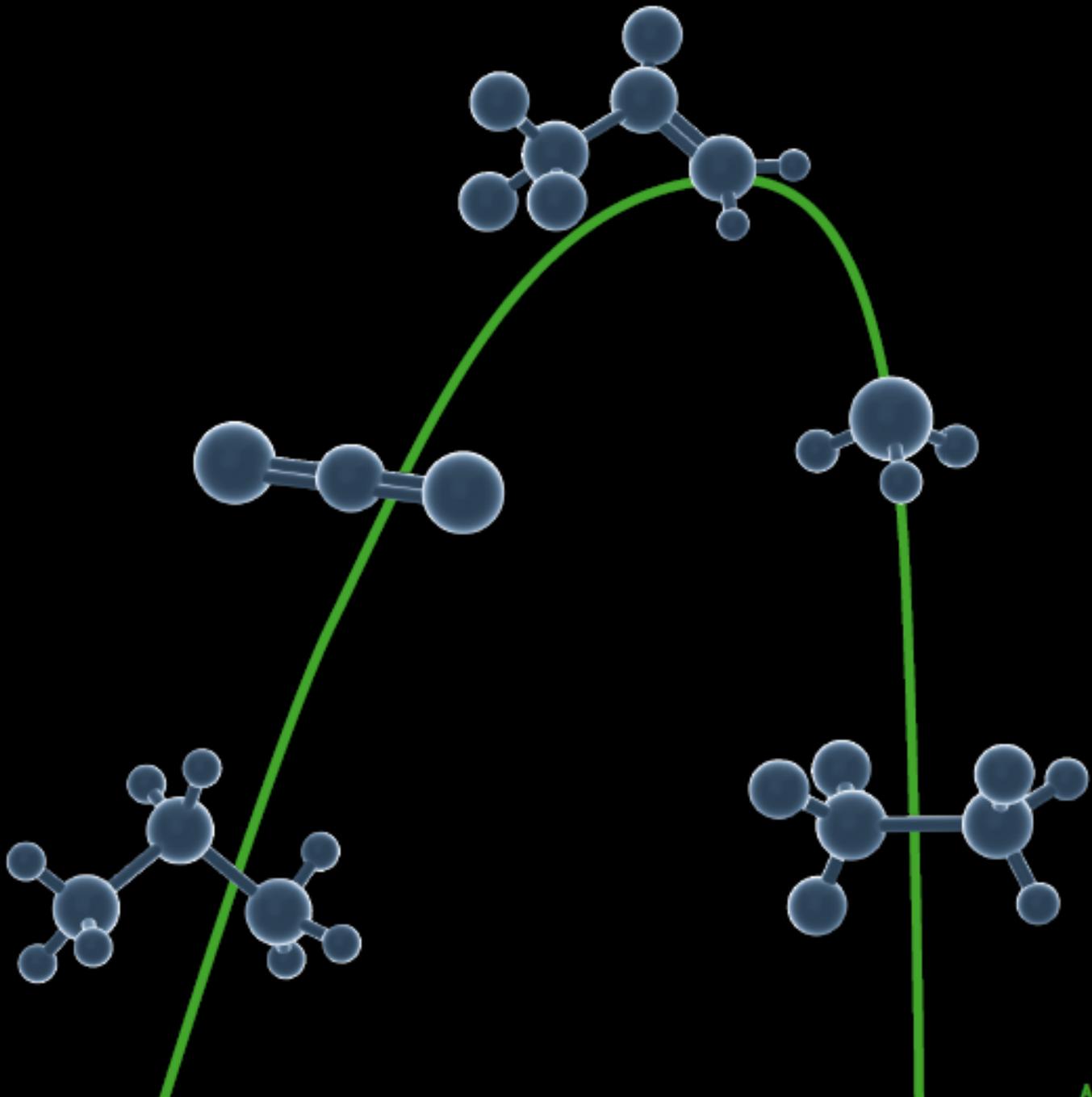




THE HEART OF FRESHNESS

Tradução livre do documento *Refrigerant Report 17*

# RELATÓRIO DE REFRIGERANTES 17



## Aspectos gerais no desenvolvimento dos fluidos refrigerantes

### Introdução

A degradação da camada de ozônio, bem como o efeito estufa, devido a elevada emissão de fluidos refrigerantes na atmosfera, tem liderado as drásticas mudanças na tecnologia de refrigeração e climatização desde o início dos anos 1990. Isso é especialmente verdade para a área de refrigeração comercial e plantas de A/C com seu vasto alcance de aplicação. Até há alguns anos atrás, os principais fluidos refrigerantes utilizados para esses tipos de sistema eram degradadores da camada de Ozônio, nomeados R-12, R-22 e R-502; para aplicações especiais, o R-114, R-12B1, R-13B1, R-13 e R-501 foram usados. O uso destes produtos químicos não são mais permitidos nos países industrializados, com exceção do R-22. Na União Européia, porém, há uma proibição vigente do R-22 que deverá ser realizada de forma progressiva (veja página 8 para explicações). A principal razão para essa proibição gradativa que contraria o tratado internacional é que o potencial de degradação da camada de ozônio é apenas pequeno.

Desde 2010, regulamentos de eliminação tem se mostrado eficazes, como por exemplo nos Estados Unidos.

Devido a essa situação, enormes consequências atingiram todo o mercado de refrigeração e climatização. A BITZER comprometeu-se a tomar a liderança na pesquisa e desenvolvimento no projeto de sistemas ambientalmente favoráveis.

Embora os refrigerantes hidroclorofluoretados (HFC) R134a, R404A, R507A, R407C, R410A, bem como a NH3 e vários hidrocarbonetos, estejam estabelecidos, eles ainda possuem tarefas a desempenhar, especialmente no que

diz respeito ao impacto no aquecimento global. O objetivo é reduzir significadamente a emissão direta causada por perda de fluido refrigerante e emissões indiretas através de plantas de alta eficiência.

Portanto, existe uma cooperação mútua entre instituições científicas e indústrias de refrigeração/óleo, fabricantes de componentes e também companhias que inovam os processos de refrigeração e climatização.

Um grande número de tarefas de desenvolvimento já foram concluídas; uma grande gama de compressores e equipamentos já estão disponíveis para vários refrigerantes alternativos.

Além do desenvolvimento de projetos, a BITZER apoia regulamentos e compromissos a respeito do uso de refrigerantes bem como medidas para o aumento da eficiência do sistema e seus componentes.

O seguinte relatório lida com a possibilidade de uma mudança a curto e médio prazo visando a utilização de refrigerantes ambientalmente benignos em médias e grandes empresas de refrigeração e climatização. Ao mesmo tempo, a experiência que já existe também é retratada resultando em consequências para a tecnologia da planta.



O resultado de vários estudos confirmam que a compressão do vapor de equipamentos de refrigeração normalmente utilizados no campo comercial são muito superiores a todos os

processos abaixo de temperaturas aproximadas de -40°C.

A seleção de um refrigerante alternativo e o design do sistema recebem uma significância especial. Porém, além da necessidade dessas substâncias não degradarem a camada de ozônio, a demanda de energia de um sistema é visto especialmente como um critério essencial, devido à sua contribuição indireta para o efeito estufa. Em cima disso, existe o potencial global de aquecimento (do inglês GWP) devido a emissão causado pelo refrigerante.

Portanto, um método de cálculo foi desenvolvido para a avaliação qualificada de um sistema que permite uma análise da influência total no efeito estufa.

Nesse contexto, o assim chamado fator TEWI (do inglês, impacto total de aquecimento equivalente) foi introduzido. Entretanto, outro método com ampla avaliação foi desenvolvido sob o aspecto da Eco-Eficiência. Por meio deste, aspectos ecológicos (como o TEWI) e econômicos foram levados em consideração.

Portanto, é possível que, no futuro, a avaliação dos refrigerantes, no que diz respeito ao meio ambiente, pode diferir de acordo com o local de instalação e o processo da unidade.

Um olhar mais atento nos substitutos à base de HFC demonstra, porém, que as possibilidades para uma simples e direta substituição comparável são limitadas. A situação do R12 com o substituto R134a é relativamente favorável, bem como o R502 com os alternativos R404A e R507A. A situação é mais crítica para os outros refrigerantes CFC's e para os HCFC's, como o R22.

Os refrigerantes R32, R125 e R134a são considerados os substitutos diretos da linha de HCFCs. Estes, porém, só podem ser utilizados excepcionalmente como substâncias puras devido às suas características específicas. O critério mais importante, neste caso, é a inflamabilidade, as propriedades termodinâmicas e o potencial de aquecimento global (GWP). Estas substâncias são muito mais adequadas como componentes de misturas os quais as características particulares de cada fluido pode ser combinada aos requisitos de acordo com a proporção de mistura.

Além dos fluidos refrigerantes, amônia (NH<sub>3</sub>) e hidrocarbonetos também são considerados substitutos. Sua utilização para aplicações comerciais, porém, é limitado devido ao alto requisito de segurança necessário.

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) tem se tornado uma importante alternativa secundária como refrigerante, contudo, por apresentar características específicas que impossibilitam sua utilização em aplicações em geral, existem restrições no seu uso.

Ao mesmo tempo, pesquisas estão sendo realizadas testando a eficiência dos chamados fluidos de baixo potencial de aquecimento global (do inglês Low-GWP) a base de fluorolefinas (HFO). Eles podem ser aplicados futuramente como substâncias puras ou em misturas, denominadas *blends*.

A ilustração na próxima página mostra um levantamento de fluidos refrigerantes alternativos e um resumo das substâncias simples e dos *blends* disponíveis. Posteriormente, os mesmos serão discutidos individualmente.

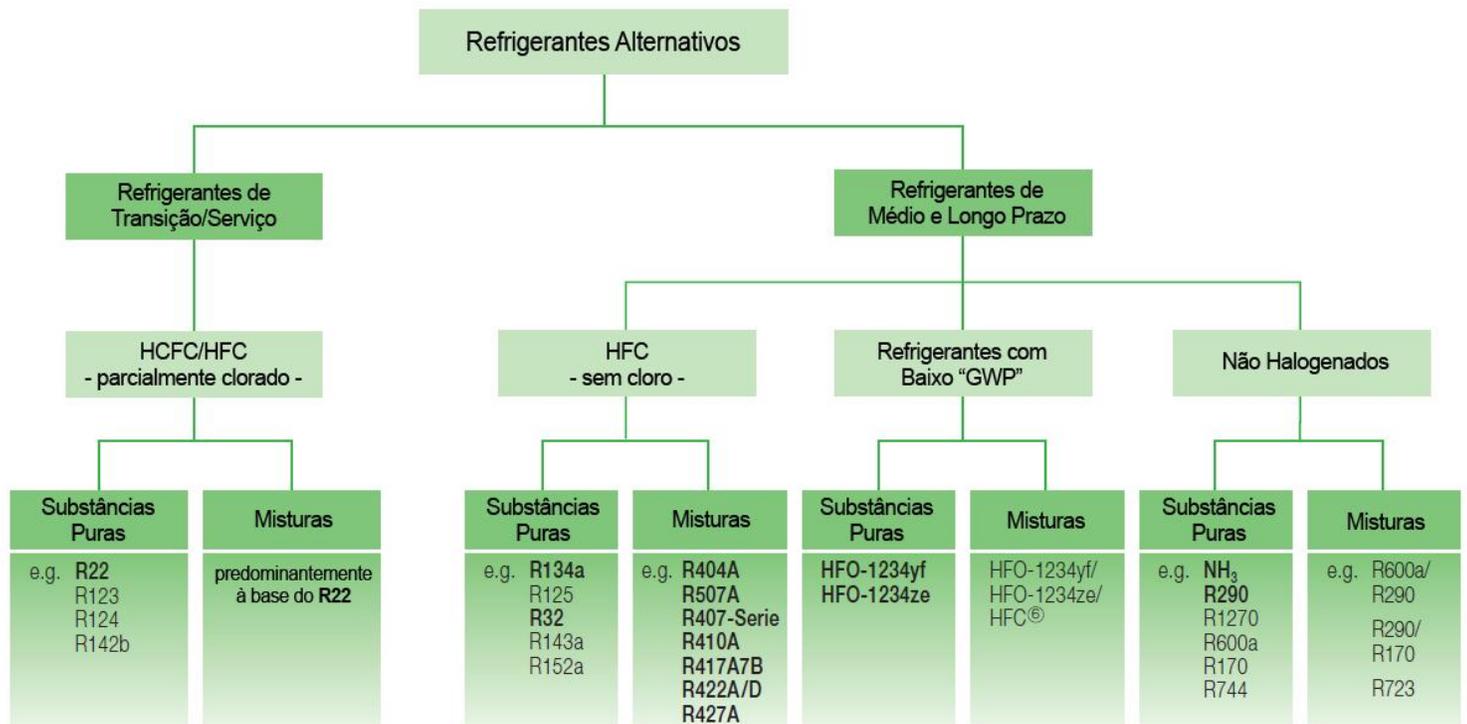


Fig. 1 General survey of the alternative refrigerants

## Refrigerantes de Transição/Serviço

09.12

Refrigerantes anteriores	Alternativos				
	Classificação ASHRAE	Nome comercial		Composição (com misturas)	Informação Detalhada
R12 (R500)	R401A R401B R409A	MP39 MP66 FX56	DuPont DuPont Arkema/Solvay	R22/152a/124 R22/152a/124 R22/124/142b	páginas 16, 38, 39
R502	R22 R402A R402B R408A	- HP80 HP81 FX10	- DuPont DuPont Arkema	- R22/125/290 R22/125/290 R22/143a/125	páginas 8, 15, 16, 36...39
R114 R12B1	R124 <sup>⑤</sup> R142b <sup>① ③</sup>	- -	- -	- -	páginas 34, 36...39
R13B1 R13 R503	Alternativos - ver Fig. 3 "Refrigerantes HCFC sem cloro"				

## Refrigerantes HFC e HFO

09.12

Refrigerantes anteriores	Alternativos				
	Classificação ASHRAE	Nome comercial		Composição (com misturas)	Informação Detalhada
R12 (R500)	R134a R152a <sup>①</sup> R437A <sup>④</sup>	– ISCEON MO49 Plus	DuPont	R125/134a/600/601	páginas 9...11, 16, 36...39
	HFO-1234yf(ze) <sup>⑥</sup> – –	vários Opteon XP10 <sup>⑤</sup> Solstice N-13 <sup>⑥</sup>	Du Pont Honeywell		páginas 11, 12 páginas 23, 24
R502/R22	R404A <sup>⑦</sup> R507A <sup>⑦</sup> R422A	vários vários ISCEON MO79	DuPont	R143a/R125/R134a R143a/125 R125/134a/600a	páginas 17...19, 36...39
R22 <sup>⑦</sup>	R407A R407C <sup>⑦</sup> R407F R410A <sup>⑦</sup> R417A R417B R422D R427A R438A	vários vários Performax LT vários ISCEON MO59 Solkane 22L ISCEON MO29 Forane 427A ISCEON MO99	Mexichem, Arkema Honeywell DuPont Solvay DuPont Arkema DuPont	R32/125/134a R32/125/134a R32/125/134a R32/125 R125/134a/600 R125/134a/600 R125/134a/600a R32/125/143a/134a R32/125/134a/600/601a	páginas 18...23, 36...39
R114 R12B1	R236fa R227ea	– –		– –	páginas 34, 36...39
R13B1	R410A –	vários ISCEON MO89	DuPont	R32/125 R125/218/290	páginas 35, 36...39
R13 R503	R23 R508A R508B	– KLEA 508A Suva 95	Mexichem DuPont	– R23/116 R23/116	páginas 35, 36...39

## Refrigerantes Não Halogenados

09.12

Refrigerantes anteriores	Alternativos				
	Classificação ASHRAE	Nome comercial		Fórmula	Informação Detalhada
R12 (R500)	R290/600a <sup>①</sup> R600a <sup>① ③</sup>	– –		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	páginas 27, 36...39
R22 (R502)	R717 <sup>① ②</sup> R723 <sup>① ② ⑤</sup> R290 <sup>①</sup> R1270 <sup>①</sup>	– – – –		NH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> + R-E170 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	páginas 25...29, 36...39
R114 R12B1	R600a <sup>①</sup>	–		C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	páginas 34, 36...39
R13B1	alternativos diretos não disponíveis				
R13 R503	R170 <sup>①</sup>	–		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	páginas 35, 36...39
Various	R744 <sup>③</sup>	–		CO <sub>2</sub>	páginas 30...33, 36...39

## Aquecimento Global e Fator TEWI (Impacto de aquecimento total equivalente)

Como mencionado na introdução, um método de cálculo foi desenvolvido no qual a influência sobre o efeito do aquecimento global pode ser julgada pelas operações individuais de refrigeração de uma planta.

Todos os halocarbonos, incluindo o HFCs não clorados, pertencem a categorias dos gases que contribuem com o efeito estufa. A emissão destes gases contribuem com o aquecimento global, sendo sua influência muito maior quando comparado com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que é o principal responsável por este fenômeno na atmosfera. Baseado em um horizonte de 100 anos, a emissão de 1kg de R-134a é aproximadamente equivalente a 1430 kg de  $\text{CO}_2$  ( $\text{GWP}_{100}=1430$ ). Já é evidente, através destes fatos, que a redução da emissão desses fluidos é uma importante tarefa para o futuro.

Por outro lado, o maior contribuinte para o aquecimento global de uma planta de refrigeração é a emissão indireta de dióxido de carbono causado pela geração de energia. A média de emissão de  $\text{CO}_2$  na Europa é por volta de 0.6 kg por kWh de energia elétrica gerada, baseada nas altas porcentagens de combustíveis fósseis utilizadas nas usinas européias causando, assim, consequências ao efeito estufa ao longo da vida das usinas.

Como este fato contribui com uma alta parcela do saldo total emitido diariamente à atmosfera, é necessário uma maior ênfase no aprimoramento dos compressores e equipamentos relacionados ao sistema, visando, assim, uma otimização geral do processo, em conjunto com o aumento da demanda por fluidos refrigerantes alternativos que possuam propriedades termodinâmicas favoráveis e que economizem energia.

Quando vários compressores são comparados, a diferença da emissão indireta de dióxido de carbono (devido a exigência de energia) pode ter uma larga influência no efeito estufa global.

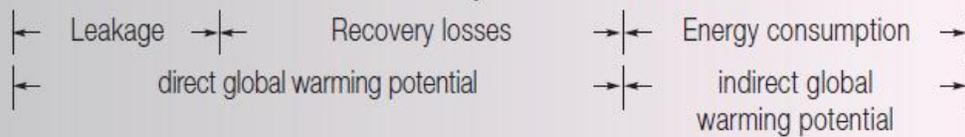
Uma fórmula usual para o cálculo do fator TEWI é demonstrada na fig. 5, bem como as diversas áreas de influência correspondentemente separadas. Em seguida, um exemplo (com R-134a à temperatura média) demonstra a influência no valor do TEWI comparando diferentes cargas de fluidos refrigerantes, perdas por vazamentos e consumo de energia.

Esse exemplo é simplificado baseado em uma taxa de vazamento geral como uma porcentagem da carga refrigerante. Como é conhecido, os valores práticos variam muito, já que o risco potencial é individual a cada sistema construído e o risco em plantas altamente diversificadas é especialmente elevada.

Grandes esforços estão sendo tomados em escala mundial para reduzir as emissões que acarretam no efeito estufa, e regulamentações legais já foram desenvolvidas. Desde 2007, a “Regulamentação em certos gases que causam efeito estufa fluoretados” (NO. 842/2006) – que define também exigências rigorosas para sistemas de refrigeração e ar-condicionado – tornou-se válido para União Européia. A regulamentação está sobre revisão.

## TEWI = TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \times L \times n) + (\text{GWP} \times m [1 - \alpha_{\text{recovery}}]) + (n \times E_{\text{annual}} \times \beta)$$



GWP	= Global warming potential	[ CO <sub>2</sub> -related acc. to IPCC IV ]
L	= Leakage rate per year	[ kg ]
n	= System operating time	[ Years ]
m	= Refrigerant charge	[ kg ]
$\alpha_{\text{recovery}}$	= Recycling factor	
$E_{\text{annual}}$	= Energy consumption per year	[ kWh ]
$\beta$	= CO <sub>2</sub> -Emission per kWh	(Energy-Mix)

### Example

Medium temperature R134a

SST -10 °C

SCT +40 °C

m 10 kg // 25 kg

$L_{[10\%]}$  1 kg // 2,5 kg

CAP 13,5 kW

E 5 kW x 5000 h/a

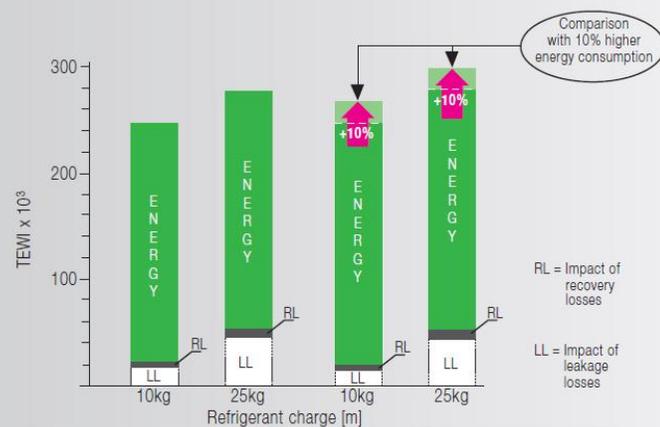
b 0,6 kg CO<sub>2</sub>/kWh

a 0,75

n 15 years

GWP 1430 (CO<sub>2</sub> = 1)

time horizon 100 years



## Eco Eficiência

Como mencionado acima, uma avaliação baseada no valor específico do TEWI leva em conta os efeitos do aquecimento global durante o período de operação de refrigeradores, ar condicionados ou instalação de bombas de calor. Por meio desta avaliação, entretanto, nenhum aspecto ecológico e econômico é levado em consideração. Independente dos aspectos ecológicos, a avaliação de tecnologias e investimentos em marketing, bem como aspectos econômicos, são de extrema relevância. Com sistemas mais tecnológicos, a redução no impacto ambiental envolve geralmente altos custos, ao passo que baixos custos geralmente acarretam graves impactos ambientais. Para a maioria das companhias, os custos de investimentos são decisivos, todavia, eles sempre são negligenciados durante as discussões quando o assunto principal é minimizar problemas ecológicos.

Com o objetivo de uma avaliação mais objetiva, estudos\* foram apresentados em 2005 e 2010 usando como exemplo plantas de refrigeração de supermercados para descrever o conceito e avaliar a Eco-Eficiência. Ela é baseada na relação entre o valor agregado (o valor econômico de um produto) e o impacto ambiental resultante. Com essa abordagem avaliativa, toda a vida do ciclo do sistema é levada em conta através de:

- Performance ecológica de acordo com o conceito Avaliação do Ciclo de Vida, segundo o ISO 14040.
- Performance econômica por meio da Análise do Custo do Ciclo de Vida.

Isso significa que todo o impacto ambiental (incluindo as emissões diretas/indiretas), bem como os custos de investimentos, operação, descarte e custos de capital, já são contabilizados.

Os estudos também confirmam que um aumento da Eco-Eficiência pode ser obtida através de investimentos na otimização dos equipamentos das plantas (minimizando custos operacionais). Assim, a escolha de um refrigerante e a tecnologia do sistema em que o mesmo funcionará desempenham um papel importante.

A Eco-Eficiência pode ser ilustrada através de uma representação gráfica (veja por exemplo a fig. 8). Para este, os resultados da avaliação da Eco-Eficiência estão mostrados no eixo X no sistema de coordenadas, enquanto que os resultados da análise do custo do ciclo de vida estão apresentados no eixo Y. A representação demonstra claramente que, quanto maior a direita no canto superior da figura, o sistema apresenta uma melhora considerável na Eco-Eficiência – o mesmo reciprocamente, ou seja, o sistema torna-se menos eficiente no canto inferior esquerdo.

As diagonais plotadas no sistema de coordenadas representam linhas idênticas de Eco-Eficiência. Isso significa que os sistemas ou processos com diferentes custos de ciclo de vidas e impactos ambientais podem, perfeitamente, exibir a mesma eficiência ecológica.

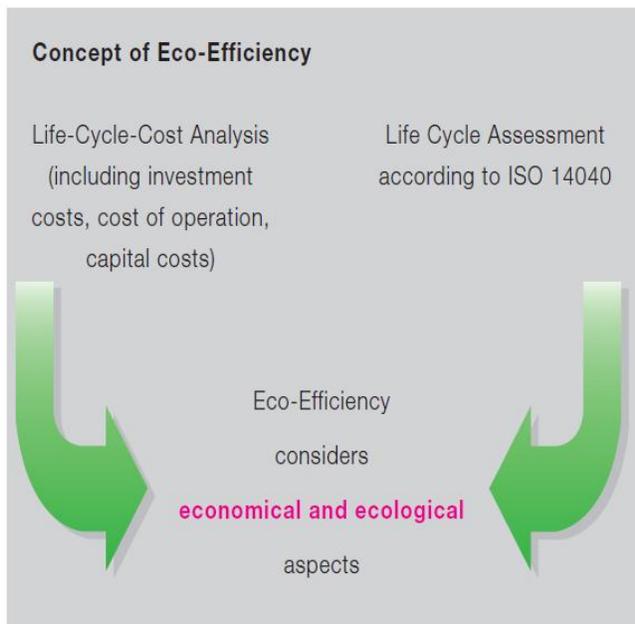


Fig. 7 Concept of Eco-Efficiency

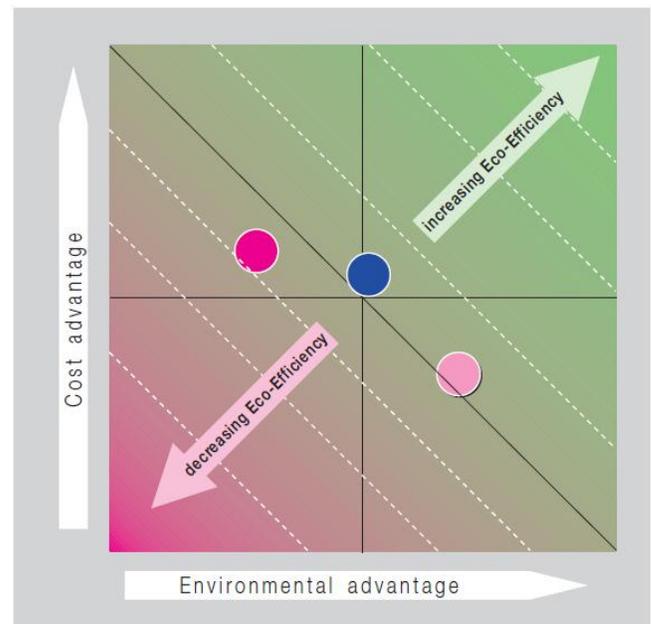


Fig. 8 Example of an Eco-Efficiency evaluation

## R-22 como um refrigerante transicional

Embora os refrigerantes alternativos não clorados como o R134a e R404A/R507A (figs. 1 e 3) estabelecerem exclusivamente seus caminhos como substitutos de fluidos clorados em diversos campos pelo mundo, o R22 é ainda utilizado em novas instalações e para retrofit de sistemas existentes.

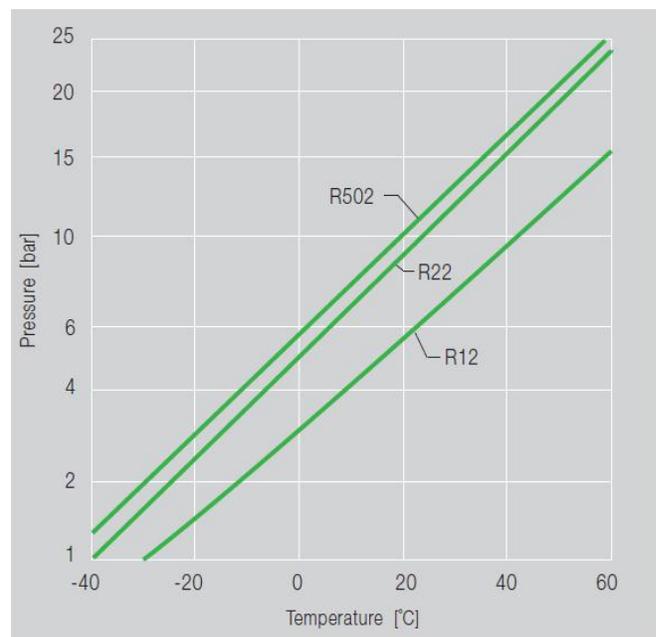
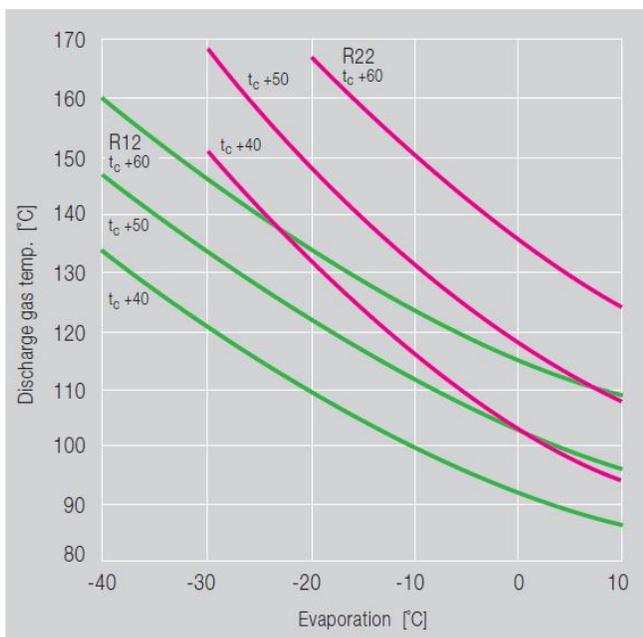
Tal fato pode ser explicado pelos baixos investimentos especialmente quando comparado com os sistemas carregados com R134a - além da enorme aplicabilidade do mesmo - que apresenta propriedades termodinâmicas favoráveis e baixa exigência energética. Adicionalmente, existe uma disponibilidade mundial do R-22 e de seus componentes, que não garante a utilização em todos os lugares ainda dos fluidos refrigerantes desclorados.

Apesar de todas as propriedades favoráveis do R-22, ele já é sujeito a várias restrições regionais que controlam o uso deste refrigerante em novos sistemas para fins de manutenção, devido a seu potencial de degradação – apesar de ser baixo.

No que se refere aos componentes e à tecnologia do sistema, algumas particularidades são observadas. O refrigerante R-22 tem aproximadamente 55% maior capacidade refrigerante e níveis de pressão em comparação ao R12. A significativa maior temperatura de descarga do gás é também um fator crítico, se comparado ao R12 (veja figura 9) e ao R502.

Relações similares em termos de carga térmica são encontrados em comparação aos refrigerantes HFC R134a, R404A/R507A (páginas 9 e 17).

Compressores adequados são necessários para plantas de R-22 e os mesmos foram avaliados e aprovados para climatização em temperaturas médias durante longos períodos de tempo.



## Refrigeração e Ar-Condicionado

As plantas que trabalham com baixas temperaturas apresentam um grande risco potencial devido a alta temperatura de descarga do gás, especialmente, no que diz respeito à estabilidade térmica do óleo e do fluido refrigerante, além da possível perigosa formação de ácidos e depósito de cobre. Portanto, medidas específicas devem ser adotadas como dois estágios de compressão, injeção controlada de fluido refrigerante, resfriamento adicional e monitoramento da temperatura do gás de descarga, limitando-se, assim, à sucção do gás superaquecido e o cuidado com uma instalação especial.

## R-134a como Substituto para o R-12 e R-22

O R-134a foi o primeiro HFC refrigerante testado exaustivamente, e é atualmente utilizado mundialmente em muitas unidades de refrigeração e ar-condicionados com ótimos resultados. Além do seu uso como substância pura, o R-134a também é aplicado em diversas misturas denominadas “*blends*” (veja “misturas refrigerantes”, página 13).

## R-134a possui propriedades termodinâmicas similares ao R-12

Capacidade de refrigeração, exigência energética, propriedades de temperatura e níveis de pressão são algumas das propriedades em que estes fluidos são comparáveis, ao menos em instalações de ar-condicionados em temperaturas médias de refrigeração. Portanto, o R-134a pode ser utilizado como uma alternativa viável para grande parte das aplicações dos R-12.

Para algumas aplicações, **o R-134a é mais indicado como substituto do R-22**. Uma importante razão são as limitações do uso do R-22 em novas plantas e serviços. No entanto, a menor capacidade de refrigeração volumétrica do R-134a (veja fig. 11/2) semanda uma substituição por um compressor com maior capacidade do que com R-22. Existem, também, limitações em aplicação com baixas temperaturas de evaporação que devem ser consideradas.

Exaustivos testes demonstraram que a performance do R-134a excede as previsões teóricas sobre uma ampla gama de condições de funcionamento de compressores. Níveis de temperatura (descarga de gás, óleo) são ainda menores, quando comparado com o R-12, e, portanto, os valores são substancialmente menores quando comparados com o R-22. Existem diversos potenciais de aplicações em ar-condicionados e em plantas de refrigeração de média temperatura, bem como em bombas de aquecimento. Ótimas características de transferência de calor em evaporadores e condensadores (a não ser em misturas azeotrópicas) favorecem economicamente seu uso.

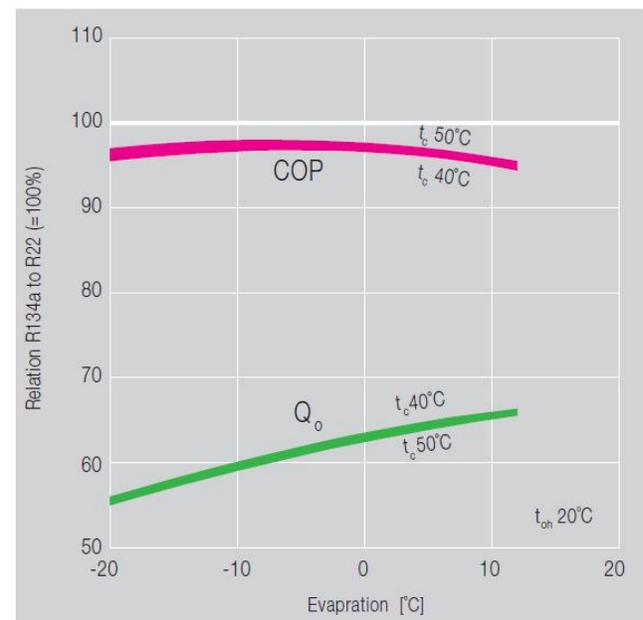
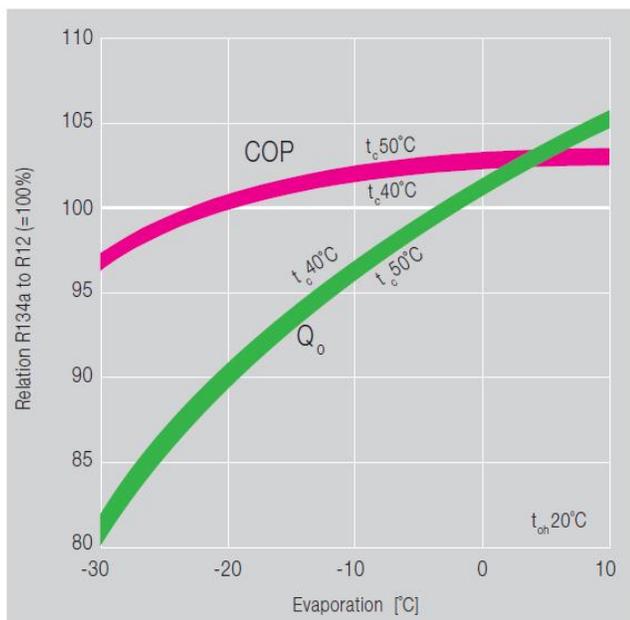
## Lubrificantes para o R-134a e outros HFCs

Os tradicionais óleos minerais e sintéticos não são miscíveis (solúveis) com o R-134a e outros HFCs descritos a seguir e, portanto, eles são apenas insuficientemente transportados em torno do circuito refrigerante. Óleos imiscíveis podem assentar nos trocadores de calores evitando, assim, a transferência de calor de tal forma que o processo não seja mais operado. Novos lubrificantes foram desenvolvidos com a solubilidade apropriada e estão sendo utilizados frequentemente há anos. Estes lubrificantes são a base de poliol-éster (POE) e polialquilenoglicol (PAG).

Eles possuem características lubrificantes similares aos óleos tradicionais, porém são mais ou menos higroscópicos, dependendo da solubilidade do fluido refrigerante ao qual ele está em contato. Estas características demandam um cuidado especial durante a produção (incluindo a retirada de toda umidade do sistema), transporte, estocagem e carregamento, afim de evitar reações químicas no equipamento, como a hidrólise, por exemplo.

Óleos baseados no PAG são especialmente críticos em relação à absorção de água. Além disso, eles possuem uma relativa baixa força de resistência dielétrica e, por estas razões, não são adequados para compressores semi-herméticos ou herméticos.

Portanto, devido a essas particularidades, eles são normalmente utilizados em sistemas de ar-condicionado automotivos que apresentam compressores abertos, onde estas características específicas ao lubrificante e uma solubilidade otimizada são necessárias, devido a alta taxa de circulação de óleo no sistema. Com objetivo de evitar o depósito de cobre no sistema, nenhum material contendo cobre em sua composição são utilizados nestes sistemas. Todo o restante das indústrias de refrigeração preferem a utilização de óleos a base de ésteres, já que estes possuem uma vasto histórico devido sua utilização em diversas aplicações. Os resultados geralmente são positivos quando a concentração de água contida no óleo não excede 100 ppm (partes por milhão). Entretanto, compressores para fabricantes de A/C e unidades de refrigeração estão cada vez mais sendo carregados com éter polivinílico (do inglês **Polyvinyl Ether**, ou **PVE**). Embora eles sejam mais higroscópicos do que os POE, por outro lado, são mais resistentes à hidrólise, termicamente/quimicamente estáveis, possuem ótimas propriedades lubrificantes e uma alta resistência dielétrica. Ao contrário dos POE, eles não possuem tendência de formação do fenômeno *metal soap* e, portanto, o risco de obstrução do tubo capilar é reduzido.



## Design Resultante e Critérios de Construção

Conforme discutido anteriormente, compressores adequados e uma carga especial do óleo são necessários ao utilizar o R-134a, bem como algumas adaptações nos componentes do sistema para tal fluido. Os materiais metálicos normais utilizados nas plantas que operam com CFC comprovaram funcionar adequadamente com óleos a base de ésteres, porém, as vezes, o elastômero deve ser modificado de acordo com a situação. Tal afirmação é especialmente válida para mangueiras flexíveis onde exige-se uma baixa umidade residual e uma reduzida permeabilidade. Estes equipamentos devem ser totalmente desidratados e qualquer carregamento ou troca do lubrificante deve ser realizada de forma cautelosa, evitando qualquer exposição à umidade. Para garantir tal fato, secadores devem ser fornecidos de tal modo que devem ser combinados com o tamanho molecular do R-134a, para que a secagem seja realizada de forma eficaz.

## Conversão de Plantas que Funcionam com R-12

Desde o começo, muito discutiu-se sobre a conversão de equipamentos de uma maneira muito controversa, e muitos métodos foram recomendados e aplicados. Atualmente, existe um acordo generalizado no que diz respeito às soluções técnicas e econômicas para tal objetivo.

As características dos óleos à base de ésteres são bem favoráveis. Sobre certas condições, eles podem ser utilizados com fluidos à base de CFC ou em misturas com óleos minerais, que podem tolerar uma concentração de cloro até algumas centenas de ppm em um sistema carregado com R-134a.

A umidade restante contém uma enorme influência no processo. Portanto, o requisito essencial é a presença de um forte vácuo (remoção do cloro e da água restante) e a instalação de secadores apropriados e dimensionados ao processo em questão.

Infelizes experiências foram encontradas através de sistemas onde a estabilidade química foi insuficiente, operando-se com o R-12, no qual a manutenção realizada foi de forma indevida e a capacidade de secagem foi menor do que a necessária, observou-se uma alta carga térmica acumulada no equipamento. Nestes casos, foram verificadas deposições de produtos, contendo cloro no interior do sistema, que geralmente são liberados pelo contato realizado pela mistura altamente polarizada entre os óleos de éster e o R-134a ao encontrarem seu caminho pelo compressor e pelos dispositivos regulatórios do sistema. Portanto, para realizar-se a conversão de um fluido refrigerante para outro, é indispensável que o equipamento esteja funcionando em perfeitas condições.

## Restrições para o R-134a nos sistemas de Ar Condicionados Automotivos (MAC)

No futuro, a nova diretiva da União Européia banirá a utilização do R-134a nos novos sistemas. Diversas tecnologias alternativas já estão sendo desenvolvidas. Veja as explicações pertinentes nas páginas 11, 12 e 13.

## R-134a como Substituto para o R-12 e R-22

Para sistemas de ar condicionado móveis (do inglês, *Mobile air-conditioning systems (MAC)*), que trabalhem com compressores de unidade aberta e conexões através de mangueiras no circuito

refrigerante, o risco de vazamento é consideravelmente maior do que em plantas estacionárias. Com objetivo de reduzir as emissões diretas nesta área, uma directiva da União Europeia (UE, 2006/40/EC) foi aprovada estabelecendo-se assim que as homologações para novos veículos somente serão concedidas caso os mesmos utilizassem fluidos refrigerantes que apresentam um potencial de aquecimento global (*GWP*) menor do que 150, excluindo-se, assim, por exemplo, o R-134a, que tem sido utilizado frequentemente nesses sistemas e possui *GWP* de 1430.

Enquanto isso, refrigerantes alternativos e novas tecnologias foram desenvolvidas e testadas, incluindo também exames mais detalhados sobre o uso do R152a.

Por algum tempo, a indústria automotiva concordou sobre os chamados fluidos de “Baixos *GWP*”. Este último é tratado a seguir. A tecnologia do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que fora utilizada para esta aplicação por muito tempo, não é mais introduzida nestes sistemas por diferentes razões (veja páginas 12 e 33).

## R-152a – Uma Alternativa ao R-134a?

Comparado ao R-134a, o R-152a é muito similar quando comparamos a capacidade volumétrica de refrigeração (aprox. -5%), níveis de pressão (aprox. -10%) e eficiência energética. Fluxo de massa, densidade do vapor, bem como a queda de pressão, são ainda mais favoráveis (aprox. -40%).

O R-152a foi utilizado por muitos anos como um componente de misturas de fluidos refrigerantes e não como uma substância pura. Ele é especialmente vantajoso quando verificamos seu potencial de aquecimento global (*GWP*), que é de 124.

Ao mesmo tempo, é uma substância inflamável – devido baixa presença de flúor em sua composição – e é classificado no grupo de segurança A2. Como resultado, maiores cuidados específicos demandam soluções individuais e medidas de segurança, juntamente com a análise de risco em seu manuseio.

Por estas razões, a utilização deste fluido em *MAC* é bastante desestimulada.

## Fluidos Refrigerantes de “Baixo *GWP*” HFO -123yf e 1234ze(E)

A proibição do uso do R-134a em sistemas de ar condicionados móveis com a directiva europeia desencadeou uma série de projetos de pesquisa. Independente da tecnologia do dióxido de carbono (página 33), novos refrigerantes com baixos valores potenciais de aquecimento global e propriedades termodinâmicas similares ao R-134a foram e estão sendo desenvolvidos.

Em meados de 2006, duas misturas de fluidos foram introduzidos no mercado com os nomes “Mistura H” (Honeywell) e a “DP-1” (DuPont). A INEOS Flúor deu continuidade, posteriormente, com outra versão denominada AC-1. De forma geral, todos estes refrigerantes foram derivados de várias moléculas fluoretadas.

Durante o desenvolvimento e fase de testes, ficou claro que todos os critérios de aceitação não seriam atingidos e, portanto, exames futuros com estas espécies foram descontinuadas. Consequentemente, a

DuPont e a Honeywell focaram suas pesquisas e atividades de desenvolvimento em uma aventura conjunta focados no 2,3,3,3-tetrafluorpropeno ( $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$ ). Esse fluido refrigerante de nome HFO-1234yf pertence ao grupo das fluor-olefinas com duplas ligações químicas carbono-carbono. Seu *GWP* é bem reduzido ( $\text{GWP}_{100}=4$ ), evidenciando sua rápida decomposição ao longo da atmosfera terrestre. Esse fato levanta questões sobre sua estabilidade química e térmica quando submetido aos longo circuitos de refrigeração sobre condições severas. Porém, exaustivos testes comprovaram a estabilidade requerida para sua utilização em sistemas de ar condicionados móveis (automotivos).

Ele é levemente inflamável, conforme análise da ASTM 681, porém, necessita de um pouco mais de energia de ignição do que o R-152a, por exemplo. Devido sua baixa velocidade de queima e alta energia de ignição, o HFO-1234yf recebeu a classificação do novo grupo de segurança “A2L”, de acordo com o ISO 81 e uma série de testes que provaram que sua inflamabilidade média, não oferecendo um risco extra para utilização em sistemas de ar-condicionados móveis. Investigações sobre toxicidade demonstraram resultados bastante positivos, bem como testes de compatibilidade com plásticos, elastômeros e óleos lubrificantes utilizados no sistema de refrigeração. Experiências de operação, oriundos dos laboratórios e do campo, traçaram um avaliação positiva, particularmente no que diz respeito à sua performance e comportamento eficiente. Para a faixa habitual de operação de sistemas de ar-condicionado, a capacidade de refrigeração e o coeficiente de performance (COP) estão em um intervalo de 5%, quando comparados com o R-134a. Portanto, é esperado que simples modificações no sistema proporcionem performance e eficiência, se comparado ao R-134a.

As temperaturas críticas e os níveis de pressão também são similares, enquanto que as densidades de vapor e massa são aproximadamente 20% maiores. A temperatura de descarga do gás com a aplicação deste fluido é de até 10K menor.

Analisando os sistemas de ar-condicionados móveis sobre a ótica do simples processo de conversão, verifica-se que esta tecnologia prevalece quando comparada aos sistemas refrigerantes que levam o dióxido de carbono como fluido. A utilização do HFO-1234yf para outras aplicações em sistemas semelhantes ao descrito também está sendo considerado, bem como em equipamentos estacionários e bombas de calor. Contudo, as limitações de carga para os refrigerantes A2(L) (exemplo EN378) que limitarão sua utilização, conseqüentemente, devem ser consideradas. Por fim, preocupações adicionais existem em relação à estabilidade destes fluidos a longo prazo nos circuitos refrigerantes, que usualmente fornecem a estes sistemas uma longa vida útil do ciclo, como usualmente é verificado.

Para aplicações que requerem o uso dos fluidos do grupo de segurança A1 (não inflamáveis, nem tóxicos), alternativas do R-134a de baixo impacto de aquecimento global (*GWP*), baseados em misturas HFO/HFC, já estão sendo desenvolvidas. Elas estão sendo testadas por algum tempo em sistemas reais. Para maiores informações destes sistemas, veja a página 23, “HFO/HFC blends”.

No grupo das fluor-olefinas, outra substância batizada com o nome de HFO-1234ze(E) está disponível, que até o momento tem sido utilizada predominantemente como agente de expansão para espuma de poliuretano e propulsor. O HFO-1234ze(E) difere do HFO-1234yf pela diferente estrutura molecular, além de suas propriedades termodinâmicas que também fornecem condições favoráveis a suas utilizações como fluidos refrigerantes. Além disso, ambas as substâncias apresentam baixo potencial de aquecimento global ( $\text{GWP}=100$ ).

A capacidade de refrigeração volumétrica e os níveis de pressão desta fluor-olefina é cerca de 75%, quando comparada ao HFO-1234yf, tornado o HFO-1234ze(E) um potencial candidato para sistemas que demandam temperaturas altíssimas. Para maiores informações, veja página 34, “Aplicações especiais”.

## Misturas (*Blends*) Refrigerantes

Misturas de fluidos refrigerantes foram desenvolvidas para novas plantas e para as já existentes com propriedades favoráveis, tornando-as, assim, alternativas comparáveis às substâncias utilizadas anteriormente. Embora a situação agora seja menos complexa, a gama de oferta ainda é muito extensa. É necessário distinguir dentre três categorias principais:

### 1) Misturas transicionais ou de serviço

A maioria destas misturas possuem o HCFC R22 como principal constituinte. Eles destinam-se, primeiramente, como refrigerantes de serviço para plantas/equipamentos antigos com foco na substituição dos fluidos CFC banidos como o R-12, R502, entre outros. Produtos correspondentes são oferecidos por diversos fabricantes e a experiência, relatando os passos necessários para correta conversão destes fluidos, está disponível. Porém, os mesmos requisitos legais aplicam-se no uso e eliminação dessas misturas quanto ao R-22.

### 2) Misturas HFC

Estas misturas são substitutas para os refrigerantes R-502, R-22, R-131B1 e ao R-503. Principalmente, os R-404a, R-507A, R-407C e R410A já estão sendo largamente utilizados. Um grupo destas misturas HFC's também contém aditivos de hidrocarbonetos que exibem uma boa solubilidade em lubrificantes e que, em certas condições, permite o uso de óleos convencionais. Em muitos casos, este fato possibilita a conversão de plantas já existentes que utilizam (H)CFC em seu funcionamento para aquelas que operam com fluidos refrigerantes livres de cloro, apresentando nenhum potencial de degradação da camada de ozônio ( $OPD=0$ ) e sem a necessidade de uma troca de óleo.

### 3) Misturas HFO/HFC

Como a geração sucessora dos refrigerantes HFC, ela consiste nos novos fluidos “Baixo *GWP*” (exemplo R-1234yf) com HFCs. O principal alvo é um decréscimo adicional do potencial de aquecimento global (*GWP*), como comparado ao estabelecido às substâncias halogenadas (veja página 23). Dois e três componentes das misturas já possuem uma longa história no mercado de refrigeração. A diferença é realizada através dos azeótropos (por exemplo R-502, R-507A) que são substâncias com propriedades termodinâmicas idênticas a de substâncias simples, e dos não azeótropos, que são misturas que apresentam *glide* de temperatura e não se comportam como uma substância pura. O desenvolvimento de azeótropos foi principalmente focada em aplicações especiais em baixas temperaturas e sistemas de bombas de calor.

Uma prática antigamente comum era a mistura entre o R-12 ao R-22 com objetivo de aumentar o retorno do fluxo de óleo e reduzir a temperatura de descarga do gás com maiores pressões. Também usualmente comum, era a adição de R-22 a sistemas de R-12 para melhora de performance, ou até mesmo a inclusão de hidrocarbonetos em sistemas que trabalhavam em temperaturas baixíssimas, visando uma melhor eficiência no transporte do óleo.

Essa possibilidade de uma formulação “ específica” com características exclusivas foi de fato a responsável pelo início do desenvolvimento de uma nova geração de misturas.

Como mencionado anteriormente, nenhuma substância refrigerante alternativa livre de cloros em sua composição, compatível ao R-502 e R-22, está disponível, o mesmo pode ser afirmado para o R-13B1 e ao R503, que apresentam a mesma situação. Se inflamabilidade é inaceitável, segurança toxicológica é

necessária, bem como a faixa de aplicação, *COP* e pressão/temperatura devem ser comparáveis, os únicos substitutos remanescentes para muitas aplicações são as misturas (*blends*).

**Substitutos para o R-502** tiveram a principal prioridade, já que ele fora utilizado em larga quantidade e já está eliminado em diversos países, devido seu potencial de degradação da camada de ozônio. A discussão que segue trata primeiramente com as alternativas estabelecidas para refrigerantes e os resultados de extensivas aplicações em sistemas reais.

Outro ponto em destaque é o desenvolvimento de alternativas ao **R-22**.

**A BITZER já acumulou uma extensa experiência com a nova geração de misturas. Testes de laboratório e campo foram iniciados nos estágios iniciais de forma que as informações básicas foram obtidas, visando a otimização das proporções das misturas e o teste dos lubrificantes adequados. Baseada nesses dados, uma grande planta de supermercado – com 4 BITZER semi-herméticos em paralelo – pode ser encomendada em 1991. A utilização dessas misturas nos sistemas mais variados foi o mais alto nível de desenvolvimento e inovação técnico da época – que contou com ótimas experiências e resultados.**

## **Características Gerais de Misturas não Azeotropicas**

Oposto as misturas azeotrópicas (por exemplo R-502 , R-507A), que possuem comportamento de substâncias refrigerantes simples contendo temperatura constante no que diz respeito aos processos de evaporação e condensação, a mudança de fase nos fluidos não azeotrópicos ocorre em forma de *glide* sobre uma certa faixa de temperatura.

Esse *glide* de temperatura pode ser mais ou menos pronunciado, dependendo principalmente dos pontos de ebulição e da porcentagem dos componentes presentes na mistura. Cabe ressaltar que certas definições suplementares também são utilizadas, dependendo dos valores efetivos como “azeótropos próximas” ou “semi-azeótropos”, para *glides* menores do que 1K.

Na prática, isso significa um aumento da temperatura de evaporação e uma redução na temperatura de condensação. Em outras palavras, o resultado final, a uma certa pressão estabelecida, é a diferença entre as temperaturas de saturação nas fases líquido e vapor (figura 13).

Para que uma comparação com uma substância simples seja possível, as temperaturas de evaporação e condensação sempre são definidas como os valores médios. Como consequência, as condições de subresfriamento e superaquecimento (baseada nos valores médios) são irreais, sendo as temperaturas – relacionadas ao pontos de condensação e de vaporização – menores em cada caso.

Esses fatores são muito importantes quando avalia-se o superaquecimento mínimo na entrada do compressor (usualmente de 5 a 7 K) e a qualidade do fluido após o receptor do líquido.

Uma definição uniforme e compreensível sobre a faixa e capacidade de funcionamento dos compressores pode ser verificada e aplicada pelas normas revisadas EN12900 e ARI540. As temperaturas de evaporação e condensação referem-se as condições de saturação (Ponto de condensação).

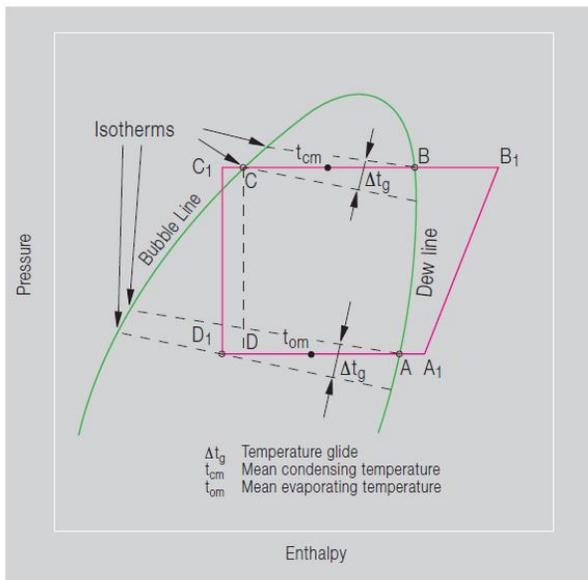


Fig. 13 Evaporating and condensing behavior of zeotropic blends

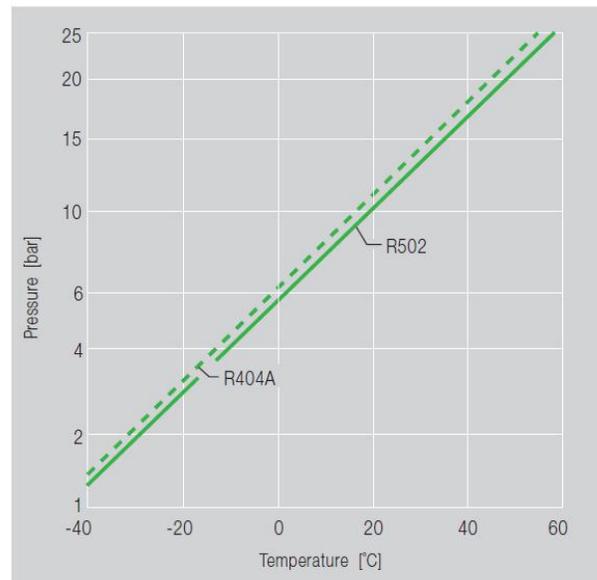


Fig. 14 Pressure level of R404A in comparison to R502

- **Temperatura de Evaporação de acordo com o ponto A (Fig. 13).**
- **Considerando temperatura de acordo com o ponto B (Fig. 13).**

Neste caso, a avaliação da efetividade da temperatura de superaquecimento e de subresfriamento será simplificada. Deve-se, contudo, avaliar que a atual capacidade de refrigeração do sistema pode ser maior do que a capacidade de funcionamento do compressor, que é causado, em partes, por uma temperatura efetivamente menor na entrada do evaporador.

Uma outra característica de fluidos não azeotrópicos é a potencial mudança de concentração quando vazamentos ocorrem. A perda de carga enquanto o fluido está completamente em uma fase (somente gás ou somente líquido) não é particularmente crítica, porém, quando ocorrem em áreas de mudança de fase, por exemplo na válvula de expansão ou dentro do evaporador/condensador/receptor, são consideradas mais significativas e podem alterar a proporção de seus constituintes. Portanto, é altamente recomendável que juntas, soldadas ou vedadas, sejam utilizadas nessas secções do sistema.

Longas investigações realizadas ao longo do tempo demonstraram que o efeito dos vazamentos levam a menores mudanças, contrariando o que imaginava-se, nas concentrações dos fluidos. Tal fato é verificado em determinados casos, os quais as seguintes substâncias pertencentes ao grupo de segurança A1 (veja página 36) não podem desenvolver qualquer mistura inflamável, seja dentro ou fora do circuito de refrigeração. Condições de operação e temperaturas essenciais apenas podem ser obtidas através de cargas suplementares com o fluido original, no caso de um pequeno *glide* de temperatura.

Mais condições/recomendações, no que diz respeito à manipulação prática das misturas refrigerantes, são apresentadas abaixo:

- O equipamento deve sempre ser carregado com o refrigerante na fase líquida. Quando há carregamento de fluido na fase vapor, mudanças nas proporções da mistura podem ocorrer.

- Uma vez que toda mistura contém pelo menos um componente inflamável, a entrada de ar no sistema deve ser evitada. Pode-se verificar uma mudança crítica do ponto de ignição quando o fluido está submetido a altas pressões/vácuo e grandes concentrações de ar.
- A utilização de misturas que apresentam um *glide* de temperatura significativo não é aconselhável para plantas que trabalham com evaporadores inundados. Uma grande mudança de concentração é esperada nessa espécie de evaporador, afetando-se, assim, a circulação do fluxo de massa do fluido refrigerante durante o sistema.

## Misturas Utilizadas para Retrofit Contendo como Componente Básico R-22 como substituto para o R-50

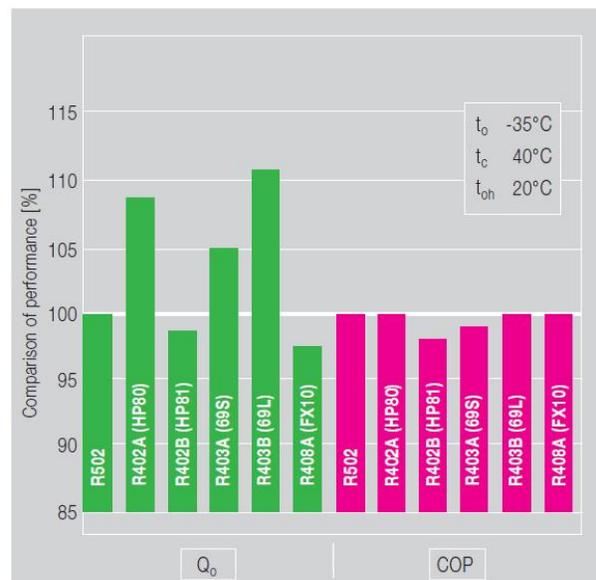
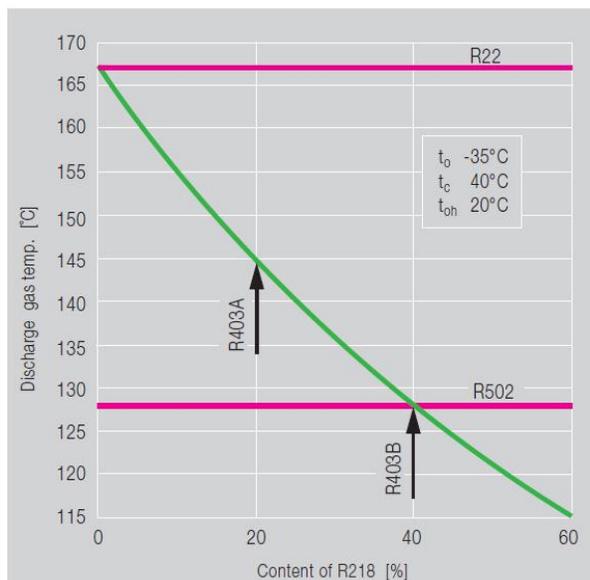
Devido ao constante processo de reforma dos equipamentos antigos utilizados largamente no mercado internacional, os fluidos para *Retrofit* são de extrema importância. Porém, devido ao potencial de degradação da camada de Ozônio e protocolos globais (como o de Montreal), eles estão cada vez mais descontinuados. Contudo, devido ao desenvolvimento histórico dos mesmos, eles serão discutidos nesse relatório.

Estes refrigerantes pertencem ao grupo dos “Fluidos para Retrofit” e são oferecidos pelas designações R402A/R402B\* (HP80/HP81 – DuPont), R403A/R403/B\* (Formalmente denominados ISCEON 69S/69L) e R408A\* (“Forane” FX10 – Arkema).

O componente básico em cada caso é o R22, que diminui significadamente a alta temperatura de descarga do gás pela adição de substâncias livres de cloro com baixo expoente de compressão isentrópica (por ex. R-125, R-143a, R218). Uma característica desses aditivos é o extraordinário fluxo de massa, que permite a mistura atingir uma alta similariedade ao R-502.

O R-290 (propano) é adicionado como terceiro componente ao R-402A/B e R403A/B para aumentar a miscibilidade aos lubrificantes tradicionais como hidrocarbonetos, que especialmente apresentam ótimas características de solubidade.

Duas variações são oferecidas para estas misturas em cada caso. Quando otimizada, no que diz respeito à idêntica capacidade de refrigeração, como o R-502, estas variações demonstraram, através de testes



laboratoriais, um significativo aumento da temperatura de descarga do gás (Fig.15) – que combinado com uma maior sucção do gás superaquecido - causa grandes limitações à suas aplicações.

Por outro lado, uma alta proporção do R-125 ou R-218, que possuem a capacidade de redução da temperatura de descarga do gás aos níveis do R-502, resulta uma ligeira maior capacidade refrigerante (Fig. 16).

No que diz respeito à compatibilidade do material utilizado, as misturas (ou *blends*) podem ser avaliadas da mesma maneira do que os refrigerantes (H)CFC. A utilização de óleos convencionais para refrigeração (preferencialmente semi ou totalmente sintéticos) é possível devido à proporção estabelecida entre o R-22 e o R-290.

Desconsiderando os aspectos positivos destacados, existem também algumas desvantagens. Essas substâncias podem, também, ser vistas como alternativas por um período de tempo limitado. A proporção de R-22 possui (apesar de pouco) potencial de degradação da camada de ozônio. Os componentes adicionais como o R-125, R-143a e o R-218 ainda possuem um potencial de aquecimento global relativamente alto.

### **Resultado dos Critérios dos Projetos/Conversão das Plantas de R-502 Existentes**

Os componentes, bem como os compressores que foram customizados para trabalho com o R-502, podem permanecer no sistema na grande maioria dos casos. Porém, as limitações/faixa de aplicação deve ser considerada: Maiores temperaturas de descarga do gás com R-402B\*\*, R-403A\*\* e R-408A\*\* ou maiores níveis de pressão com R-402A\*\* e R-403B\*\*.

Devido a ótimas características de solubilidade do R-22 e do R-290, verifica-se um maior perigo após a conversão destes equipamentos, já que é possível a presença de produtos oriundos da decomposição do óleo contendo cloro. Eventualmente, estes produtos podem atingir o compressor e dispositivos do sistema, causando danos irreparáveis. Sistemas em que a estabilidade química já era insuficiente operando com R-502 (manutenção inadequada, baixa capacidade de secagem, alta carga térmica), apresentam potenciais riscos.

**\*Quando utilizam-se misturas contendo R-22, regulamentações legais devem ser observadas, veja também página 8.**

**\*\* Classificação de acordo com a nomenclatura ASHRAE**

Antes da conversão, generosos filtros de gás de sucção e linhas líquidas de secagem devem ser dimensionados para limpeza e, aproximadamente, após 100 horas de operação, uma troca de óleo deve ser realizada; maiores informações devem ser cheçadas.

As condições de operação com o R-502 (incluindo a temperatura de descarga do gás a a sucção do mesmo superaquecido) devem ser anotadas de forma que uma comparação dos valores, após a conversão, possa ser realizada. Dependendo dos resultados obtidos, os dispositivos podem ser restabelecidos e outras medidas requeridas podem ser tomadas.

**Informações suplementares BITZER no que diz respeito a *Blends* para *Retrofits* (veja também <http://www.bitzer.de>)**

- Informações técnicas KT-650 “Retrofit do R-12 e R-502 em sistemas refrigerantes para fluidos alternativos”.

## **Blends para Retrofit substitutos do R-12 (R-500)**

Embora como a experiência já demonstra que R-134a é também adequado para conversão de equipamentos/plantas já existentes que trabalham com o R-12, o uso geral para *Retrofit* nem sempre é possível. Nem todos os compressores já instalados são adequados para funcionamento com o R-134a. Além disso, esta conversão requer a possibilidade de uma troca do óleo lubrificante, que não é o caso da maioria dos compressores herméticos, por exemplo.

Considerações econômicas também surgem, especialmente, em plantas antigas onde o esforço de conversão é relativamente alto. A estabilidade química dessas plantas é geralmente insuficiente e, portanto, a chance de sucesso é muito questionável. Portanto, as misturas para *Retrofit* também estão disponíveis para tais plantas/equipamentos como alternativa ao R-134a e são oferecidos como R-401A/R-401B (MP39/MP66 – DuPont), R409A (“Forane” FX56 – Arkema, Solvay). Os principais componentes são os refrigerantes HCFC R-22, R-124 e/ou R-142b. Ambos HFC R-152a ou R600a (Isobutano) são utilizados como terceiro componente. A operação com lubrificantes tradicionais (preferencialmente semi ou totalmente sintéticos) é também possível devido a maior proporção do HCFC.

Um *blend* adicional foi oferecido R-413A (ISCEON49-DuPont), porém foi substituído pelo R-437A no final de 2008. Porém, por motivos de desenvolvimento histórico, ele será discutido nesse relatório. Os constituintes do R-413A consistem em substâncias livres do cloro R-134a, R-218 e R600a. Apesar do alto conteúdo de R-134a, a utilização de lubrificantes é possível devido à relativa baixa polaridade do R-218 e à favorável solubilidade do R-600a.

O R-437A é uma mistura do R-125, R-134a, R-600 e R-601, com performance similar e propriedades do R-413A. Esse fluido refrigerante também apresenta nenhum potencial de degradação da camada de ozônio.

Contudo, devido a miscibilidade limitada do R-413A e do R-437A com óleos minerais/alquil-benzenos, sistemas com elevada circulação de óleo e/ou alto volume de líquido no receptor podem apresentar o fenômeno denominado migração do óleo – caso um separador de óleo não seja instalado no sistema, por exemplo.

Caso o retorno de óleo ao compressor seja insuficiente, os fabricantes dos fluidos refrigerantes recomendam que parte da reposição de carga de óleo original seja realizada com um óleo ester. Porém, pela visão dos fabricantes dos compressores, tais medidas exigem uma análise cuidadosa das condições de lubrificações. Por exemplo, se um aumento na formação de espuma é observado no cárter do compressor, uma completa troca para um óleo ester é necessária. Além disso, sob a influência da mistura altamente polarizada entre o óleo ester e o refrigerante HFC, a conversão, visando a utilização de lubrificantes a base de ésteres, leva ao aumento da dissolução dos produtos de decomposição e sujeiras nas tubulações do equipamento. Conseqüentemente, filtros generosos e adequamento

dimensionados devem ser adicionados ao sistema para que tais problemas sejam evitados ou minimizados. Para maiores detalhes, veja as orientações dos fabricantes do refrigerantes.

## **Critérios Resultantes dos Projetos/Conversão de Plantas R-12 Existentes**

Os compressores e componentes podem, na maioria das vezes, permanecer no sistema quando uma conversão é realizada. Contudo, quando utilizam-se o R-413A e R-437<sup>a</sup>, a adequação deve ser verificada no que diz respeito aos fluidos refrigerantes HFC's. As medidas atuais de *Retrofit* estão restritas à mudança do refrigerante (possivelmente o óleo) e uma cuidadosa checagem na configuração de superaquecimento da válvula de expansão.

Um significativo glide de temperatura é verificado devido à relativa grande diferença dos pontos de ebulição das substâncias individuais (Fig. 34, página 37), que demandam condições de saturação (podem ser encontradas em tabelas de vapor fornecidas pelos fabricantes de refrigerante) de modo que garantam a sucção efetiva do gás superaquecido em faixa de aplicação, deve ser sempre observada. Diferentes tipos de refrigerantes são requeridos para altas ou baixas temperaturas de evaporação, portanto, as diferentes capacidades e finalidades devem ser, devido à acentuada capacidade característica, se comparado ao R-12.

Devido à alta proporção de R-22, especialmente com a baixa temperatura nas misturas, a temperatura de descarga do gás com algum fluido é significadamente maior do que com o R-12. Portanto, os limites de aplicação do compressor devem ser verificados antes da conversão.

Os critérios de aplicação restantes são similares àqueles para as substâncias substitutas do R-502 que já foram anteriormente mencionados.

**\*Utilizando-se o R-22 em misturas, exigências legais devem ser observadas, veja página 8.**

## **R-404A e R-507A como Substituto para o R-502 e R-22**

Esses misturas são substitutos livres de cloro (ODP=0) para o R-502, bem como para o R-22 em baixas e médias temperaturas de trabalho.

Uma composição que foi lançada em meados de 1992, conhecida através do nome comercial Suva HP62 (DuPont), vem demonstrando bons resultados. Mais misturas foram comercializadas como ``Forane`` FX70 (Arkema) e ``Genetron`` AZ50 (Aliados Signak/Honeywell) ou ``Solkane`` 507 (Solvay). Nesse meio tempo, o HP62 e o FX70 foram listados pela nomenclatura ASHRAE como R-404A e AZ50 como R-507A.

O componente básico pertence ao grupo dos HFC's, sendo o R-143a pertencente ao grupo dos inflamáveis. Devida combinação com relativa alta proporção do R-125, a inflamabilidade é efetivamente neutralizada, diminuindo-se, assim, os riscos em vazamentos e em sua operação.

Uma característica desses três ingredientes que compõem essa mistura é o baixíssimo expoente de compressão isentrópica que resulta em uma similar – com a tendência de ser menor – temperatura de descarga de gás para o R-502 (Figura 17), garantido, assim, sua eficiência, quando aplicados em compressores de estágio simples com baixas temperaturas de evaporação.

Devido aos similares pontos de ebulição do R-143a e o R-125 – com baixa proporção relativa do R-134a – o glide de temperatura da mistura ternária R-404<sup>a</sup>, no que diz respeito à faixa de aplicação, é menor

do que 1K, tornando, assim, as características dos trocadores de calor não diferentes das obtidas quando azeótropos são utilizados. Assim, até agora, os resultados obtidos nas medições de transferência de calor demonstram condições favoráveis de trabalho.

O R-507A é uma combinação de uma substância binária que fornece características azeotrópicas sobre uma relativa grande faixa de utilização. As condições tendem, possivelmente, a serem sempre melhores.

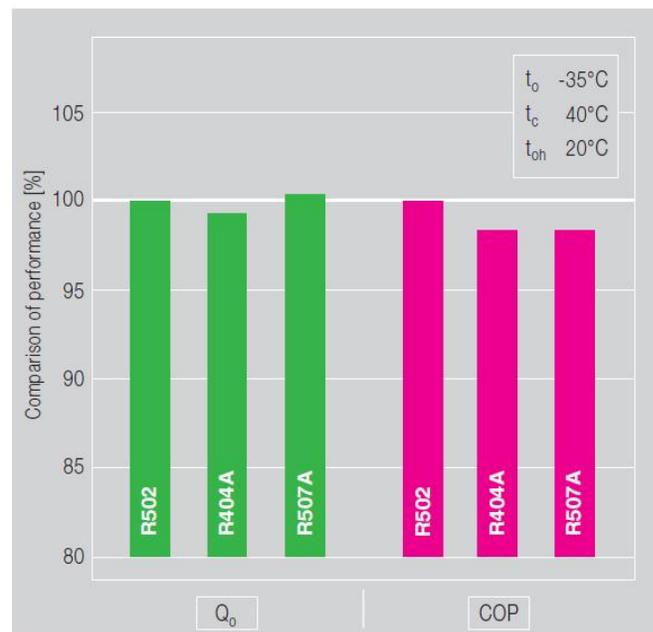
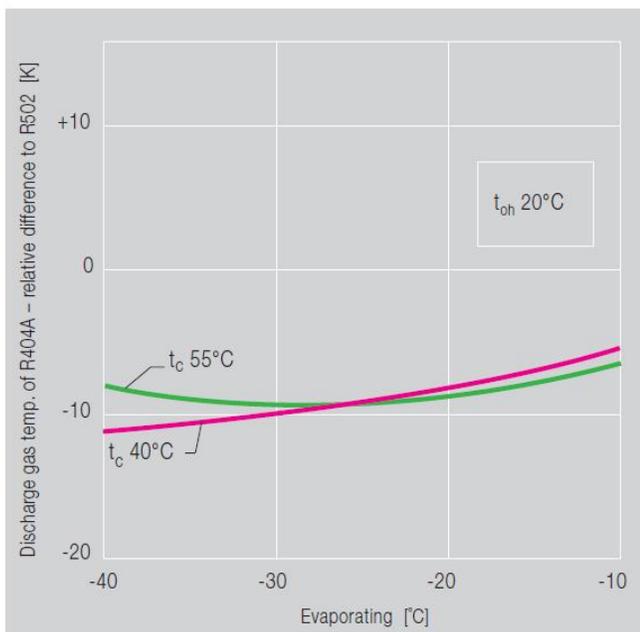
A performance verificada nos testes de laboratório (Figura 18) fornece praticamente nenhuma diferença entre várias substâncias e mostra uma similiariedade muito grande com o R-502, justificando, assim, a boa penetração desses substitutos no mercado atual.

Questões sobre a compatibilidade dos materiais são gerenciáveis; já que experiências com outros HFCs justificam a avaliação positiva. Óleos a base de POE podem ser utilizados como lubrificantes, já que a adequação de várias alternativas já está sendo avaliada (veja página 9/10). O relativo alto potencial de aquecimento global ( $GWP_{100}=3922..3985$ ), que é principalmente causado pelo R-143a e R-125, apresenta melhores valores quando comparado ao R-502, apresentando também - no que diz respeito à eficiência energética - a redução dos valores do TEWI. Outras melhorias são possíveis nestes sistemas devido ao desenvolvimento de sistemas de controle, incluindo, por exemplo, o abaixamento controlado da temperatura de condensação em ambientes de baixa temperatura.

Todavia, existem restrições esperadas no futuro para aplicação do R-404A e do R-507A, no que diz respeito aos altos valores de GWP, resultando em uma elevada porcentagem de emissões diretas na avaliação TEWI. Além disso, essas emissões contribuem para o desfavorável ``Carbon Foot-print``.

Alternativas que possuem um menor GWP são as misturas a base de HFC discutidas à seguir (página 18), bem como as misturas HFO/HFC que foram desenvolvidas e avaliadas (página 23).

Fluidos refrigerantes livres de halogênios ou sistemas em cascata que utilizam distintos fluidos são também uma opção para algumas aplicações específicas (veja página 25).



## Critérios Resultantes do Projeto

A tecnologia do sistema pode ser baseada na experiência do R-502 em uma larga área de aplicação. Do ponto de vista da termodinâmica, um trocador de calor entre a sucção e a linha líquida é recomendado para otimização da capacidade refrigerativa do sistema e *COP*.

A disponibilidade dos refrigerantes é garantida.

**A BITZER oferece uma ampla gama de compressores para aplicação dessas espécies de fluidos**

## Convertendo Plantas (H)CFC Existentes

Experiências adquiridas durante programas investigativos demonstram que conversões qualificadas são possíveis. Contudo, dependendo do sistema, maiores gastos podem ser necessários.

**Informações suplementares BITZER sobre o uso de misturas HFC (veja <http://www.bitzer.de>)**

- Informação técnica KT-651 ``*Retrofit* de sistemas de R-22 para refrigerantes alternativos``
- Informação técnica KT-510 ``Óleos de poliolésteres para compressores alternativos``

## R-407A/R407B/R407F como Substitutos para R-502 e R22

Misturas aditivas alternativas a substâncias anteriormente descritas foram desenvolvidas baseadas no R-32 que não apresenta cloro (*ODP=0*) e possui inflamabilidade similar ao R-143a.

O refrigerante R-32 é também um HFC e foi visto primeiramente como candidato substituto ao R-22 (página 20). Contudo, devido ao desenvolvimento de misturas variadas com características termodinâmicas comparáveis ao R-502 e ao R-404A/R-507A, alternativas distintas foram priorizadas.

Essa classe de refrigerantes foi inicialmente comercializada através do nome KLEA 60/61 (ICI) e estes são listados como R-407A/R-407B\* na nomenclatura ASHRAE.

A *Honeywell* desenvolveu outro *blend* com nome comercial *Performax* LT (407F de acordo com a nomenclatura ASHRAE) introduzido no mercado. A composição, no que diz respeito do R-32, é dez pontos percentuais maior do que o encontrado no R-407A, enquanto que a proporção de R-125 diminuiu de acordo.

Todavia, as condições necessárias para alternativas contendo o R-32 não são favoráveis quando comparadas a substitutos anteriormente discutidos baseados no R-143a. O ponto de ebulição do R-32 é muito baixo (-52°C) e, além disso, o expoente de compressão isentrópica é ainda maior do que o R-22. Para combinar as características no nível do R-404A e R-507<sup>a</sup>, são necessárias relativas altas proporções do R-125 e R-134a. A inflamabilidade do R-32 é assim eficientemente suprimida, e, ao mesmo tempo, a larga diferença entre os pontos de ebulição com altas proporções do R-134a levam a um maior *glide* de temperatura.

A principal vantagem do R-32 é o extraordinário baixo potencial de aquecimento global ( $GWP_{100}=675$ ) que, mesmo combinando com o R-125 e o R-134<sup>a</sup>, é significativamente menor quando comparado com

alternativas baseadas no R-143a, como mencionado em passagens anteriores (por exemplo R-407A,  $GWP_{100} = 2107$ ).

Medições feitas com o R-32 contendo misturas apresentam certas reduções comparados com o R-404A e R-507A com baixas temperaturas de evaporação, porém, o *COP* mostra menores desvios (Fig. 20), bem como os valores do *TEWI* são relativamente baixos, tornando-as vantajosas no que diz respeito a emissões e prejuízos globais.

Um importante fator é o significativo *glide* de temperatura que pode ter uma influência negativa no que diz respeito à diferença de capacidade/temperatura do evaporador e do condensador. Em relação à compatibilidade do material, as misturas de R-32 podem ser avaliadas de forma semelhante ao R-404A e ao R-507A; o mesmo aplica-se aos lubrificantes.

Apesar da relativa alta proporção do R-125 e R-134a nas misturas de R-32, a temperatura de descarga do gás é maior do que as alternativas baseados no R-143a. Tal afirmação é particularmente válida para o R-407F. Como resultado, certas limitações ocorrem em sua faixa de aplicação, bem como a necessidade de resfriamento adicional dos compressores, quando operam em altas pressões.

Desse ponto de vista, também considerando os fatores sobre eficiência, um controle inteligente é recomendado para o controle flutuante da pressão de condensação, quando submetido a ambientes de baixa temperatura. Compressores de dois estágios podem ser eficientemente aplicados nos quais alterações bruscas de temperaturas são encontradas. Uma importante vantagem, assim, é a utilização do líquido subresfriado.

## **Critérios Resultantes do Projeto**

A experiência com o R-404A/R-507A e o R-22 pode ser utilizada para a tecnologia da planta em muitos aspectos, considerando o *glide* de temperatura, bem como as diferenças nas propriedades termodinâmicas. Isso é especialmente o caso para a elaboração do projeto e construção dos trocadores de calor e válvulas de expansão. Os fluidos estão disponíveis. Ocasionalmente, seleções individuais podem ser requeridas para os componentes necessários.

\*Por enquanto, o R-407B não está mais disponível no mercado. Devido ao desenvolvimento histórico das misturas de HFC, esse fluido será, contudo, discutido nesse artigo.

## **Conversão de Plantas de R-22 Existentes**

Experiências práticas mostram que conversões qualificadas são possíveis. Comparado ao R-22, a capacidade de refrigeração volumétrica é similar, enquanto que o fluxo de massa refrigerante é levemente maior. Essas são condições relativamente favoráveis para a conversão de sistemas que trabalham com temperaturas médias e baixas. Os principais componentes podem permanecer no sistema pois são compatíveis com refrigerantes HFC e éster óleos. Contudo, modificações especiais no trocador de calor, no que diz respeito ao significativo *glide* de temperatura, devem ser considerados. A conversão do lubrificante para óleos a base de ésteres é também necessária, que leva ao aumento da dissolução de produtos de decomposição e sujeira nas tubulações do equipamento. Portanto, filtros de limpeza apropriadamente dimensionados devem ser providenciados.

**Informações suplementares BITZER sobre o uso de misturas HFC (veja também <http://www.bitzer.de>)**

- Informação técnica KT-651 ``Retrofit de sistemas R-22 para refrigerante alternativos``.

## R422A como Substituto para o R502 e R22

Entre outras aplicações, o R422A (ISCEON MO79 – DuPont) foi desenvolvido com objetivo de obter-se um refrigerante livre de cloro (ODP=0) para a simples conversão de sistemas existentes de refrigeração de baixa e média temperatura que utilizam o R502 e R22.

Para isso, é necessário formular um refrigerante que performance comparada e eficiência energética ao R-404A, R-507A, e ao R-22, que também permite a utilização de lubrificantes convencionais. Ele é uma mistura azeotrópica dos componentes básicos R-125 e R-134a com uma pequena adição do R-600a. Devido a relativa alta presença do R-134a, o glide de temperatura (fig. 34) fica maior do que para o R-404A, porém menor do que outros fluídos com as mesmas composições de mistura – como o R-417A e o R-422D (veja página 22).

O expoente adiabático, comparado ao R-404A e R507A, é menor e portanto a descarga do gás e a temperatura do óleo também. Sob condições de extrema baixa temperatura tal fato pode ser vantajoso. Em caso de baixa pressão e superaquecimento do gás de sucção isso pode ser negativo devido ao aumento da solução refrigerante se um éster óleo é utilizado. A compatibilidade do material é comparável as misturas mencionadas anteriormente, o mesmo aplica-se aos lubrificantes. Devido a ótima solubilidade do R-600a, lubrificantes convencionais podem ser utilizados em condições favoráveis.

Em particular as vantagens resultantes do processo de conversão de sistemas existentes que funcionam com R-502 e R22 estão mencionadas acima. Contudo, para plantas que funcionam com altas taxas de circulação de óleo no sistema e/ou alta carga líquida no receptor, é possível que a migração de óleo ocorra – por exemplo se nenhuma separador de óleo é instalado.

Caso o retorno de óleo ao compressor seja insuficiente, os fabricantes dos fluídos refrigerantes recomendam que parte da reposição de carga de óleo original seja realizada com um óleo ester. Porém pela visão dos fabricantes dos compressores tais medidas exigem uma análise cuidadosa das condições de lubrificações. Por exemplo, se um aumento na formação de espuma é observado no cárter do compressor, uma completa troca para um óleo ester é necessária. Além disso, sob a influência da mistura altamente polarizada entre o óleo ester e o refrigerante HFC, a conversão visando a utilização de lubrificantes a base de ésteres leva ao aumento da dissolução dos produtos de decomposição e sujeiras nas tubulações do equipamento. Consequentemente filtros generosos adequadamente dimensionados devem ser adicionados ao sistema para que tais problemas sejam evitados ou minimizados. Para maiores detalhes veja as orientações dos fabricantes do refrigerantes.

Do ponto de vista da termodinâmica uma trocador de calor entre a sucção é a linha líquida é recomendada, favorecendo uma melhora na capacidade de resfriamento e no coeficiente de performance. Além disso o resultado aumenta as temperaturas de operação levando ao aumento favorável das condições de lubrificação (menor solubilidade).

\*Propostas gerais para compressores e chiller líquidos quando evaporades DX são utilizados com tubulações trocadoras de calor internamente estruturadas. Do mais, uma verificação individual no que diz respeito a medidas adicionais será necessária.

**Compressores BITZER são adequados para o R422A. Uma seleção individual é possível de acordo com a demanda.**

## Alternativas do R-22 Livres de Cloro

Como o refrigerante HCFC, R-22 ( $OPD=0.05$ ) é ainda aceito como uma solução transicional, um grande número de alternativas livres de cloro foram desenvolvidas e arduamente testadas. Elas já estão sendo utilizadas em um enorme número de aplicações.

A prática, porém, vem mostrando que nenhuma dessas substâncias pode substituir o R-22 em todos os aspectos. Entre outras características, existem diferenças na capacidade de refrigeração volumétrica, restrições em possíveis aplicações, requisitos especiais na construção do sistema e/ou considerável diferença nos níveis de pressão. Portanto, várias alternativas – de acordo com sua especificidade de operação – são viáveis e disponíveis.

Deixando de lado o refrigerantes HFC de único componente R-134a, essas são misturas (com diferentes composições) de componentes principais R-32, R-125, R-134a, R-143a e R-600(a). A descrição que segue apresenta as principais preocupações no que diz respeito ao desenvolvimento e potenciais aplicações dos mesmos. O substituto livre de halogênio  $NH_3$ , bem como propano e propileno e  $CO_2$ , devem ser considerados, contudo, critérios específicos devem ser aplicados para sua utilização (descritos na página 23).

## R-407C como Substituto do R-22

As misturas dos fluidos HFC R-32, R-125 e R-134a são vistos como os candidatos favoritos a curto prazo para substituição do R-22, já que sua performance e eficiência são muito similares (fig. 21). No começo, duas misturas de mesma composição foram introduzidas no mercado com o nome AC9000\* (DuPont) e KLEA66\* (ICI) e, atualmente, são listadas pela nomenclatura ASHRAE como R-407C. Enquanto isso, surgiram outras variedades de misturas (por exemplo R407A/R407F) com algumas diferenças em sua composição que geram propriedades otimizadas para aplicações particulares (veja página 18).

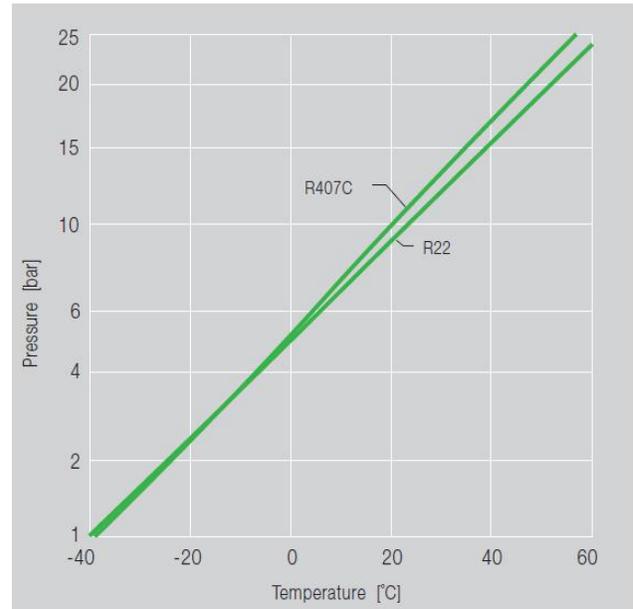
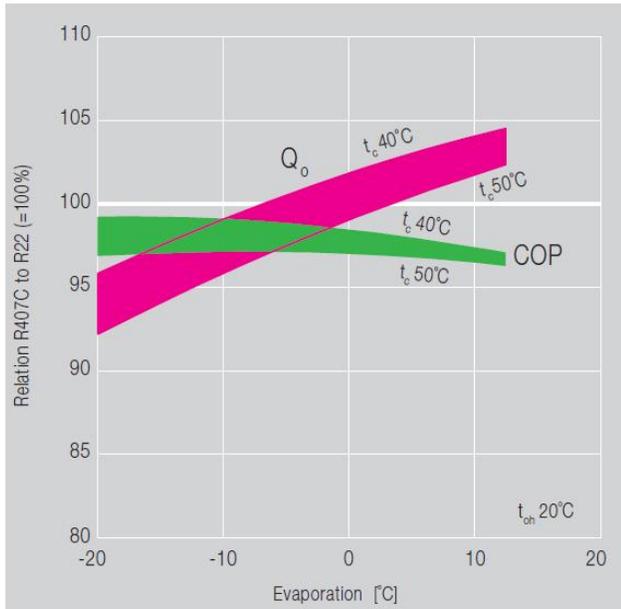
Ao contrário dos substitutos do R-502 que possuem componentes idênticos (veja página 18/19), os substitutos do R-22 em consideração possuem altas proporções do R-32 e do R-134a, que possuem uma boa correspondência com as propriedades do R-22, no que diz respeito aos níveis de pressão, fluxo de massa, densidade do vapor e capacidade volumétrica de refrigeração. Em adição, o potencial de aquecimento global é relativamente baixo ( $GWP_{100}=1774$ ), que é uma preposição para valores favoráveis do *TEWI*. O alto *glide* de temperatura é uma desvantagem para aplicações usuais que necessitam de um projeto adequado de sistema e podem ter uma influência negativa na eficiência dos trocadores de calor (veja explicações nas páginas 13/14).

Devido às propriedades mencionadas, o R-407C é preferível ao R-22, substituindo-o em sistemas de ar-condicionado e (com algumas limitações) também para refrigeração em temperatura média. Em baixas temperaturas de refrigeração, devido à alta proporção do R-134a, uma significativa queda da capacidade de resfriamento e do *COP* é esperada. Existe também o risco de uma maior concentração do R-134a na

mistura no evaporador, com conseqüente redução da performance e mal funcionamento da válvula de expansão (por exemplo, sucção insuficiente do gás superaquecido).

A compatibilidade do material pode ser avaliada da mesma maneira da abordada para as misturas comentadas anteriormente, o mesmo aplica-se aos lubrificantes.

\*Os antigos nomes comerciais não são mais utilizados .



## Critérios Resultantes do Projeto

No que diz respeito à tecnologia do sistema, experiências prévias com o R-22 apenas podem ser utilizadas em uma limitada extensão. A distinta temperatura do *glide* requer uma adequação particular dos principais componentes do sistema, como o evaporador, condensador e a válvula de expansão. Nesse contexto, deve ser considerado que os trocadores de calor devem, preferencialmente, ser definidos para operar em contra fluxo e com otimizada distribuição do refrigerante. Existem também requisitos especiais dos dispositivos regulatórios e do manuseio destes equipamentos.

Além disso, a utilização em sistemas que trabalham com evaporadores inundados não é recomendado pois isto resultaria em severas mudanças na concentração e formação de uma camada no evaporador.

## Convertendo Plantas de R-22 Existentes

Uma série de plantas e equipamentos foram convertidos a fim de testá-los, porém, devido aos critérios acima mencionados, nenhuma orientação pôde ser definida. Assim, cada caso deve ser avaliado de maneira individual.

## R-410 como Substituto do R-22

Em adição ao R-407C, existe uma mistura que está sendo oferecida pela designação ASHRAE R-410a , que já é largamente utilizada, principalmente, em aplicações para ar condicionado.

Uma característica essencial indica cerca de 50% de maior capacidade volumétrica de refrigeração (Fig. 23/1) em comparação ao R-22, mas um conseqüente aumento proporcional na pressão do sistema (Fig. 23/2).

Em altas temperaturas de condensação, o consumo de energia/*COP* parece ser menos favorável do que quando opera-se com o R-22, devido, principalmente, às propriedades termodinâmicas. Por outro lado, uma altíssima eficiência isentrópica é atingível (com compressores alternativos/rolamentos) onde as diferenças são menores na realidade.

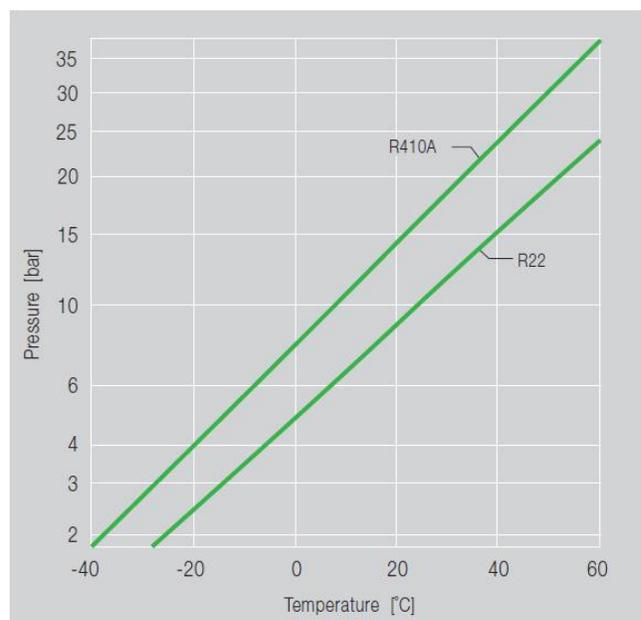
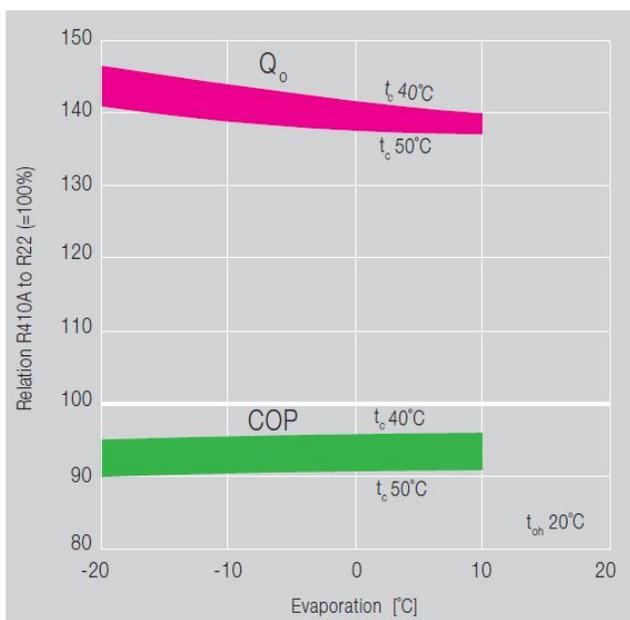
Somado a isso, os altos coeficientes de transferência de calor dos evaporadores e condensadores foram determinados através de vários testes, resultando em favoráveis condições de operação. Quando a otimização é realizada de forma correta, é possível que o sistema atinja uma melhor eficiência global, quando comparado à utilização de outros fluidos refrigerantes. Devido ao negligenciável *glide* de temperatura (< 0.2K), sua geral utilização considera-o um refrigerante puro.

A compatibilidade do material é comparável às misturas anteriormente discutidas e o mesmo aplica-se aos lubrificantes. Contudo, os níveis de pressão e as altas cargas específicas ao quais os componentes do sistema são submetidos devem ser levados em conta.

### Critérios Resultantes do Projeto

Os principais critérios para misturas a base de HFC também aplicam-se à tecnologia dos sistemas que operam com R-410A, contudo, os altíssimos níveis de pressão devem ser considerados (temperaturas de condensação de 43°C correspondem a pressões de 26 bar).

Compressores e outros componentes de um sistema R-22 padrão possuem limitações substanciais para aplicação deste refrigerante. Contudo, devido às propriedades favoráveis do R-410A, consideráveis



esforços estão sendo feitos para o desenvolvimento de produtos adequados.

Quando considera-se cobrir as faixas de aplicação usuais do R-22, as significantes diferenças nas propriedades termodinâmicas (por exemplo, níveis de pressão, fluxo de massa e líquido, densidade do vapor) devem ser avaliadas.

Isso também requer consideráveis mudanças nos compressores, trocadores de calor, controles bem como medidores de vibração.

Além disso, as medidas de segurança são fundamentais, afetando, assim a qualidade e o dimensionamento dos tubos e a flexibilidade dos elementos (para temperaturas de condensação de aprox. 60°C/40 bar).

Outro critério a ser considerado é a relativa baixa temperatura crítica de 73°C. Independentemente do desenho/projeto dos componentes que integram a parte de alta pressão do sistema, a temperatura de condensação é portanto limitada.

**A BITZER, há muito tempo, conduziu extensivas pesquisas com o R-410A e acompanhou uma série de projetos. Enquanto isso, duas séries de compressores alternativos e de rolagem semi-herméticos para o R-410A estão disponíveis.**

## **R-417/417B/422D/438A como Substitutos do R-22**

Um dos principais objetivos destes desenvolvimentos foi – assim como o R-422<sup>a</sup> (página19) – a necessidade de refrigerantes livres de cloro ( $ODP=0$ ) para a simples conversão de plantas que funcionam com R-22.

O R-417A foi introduzido no mercado alguns anos atrás e ainda é oferecido sob o nome comercial ISCEON MO59 (DuPont). Esse substituto para o R-22 contém uma mistura dos componentes R-125/R134a e R-600, diferenciando-o, consideravelmente, do R-407C, por exemplo, que possui uma elevada proporção do R-32.

Enquanto isso, outro fluido baseado em componentes idênticos, porém com maior proporção do R-125, foi oferecido pelo nome comercial Solkane 22L (Solvay) – classificação ASHRAE R-417B. Devido a menor quantidade de R-134a presente no mesmo, a capacidade volumétrica de refrigeração, bem como os níveis de pressão, são maiores do que o R-417<sup>a</sup>, resultando em diferentes parâmetros de performance e ênfase em sua aplicação.

O mesmo aplica-se a outras misturas que apresentam o mesmo componente mas com o R-600a como um hidrocarboneto aditivo. Ele é oferecido através do nome comercial ISCEON MO29 (DuPont) e listado como R-422D na nomenclatura ASHRAE. Outro refrigerante, também pertencente à categoria de misturas HFC/HC, foi introduzido em 2009 com o nome ISCEON MO99 (DuPont) – nomenclatura ASHRAE R-438A. Essa formulação foi seletivamente designada para aplicação quando altas temperaturas críticas estão presentes em áreas climáticas de calor excessivo. Os componentes básicos dessa mistura são o R-32, R-125, R-134a, R-600 o R-601a.

Como o R-407C, todos os quatro refrigerantes substitutos são misturas não azeotrópicas com maior ou menor *glide* de temperatura. Nesse aspecto, os critérios descritos em conexão com o R-407C também são válidos.

Apesar das similares capacidades de refrigeração, existem diferenças nas propriedades termodinâmicas e no comportamento do transporte de óleo. A alta proporção de R-125 causa, em conjunto com o R-417A/B e R-422D, um alto fluxo de massa com R-407C, uma baixa temperatura de descarga do gás e um relativo aumento da entalpia de aquecimento. Essas propriedades indicam que existem diferenças vantajosas na otimização dos componentes do sistema e trocadores de calor entre as linhas de líquido e sucção.

Apesar da proporção predominante de refrigerantes HFC, a utilização de lubrificantes convencionais é somente possível devido às boas propriedades de solubilidade do hidrocarboneto consituente. Contudo, em sistemas que trabalham com uma alta circulação de óleo ou alto volume de fluido, pode-se observar, eventualmente, migração de óleo do cárter do compressor para a linha.

Nestes casos, medidas adicionais são necessárias. Para maiores informações sobre retorno de óleo e lubrificações, veja a página 19.

**Os compressores BITZER são compatíveis aos refrigerantes descritos. Uma seleção individual é possível sob demanda.**

## R-427A como Substituto do R-22

Esse mistura refrigerante foi introduzida alguns anos atrás com o nome comercial Forane FX100 (Arkema) e é nomeada, segundo a nomenclatura ASHRAE, como R-427A. Esse substituto do R-22 é oferecido para conversão de sistemas existentes de R-22 quando há a necessidade de nenhuma degradação da camada de ozônio ( $ODP = 0$ ). Esse refrigerante é uma mistura HFC baseada nos componentes R-32/R-125/R-134a/R-143a.

Apesar da composição da mistura ser baseada em refrigerantes HFC, o fabricante informa que um simples processo de conversão é possível.

Essa mistura é positivamente influenciada pela proporção de R-134a. Portanto, quando a conversão do R-22 para o R-427A é realizada, é necessário uma substituição do óleo original do sistema para o óleo éster e lavagens adicionais do sistema não são necessárias, já que as proporções de até 15% de óleo mineral e/ou alquil benzeno não possuem efeito significativo na circulação de óleo no sistema.

Contudo deve-se levar em consideração que, sob a influência da mistura altamente polarizada entre o éster e o fluido HFC, verifica-se o aumento de produtos de decomposição e sujeiras no encanamento, portanto, filtros para limpeza eficientemente planejados devem ser instalados para a retirada dessas impurezas do sistema. No que diz respeito à capacidade refrigerante, níveis de pressão, fluxo de massa e densidade de vapor, o R-427A é relativamente próximo ao R-22. Durante um processo de *Retrofit* componentes essenciais – como as válvulas de expansão – podem ser mantidos no sistema. Devido à alta proporção nesta mistura de componentes com baixo expoente adiabático, a temperatura de descarga do gás é consideravelmente menor do que quando utiliza-se o R-22, sendo, assim, um efeito positivo em altas taxas de compressão.

Deve-se levar em conta também o fato desse *blend* resultar em uma mistura não azeotrópica, apresentando, portanto, um *glide* de temperatura distinto. Portanto, o critério descrito no contexto do R-407C é também válido nesse caso.

**Os compressores BITZER são compatíveis aos refrigerantes descritos. Uma seleção individual é possível sob demanda.**

Informações suplementares no que diz respeito ao uso de *blends* HFC (veja também <http://bitzer.de>)

- Informação técnica KT-651 “*Retrofitting* de sistemas R-22 para refrigerantes alternativos”.

## R-32 como substituto para o R-22

Conforme descrito anteriormente, o R-32 pertence ao grupo dos refrigerantes HFC, porém, atualmente, é utilizado, principalmente, apenas como componente de *blends* refrigerantes. Uma essencial barreira para sua aplicação como substância pura, no momento, é sua classificação de inflamabilidade no grupo de segurança A2. Isso requer limitações adequadas de carga e/ou medidas adicionais de segurança, especialmente, sobre instalações realizadas em ambientes e plantas fechadas. Além disso, sistemas que trabalham com esse fluido puro apresentam altíssimos níveis de pressão e temperatura de descarga do gás na saída do compressor. (índice de compressão maior do que o R-22 e R410a).

Por outro lado, ele possui propriedades termodinâmicas favoráveis, como por exemplo, alta entalpia de vaporização e capacidade volumétrica de refrigeração, baixa densidade de vapor (baixa queda de pressão nas tubulações), baixo fluxo de massa e alimentação favorável no compressor, além de apresentar um baixo potencial de aquecimento global ( $GWP_{100}=675$ ).

Analisando estas propriedades favoráveis e levando-se em conta a preocupação adicional com a redução das emissões, o R-32 será gradativamente utilizado como refrigerante em sistemas produzidos em fábrica (unidade A/C e bombas de calor) com baixas cargas de refrigerante. A respeito dos requisitos de segurança, as regulamentações (por exemplo a EN-378) para fluidos refrigerantes A2 ainda são

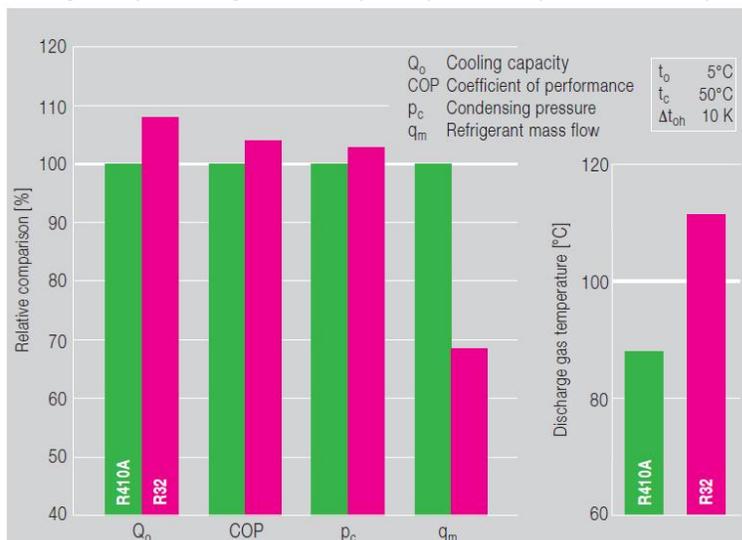


Abb. 24 R32/R410A – comparison of performance and operating data of a scroll compressor

válidos, embora já provado em testes de inflamabilidade que a energia de ignição necessária é muito alta e a velocidade da chama é baixa. Baseado nessas propriedades, o R-32 (como o HFO 1234yf e 1234ze) tem sido classificada no novo grupo de segurança A2L, de acordo com o ISO-817.

Até quando ele será classificado no grupo A2, ninguém sabe, porém, vários testes são realizados até os dias atuais.

Em conjunto com o desenvolvimento dos projetos, a BITZER está realizando investigações correspondentes com o R-32.

## Blends de HFO/HFC como alternativas ao HFC

Devido a decisão de se utilizar o refrigerante de baixo potencial de aquecimento global (*GWP*) HFO-1234yf (veja páginas 11/12) em sistemas condicionadores de ar automotivos, o desenvolvimento de alternativas para outras aplicações *mobile* e sistemas estacionários ainda está sendo realizada.

As primeiras formulações são as misturas com significativa redução do *GWP* que possuem propriedades termodinâmicas similares aos fluidos HFC utilizados atualmente.

O componente básico HFO-1234yf é o candidato preferido do grupo das fluorolefinas com uma dupla ligação química, devido a suas qualidades e propriedades. Contudo, ele é razoavelmente inflamável (grupo de segurança A2L). Além disso, sua capacidade volumétrica de refrigeração – que é aproximadamente a mesma do R-134 – é baixa. Substâncias apropriadas do grupo dos HFO com alta capacidade volumétrica – como alternativas diretas ao R-22, R-404A, R-410A, etc.. – não estão disponíveis.

Isso, em conjunto com a demanda de refrigerantes não inflamáveis e/ou maior capacidade volumétrica de refrigeração, faz com que a mistura HFO-1234yf com o HFC seja escolha adequada.

Contudo, devido às propriedades adequadas dos refrigerantes HFC, como misturas de componentes, inflamabilidade e o potencial de aquecimento global (*GWP*) estão relacionadas diametralmente uma à outra. Em outras palavras: *blends* alternativos ao R-22, R-404A, R410A etc.. que possuem um *GWP* menor que 500, são inflamáveis. Algumas das substâncias não inflamáveis possuem um *GWP* significativamente maior, porém, em menores níveis das misturas HFCs ou HFC equivalente.

Atualmente, existem duas direções de desenvolvimento:

- Alternativas HFC não inflamáveis (*blends*) com  $GWP_{100} > \text{aprox. } 500$  – grupo de segurança A1. Em relação aos requisitos de segurança, esses refrigerantes podem ser utilizados da mesma maneira que os atuais HFCs estão sendo utilizados.
- Alternativas HFC inflamáveis (*blends*) com  $GWP_{100} < \text{aprox. } 500$  – de acordo com o novo grupo de segurança A2L para refrigerantes moderadamente inflamáveis. ,

Entre os outros grupos de refrigerantes, deve-se levar em conta as limitações de carga de acordo com os requisitos atuais para refrigerantes A2.

Até que ponto as exigências de segurança para os refrigerantes A2L (em oposição ao A2) pode ser aliviada? Ninguém sabe pois numerosos testes e análises de risco são necessárias para isso.

## Alternativas não inflamáveis para o R-134a

O ponto de partida mais favorável para o desenvolvimento de alternativas ao R-134a é a criação de *blends* não inflamáveis. Para isso os valores de potencial de aquecimento global (*GWP*) devem ser iguais ou menores a 600 – que é menos da metade, comparando-o ao R-134a ( $GWP_{100}=1430$ ). Além disso,

essa espécie de *blend* pode apresentar propriedades azeotrópicas, o que justifica o fato deles serem utilizados geralmente como fluidos refrigerantes puros.

Por muito tempo, uma mistura foi testada em larga escala em sistemas reais – esta foi desenvolvida pela *DuPont* e foi chamada de *Opteon*® XP-10 (formalmente DR-11). Os resultados disponíveis atualmente são promissores. Enquanto isso, a *Honeywell* fornece uma alternativa chamada *Solstice* N-13 que, contudo, difere em termos da composição da mistura.

Ambas opções possuem capacidade de refrigeração e níveis de pressão similares ao R-134a. Como resultado, grande parte dos componentes/tecnologia do sistema podem ser utilizados da mesma maneira, apenas ajustes nas válvulas de expansão são necessários.

Óleos a base de poliolester são lubrificantes adequados que devem atender a alguns requisitos especiais, por exemplo, para adição de aditivos.

Várias perspectivas favoráveis surgem no mercado de média temperatura em conjunto com o CO<sub>2</sub> para baixas temperaturas, assim como em *chillers* líquidos com altas cargas de refrigerante onde a utilização de fluidos tóxicos ou inflamáveis necessitam severas medidas de segurança.

**A BITZER está fortemente envolvida nestes projetos e já adquiriu um importante conhecimento na utilização destes refrigerantes. Uma seleção individual de compressor é possível sob pedido.**

### **Alternativas para R-22/R-407C, R-404A/R-507a e R-410a**

Uma vez que a disposição de moléculas HFO (HFO-1234yf e HFO-1234ze) demonstrou uma considerável menor capacidade volumétrica de refrigeração, se comparado aos refrigerantes HFC acima mencionados, alternativas HFC com maiores capacidades de refrigeração para aplicações particulares devem ser adicionadas, porém, a lista dos potenciais candidatos é restrita. O R-32 com seu relativo baixo potencial de aquecimento global (*GWP*) é um possível candidato, mas um aspecto negativo de sua utilização é sua inflamabilidade (A2L), sendo que, quando adicionado em largas proporções visando limitar o *GWP* a valores < 500, fazem com que a mistura permaneça moderadamente inflamável (grupo de segurança A2L).

Por outro lado, quando formula-se um *blend* não inflamável, uma relativa alta proporção de flúor nos refrigerantes que constituem essa mistura é necessária, permitindo-se, assim, que a inflamabilidade deste seja suprimida. Uma desvantagem aqui presente é o alto *GWP* dessas substâncias, o que leva à conclusão de que alternativas não inflamáveis para o R-22/R-407C e R-404A/R-507A apresentam *GWP*<sub>100</sub> de 1000 a 1300. Comparado ao R-404A/R-507A, isso significa uma redução significativa de até 1/3.

Para o R-410a, não há alternativa não inflamável no horizonte pois isso requer uma alta proporção de R-32 para que a capacidade volumétrica de refrigeração seja alcançada.

Todas as opções de *blends* acima descritos demonstram maior ou menor *glide* de temperatura devido à significativa diferença entre as temperaturas de ebulição. O mesmo critério aplica-se no contexto com o R-407C.

Além disso, a temperatura de descarga do gás no R-404A/R507A apresenta-se consideravelmente maior às correspondentes misturas HFC.

Entretanto, variações de misturas foram inicialmente desenvolvidas pela *DuPont* e pela *Honeywell* e já estão sendo testadas em diferentes projetos. Dentre estas, estão os seguintes refrigerantes que são designados pelos seus nomes comerciais:

Refrigerante Atual	Alternativa DuPont	Alternativa Honeywell
<b>Alternativas não inflamáveis (GWP <math>\geq</math> 1000)</b>		
R-22/R-407C	*	N-20 (A1)
R-404A/507A	DR-33 (A1)	N-40 (A1)
<b>Alternativas não inflamáveis (GWP &lt; 500)</b>		
R-22/R-407C	DR-3 (A2L)	L-20 (A2L)
R-404A/507A	DR-7 (A2L)	L-40 (A2L)
R-410A	DR-5 (A2L)	L-41 (A2L)

\*Não publicado

Para o teste dos fluidos de baixa *GWP* a AHRI (EUA), iniciou-se o programa de testes internacionais denominado *AREP* (Programa de Avaliação de Refrigerantes Alternativos). Nesse contexto de desenvolvimento adicional, os produtos de outros fabricantes (Arkema, Mexichem, e outras), bem como refrigerantes livres de halogênios, estão sendo investigados e avaliados. Portanto, no ponto de vista da *AREP*, não existe uma completa avaliação sobre a adequação e estabilidade química dos vários produtos ainda.

## Refrigerantes livres de Halogênios

### NH<sub>3</sub> (amônia) como Refrigerante Alternativo

O refrigerante NH<sub>3</sub> é utilizado há mais de um século em indústrias/plantas de refrigeração e possui nenhum potencial de degradação da camada da ozônio e de aquecimento global direto. Sua eficiência é, pelo menos, tão boa quanto ao R-22 e, em algumas áreas, é até mesmo mais favorável; além de possuir um preço incomparavelmente melhor. Em resumo, ela então pode ser o substituto ideal e otimizado para o R-22 ou uma alternativa para os HFCs?! A amônia de fato possui características positivas que podem ser principalmente exploradas em largas plantas de refrigeração. Infelizmente, existem alguns aspectos negativos que restringem sua utilização em áreas comerciais e geralmente requerem custos e/ou desenvolvimentos técnicos.

Uma desvantagem da utilização deste refrigerante é o alto expoente isentrópico (NH<sub>3</sub>=1.31 / R-22 = 1.19 / R-134a = 1.1), o que resulta em uma temperatura de descarga que é significativamente maior do que o

R-22. Compressores de estágio simples são sujeitos a algumas restrições quando trabalham com temperaturas por volta de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

A questão dos lubrificantes adequados também não é satisfatoriamente resolvida para pequenas plantas em algumas aplicações. Os óleos utilizados anteriormente não eram solúveis com o refrigerante, portanto, eles deveriam ser separados com complexas tecnologias e sérias limitações de uso de evaporadores de expansão direta devido à deteriorização durante a troca de calor.

Demandas especiais são necessárias para estabilidade térmica dos lubrificantes devido à alta temperatura de descarga do gás. Isso é especialmente válido quando a operação automática é considerada onde o óleo deve permanecer durante anos no circuito sem perder nenhuma de suas características iniciais, mantendo a lubrificação e protegendo os componentes do sistema.

O  $\text{NH}_3$  possui uma extraordinária alta diferença de entalpia e, como resultado, uma relativa baixa circulação de fluxo de massa (aproximadamente de 13 a 15%, se comparado ao R-22). Essa característica é favorável para largas plantas, tornando-a desfavorável quando utilizada em plantas de pequena capacidade pois dificulta a regulação da injeção do refrigerante no sistema.

Um outro critério que deve ser considerado é a ação corrosiva sobre o cobre contido nos componentes, que em conjunto com todas as tubulações, devem ser constituídas de aço. Além disso, o desenvolvimento de rolamentos resistentes à amônia é necessária. Outra dificuldade surge da condutividade elétrica do refrigerante quando submetido à altos teores de umidade. Características adicionais, incluindo toxicidade e inflamabilidade, que requerem medidas especiais de segurança para a construção e operação dessa plantas, devem ser consideradas.

## **Design Resultante e Critérios de Construção**

Baseado no atual estado de tecnologia, os sistemas industriais de  $\text{NH}_3$  demandam uma total diferença na tecnologia da planta, quando comparada às plantas usuais.

Devido à insolubilidade com o óleo lubrificante e às características específicas do refrigerante, os separadores de óleo e evaporadores inundados com gravidade ou bomba de circulação são geralmente empregados nestas aplicações. Por causa do perigo ao público e ao produto a ser refrigerado, o evaporador geralmente não pode ser instalado diretamente no espaço a ser resfriado. Assim, o transporte de calor deve ser realizado através de um segundo sistema de refrigeração.

Compressores de dois estágios ou parafuso com *coolers* corretamente dimensionados devem ser utilizados em médias temperaturas devido ao seu comportamento térmico desfavorável.

Linhas refrigerantes, trocadores de calor e acessórios devem ser feitos de aço, bem como as tubulações estão sujeitas à análise por um inspetor devidamente certificado. Além disso, todas as medidas de segurança correspondentes e locais adequados para as máquinas são necessários conforme tamanho da planta e da carga do fluido refrigerante que circula pelo sistema.

O compressor de refrigeração é geralmente aberto, ou seja, o acionamento do motor é um componente separado. Essas medidas significam um aumento no custo envolvido para plantas que trabalham com  $\text{NH}_3$ , especialmente para aquelas de média e baixa capacidade.

Esforços estão sendo realizados com objetivo de desenvolver simples sistemas que possam ser utilizados na área comercial. Uma parte desses programas de pesquisa lida com os lubrificantes solúveis, com o

objetivo de aumentar a circulação de óleo no sistema. Alguns métodos simplificados para retorno automático dos óleos não solúveis já começaram a ser examinados como uma alternativa.

**A BITZER está fortemente envolvida nesses projetos e possui um largo número de compressores operando. A experiência revela até agora que sistemas que operam com alguns óleos solúveis são difíceis de controlar. O conteúdo de umidade no sistema possui uma importante influência na estabilidade química do circuito e desgastam o compressor. Além disso, uma alta diluição do refrigerante no óleo (água no sistema, temperatura insuficiente do óleo) lideram como causas do forte desgaste do rolamento e outras partes móveis do compressor. Isso é causado devido à enorme mudança de volume quando a amônia evapora nas áreas lubrificadas. Esses desenvolvimentos estão sendo aplicados e utilizados em diversos programas existentes. A ênfase é também uma solução alternativa para lubrificantes não solúveis.**

Além disso, vários fabricantes desenvolveram evaporadores especiais nos quais a carga do fluido refrigerante pode ser significativamente reduzida.

Em adição a isso, existem também soluções para a vedação dessas plantas de amônia. Isso lida com a utilização de pequenos *chillers* líquidos (carga abaixo de 50kg) instalados em um container fechado e parcialmente integrado a um reservatório de água para absorção de NH<sub>3</sub> em caso de vazamento. Esse tipo de unidade compacta pode ser instalada em áreas que foram previamente reservadas para plantas com refrigerantes halogenados devido aos requisitos de segurança necessários.

Ainda é muito cedo para um julgamento final no que diz respeito à utilização de sistemas compactos com NH<sub>3</sub> no lugar de plantas que utilizam refrigerantes HFC com tecnologia convencional. Do ponto de vista técnico e pressupondo um preço aceitável, é provável que esta tecnologia se torne disponível.

**O programa de produção da BITZER atualmente inclui uma extensiva seleção de compressores para NH<sub>3</sub> otimizados para vários tipos de lubrificante:**

- **Compressor aberto com alternador de estágio simples (deslocamento de 19 a 153m<sup>3</sup> com 1450 rpm) para ar-condicionado, a temperaturas médias**
- **Compressor aberto *screw* (deslocamento de 84 a 535m<sup>3</sup>/h – com operação paralela a 3200 m<sup>3</sup>/h – com 2900 rpm ) para ar-condicionado, a baixas e médias temperaturas**

**Opções para baixas temperatura de resfriamento:**

- **Operação com estágio simples**
- **Operação econômica**
- **Operação *Booster***

## **Conversão de plantas existentes**

O refrigerante NH<sub>3</sub> não é adequado para a conversão de plantas existentes (H)CFC, pois ela deve ser completamente construída com novos componentes.