tiempo en el condensador. Fuente: autores.

En la Figura 10 se muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo en la salida del compresor.

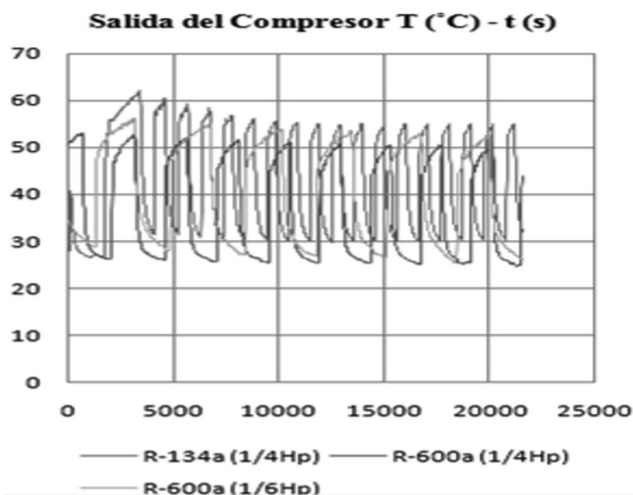


Figura 10. Gráfica temperatura vs. tiempo salida del compresor. Fuente: autores.

Con las temperaturas de funcionamiento fue posible obtener el coeficiente de desempeño y la eficiencia, cuyos valores se presentan en la tabla 4.

Por otro lado, utilizando el software EES, con los datos de temperaturas obtenidas y las ecuaciones termodinámicas para ciclo ideal de refrigeración [15] [16], se realizó la programación para determinar el

comportamiento de ciclo termodinámico de cada caso.

En la Figura 11 se presentan los diagramas de temperatura-entropía y presión-entalpía del refrigerador doméstico, ensayado con refrigerante R134a y compresor de 1/4 hp.

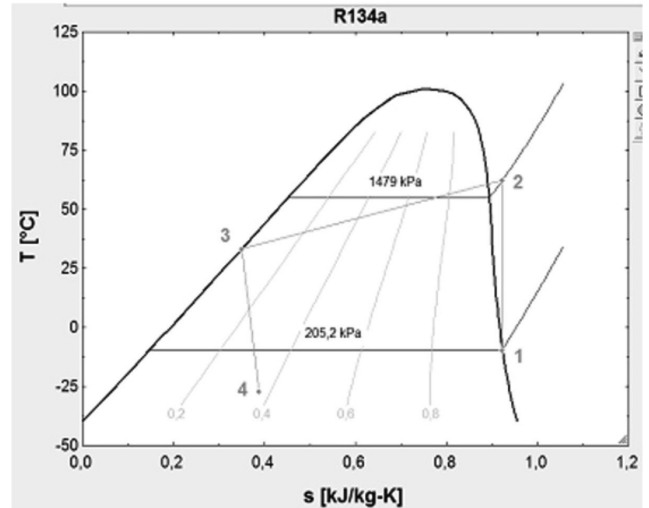
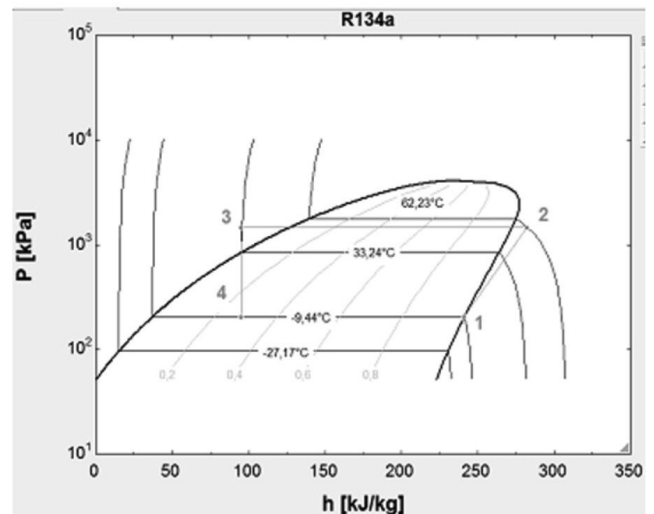


Figura 11. Diagrama T-s y P-h del ciclo ideal de refrigeración con R134a-compresor 1/4 Hp. Fuente: autores



En la Figura 12 se presentan los diagramas de temperatura-entropía y presión-entalpía del refrigerador doméstico ensayado con refrigerante R600a y compresor de 1/4 hp.



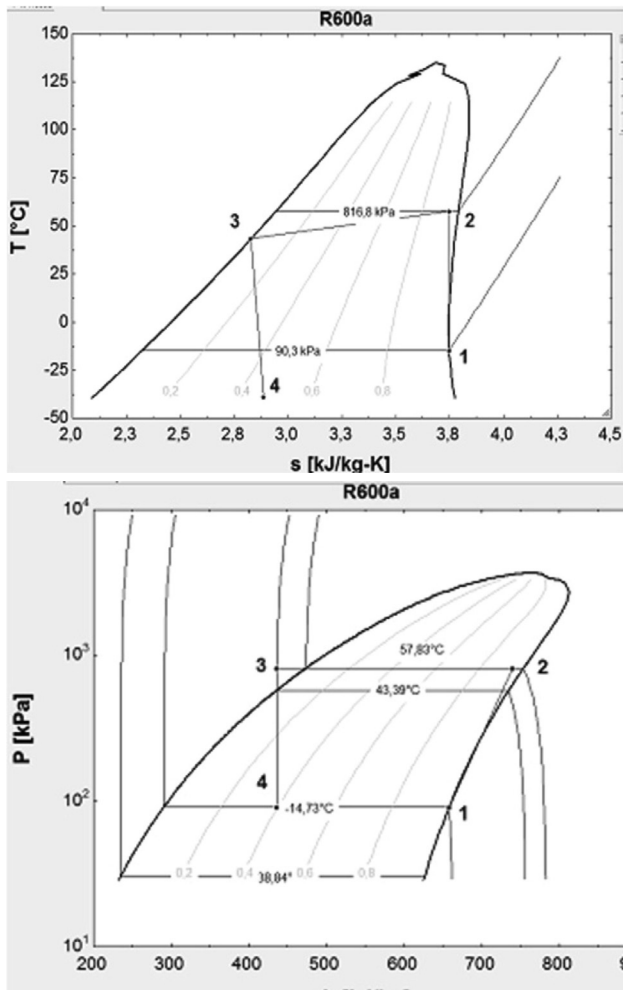


Figura 12. Diagrama T-s y P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/4 Hp. Fuente: autores.

En la Figura 13 se presentan los diagramas de temperatura-entropía y presión-entalpía del refrigerador doméstico ensayado con refrigerante R600a y compresor de 1/6 hp.

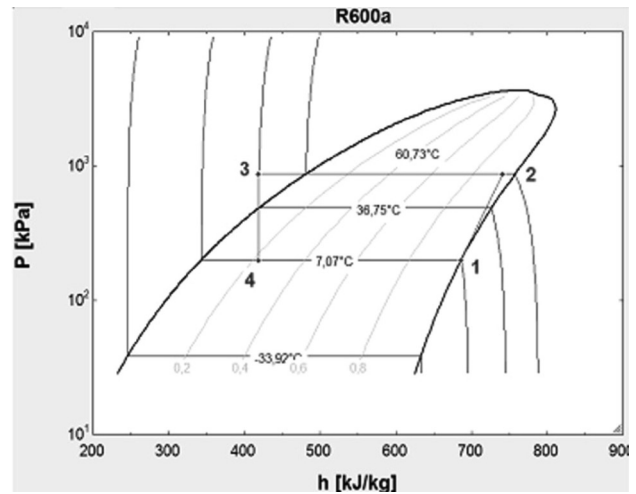
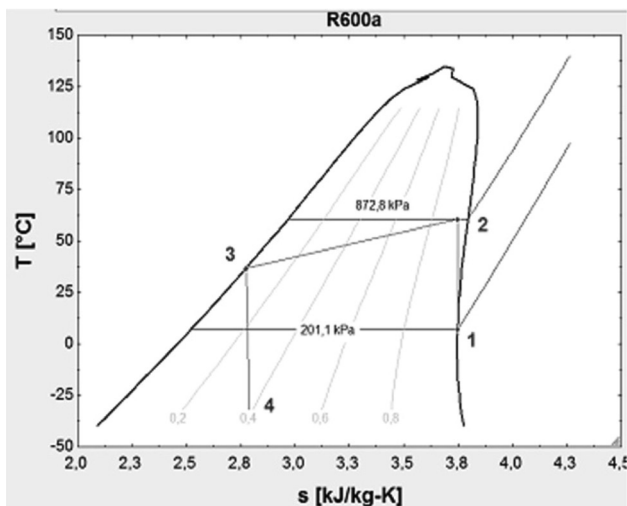


Figura 13. Diagrama T-s y P-h del ciclo ideal de refrigeración con R600a-compresor 1/6 Hp. Fuente: autores.

Se estableció como carga térmica a ser refrigerada, para las distintas pruebas desarrolladas, diferentes masas de agua, las cuales se pueden considerar como una buena aproximación para la determinación de los resultados.

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.

Con la información recopilada en el medidor de calidad de energía se puede calcular el costo de la energía consumida para cada equipo.

Además, se realizó 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 de dólar [17], (ver tabla 4).

### 3. Resultados

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la carga de refrigerante, temperatura medida del congelador y refrigerador, el COP-Ciclo Ideal calculado, la eficiencia de la máquina en ciclo

## Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a

ideal, la presión (kPa), el consumo de energía por día y el costo anual por energía consumida, todo esto en función del tipo de refrigerante y el compresor utilizado; además para completar el listado de datos se ha adicionado el potencial de destrucción de la capa de ozono (PAO), el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) y el tiempo de vida del gas en la atmósfera (años).

Tabla 4. Resultados obtenidos de las pruebas en los refrigeradores. Fuente: autores y datos de [18].

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
Compresor	1/4 hp	1/6 hp	1/4 hp
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
COP-Ciclo Ideal	2.72	4.89	3.55
Eficiencia de la máquina-Ciclo Ideal	26.85%	16.97%	21.96%
Presión (kPa)	90.3;816.8	201.1;872.8	205.2;1479
Consumo de energía por día	1.05 kWh	1.07 kWh	1.24 kWh
Costo anual por energía consumida	\$30.66	\$31.24	\$36.21

El refrigerante R600a, al ser un hidrocarburo, presenta un grado de inflamabilidad alto (ver tabla 5). Esto obliga a establecer un manejo adecuado en el momento de su utilización y almacenaje, por lo que se debe tener especial cuidado en aplicaciones cuando existen concentraciones grandes de isobutano [9].

Tabla 5. Características de inflamabilidad del R600a. Adaptado [18].

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

### 4. Conclusiones

Como se ha demostrado el refrigerante 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 presenta como un refrigerante ideal y amigable con el medio ambiente.

Si se pretende utilizarlo en la producción de refrigeradores domésticos a gran escala, el problema se centraría en el almacenamiento del R600a, por lo que sería necesario regirse estrictamente a la 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, se puede aplicar la hoja técnica IEC TS 95006 y una adaptación a la norma IEC/EN 60335-2-24, normas de seguridad eléctrica.

La temperatura en el refrigerador y congelador, en el equipo que utiliza R600a, se encuentra en los rangos adecuados para la conservación de alimentos. Esto permite decir que con solo 60 gramos de gas R600a, y un compresor de 1/6 hp, se puede alcanzar las temperaturas que maneja el R134a con 120 gramos de gas y compresor de 1/4 hp.

Al utilizar el compresor de 1/6 hp, manteniendo la carga de 60 gramos de R600a, el funcionamiento mejoró y se logró tener una temperatura límite en el compartimiento del congelador de -16.5°C.

La temperatura del gabinete de refrigeración, para el equipo con un compresor de 1/4 hp y refrigerante R600a, está dentro de los valores estándar para este compartimiento y es de 5.98°C, mientras que para el refrigerador con compresor de 1/6 hp es de 3.06°C,

este valor está por debajo de los límites recomendados (5-70C), sería conveniente realizar algún cambio en los ductos que comunican el congelador con el refrigerador y evitar que la temperatura baje demasiado.

Las temperaturas máximas alcanzadas en los elementos del sistema cargado con R600a y compresor de 1/6 hp son: ingreso al evaporador -33.92°C, salida del compresor 60.73°C, ingreso al compresor 37.53°C y salida del condensador 36.75°C.

Los datos con los cuales se construyó el diagrama Presión-Entalpía y Temperatura-Entropía permitieron obtener los coeficientes de desempeño y las eficiencias; estos valores claramente 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, mientras que con gas R134a es de 3.5; el mejoramiento en el COP con el compresor de 1/6 hp representa que la decisión de usar un compresor de menor potencia fue acertada.

Una de las mayores diferencias entre estos dos refrigerantes son las bajas presiones en las que opera el equipo con R600a; éstas 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, la necesidad de un mayor volumen desplazado produce ruidos en el evaporador, se puede entonces pensar que es posible realizar un estudio en donde se considere aumentar el diámetro de los tubos del evaporador o su longitud.

El uso de gas R600a en equipos de refrigeración doméstica permitirá consumir menos energía, esto se traduce en una reducción de hasta un 15% en el costo de energía consumida.

En el presente estudio se cargó el isobutano en compresores para R12 teniendo resultados aceptables en el funcionamiento, 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 totalmente adecuados para el isobutano, puesto que su densidad hace que necesite un compresor con una cámara de compresión diferente.

Actualmente existen empresas que han introducido al mercado europeo y asiático diseños de compresores fabricados para R600a, se recomienda que se realice un estudio similar usando este tipo de compresor, considerando que los compresores diseñados para R600a tienen una mayor capacidad de desplazamiento.

Los componentes del equipo de refrigeración deben ser los apropiados para cada refrigerante, se recomienda para futuros estudios analizar las características que deben tener el evaporador, condensador y tubo capilar cuando se utilice R600a.

## **Bibliografía**

- [1] J. Lordemann y H. Quino. "Cambio climático, desarrollo económico y energías renovables: Estudio exploratorio de América Latina". Friedrich Ebert Stiftung, 2009.
- [2] P. Carreño y C. Jadán. "Estudio del comportamiento termodinámico del refrigerante R-134a, modificando su composición química". Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2013.
- [3] I. Maclaine-cross y M. Leonardi. "Comparative Performance of Hydrocarbon Refrigerants". En: Measurement, Melbourne - Australia, 2012.
- [4] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, y P. Chandrasekar. "Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator". Int. J. Therm. Sci., vol. 48, n.o 5, pp. 1036-1042, 2009.
- [5] Y. Lee y C. Su. "Experimental studies of isobutane (R600a) as the refrigerant in domestic refrigeration system". Appl. Therm. Eng., vol. 22, n.o 5, pp. 507-519, 2002.
- [6] M. Rasti, M. Hatamipour, S. Aghamiri, y M. Tavakoli. "Enhancement of domestic refrigerator's energy efficiency index using a hydrocarbon mixture refrigerant". Measurement, vol. 45, n.o 7, pp. 1807-1813, 2012.
- [7] B. Bolaji y Z. Huan. "Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a review". Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 18, pp. 49-54, 2013.
- [8] A. Dalkilic y S. Wongwises. "A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants". Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 37, n.o 9, pp. 1340-1349, 2010.



[9] E. Corte, C. Flores, N. Jara, y C. Isaza. "Sistemas de refrigeración doméstica - Estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética". Rev. Fac. Cienc. Quím. 9, vol. 9, pp. 19 - 40, 2014.

[10] C. Danfoss. "Aplicación práctica del refrigerante R600a". [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/146600593/Aplicacion-practica-del-refrigerante-R600a>. [Accedido: 22-jun-2014].

[11] Embraco. "Manual de Aplicación de Compresores".

[12] M. Marcelino y J. Barbosa. "Solubility, density and viscosity of a mixture of R-600a and polyol ester oil". Int. J. Refrig., vol. 31, n.o 1, pp. 34-44, 2008.

[13] Fluke. "Energy studies with the Fluke 1735 Power Logger". Fluke Corporation.

[14] E. Björk y B. Palm. "Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device capacity, refrigerant charge and ambient temperature". Int. J. Refrig., vol. 29, n.o 5, pp. 789-798, ago. 2006

[15] W. Whitman y W. Johnson. "Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado". Editorial Paraninfo, 2000.

[16] Y. Cengel y M. Boles. "Termodinámica". Séptima Edición. México: McGraw-Hill, 2012.

[17] J. Cisneros. "Guía para la aplicación de sistemas de gestión energética orientado a la energía eléctrica, basado en la Norma ISO 50001". Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.

[18] E. Maclaine-cross. "Performance and Safety of LPG Refrigerants". Presentado en: Conference of the Australian Liquefied Petroleum Gas Association Ltd., Australia, pp. 149-168, 1995.