

1 - INTRODUÇÃO

Desde a confirmação da destruição da camada de ozônio pelos CFCs, e das restrições impostas pelo Protocolo de Montreal ao uso destes refrigerantes, a EMBRACO ingressou num intensivo programa de pesquisa, visando desenvolver compressores que sejam adequados ao uso dos novos refrigerantes alternativos.

Durante os últimos anos, vários refrigerantes alternativos foram avaliados e o R 134a, por apresentar propriedades físicas e termodinâmicas relativamente semelhantes às do R 12 e por não conter Cloro que (responsável pela destruição da camada de ozônio), tem sido considerado o substituto do R 12 nas suas aplicações.

Mais recentemente, outro fator ambiental, não menos importante que a destruição da camada de ozônio, tem sido considerado: o potencial de aquecimento global, mais conhecido como efeito estufa.

Dentre os refrigerantes alternativos que atendem ambas características ambientais, estão os hidrocarbonos. Estes refrigerantes não tinham até então sido considerados uma alternativa à substituição do R 12, pois são inflamáveis.

O objetivo deste informativo é descrever em detalhes, o potencial de utilização dos refrigerantes hidrocarbonos e seu impacto no projeto atual dos compressores e dispositivos de expansão dos sistemas de refrigeração doméstica.

2 - PROPRIEDADES FÍSICAS E IMPACTO AMBIENTAL

Na tabela 1 são apresentadas as principais propriedades físicas dos refrigerantes hidrocarbonos comparadas às do R 12 e R 134a.

TABELA 1 - Propriedades físicas do R 12, R 134a e refrigerantes hidrocarbonos.

| REFRIGERANTE | ESTRUTURA MOLECULAR | PESO MOLECULAR | TEMPERATURA CRÍTICA (°C) | PRESSÃO CRÍTICA (bar) | PUNTO DE EBULIÇÃO (°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) | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{H} \end{array}$ | 44,1 | 96,7 | 42,4 | - 41,7 |
| * BUTANO (R 600) | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ | 58,1 | 151,0 | 37,2 | - 0,5 |
| * ISOBUTANO (R 600a) | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}_2\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ | 58,1 | 136,1 | 36,8 | - 11,7 |

Fonte: • Programa Refprop
* Catálogo Matheson

Como pode-se verificar na tabela 1, os refrigerantes hidrocarbonos apresentam menor peso molecular quando comparados ao do R 12 e R 134a. Isto é devido à ausência de halogêneos como cloro e flúor na sua estrutura molecular, que é composta apenas de carbono e hidrogênio.

Tal característica torna os refrigerantes hidrocarbonos menos agressivos ao meio ambiente, como mostra a tabela 2.

TABELA 2 - Impacto ambiental dos refrigerantes hidrocarbonos, R 12 e R 134a

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

Fonte: 3º relatório da comissão de inquérito do parlamento alemão "Protection of the Atmosphere" (proteção da atmosfera), 1990.

ODP = Potencial de Destruição do Ozônio
GWP = Potencial de Aquecimento Global (comparado ao CO₂)

Observa-se também na tabela 2 que os refrigerantes hidrocarbonos a exemplo do R 134a, não destroem a camada de ozônio (ODP = 0). Tal característica deve-se à ausência de cloro nas suas moléculas. Entretanto os refrigerantes hidrocarbonos exercem efeito desprezível (GWP < 5) sobre o aquecimento da Terra, ao contrário do R 12 e R 134a.

Outro fator ambiental favorável aos refrigerantes hidrocarbonos, mostrado na tabela 2, é seu menor tempo de vida na atmosfera.

3 - FLAMABILIDADE E TOXIDEX

A flamabilidade de um fluido é representada pelos seus limites inferior (LEL) e superior (UEL) de explosão. Tais limites, cuja diferença é conhecida como limite de flamabilidade, representam a mínima e a máxima concentração de um gás no ar, que quando submetido a uma fonte de ignição, promove a propagação de chama, sendo ou não continuada a aplicação da fonte de ignição.

Quanto maior o valor do LEL, mais facilmente é evitada a formação de uma mistura inflamável, como mostra a tabela 3.

TABELA 3 - Limites de flamabilidade e toxidez dos refrigerantes hidrocarbonos comparados ao R 12 e R 134a.

| REFRIGERANTE | TOXIDEX | FLAMABILIDADE NO AR LEL UEL (% por Volume) |
|----------------------|--|---|
| * R 12 | TLV = 1000ppm | NÃO FLAMÁVEL |
| * R 134a | AEL - 1000ppm | NÃO FLAMÁVEL |
| • PROPANO (R 290) | BAIXA | 2,1 9,5 |
| • BUTANO (R 600) | LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = 800ppm | 1,8 8,5 |
| • ISOBUTANO (R 600a) | LEVEMENTE ANESTÉSICO TLV = Não Estabelecido | 1,8 8,5 |

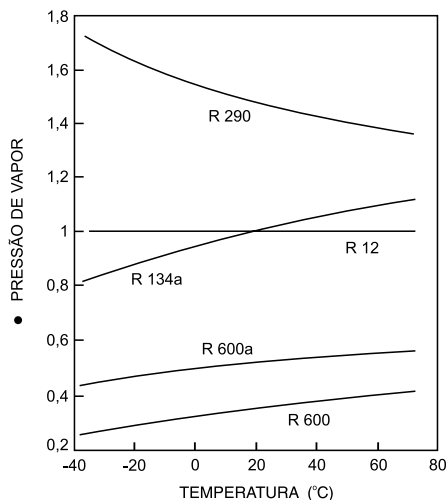
TLV = Valor Limite "Threshold" (ACGIH)
AEL = Limites de exposição permissíveis (DuPont)

Fonte: • Catálogo White Martins
* Catálogo DuPont

Observa-se também na tabela 3 que os refrigerantes hidrocarbonos apresentam toxidez similar à dos gases R 12 e R 134a.

4 - PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E ANÁLISE TEÓRICA NO CICLO ASHRAE

Com o objetivo de observar o impacto da substituição do R 12 pelos refrigerantes hidrocarbonos, são apresentadas nas figuras a seguir, as principais características termodinâmicas e o desempenho teórico no ciclo ASHRAE dos refrigerantes hidrocarbonos em relação ao R 12 e R 134a.

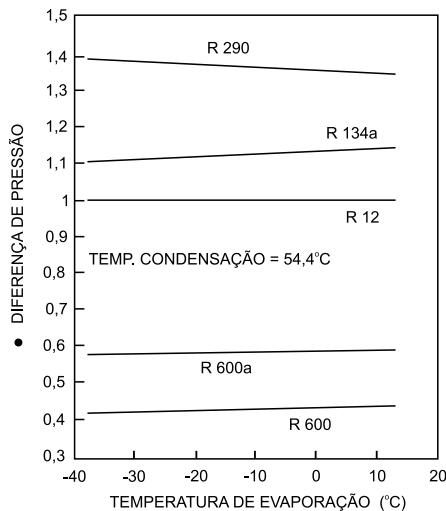


● EM RELAÇÃO AO R 12

Fig. 1 - Comportamento da pressão dos refrigerantes hidrocarbonos e R 134a em relação ao R 12, em função da temperatura.

Como pode-se verificar na figura 1, o isobutano (R 600a) e o butano (R 600) apresentam menores pressões de vapor que o R 12, enquanto que o propano (R 290) apresenta maiores pressões.

Na figura 2 é apresentado o comportamento da diferença de pressão (esforço a que estarão submetidos os mancais do compressor), dos hidrocarbonos em função da temperatura de evaporação.



● EM RELAÇÃO AO R 12

Observa-se na figura 2 que o propano (R 290) apresenta maiores diferenças de pressão (maiores esforços sobre os mancais do compressor) que o R 12, enquanto que o isobutano (R 600a) e o butano (R 600) apresentam menores diferenças de pressão (menores esforços sobre os mancais do compressor).

Assim, a utilização de propano nos sistemas de refrigeração, ocasionaria o redimensionamento dos mancais e de outros componentes do compressor, como o sistema de válvulas dos atuais compressores para R 12.

Com o objetivo de comparar o desempenho dos refrigerantes hidrocarbonos em relação ao R 12 e R 134a, são apresentadas na tabela 4, as principais características destes refrigerantes quando analisados teoricamente no ciclo de refrigeração ASHRAE.

TABELA 4 - Comparativo teórico entre R 12, R 134a e refrigerantes hidrocarbonos no ciclo de refrigeração ASHRAE.

| REFRIGERANTE | | R 12 | R 134a | R 290 | R 600a | R 600 |
|--|--|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| A - PRESSÃO DE EVAPORAÇÃO (- 23,3°C) | | | | | | |
| bar | | 1,321 | 1,152 (- 12,8%) | 2,165 (63,9%) | 0,624 (- 52,8%) | 0,389 (- 70,5%) |
| PRESSÃO DE CONDENSÇÃO (54,4°C) | | | | | | |
| bar | | 13,470 | 14,710 (9,2%) | 18,860 (40,0%) | 7,614 (- 43,5%) | 5,563 (- 58,7%) |
| DIFERENÇA DE PRESSÃO | | | | | | |
| bar | | 12,15 | 13,56 (11,6%) | 16,70 (37,4%) | 6,99 (- 42,5%) | 5,17 (- 57,4%) |
| RAZÃO DE COMPRESSÃO | | | | | | |
| | | 10,20 | 12,77 (25,2%) | 8,71 (- 14,6%) | 12,20 (19,6%) | 14,30 (40,2%) |
| DIFERENÇA DE ENTALPIA DE EVAPORAÇÃO | | | | | | |
| kJ/kg | | 143,60 | 186,90 (30,2%) | 353,40 (146,1%) | 336,00 (134,0%) | 365,30 (154,4%) |
| B - VOLUME ESPECÍFICO NA SUCCÃO (60°C) | | | | | | |
| m³/kg | | 0,1702 | 0,2322 (36,4%) | 0,2828 (66,2%) | 0,7554 (343,8%) | 1,2160 (591,2%) |
| FLUXO DE MASSA PARA 630 Btu/h | | | | | | |
| kg/h | | 4,628 | 3,556 (- 23,2%) | 1,881 (- 59,4%) | 1,978 (- 57,3%) | 1,819 (- 60,7%) |
| DESLOCAMENTO 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 NA ENTRADA DO DISPOSITIVO DE EXPANSÃO | | | | | | |
| °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%) |
| VAZÃO VOLUMÉTRICA | | | | | | |
| dm³/kg | | 3,600 | 3,012 (- 16,3%) | 3,912 (8,7%) | 3,653 (1,5%) | 3,225 (- 10,4%) |

Nota: Eficiência isoentrópica e volumétrica = 100%

Como pode ser observado na seção A da tabela 4, a diferença de entalpia dos refrigerantes hidrocarbonos é significativamente maior que a do R 12 e R 134a. Assim, um menor fluxo de massa é necessário para se obter uma determinada capacidade de refrigeração.

Na seção B, observa-se que o propano (R 290) necessita uma redução no deslocamento volumétrico da ordem de 32,5% em relação ao R 12, enquanto que o isobutano (R 600a) e o butano (R 600), necessitam um incremento em torno de 90% e 181%, respectivamente. Observa-se também que os refrigerantes hidrocarbonos, a exemplo do R 134a, apresentam menores temperaturas de descarga que o R 12.

As condições do refrigerante na entrada do dispositivo de expansão estão representadas na seção C da tabela 4. A vazão volumétrica do butano é cerca de 10,4% inferior à do R 12, indicando que a resistência ao escoamento no tubo capilar deve ser aumentada. Com propano, a vazão volumétrica é da ordem de 8,7% superior a do R 12, enquanto que com o isobutano é de apenas 1,5%. Assim, nenhuma alteração parece ser necessária no tubo capilar dos sistemas de refrigeração, quando o isobutano é utilizado como refrigerante.

Os principais impactos de cada refrigerante hidrocarbono sobre o compressor e o dispositivo de expansão dos sistemas de refrigeração, baseados na análise teórica do ciclo ASHRAE, são resumidos na tabela 5.

TABELA 5 - Principais características em relação ao R 12 e impacto dos refrigerantes hidrocarbonos no projeto dos compressores e dispositivos de expansão dos sistemas de refrigeração.

| REFRIGERANTE | CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS EM RELAÇÃO AO R 12 | IMPACTO SOBRE O COMPRESSOR E TUBO CAPILAR |
|--------------------|--|---|
| PROPANO (R 290) | <ul style="list-style-type: none"> - Menor Deslocamento Volumétrico (- 33%) - Maior Diferença de Pressão (37%) - Maior Vazão Volumétrica no Tubo Capilar (8,7%) | <ul style="list-style-type: none"> - Reprojetos dos mancais, válvulas e outros componentes do compressor - Redução da resistência ao escoamento de refrigerante no tubo capilar |
| ISOBUTANO (R 600a) | <ul style="list-style-type: none"> - Maior Deslocamento Volumétrico (90%) - Menor Diferença de Pressão (- 42%) - Similar Vazão Volumétrica no Tubo Capilar (1,5%) | <ul style="list-style-type: none"> - Reprojetos dos componentes do compressor - Mudanças no tubo capilar parecem desnecessárias |
| BUTANO (R 600) | <ul style="list-style-type: none"> - Maior Deslocamento Volumétrico (181%) - Menor Diferença de Pressão (- 57%) - Menor Vazão Volumétrica no Tubo Capilar (- 10,4%) | <ul style="list-style-type: none"> - Reprojetos dos componentes do compressor - Aumento tamanho total do compressor - Aumento da resistência ao escoamento de refrigerante no tubo capilar |

Apesar da necessidade de um maior deslocamento volumétrico do compressor e do alto ponto de ebulição, o refrigerante isobutano está sendo considerado como uma

alternativa para o R 12. Isto se deve ao fato de o sistema não necessitar grandes alterações.

5 - COMPATIBILIDADE QUÍMICA COM MATERIAIS

Os refrigerantes hidrocarbonos são compatíveis com os materiais metálicos atualmente utilizados nos sistemas de refrigeração como aço, cobre, latão e alumínio.

Elastômeros como Teflon, Neoprene, Nylon, Vitons e algumas borrachas nitrílicas também são adequados para o uso com hidrocarbonos.

6 - ÓLEO LUBRIFICANTE

Os óleos minerais e sintéticos, atualmente utilizados em sistemas de refrigeração com R 12, são compatíveis com os refrigerantes hidrocarbonos.

Os óleos éster, devido à sua característica biodegradável, também aparecem como candidatos ao uso com hidrocarbonos. Contudo, este tipo de óleo apresenta alto custo e não é compatível com determinados compostos químicos atualmente utilizados nos processos de fabricação de compressores e componentes para sistemas de refrigeração com R 12. Além disto exige cuidados especiais no seu manuseio, devido a sua alta higroscopicidade.

7 - CARGA DE REFRIGERANTE

Em sistemas de refrigeração que não sofreram alterações nos seus componentes, a carga de refrigerante, dependendo do hidrocarbono utilizado, poderá ser 50-60% menor quando comparada à carga de R 12. Esta característica reduz os possíveis riscos de explosão ou fogo em sistemas de refrigeração que utilizem hidrocarbonos como refrigerante.

8 - SEGURANÇA

O uso de refrigerantes inflamáveis e sistemas de refrigeração doméstica, aumenta os riscos de explosão ou fogo e impõem a necessidade de se avaliar cuidadosamente todos os aspectos relacionados à segurança.

A EMBRACO, ciente da importância de tal análise, colocou em andamento um extensivo plano de testes visando determinar os possíveis riscos envolvidos com o uso dos refrigerantes hidrocarbonos em sistemas de refrigeração doméstica.

Nota: Após substituição, o compressor e seus acessórios não devem ser descartados no meio ambiente. Os componentes devem ser reciclados obedecendo a classificação dos materiais utilizados (ferrosos, não ferrosos, polímeros, óleos...).