

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE PEQUEÑA CAPACIDAD QUE UTILIZA R-600a COMO GAS REFRIGERANTE

RAFAEL S. ÁLVAREZ BRITO¹, AURA L. LÓPEZ DE RAMOS²

¹Universidad Simón Bolívar. Dpto. de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia. e-mail: rafalvar@usb.ve

²Universidad Simón Bolívar. Dpto. de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia. e-mail: alopez@usb.ve

Recibido: octubre 2012

Recibido en forma final revisado: junio 2013

RESUMEN

En esta investigación se comparó el comportamiento térmico, mecánico y de eficiencia energética de un sistema de refrigeración con un hidrocarburo (R-600a) y un sistema utilizando un HFC (R-134a). Para ello se calculó el *COP*, la potencia requerida por el compresor, el calor intercambiado en cada sistema, la eficiencia isoentrópica del compresor, su consumo eléctrico y la EER. Se utilizaron dos equipos de refrigeración de la misma capacidad térmica. Se obtuvieron como resultados relevantes un *COP* 30% mayor para el sistema con R-600a, una potencia consumida 89% menor para dicho sistema, un área de transferencia de calor del 45% menor y un valor de eficiencia energética de 7,64 para el R-600a contra el 5,87 del R-134a. El consumo eléctrico del sistema del R-134a fue 2,83 mientras que para el sistema del R-600a fue 1,4 A. A partir de los resultados obtenidos se concluye que el R-600a es una opción viable para reemplazar el R-134a a fin de cumplir con regulaciones ambientales sobre la sustitución de sustancias que promueven el efecto invernadero o disminución energética.

Palabras clave: Refrigeración, Hidrocarburos, Isobutano, R-600a, R-134a, Eficiencia.

EXPERIMENTAL STUDY OF A SMALL COOLING SYSTEM USING R-600a AS REFRIGERANT

ABSTRACT

Two cooling systems of equal capacity were compared through its thermal and mechanical performance as well as its energy efficiency. In this research work, an HFC substance (the R-134a) and an HC substance (the R-600a) were used as refrigerants. To this aim, the *COP*, the input power consumed and the electrical power required by the compressor, the heat exchanged in each one of the systems, the isoentropic efficiency and the EER were evaluated. The use of R-600a produces the following results with respect to R-134a: a *COP* 30% higher, a mechanical input power 89% lower, a heat transfer area 45% smaller, a decrease in the electrical consumption from 2.83 A to 1.4 A and an increase in the EER from 2.44 to 1.75. The results obtained suggest that R-600a is a real technically and economically feasible solution to replace R-134a in refrigeration systems and thus comply with international regulations about the replace of greenhouse effect substances.

Keyword: Refrigeration, Hydrocarbons, Isobutane, R-600a, R-134a, Efficiency.

INTRODUCCIÓN

Hasta mediados de los años 90, los refrigerantes tradicionales utilizados en los procesos de refrigeración fueron los clorofluorocarbonos (CFC). El uso de estos compuestos ha impulsado en gran medida el agotamiento de la capa de ozono; es por ello, que en el Protocolo de Montreal (United Nations Environment Programme, 2000) se estableció que su producción fuese controlada y limitada por etapas hasta extinguirse la existencia de los gases agotadores de ozono. Esto originó que, rápidamente, comenzaran a circular en el mercado dos clases nuevas de gases refrigerantes: los

hidroclorofluorocarbonos (HCFC) (aún contaminantes) y más tarde los hidrofluorocarbonos (HFC).

Los refrigerantes HFC, a pesar de tener un potencial cero de agotamiento de ozono (PAO), tienen un importante potencial de calentamiento atmosférico (PCA). Por ello, en el Protocolo de Kioto (Programa Ambiental de las Naciones Unidas, 1997) se clasificó estos refrigerantes como gases de efecto invernadero y como consecuencia de ello, tanto la producción, el uso y las emisiones de los HFC también quedaron controladas y limitadas en el tiempo. Esta acción impulsó de forma determinante la necesidad de sustituir estos

refrigerantes por sustancias que no afectaran ni a la capa de ozono ni contribuyeran al efecto invernadero; cumpliendo con tales características resaltan los hidrocarburos (HC), los cuales ya han sido utilizados con éxito en gran parte de los mercados europeo y asiático. El uso de los HC como refrigerantes no es algo nuevo, ya a mediados del siglo XIX se conocía su potencial; sin embargo, fueron descartados y sustituidos por refrigerantes de alto rendimiento y carácter no inflamable, los CFC. Para ese momento se ignoraba su alto efecto negativo sobre el ambiente (Nills, 2007).

Antes de seleccionar una sustancia refrigerante, es necesario evaluar el diseño de un ciclo de refrigeración, para ello se deben tomar en cuenta varios aspectos importantes entre los cuales se encuentra la demanda térmica del ciclo, que depende principalmente de la aplicación. Con respecto al refrigerante que se va a utilizar, se debe realizar una comparación entre cada una de las posibles sustancias, evaluando sus propiedades físico-químicas de forma que permitan optimizar el desempeño del ciclo. Entre estas características destacan: (1) tener un punto de congelación menor a la mínima temperatura del sistema, ya que éste determina su rangos de aplicabilidad; (2) tener una presión de operación en la línea de baja por encima de la atmosférica para evitar funcionamiento del sistema en vacío, evitando así la entrada de humedad al momento de una fuga; (3) tener un valor alto de punto crítico, de forma que opere siempre por debajo de dichas condiciones y su rango de trabajo sea lo mayor posible; (4) tener un volumen específico pequeño, ya que ello garantiza un compresor pequeño, menor consumo energético y menores costos de fabricación, ya que el dimensionamiento de todos los componentes del sistema depende en gran medida de la carga del refrigerante. Otras características que deben considerarse al seleccionar un refrigerante incluyen perdurabilidad, seguridad (no tóxico, no inflamable y no contaminante), rentabilidad del ciclo, tipo de compresor requerido, condiciones de diseño de los intercambiadores, potencia requerida por el compresor, compatibilidad del aceite con el refrigerante, presiones de alta y baja del sistema, entre otras (Corberán & Segurado.2004).

Ningún refrigerante cumple con tales requerimientos en un rango amplio de temperaturas, tampoco para las variadas aplicaciones que requiere la industria química moderna. El redescubrimiento de los hidrocarburos refrigerantes se hace viable, ya que se adaptan perfectamente a los compresores modernos y frecuentemente no añaden ningún riesgo adicional del ya existente en el proceso. Estos refrigerantes se pueden utilizar en ciclos simples, de múltiples etapas o en cascada dependiendo de la temperatura de operación. Para refrigerantes inflamables, tales como los HC, son

necesarias precauciones adicionales al momento del diseño a fin de cumplir las consideraciones de seguridad, por lo que en algunos casos justifica el uso de refrigerantes más costosos; sin embargo, la mayoría de los refrigerantes no tóxicos y no inflamables son hidrocarburos halogenados. A pesar del excelente rendimiento de los CFC, HCFC y HFC como refrigerantes, y debido a sus propiedades intrínsecas que acarrear un alto impacto negativo que tienen estas sustancias sobre el ambiente, se promovió la necesidad del uso de refrigerantes naturales hidrocarbonados como el propano (R-290), butano (R-600), isobutano (R-600a), entre otros; debido principalmente a la disminución en el consumo energético y térmico que conlleva su uso, adicional a su carácter no contaminante. En referencia con el alto grado de inflamabilidad de los HC, su principal desventaja y punto que se explicará posteriormente, existen normativas y reglamentos para poder utilizarlos de forma segura, siendo una de ellas el establecer 10 kg como la máxima carga permitida de refrigerante en unidades comerciales; adicional a esto, los equipos de operación deben ser herméticos, compactos o semicompactos según lo indicado en el Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas (2000). Según estas normativas, el R-600a está clasificado como un refrigerante no-tóxico y que no produce lesiones mortales o importantes siempre que su concentración en aire no sea suficientemente elevada como para ocasionar explosiones. Al igual que muchos productos de uso cotidiano como la gasolina, el gas natural y la electricidad, el uso de refrigerantes HC requiere tanto de sentido común como de la aplicación de los procedimientos de seguridad adecuados.

Desde 1992 la refrigeración mediante el uso de los HC se ha ido incrementando a nivel mundial, siendo Alemania uno de los países pioneros al haber convertido todas sus neveras a tecnología de refrigeración con hidrocarburos. Actualmente, existen más de sesenta millones de equipos de refrigeración a nivel mundial que trabajan con hidrocarburos (János, 2001). En 1993, la compañía alemana FORON empezó a utilizar mezclas de hidrocarburos para sustituir el CFC diclorodifluormetano, R-12, en los sistemas de refrigeración domésticos. A partir del año 2002, compañías japonesas comenzaron a producir sistemas de refrigeración que, sin utilizar más de 50 g de hidrocarburo, resultan ser más eficientes que sus homólogos que usaban HFC (János, 2001).

Actualmente, muchas investigaciones están enfocadas en encontrar nuevos gases refrigerantes que sean más amigables con el ambiente. Extensa es la información que se puede encontrar de evaluaciones de sistemas que utilizan HC como sustitutos de los tradicionales gases refrigerantes

contaminantes. Destaca la investigación realizada por Lee *et al.* (2008) quienes, a través del uso de correlaciones, demuestran la ventaja que ofrecen algunos hidrocarburos (propano, butano y propileno) con respecto al HCFC clorodifluorometano, R-22, en términos de refrigeración (coeficiente de transferencia de calor, consumo de energía, carga de refrigerante, entre otras). Otros trabajos científicos importantes en el área fueron los realizados por Wongwises & Chimres (2005) y por Sattar *et al.* (2008) quienes adaptaron un refrigerador doméstico con el objetivo de evaluar y comparar su desempeño utilizando mezclas de refrigerantes hidrocarburos (propano, butano e isobutano) con respecto al refrigerante HFC tetrafluoruro de etilo, R-134a; concluyeron, a partir de sus resultados, que los HC representan una alternativa ambiental muy alentadora. Maclaine-Cross enfocándose en el carácter altamente inflamable de los HC, tuvieron la iniciativa de realizar experimentos en sistemas de aire acondicionado automotor y en refrigeradores domésticos con la finalidad de demostrar que, siguiendo normas estandarizadas, su manejo es seguro. Además, obtuvieron un ahorro de energía aproximadamente en un 20% y un mejor rendimiento al compararlos con resultados previos (Maclaine-Cross, 1996 y 1998) cuando utilizaron CFC. En sus investigaciones, concluyen que el refrigerante R-600a representa la mejor opción para sustituir a los refrigerantes fluorocarbonados en los sistemas domésticos de refrigeración. En la Tabla 1 se presentan los valores de consumo energético de refrigeradores domésticos con temperatura interna de 5 °C y temperatura ambiente de 25 °C. Tal y como se observa en la Tabla 1, los sistemas que utilizan R-600a como refrigerante, consumen menos energía que aquellos que utilizan R-12. En el caso del equipo Siemens KT150RSO, se tiene que el consumo energético es aproximadamente 50% menor que el requerido por el equipo UK modelo A.

Tabla 1. Consumo energético de refrigeradores (Maclaine-cross (1998))

Marca/Modelo Cap. (L)	Refrigerante	Consumo (kWh/24 h)
Uk/A 129	R-12	0,75
Uk/B 160	R-12	0,71
Liebher/KT1580 155	R-600 ^a	0,38
Siemens/ KT15RSO144	R-600 ^a	0,52

La cantidad de refrigerante utilizada en los refrigeradores domésticos, es tan pequeña y similar a la presente en un encendedor, que no representa mayores problemas de seguridad (UNEP, 1999). En cuanto a éstas, la principal

que se debe tener en cuenta es evitar las fugas y, en caso de presentarse, lo siguiente sería asegurar que no se forme una mezcla de aire/combustible. Y en último instancia de que ésta llegue a formarse, debe evitarse cualquier fuente de ignición (UNEP, 1999).

Aparte de las consideraciones básicas que se den tomar en cuenta cuando se manipulan refrigerantes, la inflamabilidad de los hidrocarburos requiere consideraciones de seguridad adicionales (UNEP, 1999):

- 1 Se deben conocer y monitorear constantemente los valores de concentración del refrigerante en aire, de manera de evitar alcanzar aquellas donde hay peligro de explosión.
- 2 Si se llega a producir un incendio, éste debe ser atacado con un extinguidor de polvo seco.
- 3 Si una alta cantidad de hidrocarburo es liberada, ésta debe ser dispersada ventilando el área o utilizando rociadores de agua. El área debe ser evacuada y toda fuente de ignición debe ser aislada.

En el caso particular de Venezuela, la investigación para evaluar la posibilidad de sustituir los gases refrigerantes contaminantes es prácticamente nula.

En las últimas décadas ha surgido una gran preocupación a nivel internacional acerca del calentamiento global. Y dentro del grupo de sustancias que más contribuyen al efecto invernadero se encuentran los HFC. En promedio 1 kg de R-134a tiene la misma contribución al calentamiento global que 1400 kg de CO₂; mientras que 1 kg de R-600a equivaldría a 0,1 kg de CO₂, lo que se traduce en una baja contribución al calentamiento global (Howard, 2008 y Nills, 2007). Otros aspectos importantes que se deben considerar es el impacto ambiental del ciclo en su entorno y el consumo de energía o LCCP, por sus siglas en inglés Life Cycle Climate Performance, valores que se obtienen al suponer diferentes porcentajes de fuga para los compuestos estudiados. Hwang *et al.* (2006) aseguran que el LCCP de los hidrocarburos siempre es inferior al de los HFC.

Venezuela es uno de los países latinoamericanos que, dadas sus condiciones climáticas y sus grandes reservas de hidrocarburos, puede ser pionero en el desarrollo e implementación de estas nuevas tecnologías ecológicas. Por ello, se hace necesario desarrollar investigaciones teóricas y experimentales en sistemas de refrigeración utilizando refrigerantes hidrocarburos. Esta investigación tiene como objetivo principal comparar el desempeño térmico, eléctrico y mecánico de un ciclo de compresión simple, utilizando como refrigerantes el HC R-600a y el

HFC (R-134a). Esta comparación se hizo resaltando que la inflamabilidad del R-600a no debe ser la razón limitante para el uso del hidrocarburo y que su uso es más beneficioso en los sistemas de refrigeración que la utilización de los refrigerantes comunes.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

VARIABLES DE EVALUACIÓN

Los valores experimentales que se registrarán de presión y temperatura, se utilizan en el cálculo de las variables necesarias para realizar un detallado análisis comparativo de los ciclos de refrigeración. Los puntos del ciclo con los cuales se medirán tales variables se detallan en la sección Descripción del Equipo. A continuación se listan y definen cada uno de los parámetros a calcular.

Flujo másico (\dot{m}): la cantidad de masa de refrigerante por unidad de tiempo que circula en el ciclo se calcula a partir de la ec. (1):

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{\Delta h_{vap}} \quad (1)$$

La carga de refrigerante también se puede expresar en términos del flujo volumétrico (\dot{V}) a través de la ec. (2):

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v \quad (2)$$

Entalpía de vaporización (Δh_{vap}): un factor fundamental en todo diseño y evaluación de un ciclo de refrigeración es la energía de vaporización, ya que su valor influye de manera significativa en el cálculo de la carga del sistema y por tanto en el impacto ambiental que pueda ocasionar el refrigerante. Mayores valores de esta propiedad se traducen en menores valores de masa de refrigerante necesaria para una demanda térmica conocida.

Volumen específico (v): propiedad termodinámica que generalmente está expresada en términos de la capacidad del compresor. Mientras mayor sea el volumen específico menor será la carga que manejará el compresor y, por lo tanto, menores serán el tamaño y la potencia del mismo, lo que se traduce en un menor consumo de electricidad.

$$v = \frac{Volumen}{m} \quad (3)$$

Relación de compresión (RC): corresponde a la relación entre la presión de descarga del compresor, o presión de alta P_{alta} , y la presión de succión del compresor, o presión de

baja P_{baja} . Mientras mayor sea esta relación, menor será el rendimiento mecánico del compresor. Su valor se calcula a través de la ec. (4).

$$RC = \frac{P_{alta}}{P_{baja}} \quad (4)$$

Coficiente de operación (COP): valor que cuantifica la eficiencia del ciclo, el cual será más eficiente en la medida de que el COP sea mayor, ya que para una demanda térmica dada menor sería la potencia consumida por el compresor. Se calcula a partir de la ec. (5).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{\dot{W}_c} \quad (5)$$

Coficiente de operación de Carnot (COP_{CT}): corresponde a la máxima eficiencia que se puede obtener en un ciclo de refrigeración ideal donde se supone que todos los procesos son adiabáticos y reversibles. Se calcula a través de la ec. (6).

$$COP_{CT} = \frac{T_{Evap}}{T_{Cond} - T_{Evap}} \quad (6)$$

Rendimiento de instalación (RI): cuantifica la eficiencia real del ciclo con respecto a la ideal. Se calcula a través de la ec. (7).

$$RI = \frac{COP}{COP_{CT}} \quad (7)$$

Eficiencia isoentrópica del compresor (η_c): cuantifica cuán alejado está operando el compresor con respecto a las condiciones ideales. Se calcula a través de la ec. (8).

$$\eta_c = \frac{h_{Sal,I} - h_{Ent}}{h_{Sal,R} - h_{Ent}} \quad (8)$$

Flujo de calor retirado en el condensador (\dot{Q}_{Cond}): se calcula a través de la ec. (9).

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m} \cdot \Delta h_{vap} \quad (9)$$

Potencia eléctrica del compresor (PEC): se calcula a través de la ec. (10).

$$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m} \cdot \Delta h_{vap} \quad (10)$$

Relación de eficiencia energética (EER): parámetro que, al igual que el COP , cuantifica la eficiencia del ciclo. Se

expresa en términos del flujo de calor retirado en el espacio a refrigerar en (Btu/h) con respecto a la potencia consumida por el compresor en (W). Se calcula a través de la ec. (11).

$$ERR = 3,41214 \cdot COP \quad (11)$$

Límites de inflamabilidad (UNEP, 1999): son las concentraciones mínimas y máximas de un vapor o gas en mezcla con el aire, entre las cuales hay riesgo de explosión. Se expresan en porcentaje volumétrico, es decir, el volumen del vapor de combustible con respecto al volumen de la mezcla aire-combustible. Según las condiciones de confinamiento, cantidad, intensidad de la fuente de ignición, entre otras, varía la velocidad de la combustión y es común que se origine una explosión; razón por la cual estos valores también reciben el nombre de límites de explosividad, siendo más común utilizar estos últimos sólo para polvos combustibles. Los valores del límite inferior y superior de inflamabilidad delimitan el llamado rango o campo de inflamabilidad.

GASES REFRIGERANTES SELECCIONADOS

Para cumplir con los objetivos de la presente investigación se seleccionaron dos refrigerantes, el HFC R-134a y el HC R-600a. En la Tabla 2 se presentan algunos de los parámetros más resaltantes a evaluar al momento de realizar el estudio comparativo de los refrigerantes en un ciclo de refrigeración por compresión.

Tabla 2. Principales propiedades físico-químicas del R-134a y el R-600a (UNEP, 1999; WYLEN, 2003)

Propiedad	Refrigerantes	
	R-134a	R-600a
PCA	1400	0,1
PAO	0	0
Tiempo de vida en la atmósfera (años)	14,6	<<1
Temperatura de auto ignición (°C)	NA	512
TFus (°C) a 1 bar	-101,1	-159
TEvap (°C) a 1 bar	-26,5	-12,1
Energía de vaporización, ΔhVap (kJ/kg) a 1 bar	215	366
Límites de inflamabilidad:		
Inferior (% v/v)	--	1,85
Superior (% v/v)	--	8,5
Masa molar	102	58,1
TC (°C)	101	135
PC (bar)	40,7	36,5

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Se utilizaron dos equipos para realizar las pruebas experimentales, el primero de ellos se muestra en la Figura 1. Este equipo de prueba comercial proveniente de Alemania, modelo ET410 marca GUNT, que opera con R-134a sirvió de modelo para el dimensionamiento de un segundo equipo diseñado con el objetivo de funcionar con R-600a. Este equipo (Figura 2), fue diseñado, construido y evaluado en su totalidad en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte de la Universidad Simón Bolívar por Álvarez *et al.* (2008).

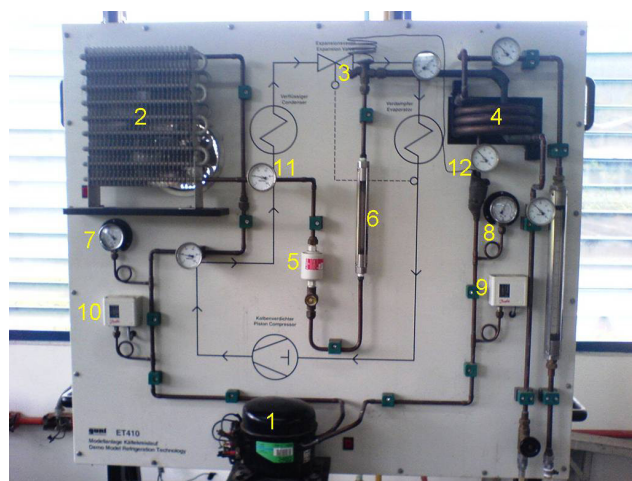


Figura 1. Sistema de refrigeración por compresión utilizando R-134a. (1) Compresor. (2) Condensador. (3) Válvula de expansión. (3) Evaporador. (4) Filtro. (5) Rotámetro. (6) Manómetro de Alta. (7) Manómetro de baja. (8) Presostato de baja presión. (9) Presostato de alta presión. (10) Termómetro bimetálico de alta. (11) Termómetro bimetálico de baja.

El equipo del R-600a tiene el mismo dimensionamiento de tuberías, ubicación de los equipos, mismo recorrido del refrigerante y, además, se diseñó con la misma demanda térmica que el equipo del R-134a. Su construcción y evaluación se realizó bajo la más estricta supervisión de expertos en el área. Vale la pena destacar que éste es el primer y único equipo de hidrocarburos de fabricación nacional existente en Venezuela.

La Figura 2(B) presenta los puntos con los cuales se registraron los datos experimentales en cada uno de los equipos principales de los bancos de prueba:

- Puntos 1 y 2: succión y descarga del compresor, respectivamente;
- Puntos 3 y 4: entrada y salida del condensador, respectivamente;

- Puntos 5, 6 y 7: entrada al dispositivo de expansión, salida del dispositivo de expansión o entrada del evaporador y descarga del evaporador respectivamente.

En la Figura 1 y en la Figura 2(A) se pueden observar los cuatro equipos fundamentales de un sistema clásico de refrigeración por compresión, así como también accesorios como el visor de líquido, los presostatos, las válvulas reguladoras de flujo, entre otros.

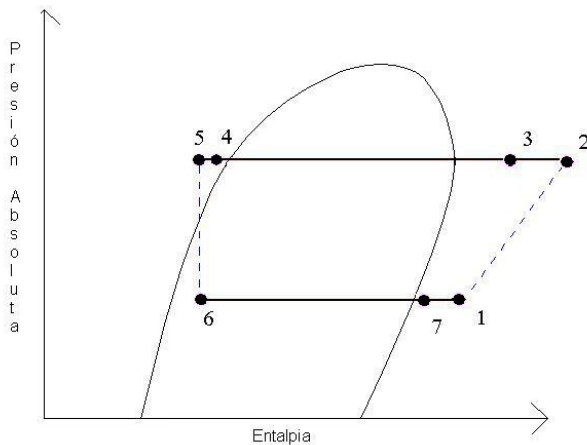
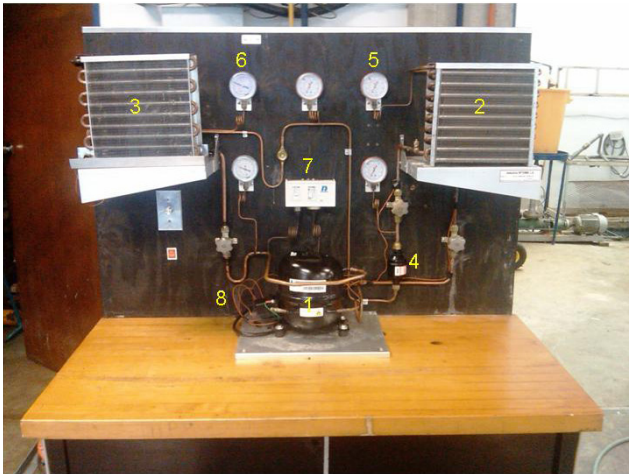


Figura 2. (A) Sistema de refrigeración por compresión utilizando R-600a. (B) Ciclo de refrigeración en el diagrama de Mollier: (1) Compresor (segmento 1-2). (2) Condensador (segmento 3-4). (3) Evaporador (segmento 6-7). (4) Filtro. (5) Manómetro de Alta. (6) Manómetro de baja. (7) Presostato de alta y baja presión. (8) Termopares tipo K

Tal como se observa en la Figura 1, el equipo del R-134a cuenta con un evaporador de tipo doble tubo cuyo fluido a enfriar es agua que se toma directamente del servicio y es regulada mediante un rotámetro. El condensador consta de un intercambiador de tipo flujo cruzado con aletas y el fluido a calentar es aire. El equipo tiene dos manómetros

para medir presiones de alta y baja, cuatro puntos de medición de temperatura, un rotámetro para medir el flujo del refrigerante en el ciclo, un visor de líquido y un filtro. Si se compara con el del R-600a, se observa que tanto el evaporador como el condensador son serpentines aleteados, y utilizan como fluido secundario aire, el cual cruza de forma perpendicular los intercambiadores de calor para el intercambio de energía. El área de transferencia de calor de ambos equipos es 314 cm². El equipo del R-600a tiene tres manómetros para medir presiones de alta y dos para presiones de baja y, se utilizó un termopar tipo K para medir las temperaturas en los puntos característicos del ciclo.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La metodología que se utilizó para el registro de los datos experimentales, en ambos sistemas, consistió en medir las temperaturas a las entradas y salidas de cada uno de los componentes fundamentales del banco de pruebas; de igual forma se registraron los valores de la presiones de alta y baja de ambos ciclos. Igualmente, se tomó datos de la velocidad del aire en los intercambiadores de flujo cruzado en el caso del sistema con R-600a, y del flujo volumétrico del agua en el evaporador en el caso del sistema con R134a. Vale la pena destacar que, para verificar la repetibilidad de los datos, todas las pruebas fueron realizadas más de siete veces, descartando así los posibles errores o la influencia de cualquier factor debido a condiciones externas al sistema, tales como variaciones en la temperatura ambiente o fluctuaciones eléctricas. Se asegura, de esta forma, que los datos y resultados presentados en esta investigación tienen un alto grado de confiabilidad.

En la Tabla 3 se presentan los datos experimentales de presión y temperatura registrados tanto en el equipo de refrigeración del R-134a como los correspondientes al equipo del R-600a. En tanto que en las Tablas 4 y 5 se presentan los valores correspondientes a los fluidos secundarios en los intercambiadores de ambos sistemas.

Tabla 3. Temperaturas y presiones experimentales del R-134a y del R-600a

Punto	R-134a		R-600 ^a	
	T±1 (°C)	P (bar) P (psig)	T±1 (°C)	P (psig)
1	17	4,2±0,2 (61±3)	10	14±1
2	58	11,5±0,5 (167±7)	41	65±5
3	52	11,5±0,5 (167±7)	40	65±5
4	37	11,5±0,5 (167±7)	38	65±5
5	33	11,5±0,5 (167±7)	35	65±5
6	14	4,2±0,2 (61±3)	7	14±1
7	16	4,2±0,2 (61±3)	9	14±1

Tabla 4. Datos experimentales del agua en el evaporador del equipo del R-134a

T_{Ent} (°C)	24
T_{Sal} (°C)	19
Flujo másico, $\dot{m} \times 10^2$ (Kg/s)	2,61

Tabla 5. Datos experimentales del aire en el equipo del R-600a

	T_{Ent} (°C)	T_{Sal} (°C)	u (m/s)
Evaporador	25	18	1,6
Condensador	25	34	2,4

En la Tabla 6 se representan todos los resultados obtenidos en esta investigación que fueron comparados y analizados para ambos sistemas, recordando que ambos equipos poseen la misma capacidad y distribución.

En la Tabla 3 se puede observar que para ambos ciclos se está operando en rangos de temperatura similares, es decir, que rangos de las temperaturas de evaporación y condensación no son muy distantes. A pesar de que las presiones de operación de cada uno de los ciclos son muy diferentes, favoreciendo así al refrigerante HC, por la inversión al momento de construirlo, debido a que las tuberías serán de menor espesor, además de menor trabajo. La eficiencia isoentrópica del compresor, η_c es una de las variables calculadas con el objetivo de comparar el desempeño de los ciclos estudiados. Se puede observar que los valores para ambos sistemas son considerablemente menores a la unidad. Esto es consecuencia directa del intercambio de calor entre el compresor y el ambiente, lo cual disminuye la eficiencia isoentrópica, ya que esta energía perdida no es considerada en la ec. (8). En el caso del R-600a se notó a tacto que la temperatura en el domo del compresor fue muchísimo menor que en el caso del R-134a, reflejándose ello en una eficiencia isoentrópica de 0,58 contra 0,32, respectivamente.

El COP del equipo del R-600a es 30,2% mayor que el obtenido para el R-134a; es decir, se requiere una menor potencia para la misma carga térmica. Estos valores permiten asegurar que los HC son una opción viable para reemplazar los HFC.

En cuanto a la carga de refrigerante en ambos equipos, se tienen 170 g de R-600a y 500 g de R-134a, con lo cual se observó que para una refrigeración con un rango de temperaturas similares, como en el presente caso, se necesita un 66% menos carga de R-600a y se obtiene a su vez un COP mayor, lo cual indica que se tiene una capacidad de refrigeración mayor a pesar de tener menor carga.

Si se observan los volúmenes específicos, v , de los refrigerantes para ambos ciclos, se puede notar que se necesitarían compresores más pequeños para la obtención de la misma capacidad. Vale la pena mencionar que ambos equipos en estudio representan el equivalente de una nevera de 21 ft³ o la carga de gas del equipo de R-134a es similar a la carga típica de un vehículo, nevera o aire acondicionado de una tonelada de refrigeración.

En cuanto a consumo energético, I , se tiene que el compresor del sistema de refrigeración de R-134a requiere un consumo eléctrico 102% mayor que el de su homólogo en el equipo de R-600a. Punto a favor del sistema de enfriamiento con hidrocarburo, ya que no sólo se ahorra energía consumida, sino que también por menos energía y menos carga de refrigerante se pueden obtener las mismas condiciones de refrigeración deseadas, reduciendo a su vez el impacto ambiental al necesitar menor energía para operar. Sin mencionar el potencial que tiene Venezuela de producir estos tipos de refrigerantes.

Tabla 6. Resultados obtenidos en los ciclos de refrigeración utilizando: R-134a y R-600a

	R-134a	R-600a
η_c	0,32	0,58
COP	1,72	2,24
EER (Btu.h-1/W)	5,87	7,64
m (g)	500	170
\dot{m} (kg/s)	0,00354	0,00274
v (m ³ /kg) (P_{Ent} y T_{Ent} al compresor)	0,01708	0,07108
I (A)	2,83	1,4
V (V)	112	120
\dot{W}_c (W)	317	168
RC	2,4	2,6
\dot{Q}_{Cond} (W)	627	881
\dot{Q}_{Evap} (W)	546	720

La potencia consumida por el compresor de R-134a es un 89% mayor que el consumido por el R-600a, lo cual representa, en el caso del HC, un menor costo de operación y un menor impacto ambiental debido a menores requerimientos energéticos y disipación de calor al ambiente.

A pesar de que la relación de compresión, (RC), para ambos refrigerantes se encuentran muy cercanas, se puede destacar que las presiones de operación del equipo que

funciona con R-600a son muy inferiores que la que trabaja con el R-134a, lo que se traduciría en menores costos de fabricación e instalación del sistema.

En el caso particular del presente estudio, a una temperatura de evaporación de 10 °C y una presión de baja de 4 bar, la entalpía de vaporización es 346,27 kJ/kg para el R-600a y 189,45 kJ/kg para el R-134a; en otras palabras, la energía de vaporización del HC es 82,77% mayor que la del HFC. Estos valores se reflejan directamente en el 32% más de flujo calórico retirado en el evaporador para el caso del R-600a, aun cuando la carga de refrigerante es considerablemente menor al R-134a. Similar explicación resulta al observar los calores retirados en el condensador, el cual es un 40% mayor en el caso del HC. Ya que el R-600a posee más capacidad de condensación y evaporación que el R-134a, se requiere menor área de transferencia de calor en los equipos; esto se corroboró en Álvarez *et al.* (2008), disminuyendo en el condensador un 13% y casi un 45% en el evaporador.

Otras propiedades físico-químicas (Tabla 2) que favorecen el uso del R-600a con respecto al del R-134a es su punto crítico, siendo 135 °C, 36,5 bar y 101,1°C, 40,67 bar, respectivamente. Esta diferencia permite que el HC pueda operar en un rango de temperaturas mayor, permitiéndole una mayor adaptabilidad a las necesidades de refrigeración y mejorando la versatilidad de operación de los sistemas que utilicen hidrocarburos.

Con respecto al impacto ambiental, y por ser el PCA del R-134a 14000 veces mayor al del R-600a, en el caso de una fuga completa en el sistema del HC, estos 170 g equivaldrían a liberar a la atmósfera 17 g de dióxido de carbono, mientras que los 500 g de R-134a equivaldrían a liberar 700 kg de CO₂, con lo que se observa que bajo las condiciones de la presente investigación no sólo es recomendable y favorable el uso del HC sobre el HFC, desde el punto de vista de rendimiento eléctrico y termodinámico, sino que también se reduce drásticamente la posibilidad de liberar al ambiente gases altamente contribuyentes al efecto invernadero.

Otro aspecto de relevancia al considerar el uso de HC en sistemas de refrigeración es su carácter inflamable. Si se parte de los valores mínimo y máximo de concentración de R-600a en aire a las cuales hay riesgo de explosión, se requiere tener en un espacio confinado entre 33 y 154 g/m³, vale la pena destacar que en una fuga común no se liberan grandes cantidades al mismo instante. Estándares de seguridad utilizados en Europa, tal como BS EN 60335-2-24, restringe mucho más la cantidad de hidrocarburo que puede ser liberado en un espacio cerrado, siendo éste de 8 g/m³, así se puede determinar la cantidad máxima

recomendable de hidrocarburo a cargar en un equipo ubicado en un espacio de dimensiones conocidas. Por ejemplo, una habitación de 3x3x2,5 m se recomienda un equipo cuya carga máxima sea 1300 g de hidrocarburo. Un equipo comercial utilizaría tan solo 170 g del refrigerante, estando muy por debajo de lo permitido, además se debe considerar el triángulo del fuego, que explica de una manera simple que para ocurrir una explosión debe existir combustible, una fuente de calor y oxígeno, donde este último no existe en un sistema de refrigeración, solo al momento de la fuga, pero ya se sabe que se encuentra muy por debajo de los límites de peligrosidad.

El uso de esta tecnología es factible siempre y cuando se realicen las correspondientes charlas de capacitaciones al personal a cargo de los sistemas de refrigeración y a la ciudadanía en general, y de esta forma dar a entender que este tipo de refrigerantes son seguros de usar en casa o lugares de trabajo, tal como lo es el uso de yesqueros (10 g de butano), aromatizantes de cocina (200 g de propano) y negocios comerciales de comida (bombonas de 20 kg o más de hidrocarburos).

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más resaltantes de esta investigación, las cuales están planteadas en términos comparativos entre los refrigerantes R-134a y R-600a.

- El coeficiente de desempeño del sistema del R-600a es 30,2% mayor al sistema que usa HFC, es decir, menor potencia requerida por el compresor para la misma demanda térmica.
- El hidrocarburo, al poseer una mayor energía de vaporización, genera que el equipo requiera una menor carga de refrigerante, es decir, son necesarios 500 g de R-134a y tan solo 170 g de R-600a para satisfacer la misma demanda térmica; en otras palabras, la masa necesaria de refrigerante se reduce en un 66% con el HC.
- Un equipo de refrigeración con R-600a tiene un menor impacto ambiental, ya que al tener menos carga de gas se disminuye las emisiones a la atmósfera y por tanto el potencial de calentamiento global.
- El equipo de R-134a consume un 102% más de energía eléctrica.
- La eficiencia energética del R-600a es 7,64 mientras que para el R-134a es de 5,87, lo que significa que el hidrocarburo consume menos energía para producir el mismo confort.
- La relación de compresión es menor para el R-600a,

lo que conlleva a una menor potencia consumida el compresor.

- La potencia del compresor del R-134a es 89% mayor que el del R-600a.
- El área de transferencia de calor para los intercambiadores es 50% menor para el R-600a.
- El R-600a es una alternativa viable en la sustitución del R-134a y otros refrigerantes CFC y HCFC de gran impacto ambiental aún utilizados en Venezuela.
- Puede descartarse el argumento de que los HC son peligrosos para operar en las condiciones de los sistemas de refrigeración pequeños, ya que si se relaciona masa del gas con respecto al volumen de aire de una habitación, esta relación es inocua.

NOMENCLATURA

<i>CFC</i>	Clorofluorocarbonos
<i>COP</i>	Coficiente de operación (adimensional)
<i>COP_{CT}</i>	Coficiente de operación de Carnot (adimensional)
<i>EER</i>	Relación de eficiencia energética ((Btu/h)/W)
<i>h_{i,I}</i>	Entalpía ideal de la corriente “i”
<i>h_{i,R}</i>	Entalpía real de la corriente “i”
<i>HC</i>	Hidrocarburos
<i>HCFC</i>	Hidroclorofluorocarbonos
<i>HFC</i>	Hidrofluorocarbonos
<i>I</i>	Intensidad de corriente (A)
<i>m</i>	Masa (kg)
<i>ṁ</i>	flujo másico (kg/s)
<i>PAO</i>	Potencial de agotamiento de ozono
<i>P_{alta}</i>	Presión de descarga del compresor (bar)
<i>P_{baja}</i>	Presión de succión del compresor (bar)
<i>PCA</i>	Potencial de calentamiento atmosférico
<i>PC</i>	Presión crítica (bar)
<i>PEC</i>	Potencia eléctrica del compresor (W)
<i>Q̇_i</i>	Flujo de calor retirado (W)
<i>RC</i>	Relación de compresión (adimensional)
<i>RI</i>	Rendimiento de instalación (adimensional)
<i>R-12</i>	Diclorodifluorometano
<i>R-22</i>	Clorodifluorometano
<i>R-134a</i>	Tetrafloruro de etilo
<i>R-290</i>	Propano
<i>R-600</i>	Butano
<i>R-600a</i>	Isobutano
<i>T_C</i>	Temperatura crítica (°C)
<i>T_i</i>	Temperatura de condensación (°C)
<i>u</i>	Velocidad (m/s)
<i>v</i>	Volumen específico (m ³ /kg)
<i>V</i>	Potencial eléctrico (V)
<i>Ṃ</i>	Flujo volumétrico (m ³ /s)
<i>Ẇ_C</i>	Potencia consumida por el compresor (W)

Símbolos griegos

Δh_{vap}	Energía de vaporización (kJ/kg)
η_c	Eficiencia isoentrópica (adimensional)

Subíndices

Cond	Condensador/Condensación
Ent	Entrada
Evap	Evaporador/Evaporación
Fus	Fusión
Sal	Salida

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Decanato de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Simón Bolívar por el apoyo económico a través del proyecto de investigación S1-IN; así como a los grupos de miniproyectos que contribuyeron en algunas etapas de la presente investigación.

REFERENCIAS

- ALVAREZ, R., BARRIO, R., CESTONE, A., DAVILA, C. (2008). Diseño y construcción de un equipo de refrigeración que utiliza R-600a como gas refrigerante. Trabajo de investigación no publicada, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas Venezuela.
- CORBERÁN, J. M. & SEGURADO, J. (2004). “Characteristics of hydrocarbon refrigerants. Comparison with R22”. Memorias de SHERHPA: Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications, Universidad Politécnica de Valencia.
- HOWARD, S. (2008). “Cooling: Rethinking Refrigerants”. Appliance Design magazine, publicado el 1 de abril.
- HWANG, Y., JIN, D., RADERMARCHER, R. (2006). “Comparison of R290 and two HFC blends for walk-in refrigeration systems”. International Journal of Refrigeration Vol. 30, pp 633-641.
- MACLAINE-CROSS, I. (1996). “Insurance risk for hydrocarbons refrigerant in car air conditioners cars”. The University of New South Wales.
- MACLAINE-CROSS, I. (1998). “Replacement Refrigerants for Water Chillers”. The University of New South Wales.
- JÁNOS, J.M. (2001). Cool Technologies: Working Without HFCs. Trabajo presentado en Montreal para la 35va Junta de recaudación de Fondos para la implementación del protocolo de Montreal.

LEE, M.Y., LEE, D.Y., KIM, Y. (2008). "Performance characteristics of a small-capacity directly cooled refrigerator using R290/R600a (55/45)". International Journal of Refrigeration, Vol 4, pp 1-8.

NILLS, K.A. (2007). Hydrocarbons in commercial Refrigeration. Trabajo presentado para la junta de aire acondicionado en la industria (ACRIB).

PROGRAMA AMBIENTAL DE LAS NACIONES UNIDAS. (1997). "Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático".

Reglamento de Seguridad para Plantas e Instalaciones Frigoríficas e I.T.C. MYCT (2000).

SATTAR, M. A, R. SAIDUR, H., MASJUKI, H. (2008). "Performance Investigation of Domestic Refrigerator Using Pure Hydrocarbons and Blends of Hydrocarbons as Refrigerants". International Journal of Mechanical Systems Science and Enginnering Volume 1 Number 1 2008 ISSN 1307-7473.

WONGWISES, S. & CHIMRES, N. (2005). "Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator". Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91, Prachauti Road, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand. Energy Conversion and Management 46 (2005) 85-100.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). (1999). "Study on the Potential for Hydrocarbon Replacements in Existing Domestic and Small Commercial Refrigeration Appliances". Publicación de las Naciones Unidas ISBN 92-807-1765-0.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. (2000). "The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer".

WYLEN, V. (2003). Fundamentos de Termodinámica. Limusa Wiley, (México). 2da ed.