

SUBSTITUIÇÃO DO R-22: PANORAMA ATUAL (PARTE 1)

James M. Calm e
Piotr A. Domanski

O próximo passo na transição para refrigerantes não agressivos ao meio-ambiente consiste na substituição do R-22, o fluido refrigerante adotado pela grande maioria dos equipamentos de refrigeração em operação. Utilizado nos mais diversos setores econômicos, tais como residencial, comercial, industrial e de transporte, sua faixa de aplicação é a mais ampla dentre os fluidos refrigerantes disponíveis, tendo sido empregado em sistemas com capacidades de refrigeração entre 2kW e 33MW (0,5 e 9.500 TRs). Como nenhum dos potenciais substitutos é tão versátil quanto o R-22, sua escolha depende fortemente da aplicação.

INTRODUÇÃO

Desde seu descobrimento em 1928 e início da comercialização em 1936, o refrigerante R-22 vem sendo largamente empregado em sistemas de refrigeração dos mais diversos portes, desde aplicações de baixa capacidade - como condicionadores de ar de janela de 0,5 TR (2kW) - até chillers e bombas de calor usados para refrigeração distrital, com capacidades em torno de 9.500 TRs (33MW). Dada sua ampla faixa de aplicação, o R-22 tem sido utilizado nos mais diversos equipamentos de refrigeração, tais como compressores scroll e recíprocos, compres-

sores centrífugos, rotativos e de parafuso, e até em sistemas de absorção, embora ainda em caráter experimental. Nenhum outro refrigerante teve seu uso tão amplamente difundido como o R-22, tanto em termos de capacidade de refrigeração como de aplicação comercial.

No entanto, o R-22 pertence a uma classe de substâncias - denominada de hidrocloro-fluorcarbonos (HCFCs) - prejudicial ao meio-ambiente, motivo pelo qual seu uso vem sendo gradativamente reduzido de acordo com as metas estabelecidas pelo Protocolo de Montreal (UNEP 1987, 2003a). Este tratado internacional firmado em 1987 regulamenta apenas o "consumo" do R-22: definido como a soma da quantidade produzida e da importada, subtraída das quantidades exportada e destruída. O Protocolo de Montreal não atua sobre aplicações futuras do refrigerante em uso ou que tenha sido estocado antes dos prazos estipulados, tam-

pouco sobre o uso de substâncias empregadas como intermediários na fabricação de outros produtos químicos.

A tabela 1 apresenta os prazos estabelecidos pelo Protocolo de Montreal para interrupção da produção do R-22, embora metas de redução parcial ou congelamento da produção possam ter sido previamente adotadas por alguns dos países integrantes, notadamente na Europa, a fim de acelerar o processo. As metas impostas pelos governos dos EUA e Canadá também são mostradas na tabela 1.

Mesmo após a interrupção da produção, uma ampla quantidade de equipamentos que operam com o R-22 permanecerá em funcionamento por décadas. O fluido necessário à manutenção de tais equipamentos será obtido através da produção de pequenas quantidades sob licença, de reservas estocadas antes da data final de produção e do reaproveitamento do refrigerante de sistemas sucateados ou recém

Protocolo de Montreal	Novos Equipamentos	Equipamentos Existentes
Países em desenvolvimento	2020 ^a	2030
Países do artigo 5.1	2040 ^a	2040
EUA ^b e Canadá	2010	2020

NOTAS:

- São impostas reduções graduais para o consumo coletivo de HCFCs (para os países citados no artigo 5.1 apenas um congelamento em 2015), embora seja permitido que cada país determine individualmente como atingir tais metas com base na média ponderada pelo potencial de degradação da camada de ozônio (ODP) de cada substância e no seu respectivo uso.
- Segue as regras do CAAA (*Clean Air Act Amendments*) de 1990 e está, atualmente, implementando o 40 CFR 82.

Tabela 1: Prazos para interrupção da produção do R-22, com início em 1º de Janeiro do ano indicado. As datas referem-se apenas à produção e importação de R-22

J. M. Calm and P. A. Domanski, "R-22 Replacement Status," *ASHRAE Journal*, 46(8):29-39, August 2004; translation by C. Hermes to Portuguese as "Substituição do R-22: Panorama Atual" in *Revista ABRAVA*, 222:40-43, February 2005, and 223:40-45, March 2005

convertidos para outros fluidos. Parte desses equipamentos será convertida para refrigerantes substitutos, alguns desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Um pequeno número de países, novamente na Europa, impuseram restrições ainda mais severas: o uso de R-22 já foi ou será proibido em breve, com base em datas definidas de acordo com o tipo e tamanho do equipamento. No entanto, o Protocolo de Montreal permite aos países em desenvolvimento - mais especificamente àqueles citados no Artigo 5.1 - usarem o R-22 a título de "consumo" até 2040.

OPÇÕES

Não existe atualmente uma substância pura que seja capaz de substituir o R-22 em toda a sua faixa de aplicação. Existem, entretanto, pelo menos oito misturas refrigerantes no mercado para substituir o R-22 nos equipamentos em operação, além de várias outras misturas desenvolvidas para novos equipamentos. Considerando o R-502 - uma mistura a base de R-22 amplamente utilizada para refrigeração a baixas temperaturas -, tem-se mais de 20 candidatos para substituição do R-22 em equipamentos em uso e mais de 10 opções para novos sistemas. Tais substâncias estão resumidas na tabela 2.

De forma complementar à extensa pesquisa realizada pelos fabricantes de equipamentos, pelas universidades, por laboratórios dos governos e por outras instituições, a indústria de refrigeração e condicionamento de ar organizou um esforço coletivo a fim de expandir o leque de opções de substitutos do R-22. Tal iniciativa foi denominada de Programa de Avaliação de Alternativas do R-22 ou AREP (do inglês, *R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program*) e teve uma contrapartida no Japão, a JAREP (*Japan AREP*). Criado no início dos anos 1990, o AREP tinha como principal objetivo concentrar esforços e evitar o desperdício de recursos na busca de substitutos para o R-22. No total, 39 instituições na Europa, Japão e América do Norte fizeram parte dessa iniciativa, em que tanto resultados analíticos como de testes calorimétricos foram compartilhados.

O AREP examinou 14 candidatos previamente selecionados como substitutos potenciais do R-22, dentre os quais destacam-se: R-134a; R-32/125 (60,0/40,0); R-32/134a (20,0/80,0), (25,0/75,0), (30,0/70,0) e (40,0/60,0); R-32/227ea (35,0/65,0); R-125/143a (45,0/55,0); R-32/125/134a (10,0/70,0/20,0) [R-407B], (24,0/16,0/60,0) e (30,0/10,0/60,0); e R-32/125/

290/134a (20,0/55,0/5,0/20,0). O propano (R-290) e a amônia (R-717) também foram considerados, embora os testes com tais refrigerantes tenham sido limitados. Foram levados em conta quatro substitutos potenciais do R-502: R-125/143a (45,0/55,0); R-32/125/134a (20,0/40,0/40,0) [R-407A]; R-125/143a/134a (10,0/45,0/45,0) e R-125/143a/134a (44,0/52,0/4,0) [R-404A].

Com base nos resultados do AREP, os interesses da maioria dos fabricantes de compressores e unidades de pequeno porte convergiram para a mistura R-32/125, posteriormente reformulada para R-32/125 (50,0/50,0) [R-410A], buscando maximizar o desempenho energético e minimizar a inflamabilidade. Embora opere com elevadas pressões de condensação - aproximadamente 60% maiores que o R-22 para sistemas a ar -, esta mistura quase-azeotrópica promete reduzir o tamanho dos equipamentos. Uma mistura ternária, o R-32/125/134a, destacou-se como substituto para aplicações de serviço, embora tenha exigido uma reformulação nas frações dos componentes para se ajustar às pressões e temperaturas de trabalho dos refrigerantes R-22 e R-502. Um exemplo é o R-32/125/134a (30,0/10,0/60,0), forte candidato a substituto do R-22 tanto a curto prazo como para uso futuro como fluido de serviço. Outro exemplo consiste na reformulação do R-32/125/134a (23,0/25,0/52,0) [R-407C] a fim de reduzir seus níveis de inflamabilidade.

O estudo do AREP levou em conta apenas análises chamadas de pré-competitivas, ou seja, sem considerar as prováveis evoluções dos potenciais substitutos do R-22 num mercado fortemente competitivo. Alguns fabricantes têm desenvolvido, por livre iniciativa, técnicas para projetar e

	Equipamentos Existentes (podem requerer conversão)				Novos Equipamentos	
R-22	R-407C R-421A	R-411A R-421B	R-417A	R-419A	R-407C R-410A HCs	R-407E R-410B
R-502	R-402A R-404A R-411B	R-402B R-407A R-422A	R-403A R-407B R-507A	R-403B R-408A	R-404A R-507A HCs	R-407A R-509A

Existem diversas misturas atualmente em uso, embora restritas a um mercado pequeno, de modo que esta tabela contém apenas as misturas de refrigerantes com designação padrão.

Tabela 2: Potenciais substitutos do R-22

otimizar os equipamentos em operação. Minor (2004) apresenta um resumo da extensa literatura disponível acerca das alterações e testes necessários à conversão dos equipamentos existentes. Tais modificações incluem reprojatos de compressores, trocadores de calor, sistemas de controle, bem como o uso de aditivos nos lubrificantes (veja a seção Compatibilidade de Materiais). Como conclusão, observou-se que a maioria dos estudos relata uma leve alteração na eficiência se o refrigerante R-410A for adotado, que se eleva de 1 a 7% para aplicações de resfriamento, e varia entre 3% de decréscimo e 7% de acréscimo para aplicações de aquecimento.

Enquanto a rede de serviços e a padronização de alguns equipamentos para aplicações residenciais e comerciais de pequeno porte permitem modificações sistemáticas nos equipamentos, alterações em plantas de maior porte não são tão simples de serem padronizadas. Por exemplo, o R-134a é o refrigerante mais empregado para aplicações em chillers com compressor de parafuso (175 a 1500kW, 50 a 450 TRs), tanto com condensação a ar como a água. Como alternativas, tem-se o R-410A, a amônia (R-717) e o propileno (R-1270), embora os dois últimos tenham sido cogitados apenas para uso experimental na Europa. Tanto o R-407C como o R-404A também foram cotados - mais o primeiro que o segundo - a fim de acelerar a penetração de substitutos do R-22 no mercado. Entretanto, a euforia inicial acerca destes refrigerantes se dissipou rapidamente, uma vez que o uso do R-134a em um novo produto juntamente com a substituição do compressor de parafuso ou recíproco por um compressor centrífugo com controle de capacidade é capaz de elevar dramaticamente a eficiência para os mesmos níveis de capa-

cidade.

O interesse no R407C continua, principalmente na Europa, para aplicações em chillers com condensação a água. Apesar de uma eficiência 7% abaixo da obtida com R-22, duas possibilidades estão sendo cogitadas para resolver este problema. Primeiramente, o uso de um trocador de calor entre a linha de líquido e a linha de sucção pode diminuir as perdas em 2%. Adicionalmente, melhorias substanciais podem ser obtidas tirando vantagem da elevada variação da temperatura de saturação com a pressão (comumente denominada de glide) do R-407C, em torno de 4-5 °C tanto para as temperaturas de condensação como para evaporação. Estima-se que um aumento de aproximadamente 5% pode ser obtido em eficiência através do uso de trocadores de calor em contra-corrente para aproximar o ciclo real do ciclo de Lorenz, mais eficiente sob o ponto de vista termodinâmico.

MEIO-AMBIENTE

Enquanto as regras para eliminação do R-22 se baseiam apenas no seu potencial de depleção de ozônio (ODP), a busca de alternativas para substituição do R-22 deve levar em conta dados ambientais adicionais, tais como o tempo de vida na atmosfera (τ_{atm}) e o potencial de aquecimento global (GWP), apresentados na tabela 3 tanto para o R-22 como para alguns potenciais substitutos. O tempo de vida na atmosfera, τ_{atm} , indica o tempo médio de permanência de um refrigerante liberado na atmosfera até que se decomponha, ou reaja com outros químicos, ou seja completamente removido do meio. Em outras palavras, τ_{atm} representa um potencial de acumulação da substância na atmosfera: uma vida elevada indica uma recuperação lenta do meio-ambiente após um determinado problema. Assim, uma vida mais curta na atmosfera é desejável.

Refrigerante	τ_{atm} (anos)	ODP	GWP (100 anos)
R-22	12,0	0,034	1780
R-123	1,3	0,012	76
R-134a	14,0	~ 0,0	1320
R-407C	a	~ 0,0	1700
R-407E	a	~ 0,0	1400
R-410A	a	~ 0,0	2000
R-32	4,9	~ 0,0	543
R-32/600 (95,0/5,0)	a	~ 0,0	520
R-32/600a (90,0/10,0)	a	~ 0,0	490
R-290 (propano)	b	0,0	~ 20
R-717 (amônia)	b	0,0	< 1
R-744 (dióxido de carbono)	> 50	0,0	≡ 1
R-1270 (propileno)	b	0,0	~ 20

a τ_{atm} não foi apresentado para misturas, uma vez que seus componentes se separam na atmosfera.

b Desconhecido.

Tabela 3: Propriedades ambientais do R-22 e de seus substitutos com base em Calm e Hourahan (2001), IPCC (2001), e WMO (2003)

Os valores indicados na tabela representam tempos de vida médios levando em conta as diversas camadas da atmosfera, embora se possa considerar separadamente o tempo de vida de uma dada substância na troposfera (camada mais baixa da atmosfera, onde vivemos), na estratosfera (próxima camada, onde o ozônio fica concentrado), e em camadas ainda mais elevadas, uma vez que os mecanismos de degradação variam ao longo da atmosfera.

O ODP (do inglês, *Ozone Depleting Potential*) consiste num indicador normalizado, referente ao R-11, da capacidade de uma substância de destruir moléculas de ozônio na estratosfera. Os dados apresentados na tabela 3 são valores tradicionalmente adotados pela comunidade científica mundial, sendo que os valores mencionados para misturas são, na verdade, médias em massa dos ODPs de seus componentes.

Ambos ODP e GWP (*Global Warming Potential*) são calculados a partir do τ_{atm} , de propriedades químicas e de dados atmosféricos. Um refrigerante ideal possui tanto τ_{atm} , como ODP e GWP mínimos, embora tais parâmetros devam ser avaliados conjuntamente com critérios de performance, segurança e estabilidade físico-química. Calm e Hourahan (2001) discutem tais parâmetros com mais profundidade, além de formas alternativas para estimá-los.

COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA

Os seguintes fatores devem ser considerados ao se comparar as eficiências dos potenciais substitutos do R-22:

Propriedades Termodinâmicas:

1. Quão próximo o refrigerante opera do ponto crítico, o que afeta a relação entre o calor latente de vaporização e o calor específico do líquido a pressão constante;
2. As inclinações das linhas de líquido e vapor saturados, que regem o comportamento do superaquecimento, do sub-resfriamento e da expansão do refrigerante. Tais inclinações são fortemente influenciadas pela capacidade térmica molar da substância;

Propriedades de Transporte:

3. Condutividade térmica e viscosidade, que caracterizam os efeitos difusivos relacionados tanto à transferência de calor como às perdas de pressão por atrito;

Aplicação:

4. Transferência de calor afetada pelo glide da mistura e pela configuração do trocador de calor;
5. Otimização do ciclo para cada fluido de acordo com os graus de superaquecimento e de sub-resfriamento, estágios intermediários e equipamentos adicionais, tais como trocadores de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido.

A figura 1 mostra, num diagrama temperatura-entropia, uma comparação entre o R-22 e seus potenciais substitutos a fim de avaliar qualitativamente o impacto das características termodinâmicas do fluido no coeficiente de performance do ciclo de refrigeração (COP), definido como a relação entre a capacidade de refrigeração e o trabalho consumido. A entropia foi normalizada de modo que, para cada pressão, as entropias do líquido e do vapor saturados são respectivamente iguais a 0 e 1.

O ponto crítico, situado no topo da região

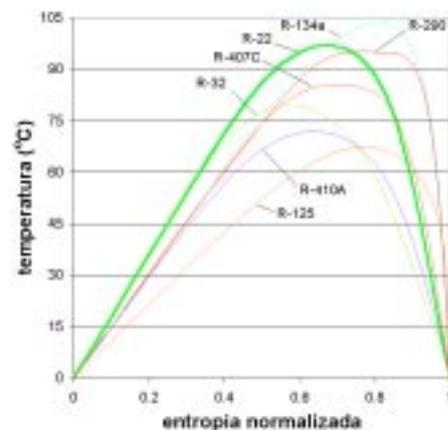


Figura 1: Diagrama temperatura-entropia para o R-22 e potenciais substitutos (a entropia foi adimensionalizada a fim de facilitar as comparações)

bifásica, é maior para o R-134a que para o R-22. De forma similar, mas com tendências opostas, a temperatura crítica é menor para o R-410A e para o R-125, sendo este um componente do R-410A (50% em massa). Considerando as mesmas temperaturas de evaporação e de condensação, um ciclo com R-134a opera mais afastado de seu ponto crítico que o R-22, o que se acentua ainda mais se comparado aos refrigerantes R410A e R-125.

Artigo originalmente publicado como J.M. Calm and P.A. Domanski, "R-22 Replacement Status", *ASHRAE Journal*, 46(8): 29-39, Agosto 2004. Traduzido por Christian J. L. Hermes (Multibrás Eletrodomésticos S.A., Joinville, SC), chermes@multibras.com.br

Sobre os Autores: James M. Calm é engenheiro e consultor independente em Great Falls-VA, EUA. Piotr A. Domanski, PhD é líder do HVAC&R Equipment Performance Group, National Institute of Standards and Technology em Gaithersburg-MD, EUA. Contato com os autores: jmc@jamesmcalm.com ou piotr.domanski@nist.gov

SUBSTITUIÇÃO DO R-22: PANORAMA ATUAL (PARTE 2)

James M. Calm e
Piotr A. Domanski

Um ciclo padrão de compressão mecânica de vapor é ilustrado na figura 2 com auxílio de um diagrama temperatura-entropia. Deve-se notar que o efeito refrigerante específico - a relação entre a capacidade de refrigeração e o fluxo de massa de refrigerante - equivale à área em azul, localizada abaixo da temperatura de evaporação, enquanto o trabalho consumido para manter o sistema em operação corresponde à área 1-2R-3-4R. Tomando o ciclo de Carnot como referência, deve-se observar que as irreversibilidades (i.e. trabalho perdido) introduzidas pelo dispositivo de expansão reduzem o efeito refrigerante específico na proporção indicada pela área situada abaixo da linha 4C-4R. O trabalho adicional necessário oriundo do superaquecimento do fluido na descarga do compressor é denotado pela área 2-2C-2R. Tanto as irreversibilidades associadas ao processo de expansão como ao superaquecimento de refrigerante são influenciadas pelas inclinações nas linhas de líquido e de vapor saturado. Tais perdas são maiores nas regiões próximas ao ponto crítico (note a região plana, próxima ao domo mostrado na figura 2).

Na figura 1 pode-se observar ainda que o R-410A possui uma temperatura crítica mais baixa em comparação com o R-22, de modo que, para uma mesma condição de operação - mesmas temperaturas de evaporação e de condensação -

as irreversibilidades associadas tanto ao superaquecimento como ao processo de expansão se tornam mais pronunciadas para a mistura. Dentre os componentes do R-410A, o R-125 apresenta um desempenho termodinâmico inferior ao R-32, além de elevar o grau de inflamabilidade e o GWP da mistura. Outras misturas que utilizam o R-32 como componente também possuem características interessantes. Dois exemplos são o R-32/600 (95,0/5,0) e o R-32/600a (90,0/10,0), duas misturas azeotrópicas de R-32 respectivamente com n-butano e isobutano, cujas propriedades são ilustradas nas tabelas 3 e 4. Como observado por Yoshida e outros (1999), além da possibilidade de serem utilizadas com lubrificantes minerais, tais misturas oferecem um bom desempenho termodinâmico. Ambas são, no entanto, inflamáveis.

Uma análise do ciclo termodinâmico teórico permite comparar, embora de forma simplificada, o desempenho das misturas em termos de COP, já que não leva em consideração o impacto das propriedades de transporte, efeito do lubrificante e características dos componentes. Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os coeficientes de performance para alguns possíveis substitutos do R-22, calculados com base em ciclos de refrigeração de um único estágio, comumente usados em condicionadores de ar e em chillers com condensação a água. Além dos COPs, são apresentadas também as potências específicas (kW/TR), mais usadas para sistemas de grande capacidade. Alguns refrigerantes, ape-

sar de possuírem melhores características termodinâmicas, não apresentam o mesmo desempenho que outros com boas características de transferência de calor como, por exemplo, misturas com elevado glide. O R-407C, por exemplo, pode não fornecer o desempenho indicado caso seja empregado um trocador de calor de fluxo cruzado, embora tenha potencial para excedê-lo caso um trocador de calor contra-corrente seja utilizado.

Alguns substitutos, como o R-134a para chillers, oferecem eficiências mais elevadas que o R-22. Para os demais, os fabricantes têm aperfeiçoado os equipamentos a fim de compensar as perdas de eficiência. Tanto Domanski (1995) como Calm e Didion (1997) analisaram algumas das implicações e limitações das eficiências teóricas dos refrigerantes. Domanski e Payne (2002) mostram que o R-410A sofre, em comparação com o R-22, uma degradação significativa de performance para operações com tem-

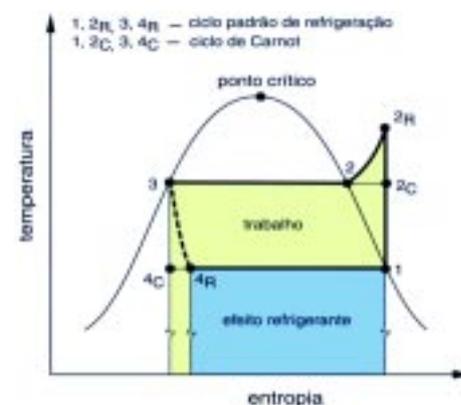


Figura 2: Representação do ciclo padrão de compressão mecânica de vapor em um diagrama temperatura-entropia

peraturas de condensação elevadas, embora seu desempenho seja comparável ao do R-22 para condições típicas de operação. Na mesma linha, Spatz e Yana Motta (2003) discutem os efeitos das perdas de carga e das trocas de calor sobre a eficiência do sistema enquanto Yoshida e outros (1999) apresentam novas técnicas para obter eficiências elevadas a partir do uso de misturas de R-32 e hidrocarbonetos.

Existe ainda muita controvérsia acerca da eficiência do dióxido de carbono (R-744, CO₂). Uma das principais razões consiste no fato da maioria das aplicações do CO₂ necessitarem de um ciclo termodinâmico transcrito ao invés de um ciclo convencional. Brown e outros (2002) fizeram uma análise detalhada acerca da aplicação residencial de CO₂, tanto com ciclos convencionais como com ciclos transcritos, e concluíram que há uma significativa perda de performance, em relação ao R-22, caso trocadores de calor equivalentes sejam utilizados, o que sugere que os tão aclamados ganhos no compressor e nas propriedades de transporte não compensam as perdas termodinâmicas. Enfatiza-se, no entanto, que o CO₂ possui um grande potencial para algumas aplicações específicas, como, por exemplo, nos ciclos de baixa pressão de sistemas de refrigeração tipo cascata projetados para aplicações industriais.

A performance dos hidrocarbonetos é ilustrada através das eficiências do propano (R-290) na tabela 4, e do propileno (R-1270) na tabela 5, cujas propriedades ambientais são também apresentadas na tabela 3. A maior limitação para seu uso não é performance, mas segurança, devido à sua alta inflamabilidade.

Existem pelo menos duas fortes razões

para considerar a eficiência energética como um critério para seleção dos substitutos do R-22: (1) a redução dos índices relacionados ao efeito estufa só será possível através da redução dos índices de emissão indireta de gases relacionada ao consumo de energia; e (2) as metas de eficiência energética para equipamentos de refrigeração - a maior aplicação do R-22 - aumentará em cerca de 30% nos EUA durante a fase de transição do R-22.

Kul e outros (2004) avaliaram a performance de uma gama de hidro-fluoretéres (HFEs) e de suas misturas com HFCs, apontados como potenciais substitutos do R-22. Deste trabalho, concluiu-se que os coeficientes de performance (COPs) calculados variam em torno de 80 a 90% do obtido para o R-22. Além disso, tanto o R-E125 (CHF₂OCF₃) como suas misturas ternárias com o R-32 e R-134a ou R-152a foram identificados como os candidatos mais promissores para substituir o R-22, mesmo apresentando COPs entre 90 a 93% do COP do R-22.

SEGURANÇA

É fato que os refrigerantes a base de fluor foram introduzidos na década de 1930 para elevar a segurança dos sistemas de refrigeração disponíveis na época. Com a remoção de alguns refrigerantes-chave, incluindo o R-22, foi proposta a retomada do uso dos chamados “refrigerantes naturais”, classe que inclui a amônia, o dióxido de carbono e os hidrocarbonetos.

A amônia (R-717) possui um forte apelo devido à sua eficiência, como mostrado na tabela 5, e ao inerente baixo custo. Apesar de ser o refrigerante mais empregado no processamento e armazenamento de alimentos, a amônia é extremamente tóxica e inflamável. O dióxido de carbono (R-744), por sua vez, foi um dos primeiros fluidos

empregados em refrigeração, sendo usado até hoje em sistemas industriais. Entretanto, o CO₂ opera em pressões muito elevadas em comparação com o R-22, fazendo com que o ciclo termodinâmico se torne transcrito para temperaturas de condensação convencionais. Os hidrocarbonetos, notadamente o etano (R-170), o propano (R-290), o n-butano (R-600), o isobutano (R-600a), o etileno (R-1150) e o propileno (R-1270) possuem uma boa eficiência termodinâmica e propriedades similares aos refrigerantes a base de fluor. Além disso, são de baixo custo e ambientalmente amigáveis, embora sejam fortemente inflamáveis, o que requer um uso mais cuidadoso.

Os hidrocarbonetos possuem uma ampla aceitação nos países europeus, tanto para sistemas de pequeno porte - em refrigeração doméstica, o R-600a tem sido usado como substituto do R-12 - quanto em refrigeração de grande porte. A amônia e o propileno tem sido aplicados em chillers de água gelada, mas isolados em salas de máquinas apropriadas. Na América do Norte e na Ásia, normas de segurança restritivas, bem como os altos preços dos seguros, têm limitado o uso de substâncias inflamáveis. A norma ANSI/ASHRAE Standard 15, por exemplo, limita a quantidade de refrigerante inflamável que pode ser empregada em sistemas de grande porte, de modo que os fabricantes têm mantido seu foco nos refrigerantes classificados pela norma ANSI/ASHRAE Standard 34 como A1, que significa baixa toxicidade e baixa inflamabilidade, permitidos para uso em sistemas residenciais e comerciais de pequeno porte.

COMPATIBILIDADE DE MATERIAIS

A escolha do lubrificante é o principal fator a ser considerado quando se pretende introduzir um refrigerante substituto num sistema de refrigeração projetado para o R-22. Enquanto sistemas que operam com R-22 geralmente empregam óleos minerais naftênicos com aditivos, as

alternativas derivadas de refrigerantes a base de HFCs requerem lubrificantes sintéticos a fim de garantir a miscibilidade adequada e, assim, permitir o retorno de óleo para o(s) compressor(es). Para tal categoria de substitutos, os poliolésteres (POEs) são os principais lubrificantes*.

Opções como o alquilbenzeno (AB) e o polivinil-éter (PVE) estão também disponíveis para aplicações especiais. Embora largamente empregado com o R-134a em condicionadores de ar automotivos e em transporte refrigerado, os polialquileno-glicóis (PAG) são pouco comuns em sistemas domésticos ou comerciais.

A escolha do lubrificante é complexa e os usuários devem seguir as recomendações do fabricante do equipamento ou, no projeto do equipamento, do fabricante do compressor. Cuidados de instalação e manutenção são ainda mais importantes para a grande maioria dos lubrificantes sintéticos, a fim de evitar a contaminação do sistema com umidade ou outras substâncias. Conversões de sistemas com R-22 para refrigerantes substitutos usualmente requerem procedimentos especiais para remoção do lubrificante. Vários produtores de refrigerante oferecem alternativas ao R-22 especialmente reformuladas para evitar este processo. Embora haja opções para substituição do R-22 para aplicações de serviço, acredita-se que, uma vez que o R-22 pode ser facilmente obtido nos dias de hoje e estará disponível ainda por algum tempo, muitos usuários não farão a conversão dos equipamentos atualmente em operação, ou mesmo dos que serão produzidos nos próximos anos.

Dada a complexidade do problema, uma outra pesquisa, denominada de programa MCLR (do inglês, *Material Compatibility and Lubricant Research Program*), foi realizada pelas indústrias de refrigeração e condicionamento de ar. Fabricantes de equipamentos e componentes aliados a produtores de refrigerantes e lubrificantes realizaram um estudo conjunto para qualificar materiais para os substitutos do R-22. De um modo geral, os problemas

Condições	Ciclo Ideal ^{a,b}		Condições Típicas ^{b,c}	
	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)
Temperatura média de evaporação	10,0 °C		10,0 °C	
Grau de superaquecimento ^d	0,0 °C		0,0 °C	
Temperatura média de condensação	35,0 °C		35,0 °C	
Grau de sub-resfriamento ^d	0,0 °C		0,0 °C	
Eficiência isentrópica do compressor	100%		70%	
Eficiência do motor	100%		90%	
Controles e outros dispositivos	0%		0%	
Refrigerante	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)
R-22	9,85	0,36	4,06	0,87
R-32	9,55	0,37	3,84	0,92
R-134a	9,86	0,36	4,13	0,85
R-290 (propano)	9,68	0,36	4,05	0,87
R-407C	9,60	0,37	3,97	0,89
R-407E	9,67	0,36	4,00	0,88
R-410A	9,29	0,38	3,77	0,93
R-32/600 (95,0/5,0)	9,54	0,37	3,85	0,91
R-32/600a (90,0/10,0)	9,43	0,37	3,81	0,92

a Condição "A" para classificação de condicionadores de ar e bombas de calor (ARI, 2003). A norma de classificação especifica apenas as temperaturas do ar na entrada do trocador de calor do ambiente interno (26.7°C) e externo (35.0°C), embora a temperatura de evaporação fique restrita, na prática, a 10°C para garantir a desumidificação adequada.

b Cálculos realizados pelo programa CYCLE_D 3.0 (Domanski e outros, 2003)

c Condições aproximadas daquelas tipicamente encontradas no lado do refrigerante. As eficiências típicas mostradas podem ser excedidas através da otimização dos graus de superaquecimento e sub-resfriamento, ou do uso de ciclos com estágios intermediários de compressão, ou outras modificações no ciclo. Da mesma forma, projetos pobres podem resultar em perda de desempenho.

d Graus de superaquecimento e sub-resfriamento típicos variam de acordo com o refrigerante. Os níveis são mostrados apenas para efeito de comparação.

Os refrigerantes indicados em laranja são inflamáveis.

Tabela 4: Comparação entre as eficiências para condicionadores de ar e bombas de calor

Condições	Ciclo Ideal ^{a,b}		Condições Típicas ^{b,c}	
Temperatura média de evaporação	6,7°C		5,0°C	
Grau de superaquecimento d	0,0°C		1,0°C	
Temperatura média de condensação	29,4°C		35,0°C	
Grau de sub-resfriamento d	0,0°C		5,0°C	
Eficiência isentrópica do compressor	100%		80%	
Eficiência do motor	100%		95%	
Controles e outros dispositivos	0%		0%	
Refrigerante	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)	COP (kW/kW)	Potência Específica (kW/TR)
R-22	10,92	0,32	6,18	0,57
R-32	10,64	0,33	5,97	0,59
R-123	11,42	0,31	6,52	0,54
R-134a	10,93	0,32	6,24	0,56
R-407C	10,69	0,33	6,09	0,58
R-410A	10,42	0,34	5,90	0,60
R-717 (amônia)	11,21	0,31	6,24	0,56
R-1270 (propileno)	10,72	0,33	6,10	0,58

a As condições são as padrões para teste de chillers com condensação a água (ARI, 1998).

b Cálculos realizados pelo programa CYCLE_D 3.0 (Domanski e outros, 2003)

c Condições aproximadas daquelas tipicamente encontradas no lado do refrigerante. As eficiências típicas mostradas podem ser excedidas através da otimização dos graus de superaquecimento e sub-resfriamento, ou do uso de ciclos com estágios intermediários de compressão, ou outras modificações no ciclo. Da mesma forma, projetos pobres podem resultar em perda de desempenho.

d Graus de superaquecimento e sub-resfriamento típicos variam de acordo com o refrigerante. Os níveis são mostrados apenas para efeito de comparação.

Os refrigerantes indicados em laranja são inflamáveis.

Tabela 5: Comparação entre as eficiências para chillers com condensação a água

de compatibilidade foram solucionados para os substitutos do R-22, embora projetistas de equipamentos e componentes devam ficar atentos ao selecionar os materiais apropriados.

Existem outras questões delicadas, como a amônia, por exemplo, que consiste num substituto do R-22 com características singulares. Os equipamentos empregados para uso com amônia são completamente diferentes

uma vez que são projetados para trabalhar com lubrificantes imiscíveis. Além disso, a amônia é compatível com cobre, mas muda de comportamento na presença de contaminantes, tais como umidade. Como resultado, a amônia geralmente não é empregada com materiais a base de cobre, seja para os trocadores de calor, enrolamento do compressor ou tubulação. Por estes motivos, acredita-se que a

conversão de equipamentos com R-22 para amônia não seja viável.

Refrigerantes formados por hidrocarbonetos são usualmente compatíveis com os materiais usados em sistemas projetados para R-22 e podem, com frequência, fazer uso dos mesmos lubrificantes ou de similares. Entretanto, sua aplicação requer cuidados com segurança devido à sua inflamabilidade.

PRINCIPAIS SUBSTITUTOS

O principal substituto do R-22 para aplicações de condicionamento de ar e bombas de calor “casados” - ou seja, em que uma determinada unidade evaporadora é projetada para trabalhar com uma determinada unidade condensadora - é o R410A, embora a substituição não seja direta já que as diferenças entre tais refrigerantes exigem mudanças de projeto. A maioria dos fabricantes de equipamentos já disponibilizaram no mercado alguns produtos com R-410A. Embora o uso deste refrigerante corresponda, atualmente, a menos de 10% do mercado norte-americano de R-22, espera-se que tal proporção exceda 80% em 2007 e atinja 100% ao final de 2009.

O R-410A é também o candidato mais cotado para condicionadores de ar, bombas de calor e chillers pequenos para aplicações comerciais. A escolha do refrigerante muda de acordo com o tamanho do equipamento, particularmente para chillers com compressores de parafuso. Até então, o R-134a predomina como o refrigerante mais usado para chillers de médio porte, embora alguns fabricantes empreguem R-410A e outros refrigerantes. Enquanto o R-134a trabalha a baixas pressões, o R-410A apresenta um comportamento oposto, de modo que requerem diferen-

Tipo de Equipamento	Aplicação Típica	Principal(is) Substituto(s)
Condicionadores de ar de janela	residencial	R-410A
Condicionadores de ar e bombas de calor	residencial, comercial de pequeno porte	R-410A
Condicionadores de ar e bombas de calor "casados", sistemas multisplits	comercial	R-410A
Sistemas multisplits	residencial, comercial	R-410a, R-407C
Sistemas de grande porte	comercial	R-134a, R-410A
Chillers condensação a ar condensação a água	sistemas centrais sistemas centrais	R-134a, R-410A, R-23 R-123, R-134a
Refrigeração comercial	comercial	R-134a R-404A R-410A R-507A
Refrigeração industrial	industrial	R-134a, amônia
Refrigeração de transporte	transporte	R-134a

Tabela 6: Principais substitutos do R-22 de acordo com a aplicação.

tes projetos. Atualmente, o R-22 praticamente não é mais usado em chillers de grande porte com compressores centrífugos. O projeto de tais equipamentos foi redirecionado para o uso de R-123 e R-134a, sendo o primeiro mais aceito no mercado atual. Embora o R-123 também seja um HCFC e precise ser removido do mercado, seu prazo é mais dilatado, uma vez que possui um ODP menor que o R-22 (Calm e Didion 1997, Calm 2000, UNEP 2003b).

Atualmente a produção de R-22 já é inferior às cotas alocadas pelos fabricantes. Todavia, não se espera que falte R-22 para aplicações futuras, tendo em vista a concessão de licenças especiais para sua produção em pequena escala, o seu armazenamento, a existência de fluidos alternativos para serviço e o grande potencial de reaproveitamento do R-22 atualmente em uso. De fato, espera-se que qualquer risco de falta de R-22 deva elevar os preços

e, assim, acelerar o processo de substituição. A Tabela 6 sumariza os principais substitutos do R-22 de acordo com a aplicação.

CONCLUSÕES

Todos os fatores apontam para uma substituição metódica e disciplinada do R-22. Até então, não foi identificado um refrigerante formado por um único componente que seja capaz de substituir o R-22 em toda sua ampla faixa de aplicação, de modo que as misturas refrigerantes, se selecionadas de acordo com a aplicação, oferecem a melhor opção. A indústria de refrigeração e condicionamento de ar tem desenvolvido equipamentos cada vez mais eficientes, que operam com refrigerantes alternativos e atingem, ou mesmo ultrapassam, as metas de eficiência estabelecidas. Resultados favoráveis obtidos com produtos já lançados e a experiência com a eliminação dos CFCs

sugerem que a remoção do R-22 trará avanços tecnológicos significativos. E como mostrado pela experiência com os CFCs, nenhum grande problema relacionado às futuras necessidades de serviço do R-22 é esperado, mesmo com o término da sua produção em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARI. 1998. Standard for Water Chilling Packages Using the Vapor-Compression Cycle (Standard 550/590-1998). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
- ARI. 2003. Standard for Unitary Air-Conditioning And Air-Source Heat Pump Equipment (Standard 210/240-2003). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
- Brown, J. S., Y. Kim, and P. A. Domanski. 2002. "Evaluation of Carbon Dioxide as R-22 Substitute for Residential Air Conditioning." ASHRAE Transactions 108(2).
- Calm, J. M., and D. A. Didion. 1997. "Trade-Offs in Refrigerant Selections: Past, Present, and Future." Refrigerants for the 21st Century (proceedings of the ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, Gaithersburg, MD, 6-7 October 1997) 6-19. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Calm, J. M. 2000. "Options and Outlook for Chiller Refrigerants," Proceedings of the Earth Technologies Forum pp. 239-248. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
- Calm, J. M., and G. C. Hourahan. 2001. "Refrigerant Data Summary." Engineered Systems 18(11):74-88.
- Domanski, P. A., 1995. "Minimizing Throttling Losses in the Refrigeration Cycle." Proceedings of the International Congress of Refrigeration pp. 766-773. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
- Domanski, P. A., D. A. Didion, and J. S. W. Chi. 2003. CYCLE_D: NIST Vapor-Compression Design Program (version 3.0), Standard reference database 49. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST).
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP). Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kull, D. D., DesMarteau, and A. L. Beyerlein. 2004. "Coefficient of performance of fluorinated ether and fluorinated ether mixtures", paper 4711, ASHRAE Transactions 110(2).
- Minor, B. H. 2004. "R410A and R407C Design and Performance - A Literature Review," Proceedings of the Earth Technologies Forum. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
- Payne, W. V., and Domanski, P.A. 2002. "A

- Comparison of an R22 and an R410A Air Conditioner Operating at High Ambient Temperatures." Proceedings of the 9th International Refrigeration Conference at Purdue, paper R2-1. West Lafayette, IN: Purdue University.
- Spatz, M. W., and S. F. Yana Motta. 2003. "An Evaluation of Options for Replacing HCFC-22 in Commercial Refrigeration Systems." Proceedings of the International Congress of Refrigeration paper ICR0510. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
- WMO. 2003. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, report 47. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone and Research Monitoring Project. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Program (UNEP). Washington, DC, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Science. Brussels, Belgium: European Commission, Research Directorate General. Chaired by A-L. N. Ajavon, D. L. Albritton, G. Mégie, and R. T. Watson.
- UNEP. 1987 with subsequent amendments. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNEP. 2003a. Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer (sixth edition). Nairobi, Kenya: UNEP Ozone Secretariat
- UNEP. 2003b. Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee - 2002 Assessment, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, January 2003
- Yoshida Y., M. Funakura, N. Okaza, and M. Matsuo. 1999. "Residential Use Air Conditioner for Advanced COP: Acceptability of HFC-32/Hydrocarbon Mixtures." Heat Pumps - a Benefit for the Environment (proceedings of the Sixth IEA Heat Pump Conference). Frankfurt am Main, Germany: VWEW-Verlag.

Artigo originalmente publicado como J.M. Calm and P.A. Domanski, "R-22 Replacement Status", ASHRAE Journal, 46(8): 29-39, Agosto 2004. Traduzido por Christian J. L. Hermes (Multibrás Eletrodomésticos S.A., Joinville, SC), chermes@multibras.com.br

Sobre os Autores: James M. Calm é engenheiro e consultor independente em Great Falls-VA, EUA. Piotr A. Domanski, PhD é líder do HVAC&R Equipment Performance Group, National Institute of Standards and Technology em Gaithersburg-MD, EUA. Contato com os autores: jmc@jamesmcalm.com ou piotr.domanski@nist.gov

NOTA: Alguns dos refrigerantes, seus processos de manufatura e suas aplicações específicas são protegidos por patentes pertencentes a terceiros. A menção neste documento não implica que o uso ou a produção de tais substâncias sejam irrestritos. ☹

** Quando este artigo foi elaborado, os POEs estavam em falta no mercado mundial, pois a fábrica responsável pelo fornecimento da maior quantidade de um componente usado na produção dos POEs foi fechada devido a problemas de segurança não relacionados à dita substância. Este fato abalou a produção dos POEs, que pode levar mais de um ano para se recuperar.*