

## 1 - INTRODUCCIÓN

Desde la confirmación de la destrucción de la capa de ozono por los CFCs y de las restricciones impuestas por el Protocolo de Montreal a la utilización de estos refrigerantes en 1987, EMBRACO empezó un plan intensivo de investigación, visando desarrollar compresores que sean adecuados al uso de nuevos refrigerantes alternativos.

Durante los últimos años, varios refrigerantes alternativos han sido evaluados y, el R 134a, por presentar propiedades físicas y termodinámicas relativamente similares al R 12 y por no contener Cloro que destruye la capa de ozono, ha sido considerado el sustituto del R 12 en sus aplicaciones.

Recientemente, otro factor ambiental, también importante la destrucción de la capa de ozono, ha sido considerado: el potencial de calentamiento global, más conocido como efecto invernadero.

Dentre los refrigerantes alternativos que atienden ambas características ambientales, están los hidrocarburos. Estos refrigerantes no habían sido considerados como alternativos a sustitución al R 12, pues son inflamables.

El objetivo de este informativo es describir en detalles, el potencial de utilización de los refrigerantes hidrocarburos y su impacto en el proyecto actual de los compresores y dispositivos de expansión de los sistemas de refrigeración doméstica.

## 2 - PROPIEDADES FÍSICAS Y IMPACTO AMBIENTAL

En la tabla 1 son presentadas las principales propiedades físicas de los refrigerantes hidrocarburos comparadas a las del R 12 y R 134a.

TABLA 1 - Propiedades físicas del R 12, R 134a y refrigerantes hidrocarburos.

REFRIGERANTE	ESTRUCTURA MOLECULAR	PESO MOLECULAR	TEMPERATURA CRÍTICA (°C)	PRESIÓN CRÍTICA (bar)	PUNTO DE EBULICIÓN (°C)
• R 12	$\begin{array}{c} \text{F} \\   \\ \text{F}-\text{C}-\text{Cl} \\   \\ \text{Cl} \end{array}$	120,9	111,8	41,8	- 29,8
• R 134a	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{F}-\text{C}-\text{C}-\text{F} \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{H} \end{array}$	102,0	101,2	40,6	- 26,0
• PROPANO (R 290)	$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{H} \end{array}$	44,1	96,7	42,4	- 41,7
* BUTANO (R 600)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	58,1	151,0	37,2	- 0,5
* ISOBUTANO (R 600a)	$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	58,1	136,1	36,8	- 11,7

Fuente: • Programa Refprop  
\* Catalogo Matheson

Como se puede observar en la tabla 1, los refrigerantes hidrocarburos presentan menor peso molecular cuando comparados al R 12 y R 134a. Esto es debido a la ausencia de halógenos como cloro y fluor en su estructura molecular, que es compuesta solamente de carbono hidrógeno.

Tal característica hace con que los hidrocarburos sean más amistosos con el medio ambiente como está representado en la tabla 2.

TABLA 2 - Impacto ambiental de los refrigerantes hidrocarburos, R 12 y R 134a

REFRIGERANTE	ODP	GWP	TIEMPO DE VIDA
R 12	1,00	7100	120 años
R 134a	0	3200	16 años
PROPANO (R 290)	0	< 5	meses
BUTANO (R 600)	0	< 5	semanas

Fuente: 3º Report de la comisión de inquisición del parlamento alemán "Protection of the Atmosphere" (protección de la atmósfera), 1990  
ODP = Potencial de Destrucción del Ozono  
GWP = Potencial de Calentamiento Global (comparado al CO<sub>2</sub>)

Observase también en la tabla 2 que los refrigerantes hidrocarburos a ejemplo del R 134a, no destruyen la capa de ozono (ODP = 0). Tal característica debe a la ausencia del Cloro en sus moléculas. Además, los refrigerantes hidrocarburos ejercen efectos despreciables (GWP < 5) sobre el calentamiento de la Tierra, al contrario del R 12 y R 134a.

Otro factor ambiental favorable a los refrigerantes hidrocarburos presentados en la Tabla 2, es el menor tiempo de vida en la atmósfera.

## 3 - FLAMABILIDAD Y TOXICIDAD

La flamabilidad de un fluido es representada por sus límites inferiores (LEL) y superiores (UEL) de explosión. Tales límites, cuya diferencia son conocidas como límite de flamabilidad, representan la mínima y la máxima concentración de un gas en el aire, que cuando sometido a una fuente de ignición, promueve la propagación de llama, siendo o no continuada la aplicación de la fuente de ignición.

Cuanto mayor es el valor del LEL, más fácilmente es evitada la formación de una mezcla inflamable como presenta la Tabla 3.

TABLA 3 - Límites de flamabilidad y toxicidad de los refrigerantes comparados al R 12 y al R 134a.

REFRIGERANTE	TOXICIDAD	FLAMABILIDAD EN EL AIRE LEL UEL (% por Volumen)	
* R 12	TLV = 1000ppm	NO FLAMABLE	
* R 134a	AEL - 1000ppm	NO FLAMABLE	
• PROPANO (R 290)	BAJA	2,1	9,5
• BUTANO (R 600)	LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = 800ppm	1,8	8,5
• ISOBUTANO (R 600a)	LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = No Establecido	1,8	8,5

TLV = Valor Límite "Threshold" (ACGIH)  
AEL = Límites de exposición permisibles (DuPont)  
Fuente: • Catalogo White Martins  
\* Catalogo DuPont

Observase también en la tabla 3 que los refrigerantes presentan toxicidad similar al R 12 y R 134a.

#### 4 - PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ANALISIS TEORICA EN EL CICLO ASHRAE

Con el objetivo de observar el impacto de la sustitución del R 12 por los refrigerantes hidrocarbónicos, son presentadas en las figuras a seguir, las principales características termodinámicas y el desempeño teórico del ciclo ASHRAE de los refrigerantes hidrocarbónicos en relación al R 12 y R 134a.

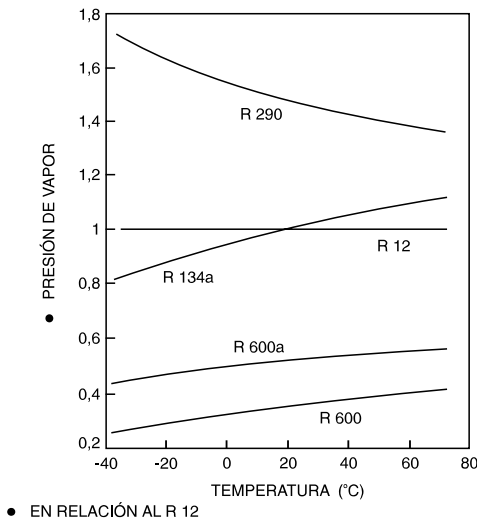
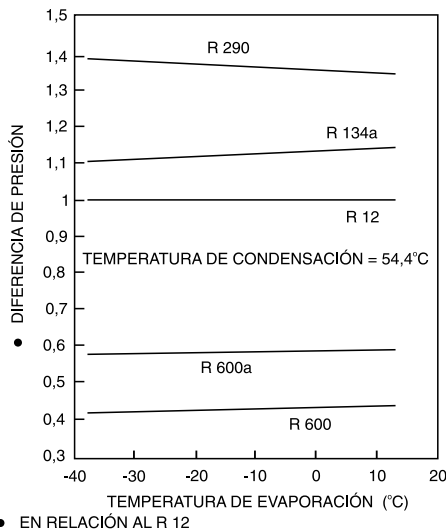


Fig. 1 - Comportamiento de presión de los refrigerantes hidrocarbónicos y R 134a en relación al R 12, en función de la temperatura.

Como puede observarse en la figura 1, el isobutano (R 600a) y el butano (R 600) presentan menores presiones de vapor que el R 12, encunanto el propano (R 290) presenta mayores presiones.

En la figura 2 es presentado el comportamiento de una diferencia de presión (esfuerzo a que estarán sometidos los mancales del compresor), de los hidrocarbónicos en función a la temperatura de evaporación.



Observase en la figura 2 que el propano (R 290) presenta mayores diferencias de presiones (esfuerzos mas grandes sobre los mancales del compresor) que el R 12, encunanto que e isobutano (R 600a) y el butano (R 600) presentan menores diferenciais de presión (menores esfuerzos sobre los mancales del compresor).

Asi, la utilización del propano en los sistemas de refrigeración, ocasionaria el redimensionamiento de los mancales y de otros componentes del compresor, como el sistema de válvulas de los actuales compresores para R 12.

Con el objetivo de comparar el desempeño de los refrigerantes hidrocarbónicos en relación al R 12 y R 134a, son presentadas en la Tabla 4, las principales características destes refrigerantes cuando analizados teóricamente en el ciclo de refrigeración ASHRAE.

TABLA 4 - Comparativo teórico entre R 12, R 134a y refrigerantes hidrocarbónicos en el ciclo de refrigeración ASHRAE

REFRIGERANTE		R 12	R 134a	R 290	R 600a	R 600
A - PRESIÓN DE EVAPORACIÓN (-23,3°C)	bar	1,321	1,152 (-12,8%)	2,165 (63,9%)	0,624 (-52,8%)	0,389 (-70,5%)
PRESIÓN DE CONDENSACIÓN (54,4°C)	bar	13,470	14,710 (9,2%)	18,860 (40,0%)	7,614 (-43,5%)	5,563 (-58,7%)
DIFERENCIA DE PRESIÓN	bar	12,15	13,56 (11,6%)	16,70 (37,4%)	6,99 (-42,5%)	5,17 (-57,4%)
RAZON DE COMPRESIÓN		10,20	12,77 (25,2%)	8,71 (-14,6%)	12,20 (19,6%)	14,30 (40,2%)
DIFERENCIA DE ENTALPIA DE EVAPORACIÓN	kJ/kg	143,60	186,90 (30,2%)	353,40 (146,1%)	336,00 (134,0%)	365,30 (154,4%)
B - VOLUME ESPECÍFICO EN LA SUCCIÓN (60°C)	m³/kg	0,1702	0,2322 (36,4%)	0,2828 (66,2%)	0,7554 (343,8%)	1,2160 (591,2%)
FLUJO MASICO PARA 630 Btu/h	kg/h	4,628	3,556 (-23,2%)	1,881 (-59,4%)	1,978 (-57,3%)	1,819 (-60,7%)
DESPLAZAMIENTO VOLUMÉTRICO (3000 rpm)	cm³/rev	4,376	4,587 (5,0%)	2,955 (-32,5%)	8,301 (89,7%)	12,288 (180,8%)
TEMPERATURA DE DESCARGA (ISOENTRÓPICA)	°C	157,8	147,9 (-6,3%)	143,9 (-8,8%)	129,8 (-17,7%)	133,1 (-15,7%)
C - TEMPERATURA EN LA ENTRADA DEL DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN	°C	32,2	32,2	32,2	32,2	32,2
VOLUME ESPECÍFICO	dm³/kg	0,778	0,847 (8,9%)	2,080 (167,3%)	1,847 (137,4%)	1,773 (127,9%)
FLUJO VOLUMÉTRICO	dm³/kg	3,600	3,012 (-16,3%)	3,912 (8,7%)	3,653 (1,5%)	3,225 (-10,4%)

Nota: Eficiencia isoentrópica y volumétrica = 100%

Como se puede observar en la sección A de la tabla 4, la diferencia de entalpia de los refrigerantes hidrocarbónicos es significativamente mas grande que a del R 12 y R 134a. Asi, un flujo menor de masa es necesario para se obtener una determinada capacidad de refrigeración.

En la sección B, observase que el propano (R 290) necesita una reducción en el desplazamiento volumétrico de la orden de 32,5% en relación al R 12, encunanto que el isobutano (R 600a) y el butano (R 600), necesitan un incremento en torno de 90% y 181%, respectivamente. Observase también, que los refrigerantes hidrocarbónicos a ejemplo del R 134a, presentan menores temperaturas de descarga que el R 12.

Las condiciones del refrigerante en la entrada del dispositivo de expansión están representadas en la sección C de la tabla 4. El flujo volumétrico del butano es alrededor de 10,4% inferior a del R 12, indicando que la resistencia al caudal en el tubo capilar debe ser incrementado. Con propano, el flujo volumétrico es de la orden de 8,7% superior al del R 12, encuanto que con el isobutano es de apenas 1,5%. Así, ningún cambio parece ser necesario en el tubo capilar de los sistemas de refrigeración, cuando isobutano es utilizado como refrigerante.

Los principales impactos de cada refrigerante hidrocarbónico sobre el compresor y el dispositivo de expansión de sistemas de refrigeración, basados en análisis teórica del ciclo ASHRAE, son resumidos en la tabla 5.

TABLA 5 - Principales características en relación al R 12 y el impacto de los refrigerantes hidrocarbónicos en el proyecto de los compresores y dispositivos de expansión de los sistemas de refrigeración

REFRIGERANTE	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES EN RELACIÓN AL R 12	IMPACTO SOBRE EL COMPRESOR Y EL TUBO CAPILAR
PROPANO (R 290)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor Desplazamiento Volumétrico (- 33%)</li> <li>- Mayor Diferencia de Presión (37%)</li> <li>- Mayor Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (8,7%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re-proyecto de los mancales, valvulas y otros componentes del compresor</li> <li>- Reducción de la resistencia al caudal de refrigerante en el tubo capilar</li> </ul>
ISOBUTANO (R 600a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor Desplazamiento Volumétrico (90%)</li> <li>- Menor Diferencia de Presión (- 42%)</li> <li>- Similar Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (1,5%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re-proyecto de los componentes del compresor</li> <li>- Cambios en el tubo capilar parecen desnecesarias</li> </ul>
BUTANO (R 600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor Desplazamiento Volumétrico (181%)</li> <li>- Menor Diferencia de Presión (- 57%)</li> <li>- Menor Flujo Volumétrico en el Tubo Capilar (- 10,4%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re-proyecto de los componentes del compresor</li> <li>- Aumento tamaño total del compresor</li> <li>- Aumento de la resistencia al caudal de refrigerante en el tubo capilar</li> </ul>

A pesar de la necesidad de un mayor desplazamiento del compresor y del alto punto de ebullición, el refrigerante isobutano está siendo considerado como alternativa al

refrigerante R 12. Esto debe de ser el hecho del sistema no requirer grandes alteraciones.

### 5 - COMPATIBILIDAD QUÍMICA COM MATERIALES

Los refrigerantes hidrocarbónicos son compatibles con los materiales metálicos actualmente utilizados en los sistemas de refrigeración como acero, cobre, latón y aluminio.

Elastómeros como Teflon, Neoprene, Nylon, Vitons y algunas gomas nitrílicas, también son adecuados al uso de hidrocarbónicos.

### 6 - ACEITE LUBRICANTE

Los aceites minerales y sintéticos, actualmente utilizados en sistemas de refrigeración con R 12, son compatibles con los refrigerantes hidrocarbónicos.

Los aceites ester, debido a su característica biodegradable, también aparecen como candidatos al uso con hidrocarbónicos, sin embargo, este tipo de aceite presenta alto costo, no es compatible con determinados compuestos químicos actualmente utilizados en los procesos de fabricación de compresores y componentes para sistema de refrigeración con R 12, además de exigir cuidados especiales en su manejo debido a alta higroscopicidad.

### 7 - CARGA DE REFRIGERANTE

En sistemas de refrigeración que no sufran cambios en los componentes la carga del refrigerante dependiendo del hidrocarbónico utilizado, podrá ser 50-60% menor cuando comparada a la carga del R 12. Esta característica, reduce los posibles riesgos de explosión o fuego en sistemas de refrigeración que utilicen hidrocarbónicos como refrigerante.

### 8 - SEGURIDAD

El uso de refrigerantes inflamables en sistemas de refrigeración doméstica, incrementan los riesgos de explosión o fuego, y imponen la necesidad de se evaluar cuidadosamente todos los aspectos relacionados a seguridad.

EMBRACO, ciente de la importancia de tal análisis, hizo un extensivo plan de pruebas visando determinar los posibles riesgos envueltos con el uso de refrigerantes hidrocarbónicos en sistemas de refrigeración doméstica.

**Nota:** Cuando retirados de un sistema de refrigeración, el compresor y sus accesorios no deben ser tirados al medio ambiente. Los componentes deben ser reciclados conforme la clasificación de los materiales utilizados (ferrosos, no ferrosos, polímeros, aceites...).