

Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado

Artigos Técnicos

Os temas aqui abordados foram apresentados durante o Seminário “Uso de Refrigerantes Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado”, realizado em São Paulo, no período de 21 e 22 de novembro de 2007.

Tanto o Seminário quanto esta publicação está inserida no Plano Nacional de Eliminação de CFCs, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD e pela Agência Alemã de Cooperação Técnica – GTZ.

1111

Ministério do Meio Ambiente – MMA

Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado – Publicação Técnica. 2008.

348 p.

1. Desenvolvimento urbano – Brasil. 2. Espaço metropolitano – Brasil. 3. Políticas Públicas.

CDI

Sumário

- 1 | **Aplicações de CO₂ como fluido refrigerante no setor de refrigeração industrial**
LEONILTON TOMAZ CLETO
- 17 | **Aplicações de amônia como fluido refrigerante no setor de ar condicionado e refrigeração industrial**
LEONILTON TOMAZ CLETO
- 35 | **CO₂ (R-744) em equipamentos de refrigeração comercial**
CLÁUDIO MELO | CHRISTIAN J. L. HERMES
- 45 | **Novas soluções para fluidos secundários em refrigeração**
FRANK CHAVIANO PRUZAESKY | EPIFANIO MAMANI TICONA | SERGIO LEAL BRAGA | JOSÉ ALBERTO R. PARISE
- 63 | **Uso de fluidos refrigerantes hidrocarbonetos – Estado atual e tendências**
ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO
- 79 | **Uso de hidrocarbonetos refrigerantes em aplicações residenciais**
JOÃO M. D. PIMENTA
- 103 | **Aplicações do CO₂ no setor automotivo**
ENIO PEDONE BANDARRA FILHO
- 115 | **Experiência da União Européia em Refrigerantes Naturais – Status e Tendências**
BERND KALTENBRUNNER
- 121 | **Instalações de frio alimentar em supermercados com a utilização de amônia**
ALEXANDRE PRESOTTO JR. | CARLOS GUILHERME SÜFFERT
- 129 | **Aplicações do CO₂ no setor de refrigeração comercial para supermercados**
ALESSANDRO DA SILVA
- 155 | **Pesquisa e desenvolvimento para uso de refrigerantes naturais**
P. HRNJAK



Prefácio

A presente publicação reflete os resultados de um seminário pioneiro, que abriu uma discussão técnica com os principais atores do Setor de Refrigeração e Ar Condicionado, sobre o uso dos fluidos naturais como alternativa aos CFCs e HCFCs. Tal discussão é especialmente oportuna no momento em que vivemos, onde o uso dos CFCs está em seus momentos finais e o abandono acelerado dos HCFCs é uma realidade.

Em setembro de 2007, quando se comemorava os 20 anos de sucessos do Protocolo de Montreal, uma nova decisão histórica foi tomada pelo conjunto de países signatários. Com o fim dos CFCs, previsto para 2010, decidiu-se pelo início do processo de substituição dos HCFCs já em 2013, antecipando em dez anos o prazo previsto pelo Protocolo de Montreal para o abandono destes gases. Além dos benefícios para a recomposição da Camada de Ozônio, objeto do Protocolo, a medida traz também um enorme benefício para o regime climático, dado o acentuado Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos HCFCs.

Esta intenção está explícita na Decisão XIX/6, quando em seu Ponto 6 encoraja as Partes a “promover a seleção de alternativas aos HCFCs que minimizem os impactos ambientais, em particular os impactos no clima, bem, como considerem os aspectos de saúde, segurança e viabilidade econômica”. Também em seu Ponto 11 orienta o Comitê Executivo, ao examinar o financiamento de projetos por parte dos países, a priorizar “Substitutos e alternativas que minimizem os impactos no meio ambiente, incluindo ao clima, levando em consideração o Potencial de Aquecimento Global, consumo de energia e outros fatores relevantes.”

O ganho para o regime climático, explicitado com tanta ênfase se justifica pela contribuição dada pelo Protocolo de Montreal para a mitigação da emissão dos gases de efeito estufa. Ao longo de seus 20 anos, a eliminação dos CFCs contribuiu significativamente para o que se evitasse a emissão de bilhões de toneladas de CO₂ equivalente e pode continuar a fazê-lo com uma relação custo-benefício das mais favoráveis. Somente no Brasil, a antecipação do prazo de eliminação dos CFCs determinada pela Resolução 267/00 do Conama evitou o consumo de 36,5 mil toneladas PDO de CFCs, o que equivale, quanto ao seu efeito para o aquecimento global, a 360 milhões de toneladas de CO₂. A título de comparação, o Proálcool, o mais bem sucedido programa de combustíveis renováveis do mundo, evitou de 1975 a 2005 a emissão de 650 milhões de toneladas de CO₂. Antecipar os prazos de abandono dos HCFCs significará novos ganhos. Ainda no caso do Brasil, pode-se estimar que a Decisão XIX/6 evitará, em relação ao cronograma anterior do Protocolo de Montreal, o consumo de cerca de 750 mil toneladas de HCFCs. Ponderando-se consumo proporcional de cada uma das substâncias e seu respectivo GWP, isso equivale a cerca de 1 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente.

Vale lembrar que a substituição dos HCFCs se dará com a introdução de outros gases. Caso o HCFC-22 venha a ser substituído predominantemente pelo HFC-134a, uma das alternativas mais consolidadas no mercado, grande parte deste ganho seria anulada, já que o GWP das duas substâncias são similares.

Vem daí a importância desta publicação, que aponta aspectos relevantes do uso dos chamados fluidos naturais, que poderão ser adotados em substituição dos HCFCs preservando os ganhos ensejados pela Decisão XIX/6,

ou dos CFCs, por meio da substituição de equipamentos ou retrofit. A pouca discussão que predominou até o momento sobre o tema colaborou para o surgimento de preocupações, por vezes infundadas, sobre a segurança, eficácia ou economicidade dos fluidos naturais. São aspectos a serem tratados com a devida seriedade e fundamentação. Nisso, a experiência internacional, a fundamentação científica e a experiência prática, devem ser levadas em consideração e são abordadas nos diversos artigos desta publicação. Como resultado do seminário, fica clara a tendência ao crescimento do uso dos fluidos naturais, alavancado por medidas de incentivo adotadas em alguns países e pelos avanços produzidos por novas tecnologias já disponíveis no mercado. Nos próximos anos, diversas empresas terão que tomar decisões quanto a novos equipamentos a serem produzidos ou comprados. Estes equipamentos por vezes permanecem em atividade por décadas e as opções a serem adotadas terão que levar em consideração as tendências para o futuro. O debate sobre novas tecnologias e produtos será intenso nos próximos anos, mas a aposta que deve ser feita é na adoção de gases que além de não afetar a Camada de Ozônio, tenham também um baixo potencial de aquecimento global.

Compete ao Ministério do Meio Ambiente, como coordenador do Prozon, o Comitê Executivo Interministerial para a Proteção da Camada de Ozônio, a formulação do Programa Nacional de Eliminação dos HCFCs - PNH – que internalizará o novo cronograma no Brasil. Este será elaborado nos próximos meses, em consonância com as decisões a serem adotadas pelas Partes do Protocolo. Apesar de não estar ainda formulado, pode-se afirmar que parte da missão do PNH será criar as condições para que a adoção de opções por parte das empresas propicie ganhos tecnológicos, competitividade e, cumprimento das obrigações internacionais do Brasil perante o Protocolo, com os benefícios ambientais daí advindos. Para isso, a difusão de informações é fundamental. Esperamos que esta publicação cumpra parte deste papel.

Finalmente, gostaríamos de agradecer ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD, a Agência de Cooperação Técnica-GTZ, Associação Nacional dos Profissionais de Refrigeração e Ar condicionado – ANPRAC – e a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento - ABRAVA, pela parceria na organização do evento e à Universidade Mauá, que nos hospedou gentilmente durante estes dias.

Ruy de Góes Leite de Barros
Diretor do Departamento de Mudanças Climáticas
Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental
Ministério do Meio Ambiente

Aplicações de CO₂ como fluido refrigerante no setor de refrigeração industrial

LEONILTON TOMAZ CLETO

Yawatz Engenharia Ltda.

Rua Agostinho Teixeira de Lima, 215 – São Paulo – SP – 04826-230 – Brasil

RESUMO

Com o ressurgimento do CO₂ (dióxido de carbono) como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração, foram desenvolvidas novas tecnologias e aplicações nos vários setores do mercado de refrigeração para tornar o seu uso viável. Sendo um refrigerante natural, o CO₂ se apresenta como alternativa promissora aos refrigerantes sintéticos em várias aplicações de sistemas de refrigeração. O presente artigo explora as aplicações de CO₂ no setor de refrigeração industrial, que surge também como uma alternativa para a Amônia. A Amônia, apesar de ser um outro refrigerante natural, possui um índice de toxicidade mais elevado e normalmente, em aplicações de baixa temperatura, requer uma carga muito grande. Nos sistemas aqui apresentados, com a introdução de ciclos em cascata, utilizando CO₂ e Amônia, a redução de carga de Amônia pode chegar em até 97%, comparando com sistemas convencionais. Além da redução de carga de Amônia, são analisados outros aspectos dos sistemas com CO₂ que incluem a eficiência energética, a redução dos diâmetros das linhas, alguns cuidados operacionais a as tendências da sua utilização no setor nos próximos anos.

1 Introdução

O CO₂ (dióxido de carbono – R-744) foi um dos primeiros fluidos refrigerantes aplicados para sistemas de refrigeração e foi amplamente utilizado até os meados da década de 30 do século XX. Com o surgimento dos fluidos CFCs e HCFCs, o CO₂ foi perdendo mercado até ser praticamente extinto no início dos anos 60. Com os problemas ambientais e o estabelecimento dos Protocolos de Montreal e de Kyoto, o CO₂ ressurge como uma alternativa promissora a ser utilizada em muitas aplicações, nos vários setores de refrigeração.

No início dos anos 90, os livros antigos sobre tecnologia de refrigeração, com várias aplicações utilizando CO₂, foram reabertos. Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, novos conceitos surgiram propiciando assim o renascimento do CO₂ como fluido refrigerante natural. Um dos principais responsáveis pelo “reavivamento” do CO₂ foi o Prof. Gustav Lorentzen (1915-1995) do Instituto de Tecnologia da Noruega (NTH), em Trondheim, que propôs e desenvolveu com sua equipe várias aplicações e sistemas utilizando CO₂ como fluido refrigerante [1]. Já no final dos anos 90, surgem nos mais variados setores da refrigeração, várias aplicações comerciais utilizando CO₂ como fluido refrigerante, seja em sistemas com ciclos sub-críticos, para baixas temperaturas (abaixo de -30 °C e até -55 °C), em cascata com outro fluido refrigerante, seja em sistemas com ciclos transcíticos para médias temperaturas (acima de -15 °C), sistemas de ar condicionado (principalmente no setor automotivo) e bombas de calor.

O setor de refrigeração industrial abrange os grandes sistemas e normalmente se refere às aplicações na indústria alimentícia e na indústria de bebidas, onde o principal fluido refrigerante é a Amônia (R-717). Aqui são ainda incluídas as aplicações nas indústrias químicas e petroquímicas, que utilizam principalmente os fluidos halogenados (HFCs e, no Brasil, ainda o HCFC R-22), além de Amônia e alguns hidrocarbonetos (R-1270, R-290 e misturas) e as aplicações de ar condicionado industrial (principalmente nas indústrias farmacêuticas, têxteis e automotivas), que utilizam principalmente os HFCs.

Apesar da Amônia e dos hidrocarbonetos serem parte do grupo de fluidos refrigerantes naturais (assim chamados por serem encontrados nos ciclos naturais na terra), ambos possuem algumas restrições que limitam o seu uso.

A Amônia, com suas excelentes características para o uso em sistemas de refrigeração, sofre muitas restrições de sua aplicação por ser um refrigerante com maior índice de toxicidade que a maioria dos HFCs. Em vários países, inclusive o Brasil, há legislações que requerem uma série de cuidados desde o projeto até a operação de um sistema de refrigeração que,

dependendo da carga de refrigerante no sistema e do local onde o mesmo será instalado, podem até inviabilizar a sua aplicação. Um exemplo recente é o de várias instalações de refrigeração com grandes cargas de Amônia, localizadas em áreas densamente povoadas, que estão mudando para áreas industriais isoladas, onde o impacto de um grande vazamento de Amônia se torna bem menor. Nos últimos 15 anos, só na cidade de São Paulo, cerca de 15 instalações, que somavam uma carga de mais de 600 ton de Amônia, foram transferidas para áreas isoladas, em outras localidades [2].

Os hidrocarbonetos possuem um alto índice de inflamabilidade e quando utilizados em grandes sistemas de refrigeração, os equipamentos da área requerem classificações específicas quanto à explosividade. Em instalações químicas e petroquímicas, muitas vezes os próprios produtos da manufatura são inflamáveis, o que torna a área classificada independente do tipo de refrigerante utilizado. Porém, se a carga de refrigerante hidrocarboneto for muito grande, o nível de risco da área será maior.

Nestes cenários, em sistemas com temperaturas de operação entre -30 °C e -55 °C surge a alternativa de um sistema cascata, com CO₂ em ciclo sub-crítico para baixa temperatura e Amônia ou hidrocarboneto no ciclo com a rejeição de calor final para a atmosfera, estes em equipamentos compactos, com cargas extremamente reduzidas.

Além disso, para sistemas de refrigeração por Amônia, com vários níveis de temperaturas de operação (ex.: para sistemas de duplo estágio, com produtos congelados a -40 °C e resfriados a -10 °C), o CO₂ pode ser utilizado como fluido secundário bombeado, utilizando calor latente, para o sistema de temperatura intermediária (de -15 °C a 0 °C), reduzindo ainda mais a carga de Amônia no sistema.

2 Desenvolvimento

2.1 Sistemas com Ciclo Cascata – CO₂ / Amônia (R-744/ R-717)

O sistema com Ciclo Cascata constitui-se de dois (ou mais) ciclos de refrigeração independentes, cada um com o seu próprio fluido refrigerante (no caso CO₂ e Amônia), porém com um trocador de calor comum aos dois ciclos. O trocador de calor “Cascata” tem a função de

condensador no ciclo de baixa temperatura e a função de evaporador no ciclo de alta temperatura. Os sistemas com ciclo cascata normalmente são utilizados em aplicações onde não é possível retirar o calor do nível mais baixo de temperatura requerido (para resfriar o produto do processo) e rejeitá-lo para a atmosfera (através de condensador evaporativo, a água ou a ar), com a aplicação de um único fluido em um ciclo de compressão de vapor. Os sistemas cascatas são normalmente empregados em aplicações com temperaturas abaixo de -60 °C , pois fluidos como Amônia e alguns fluidos halogenados utilizados em ciclos convencionais (ex.: R-507, R-404A) possuem pressões de evaporação muito baixas e além disso, a eficiência do ciclo é muito baixa, mesmo considerando vários estágios de compressão. Por outro lado, fluidos com faixas de pressão adequadas para baixas temperaturas (ex.: R-23, R-170), possuem ponto crítico muito baixo, sendo necessário rejeitar o calor para um nível de temperatura bem abaixo da temperatura do ar externo (ao invés de um ciclo transcrito). Assim, para retirar o calor rejeitado no condensador do ciclo de baixa temperatura, utiliza-se um ciclo independente, com outro fluido, que opera com temperatura de evaporação abaixo da temperatura de condensação do ciclo de baixa temperatura e rejeita o calor para a atmosfera.

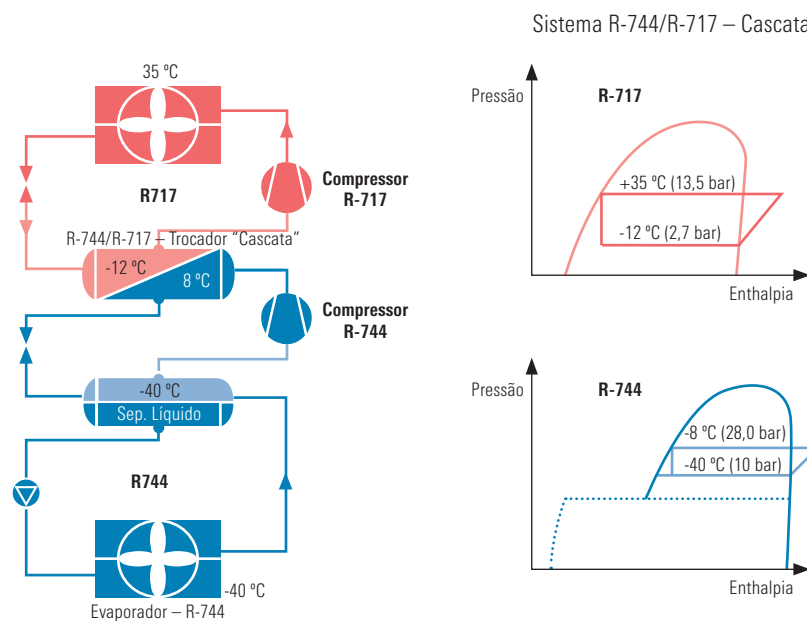


Figura 1 – Ciclo Cascata - CO_2 / Amônia ^[3]

No caso do sistema cascata com CO₂, as temperaturas de evaporação no lado de baixa variam de -55 °C a -30 °C (o ponto triplo do CO₂ ocorre a -56.6 °C e, acima de -30 °C, o sistema se torna ineficiente quando comparado com sistemas convencionais) e as temperaturas de condensação variam desde -18 °C (para sistemas com temperatura de evaporação em torno de -55 °C) até 0 °C (para temperaturas de evaporação em torno de -30 °C), com temperatura de condensação limite de operação em torno de +5 °C (em função da pressão de projeto de 40 bar para os compressores de CO₂ disponíveis no mercado). De fato, com temperaturas de condensação acima de -5 °C para o CO₂, o sistema se mostra cada vez mais ineficiente, quando comparado com sistemas convencionais.

Como mencionado, uma das maiores vantagens da utilização de CO₂ em aplicações de refrigeração se deve à redução da carga de um fluido que apresenta maiores restrições de uso (Amônia ou hidrocarbonetos), mas é essencial que o sistema com CO₂ apresente um nível de eficiência energética (COP) igual ou melhor que um sistema convencional para a mesma aplicação.

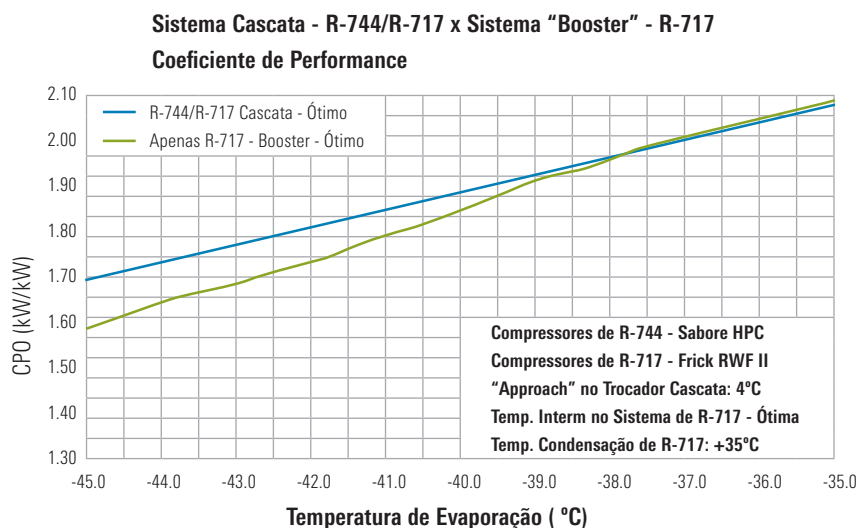


Figura 2 – Comparativo de Sistema Cascata utilizando CO₂ / Amônia, com Sistema Convencional de Duplo-Estágio (“Booster”) utilizando apenas Amônia

O gráfico da Fig. 02 mostra os resultados de COP de dois sistemas reais – ciclo cascata CO₂/Amônia e ciclo em duplo estágio (em “Booster”) com Amônia – utilizando compressores do mesmo fabricante, variando as temperaturas de evaporação e mantendo-se a temperatura de condensação de Amônia constante (nos dois ciclos) em +35 °C – típica para aplicações de refrigeração industrial no Brasil. Nos dois casos, variou-se as temperaturas intermediárias

(temperatura de condensação do CO_2 e a temperatura intermediária do ciclo “Booster” de R-717) de modo a se obter o melhor COP para cada temperatura de evaporação. A partir do gráfico pode-se observar que para temperaturas de evaporação abaixo de $-38\text{ }^\circ\text{C}$, o sistema cascata passa a ser mais eficiente que o sistema convencional utilizando Amônia. Para a temperatura de evaporação de $-45\text{ }^\circ\text{C}$ o COP do sistema com CO_2 já é cerca de 7% melhor que o sistema convencional com Amônia e em $-50\text{ }^\circ\text{C}$ a diferença chega a 14%. Acima de $-38\text{ }^\circ\text{C}$ e até cerca de $-30\text{ }^\circ\text{C}$ os sistemas apresentam resultados muito próximos, com o sistema convencional com Amônia até 1% mais eficiente que o sistema com CO_2 .

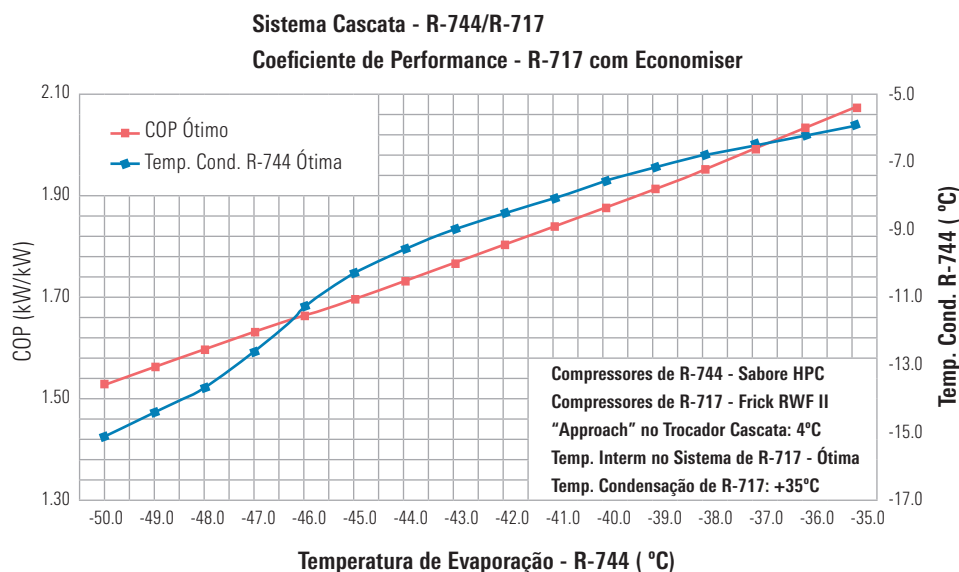


Figura 3 – Verificação da Temperatura de Condensação de CO_2 Ótima (para o COP Ótimo), em Função da Temperatura de Evaporação em Sistema Cascata utilizando CO_2 /Amônia

A Fig.03 indica a curva da temperatura de condensação ótima para o melhor COP do ciclo cascata CO_2 /Amônia, em função da temperatura de evaporação do CO_2 , para a temperatura de condensação de Amônia constante em $+35\text{ }^\circ\text{C}$. A Fig.04 indica ainda que, na faixa de temperatura de evaporação de $-38\text{ }^\circ\text{C}$ a $-47\text{ }^\circ\text{C}$, a diferença de COP é muito pequena quando se varia a temperatura de condensação do CO_2 entre $-5\text{ }^\circ\text{C}$ e $-15\text{ }^\circ\text{C}$, o que permite uma certa flexibilidade para definição da temperatura intermediária, caso o sistema envolva um nível de temperatura intermediária de processo (ex.: temperatura para atender carga de produtos resfriados).

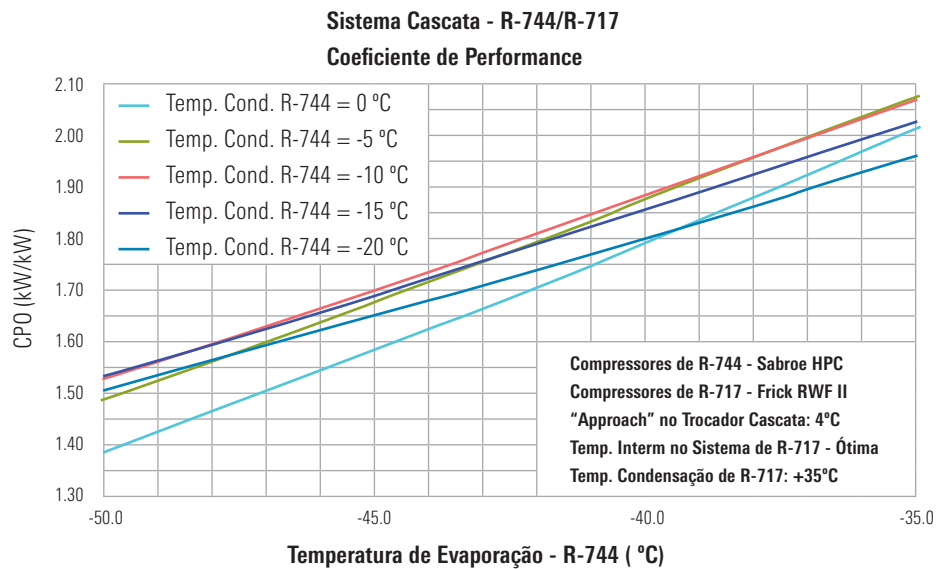


Figura 4 – Curvas de COP de um Sistema Cascata utilizando CO₂ / Amônia, em Função da Temperatura de Evaporação do CO₂, para várias temperaturas de condensação de CO₂

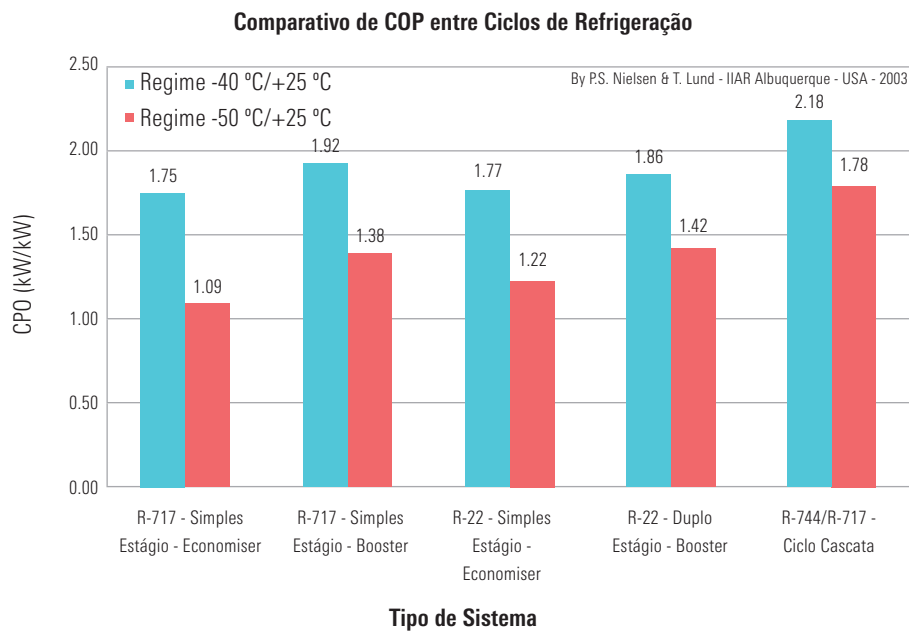
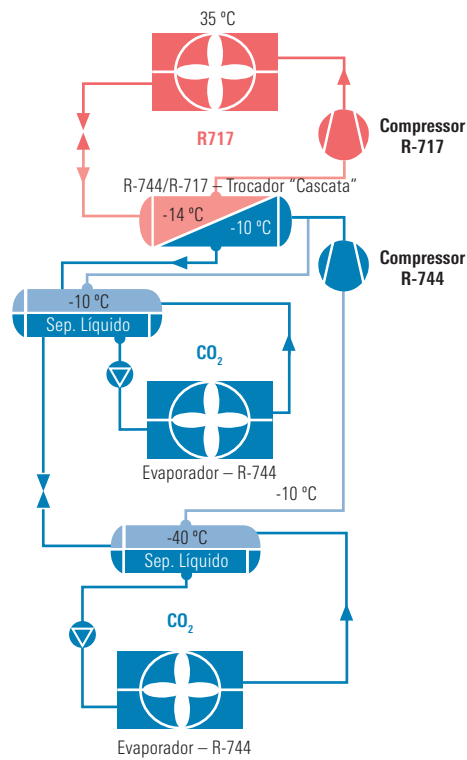


Figura 05 – Comparativo de COP entre Sistemas de Refrigeração ^[4]

A Fig.05 indica ainda um comparativo de COP entre vários sistemas de refrigeração para temperaturas de evaporação de -40 °C e -50 °C, com temperatura de condensação de +25 °C (para aplicações navais), onde se verifica uma vantagem ainda maior do sistema com CO₂ em relação aos outros sistemas.

2.2 Sistemas com CO₂ Operando como Fluido Secundário



Sistema Cascata R-744/R-717
Com R-744 Bombeado no Intermediário

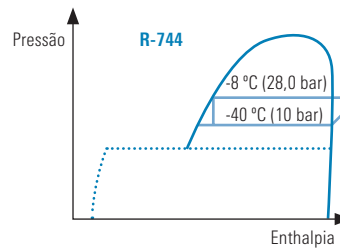
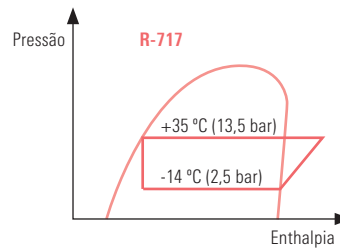


Figura 06 – Ciclo Cascata CO₂ / Amônia, com CO₂ Circulando no Regime Intermediário como Fluido Secundário ^{[3][5]}

Outra alternativa, desenvolvida por S. Forbes Pearson^[5] em uma instalação frigorífica na Escócia, é mostrada na Fig. 05, onde o CO₂ condensado no trocador de calor Cascata (no caso, a -10 °C) segue para um separador de líquido onde é bombeado para circulação como fluido

secundário para resfriamento de câmaras de estocagem com produtos resfriados. O retorno de líquido+ vapor é recondensado no trocador de calor Cascata sem passar pelo compressor. O restante do ciclo permanece idêntico ao da Fig. 01. Neste caso, haverá uma redução ainda maior da carga de Amônia no sistema, porém quando se compara este sistema com um sistema convencional “Booster” com Amônia (no caso operando em -40 °C/-10 °C/+35 °C), haverá uma redução de COP, uma vez que a capacidade do ciclo de Amônia (operando em -14 °C/+35 °C) deve aumentar.

Dependendo do sistema, esta perda de COP pode ser desprezível, em função da relação reduzida de perda de temperatura de saturação sobre a perda de pressão do circuito de CO₂ – relação $\Delta T/\Delta P$ (0.55 K/bar para o CO₂ contra 8.46 K/bar para a Amônia na temperatura de -10 °C), ou seja, em sistemas com CO₂ a temperatura de saturação de CO₂ pode chegar até -7 °C mantendo a temperatura de evaporação de Amônia no trocador de calor Cascata em torno de -11 °C.

2.3 Aspectos de Projeto e Operação

2.3.1 Linhas de Refrigeração

A seguir uma análise de linhas de refrigeração do sistema onde foram utilizados os dados da tabela abaixo, como base de cálculo, para comparação nas Fig. 07 e 08 dos diâmetros resultantes para sistemas com R-134a, Amônia e CO₂. Em média, os diâmetros das linhas de refrigeração de um sistema com CO₂ são 2.5 vezes menor que um sistema com Amônia e 7 vezes menor que um sistema com R-134a.

Dados para Cálculo	
Capacidade	250 kW
“Perda de Carga” na Linha de Sucção: ΔT	0.8 K
“Perda de Carga” na Linha de de Retorno de Vapor “Úmido”: ΔT	0.8 K
Taxa de Recirculação (Bomba)	3:1
Velocidade na Linha de Líquido	0.8 m/s
Comprimento Equivalente	50 m
Temperatura de Evaporação	-40 °C
Temperatura de Condensação	-15 °C

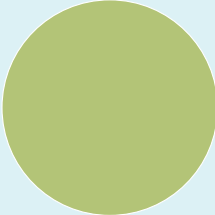





Refrigerante		R134a	R717	R744
Linha de Sucção	P (bar)	0.0212	0.0303	0.2930
	Velocidade (m/s)	20.4	37.5	15.4
	Diâmetro			
	mm	168	102	53
Linha de Líquido	Diâmetro			
	mm	37	21	35

Figura 07 – Comparação de Diâmetros de Linhas de Sucção e Linha de Líquido ^[3]

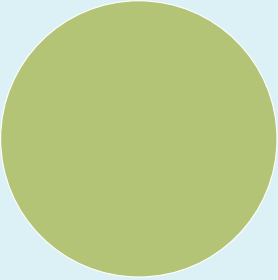
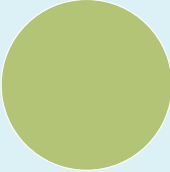




Refrigerante		R134a	R717	R744
Linha de Retorno (Líquido + Vapor)	P (bar)	0.0212	0.0303	0.2930
	Velocidade (m/s)	11.0	20.2	8.2
	Diâmetro			
	mm	215	133	69
Linha de Líquido Bombeado (Baixa)	Diâmetro			
	mm	61	36	58

Figura 8 – Comparação de Diâmetros de Linhas de Retorno de Vapor Úmido e Linha de Líquido Bombeado (no Lado de Baixa Temperatura) ^[3]

2.3.2 Sistemas de Degelo

Dentre algumas concepções de sistemas de degelo para ciclos com CO_2 , as principais são:

- ∴ compressores pequenos em série com a descarga do compressor principal de CO_2 (como ilustrado na Fig. 09),
- ∴ bombas de CO_2 associadas com sistema de aquecimento (conforme desenvolvido por F. Pearson ^[5]),
- ∴ degelo com água ou degelo com resistência elétrica (mais comuns em aplicações para supermercado).

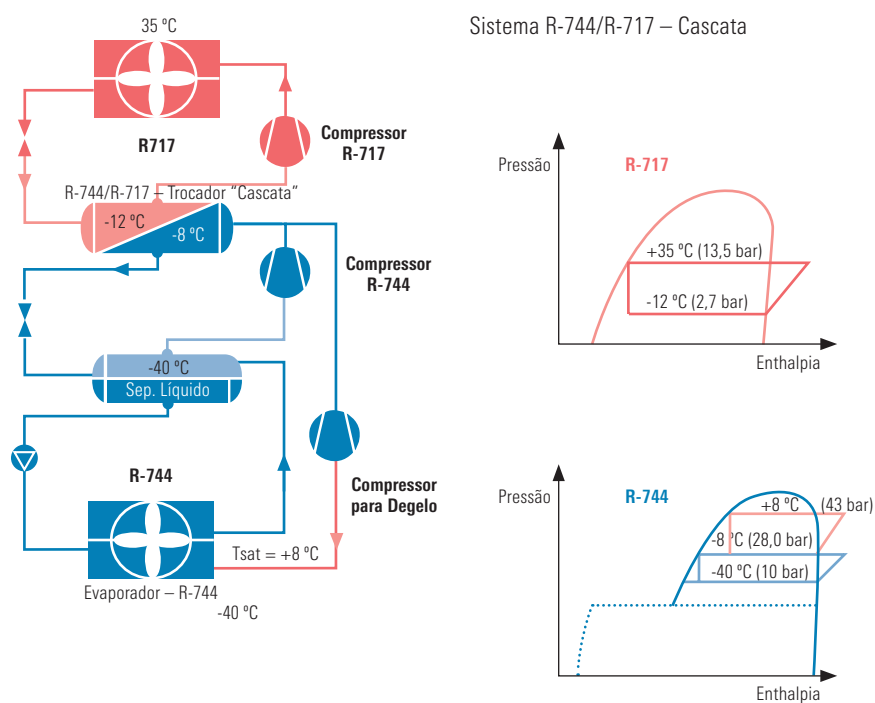


Figura 9 – Ciclo Cascata CO_2 / Amônia, com Sistema de Degelo Utilizando Compressor de CO_2 Auxiliar, em Série com o Compressor Principal ^[3]

2.3.3 Contaminação com Água

Água em sistemas de refrigeração com CO_2 é um aspecto que requer uma abordagem diferente quando comparado com Amônia. Em sistemas com Amônia o óleo é periodicamente renovado, há purga frequente de incondensáveis e vários sistemas possuem eliminadores de água. Estes cuidados

são aplicados para evitar a degradação do óleo e da Amônia e a formação de ácidos graxos. Comparado com Amônia, o CO₂ é menos suscetível a problemas de contaminação, porém se ocorrer a presença de água (umidade) no circuito de refrigeração poderá haver alguns problemas, sendo que o principal é a saturação da água na mistura com o CO₂ que, se ocorrer abaixo de 0 °C haverá congelamento, podendo comprometer principalmente o funcionamento de elementos de controle. Assim, é extremamente necessário o uso de filtros secadores nas linhas de CO₂ líquido, para manter a concentração de água em um nível aceitável, que é bem menor que os outros refrigerantes.

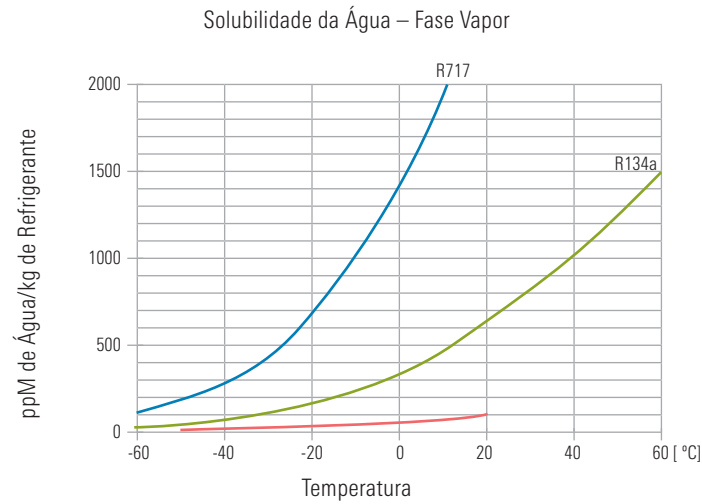


Figura 10 – Curvas de Solubilidade da Água na fase vapor de CO₂, R-717 e R-134a [3]

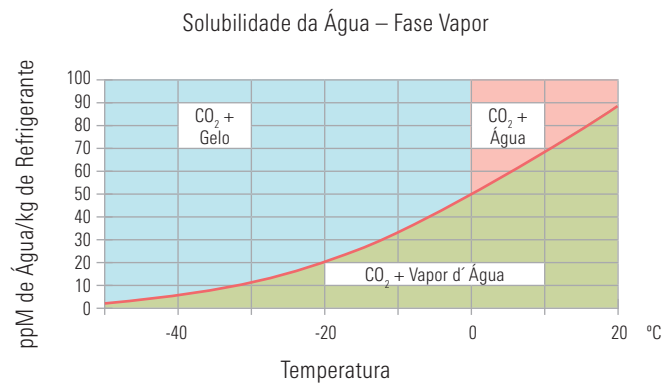


Figura 11 – Curva de Solubilidade da Água na fase vapor de CO₂ [3]

A Fig. 10 indica as curvas de solubilidade da água na fase vapor do CO₂, da Amônia e do R-134a, em função da temperatura. Diferentemente da formação da mistura “Aqua-Amônia”, a Fig. 11 indica que acima do ponto de saturação ocorre a formação de água (estado líquido) em temperaturas acima de 0 °C e gelo, para temperaturas do CO₂ abaixo de 0 °C. Além disso, pode haver formação de ácido carbônico, que pode trazer danos aos componentes do sistema (assim como a formação de ácidos graxos e compostos nitrosos podem danificar os sistemas de Amônia).

2.3.4 Válvulas de Segurança

A aplicação das válvulas de segurança em sistemas de CO₂ também requerem alguns cuidados:

- ∴ A válvula deverá ser descarregada diretamente para a atmosfera. As linhas de descarga das válvulas de segurança deverão ser montadas antes das válvulas, de modo que as válvulas de segurança sejam o último elemento do circuito. Como indicado na Fig. 12, dependendo da pressão de abertura da válvula de segurança, com a expansão do vapor até a pressão atmosférica, poderá haver formação de CO₂ sólido, pois o ponto triplo ocorre à pressão de 5.2 bar.
- ∴ Não é possível instalar válvulas de segurança ou elementos de alívio da fase líquida diretamente para a atmosfera. Nesta condição haverá uma grande formação de CO₂ sólido, como se verifica na Fig. 12. Neste caso, a descarga deverá ser feita para um vaso do sistema com menor pressão.
- ∴ As pressões de projeto recomendadas para sistemas em ciclos sub-críticos de CO₂ são 52 bar para o circuito de gás quente quando se utiliza compressor auxiliar de gás quente (até a válvula de injeção de gás quente, antes do evaporador); 40 bar para o circuito da pressão de condensação (compressor, linha de descarga, condensador, linha de líquido e vasos de pressão até a válvula de expansão); 25 bar para o circuito de baixa pressão (após a válvula de expansão e até a sucção do compressor).

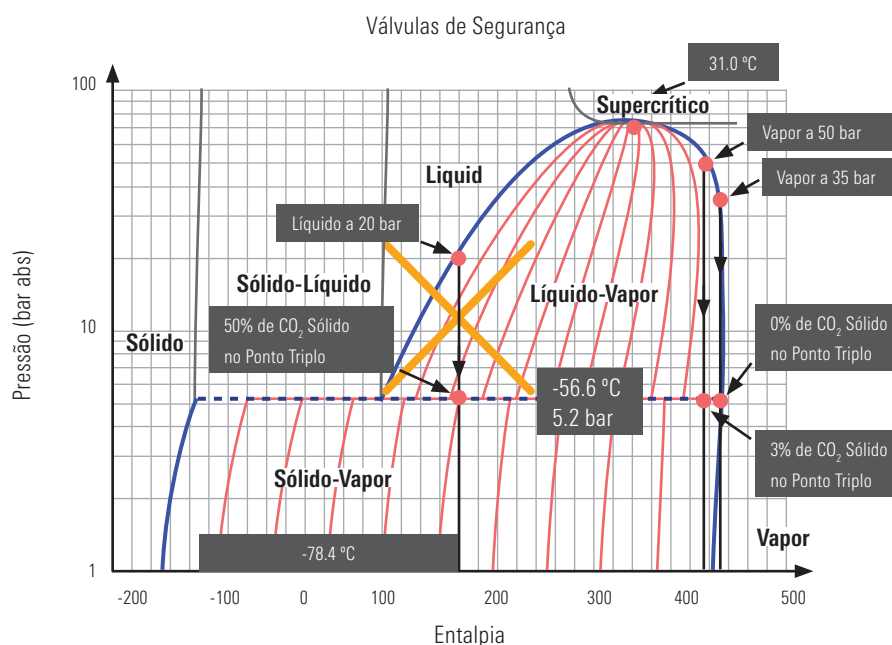


Fig. 12 – Expansão de CO₂ na Descarga de Válvulas de Segurança em Vários Pontos do Sistema de Refrigeração ^[3]

3 Conclusão

O objetivo deste artigo foi o de apresentar os aspectos mais relevantes de sistemas de refrigeração utilizando CO₂ como fluido refrigerante em aplicações do setor de refrigeração industrial.

O sistema mais utilizado até o presente é o ciclo cascata CO₂ / Amônia, que como vantagem inicial apresenta uma redução drástica na carga de Amônia no sistema.

Além disso, para sistemas operando com temperatura de evaporação abaixo de -38 °C, verifica-se melhores índices de COP quando comparados com sistemas convencionais de refrigeração por Amônia, sendo razoavelmente vantajoso com temperaturas abaixo de -45 °C.

Também foi apresentado uma variação do ciclo cascata que inclui o CO₂ operando como fluido secundário para temperaturas intermediárias (para atender cargas de produtos resfriados, por exemplo), o que propicia uma redução ainda maior da carga de Amônia em sistemas de duas temperaturas de trabalho. As perdas de eficiência podem ser minimizadas com otimização do projeto, valendo-se das vantagens da relação $\Delta T/\Delta P$ do CO₂.

Foram analisados aspectos de projeto envolvendo o dimensionamento de linhas de refrigeração, que em sistemas de CO₂ resultam em média uma redução de diâmetro de 2.5 vezes quando comparado com linhas de Amônia; sistemas de degelo; problemas relacionados à contaminação com água e a necessidade do uso de filtros secadores e, finalmente, a aplicação adequada das válvulas de segurança.

As perspectivas para crescimento do uso de CO₂ no setor de refrigeração industrial são muito boas, principalmente pelo fato de que na Europa, nos EUA e também no Brasil já existem restrições quanto ao uso de sistemas com grandes cargas de Amônia em determinadas localidades.

Quanto à tendência dos clientes optarem por esta solução, percebe-se que no Brasil ainda há uma certa relutância em mudar para o novo (quem será o primeiro?). No entanto, pode-se verificar que várias empresas ao redor do mundo estão adotando o ciclo cascata CO₂ / Amônia como solução final para sistemas com temperaturas abaixo de -40 °C.

4 Referências bibliográficas

Literatura:

Lorentzen, G. **Revival of Carbon Dioxide as Refrigerant**, *International Journal of Refrigeration* – 1994 Vol. 17 Number 5, pag. 292-301.

Cleto, L. T. **Levantamento de Inventário de Amônia das Instalações de Refrigeração Desativadas na Cidade de São Paulo** – Pesquisa pessoal – 2005.

Vestergaard, N. P. **CO₂ Refrigerant for Industrial Refrigeration** – Danfoss A/S – 2004.

Nielsen, P.S & Lund, T. **Introducing a New Ammonia/CO₂ Cascade Concept for Large Fishing Vessels**, IIR Annual Meeting – Albuquerque, USA – 2003.

Pearson, S. F. **Development of Improved Secondary Refrigerants** – *International Journal of Refrigeration* – 1993, Preprint.

Softwares:

COMP1-Ver.18.01F **Computation and Balancing of Components and Plants** – *International Technical Computing* – York Denmark – Ed. 2008.

CoolPack-Ver.1.46 **Simulation Tools for Refrigeration** – Dept. of Mechanical Engineering – Technical University of Denmark – Ed. 2001.

DIRcalc-Ver.1.16 **Refrigeration Component Selection and Line Sizing** – Danfoss Industrial Refrigeration A/S – Ed. 2007.

Aplicações de amônia como fluido refrigerante no setor de ar condicionado e refrigeração industrial

LEONILTON TOMAZ CLETO

Yawatz Engenharia Ltda.

Rua Agostinho Teixeira de Lima, 215 – São Paulo – SP – 04826-230 – Brasil

RESUMO

A Amônia (R-717) foi um dos primeiros fluidos refrigerantes a ser utilizado na área de refrigeração, utilizado inicialmente em ciclos de absorção e logo em seguida, também nos ciclos de compressão a vapor. Com a chegada dos fluidos halogenados, reduziu-se a utilização da Amônia na área comercial, mas na área industrial o uso da amônia continuou se desenvolvendo. Em quase 150 anos de sua utilização, houveram grandes avanços na tecnologia desenvolvida, com ênfase nos aspectos de segurança e eficiência energética.

Após o Protocolo de Montreal, a Amônia passou a ser considerada uma das mais importantes alternativas nas aplicações de refrigeração e ar condicionado industrial. Com estas oportunidades, surgiram novos conceitos, entre os quais, os sistemas extremamente compactos, com uma carga de refrigerante muito reduzida e dispositivos de segurança avançados, tornando viável a utilização da Amônia em vários tipos de aplicações. Neste trabalho são apresentadas algumas dessas aplicações e as tendências futuras para as aplicações com Amônia no setor.

1 Introdução

O setor de refrigeração industrial abrange os grandes sistemas e normalmente se refere às aplicações na indústria alimentícia e na indústria de bebidas, onde o principal fluido refrigerante é a Amônia (R-717). Aqui são ainda incluídas as aplicações nas indústrias químicas e petroquímicas, que utilizam principalmente os fluidos halogenados (HFCs e, no Brasil, ainda o HCFC-22), além da Amônia e alguns hidrocarbonetos (R-1270, R-290 e misturas) e as aplicações de ar condicionado industrial (principalmente nas indústrias farmacêuticas, têxteis e automotivas), que ainda utilizam principalmente os HFCs.

A Amônia, com suas excelentes características para o uso em sistemas de refrigeração, sofre muitas restrições de sua aplicação por se tratar de um fluido refrigerante com maior índice de toxicidade que a maioria dos HFCs. Em vários países, inclusive o Brasil, há legislações que requerem uma série de cuidados desde o projeto até a operação de um sistema de refrigeração que, dependendo da carga de refrigerante no sistema e do local onde o mesmo será instalado, podem até inviabilizar a sua aplicação.

No entanto, desde o Protocolo de Montreal, com os programas de eliminação dos CFCs e dos HCFCs, e posteriormente Kyoto, com possíveis restrições futuras quanto à utilização dos HFCs, surgiram novas oportunidades para a utilização da Amônia.

Assim, para minimizar o impacto do problema da toxicidade, a ênfase no desenvolvimento foi a concepção de sistemas compactos, com carga de Amônia muito reduzida. O principal conceito de sistema adotado para a maioria das novas aplicações foi o da utilização combinada com outros fluidos, sejam estes em sistema de resfriamento indireto (com os chamados fluidos secundários), seja em sistema com ciclo “Cascata”, especificamente com o CO₂. Por outro lado, com a introdução de um fluido é necessário que o patamar de mínima temperatura (a temperatura de evaporação do ciclo com amônia) seja um pouco mais baixo que os sistemas tradicionais com expansão direta de refrigerante, o que resulta em uma diminuição da eficiência energética do ciclo. Para compensar isto, algumas aplicações tiveram sua concepção alterada, de forma a minimizar ou neutralizar este impacto, e além disso, os componentes dos novos sistemas com Amônia foram otimizados para se obter uma recuperação da eficiência energética.

Neste trabalho são apresentadas algumas aplicações desenvolvidas para a utilização de sistemas compactos, especialmente os “Chillers” com trocadores de calor a placas e novas tecnologias de equipamentos para a utilização de sistemas com cargas muito reduzidas, além de alguns novos conceitos em plantas industriais.

2 Desenvolvimento

2.1 Chillers com Trocadores a Placas

Os “Chillers” (Unidades Resfriadoras de Líquido) com trocadores de calor a placas representam um dos grandes avanços tecnológicos para a redução drástica da carga de amônia em um sistema de refrigeração associada a um COP (coeficiente de performance) elevado.

A redução da carga de refrigerante no sistema chega a 80% quando comparado com chillers utilizando trocadores de calor “Shell & Tube” convencionais e até 95%, quando comparado com sistemas de expansão direta. Além disso, há duas vantagens operacionais dos chillers com trocadores a placas quando comparadas com um sistema de expansão direta. Neste último, por conta da montagem da instalação no campo, é difícil (normalmente é até desprezado) a realização do teste de estanqueidade adequado e o procedimento de vácuo dentro dos limites aceitáveis (da ordem de 5 kPa abs) antes da primeira carga de refrigerante. Isto gera paradas para manutenção mais frequentes, além da redução da vida útil de componentes internos e perda de COP ao longo do tempo. O fato dos chillers com trocadores a placas serem montados e testados completamente na fábrica, elimina este problema. Além disso, a taxa de reposição de amônia e de óleo lubrificante para o sistema são extramente reduzidas. A seguir, duas aplicações onde a introdução de sistemas com chillers com trocadores a placas trouxe grandes resultados relacionados à segurança e também à eficiência energética.

2.2 Aplicações de Chillers com Trocadores a Placas – Indústria de Laticínios

Até pouco tempo atrás, o único sistema de frio usado nos processos de resfriamento de leite era o banco de gelo, uma serpentina com Amônia evaporando a $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mergulhada em um tanque cheio de água em sistema aberto. No processo de resfriamento de leite, ocorrem picos de carga em períodos muito pequenos, o que possibilita a utilização do banco de gelo como um “pulmão” de termoacumulação. Também, com a necessidade de se ter água gelada em torno de $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pois o leite deve ser resfriado até $+4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), o banco de gelo é útil, pois mesmo havendo o congelamento em volta da serpentina, por ser um tanque atmosférico, é possível garantir o fluxo de água em temperaturas muito próximas a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sem congelamento. No caso

dos grandes laticínios nem sempre há o aproveitamento da termoacumulação pois o processo é praticamente contínuo.

No entanto, o banco de gelo apresenta grandes desvantagens. Sua construção requer disponibilidade de espaço devido às suas grandes dimensões, além de cargas de Amônia muito elevadas. Além disso, opera sob condições pouco favoráveis, evaporando em torno de $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, para produzir gelo e água gelada. Possui coeficientes de transferência de calor muito baixos, principalmente pela formação do gelo em volta da serpentina que acaba se tornando um “isolante” térmico para a troca.

Nesta aplicação, os trocadores a placas para o resfriamento da água são uma ótima alternativa aos bancos de gelo. Podem ser usados tanto na ampliação de uma instalação existente, eliminando a serpentina dos tanques, deixando-os apenas com a função de termoacumulação de água, ou em novas instalações, utilizando chillers com trocadores a placas. Uma vantagem deste sistema é que os evaporadores a placas possuem coeficientes de troca de calor com eficácia muito maior (30 a 50 vezes que a serpentina). Outra vantagem é que a carga de Amônia no sistema é extremamente reduzida (cerca de 0.5% a 2% da carga de um sistema convencional utilizando banco de gelo).

Devido ao alto coeficiente de transferência de calor, é possível obter um diferencial de temperatura muito pequeno entre a saída da água gelada e a temperatura de evaporação no evaporador a placas do chiller. No caso dos laticínios é possível obter água a $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ com o fluido refrigerante evaporando em torno de $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Associando-se ao sistema um controle de pressão de sucção, evita-se o risco de congelamento do trocador. Vale observar que, pela concepção do sistema, este pequeno diferencial entre a temperatura de saída da água e a temperatura de evaporação só é viável em sistemas inundados não sendo possível a operação com sistemas de expansão seca.

Considerando a perda no sistema devido à válvula de pressão constante, a pressão da Amônia na sucção do compressor do chiller com trocador a placas fica em torno de 4.1 bar abs (temperatura de evaporação equivalente a $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Comparando ao sistema com banco de gelo, onde a pressão de sucção é de 2.9 bar abs (com temperatura de evaporação equivalente a $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), nota-se que o sistema com trocador a placas é muito mais eficiente do ponto de vista termodinâmico.

Por exemplo, para um sistema de um grande laticínio com capacidade de resfriamento de 1000 kW, utilizando compressor parafuso e Amônia, tem-se a seguinte comparação:

Tabela 01 – Comparativo entre sistema convencional e chiller com trocadores a placas em aplicação de resfriamento de leite [1]

	Sistema com Banco de Gelo e Condensador Evaporativo	Sistema com Chiller com Trocadores a Placas e Torre de Resfriamento
Regime de operação (°C)	-10.0 / +35.0	-1.5 / + 36.0
Deslocamento volumétrico do compressor (m ³ /h)	1438	1013
Potência absorvida pelo motor do compressor (kW)	264.6	204.0
Potência total absorvida pelo sistema (kW) *	349.5	271.4
Carga de refrigerante (kg)	~10000	55

Potência total absorvida:

- ∴ Sistema com Banco de Gelo: motores dos compressores, condensadores evaporativos (ventiladores + bomba), bomba de água gelada, agitadores, bombas de Amônia.
- ∴ Sistema com Chiller com Trocadores a Placas: motores dos compressores, ventiladores da torre de resfriamento, bomba de água de resfriamento, bomba de água gelada.

Como se verifica na tabela 01, o sistema com chiller com trocadores a placas utiliza um compressor cerca de 30% menor que o sistema convencional e a potência total absorvida no sistema é 22% menor. Mas a grande redução ocorre na carga de refrigerante requerida: O sistema com chillers com trocadores a placa utiliza apenas 0.55% da carga total do sistema convencional.

Em um sistema existente, considerando-se apenas a substituição dos bancos de gelo por evaporadores a placas, mantendo-se os compressores, é possível obter-se uma expansão de capacidade do sistema de 42% com um aumento de apenas 5% na potência total absorvida dos mesmos, sendo normalmente desnecessário o aumento da potência instalada dos motores. Neste caso, o único aumento de equipamento necessário seria o dos condensadores evaporativos que deverão aumentar em 34%. Neste caso também a redução da carga de refrigerante é sensível. Tomando a capacidade do exemplo citado anteriormente, a carga de refrigerante do sistema alterado, seria de aproximadamente 600 kg (5% a 8% da carga de refrigerante de um sistema com banco de gelo).

No caso de instalações existentes de pequeno porte, onde a função de termoacumulação dos tanques é importante, os mesmos não precisam ser eliminados, apenas retira-se a serpentina e aproveita-se o volume do tanque para acumular a água gelada proveniente do trocador a placas.

2.3 Aplicações de Chillers com Trocadores a Placas – Indústria de Bebidas

A utilização de um sistema de resfriamento indireto, com solução de etanol (ou outro fluido secundário) operando com um grande diferencial de temperatura, propiciou uma mudança no conceito da instalação de refrigeração nas indústrias de bebidas não alcoólicas gaseificadas. O novo sistema consiste de vários chillers com trocadores a placas que são colocados em série no circuito de solução de etanol. Assim, teremos os chillers operando nas seguintes condições:

Tabela 02 – Condições de operação para sistema de resfriamento de etanol com chillers com trocadores a placas, em processo de resfriamento de bebidas gaseificadas ^[1]

Chiller Nr.	01	02	03	04
Temp. Entrada – Etanol (°C)	16.0	12.1	8.6	5.5
Temp. Saída – Etanol (°C)	12.1	8.6	5.5	0.0
Capacidade (kW)	944.7	841.1	756.6	605.2
Potência Absorvida (kW)	134.5	132.5	130.7	128.0
Tev / Tcd (°C)	+9.8/+36.5	+6.5/+35.7	+3.5/+35.1	-2.5/+35.1
COP (kW/kW)	7.02	6.26	5.79	4.73
COP médio (kW/kW)	6.00			

Os chillers 01, 02 e 03 estão em série e resfriam o etanol até 5.5 °C. Parte da vazão do etanol ainda é resfriada até 0.0 °C no chiler 04. Verificamos na tabela 02 que o COP médio dos chillers é de 6.0 kW/kW. Com os sistemas convencionais operando no regime –5.0 °C/+35.0 °C, o COP fica na ordem de 4.3 kW/kW. Neste caso, mesmo utilizando sistema com resfriamento indireto, o COP do sistema de refrigeração é cerca de 40% maior que o sistema convencional, uma vez que o sistema convencional opera em um único regime, com temperatura de evaporação ajustada em -5.0 °C. O COP total do sistema (incluindo bombas e ventiladores) é ainda cerca de 32% mais elevado que o sistema tradicional. Além disso, o sistema com chillers traz uma redução da carga de amônia da ordem de 90% em relação ao sistema convencional.

A Figura 1 indica um fluxograma esquemático de um sistema com chillers com trocadores a placas em série, para um processo de resfriamento de bebidas gaseificadas.

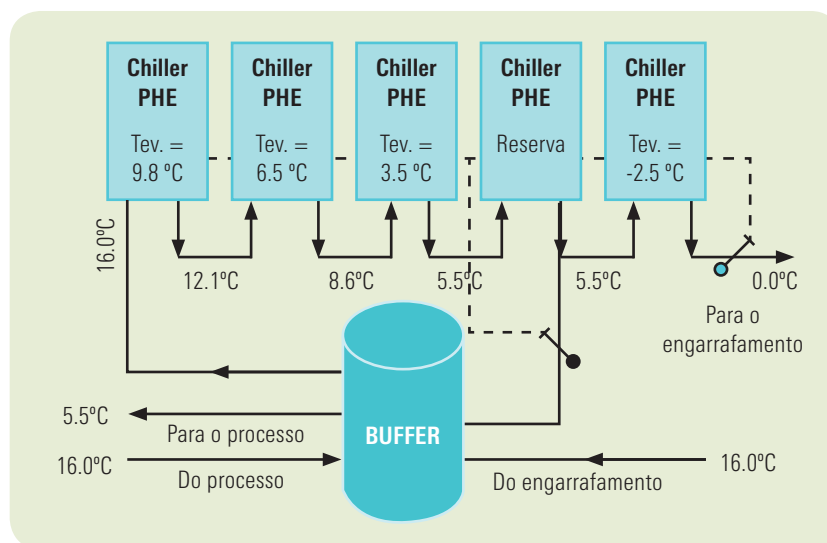


Figura 1 – Sistema de resfriamento de etanol com chillers com trocadores a placas em série em processo de resfriamento de bebidas gaseificadas ^[1]

2.4 Aplicações de Chillers com Trocadores a Placas – Ar Condicionado

Nas aplicações de resfriamento de água gelada para sistemas de ar condicionado, a Amônia ainda é uma das melhores alternativas em termos de eficiência energética. Comparando chillers com compressores centrífugos utilizando HFC-134a, com chillers com compressores parafusos com trocadores a placas utilizando Amônia, ambos de alta eficiência, a tabela 03 indica os resultados. Pode-se observar que apesar do COP (ou kW/TR – termo mais utilizado para comparação de eficiência energética em sistemas de ar condicionado) ser muito próximo na condição de 100% de carga, com ligeira vantagem para o sistema com Amônia (2%), o índice médio de eficiência energética IPLV (Integrated Part Load Value), que considera condições de operação em carga parcial, indica uma vantagem de 15% para o sistema com Amônia.

Tabela 03 – Comparação de chillers para aplicações de ar condicionado

	Chiller Centrífugo – Std	Chiller com PHE – Std
Refrigerante	R-134a	R-717
Capacidade – kW (TR)	2110 (600)	
Temp. Água Gelada – °C	12.2 / 6.7	
Temp. Água Resfriamento – °C	29.5 / 35.0	
Potência Aborvida	346	339
COP (kW/kW)	6.10	6.22
kW/TR	0.576	0.565
IPLV (ARI 550/590) – COP	8.33	9.58
IPLV (ARI 550/590) – kW/TR	0.422	0.367

A tabela 03 trata de equipamentos de linha, sem a utilização de inversores de frequência nos motores elétricos dos compressores para o controle de capacidade. A tabela 04 mostra um comparativo de dois chillers para o mesmo nível de capacidade, porém utilizando inversores de frequência. Aqui vemos uma ligeira vantagem na condição de 100% para o sistema com amônia (5.5%) e o IPLV praticamente igual para os dois chillers, o que indica uma recuperação do desempenho dos chillers com compressores centrífugos com HFC-134a frente aos compressores parafusos com Amônia.

Tabela 04 – Comparação de chillers com inversores de frequência para aplicações de ar condicionado

	Chiller Centrífugo – VSD	Chiller com PHE – VSD
Refrigerante	R-134a	R-717
Capacidade – kW (TR)	2110 (600)	
Temp. Água Gelada – °C	12.2 / 6.7	
Temp. Água Resfriamento – °C	29.5 / 35.0	
Potência Aborvida	335	317
COP (kW/kW)	6.30	6.65
kW/TR	0.558	0.529
IPLV (ARI 550/590) – COP	10.40	10.34
IPLV (ARI 550/590) – kW/TR	0.338	0.340

2.5 Reduzindo Ainda Mais a Carga de Amônia

O contínuo desenvolvimento tecnológico de componentes vem provocando uma redução substancial da carga requerida de Amônia em sistemas compactos. A tabela 05 indica o resultado do desenvolvimento para os evaporadores de linha padrão de chillers para um determinado fornecedor ao longo dos últimos anos.

Tabela 05 – Redução de carga de Amônia em evaporadores de chillers ao longo dos anos. Chillers SABROE para água gelada, com capacidade de 500 kW ^[2]

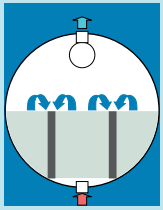
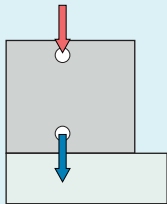
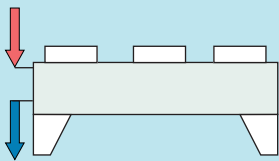
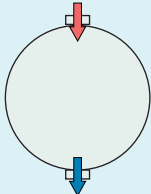
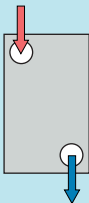
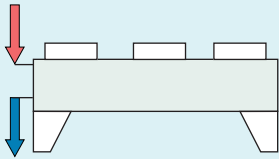
Ano	Modelo/Tipo do Evaporador	Carga de R-717 (100%)	Carga de R-717 (20%)
1990	 EOSB 415004 Inundado (Shell & Tube)	210 kg	210 kg
1994	 ESSM 5040B3 Inundado (Shell & Tube)	120 kg	130 kg
1995	 EPHE 100 (M10) Inundado (PHE)	45 kg	50 kg
2004	 ESRA 70 Inundado (Shell & Plate)	20 kg	23 kg

Tabela 06 – Carga de Amônia em condensadores para sistemas com capacidade de resfriamento de 500 kW ^[2]

Modelo/Tipo do Condensador	Carga de R-717 (100%)
	Evaporativo 66 kg
	a AR 50 kg
	a Água COSB 412304 (Shell & Tube) 10 kg
	a Água CPHE 100 (M10) (PHE) 5 kg
	a AR (Micro-Channel) 3-5 kg

A tabela 06 indica os vários tipos de condensadores utilizados em sistemas de Amônia, incluindo os mais recentes desenvolvimentos com cargas extremamente reduzidas.

Litch e Hrnjak ^[3] apresentam ainda o resultado de um levantamento de dados para carga de Amônia em sistemas pequenos e médios disponíveis no mercado, para vários tipos de chillers com condensação a ar e condensação a água, conforme a tabela 07.

Tabela 07 – Carga de Amônia em sistemas pequenos e médios disponíveis no mercado, utilizando condensação a Ar e a Água ⁽³⁾⁽⁴⁾

Chiller – Tipo/Modelo	Capacidade (kW)	Carga Específica de R-717 (g/kW)
Condensação a Ar		
Litch & Hrnjak (MC condenser)	13	18
Refcomp VKA16-14	16	125
York YSLC F4F00UW	220	129
N.R. Koeling LK 25	25	159
Condensação a Água		
ILKA MAFA 100.2-11K45	108	23
Gram (York) LC	38 – 228	228 – 37
Sabroe (York) PAC	57 – 1074	172 – 36

2.6 Plantas Industriais

Quando se fala em novas tecnologias no setor de refrigeração industrial, deve-se ter em mente que o centro dos principais desenvolvimentos ainda é a Europa e os aspectos de segurança e impacto ambiental, seguidos pela eficiência energética, são os principais elementos a serem considerados. Assim podemos citar algumas das tecnologias mais recentes já utilizadas em diversas aplicações plantas industriais de refrigeração nos mercados da Europa, Asia e EUA e também do Brasil:

2.6.1 Sistemas de Resfriamento Indireto

Os sistemas que utilizam fluidos secundários já estão amplamente difundidos em várias aplicações, mas no setor de refrigeração industrial existem ainda muitas oportunidades. Como já mencionado, a carga de Amônia fica restrita a um chiller compacto de alta eficiência e o sistema de distribuição fica extremamente simplificado em circuitos hidráulicos otimizados, com bombas de vazão variável (utilizando inversores de frequência) e elementos de controle que garantem estabilidade operacional.

Para muitas aplicações já existem novos fluidos secundários, tais como acetato de potássio e formato de potássio e ainda fluidos bi-fásicos, tais como o CO₂ (Líquido-Vapor) e Ice Slurries (Sólido-

Líquido), com excelentes propriedades físicas, propiciando altos coeficientes de transferência de calor e menor perda de carga nas linhas do lado secundário, incluindo menores potências de bombas e menores diâmetros de tubulação. Dessa forma, algumas aplicações tiveram seu conceito alterado de modo a propiciar um sistema muito mais eficiente do que os sistemas tradicionais com expansão direta de amônia.

2.6.2 Unidades Satélites

Pré-montadas em fábricas em “containers” e montadas dedicadas ao lado do equipamento que contém o evaporador (túneis de congelamento ou câmaras frigoríficas de grande porte). A exemplo dos chillers, boa parte da montagem é realizada em fábrica, com processos mais rigorosos e seguros. As unidades satélites propiciam uma redução de carga de Amônia e redução de perda de carga nas linhas, que são mais curtas.



Figura 2 – Unidade Satelite de Refrigeração (Cortesia: Mayekawa do Brasil Refrigeração Ltda)

2.6.3 Sistemas em Ciclo “Cascata” operando com CO₂ (R-744)

Sistemas em ciclos “Cascata” para aplicações de baixas temperaturas (abaixo de -35 °C), utilizando CO₂ (R-744) no ciclo de baixa temperatura, operando em ciclo sub-crítico, e amônia (R-717) no circuito de alta, novamente restrita a um chiller. Nesta aplicação, a redução do deslocamento volumétrico dos compressores do circuito de baixa temperatura (com R-744) é de até 10 vezes comparada a um sistema tradicional com amônia. Além disso, é possível um aumento de eficiência

de até 15% no circuito de baixa, ou uma diminuição sensível do tempo de congelamento do produto (para túneis) com a diminuição da temperatura de trabalho, sem perda de eficiência energética no ciclo. Neste sistema, as linhas são menores, os equipamentos são mais eficientes e o CO₂ é muito menos tóxico que os halogenados (TLV = 5000 ppm).

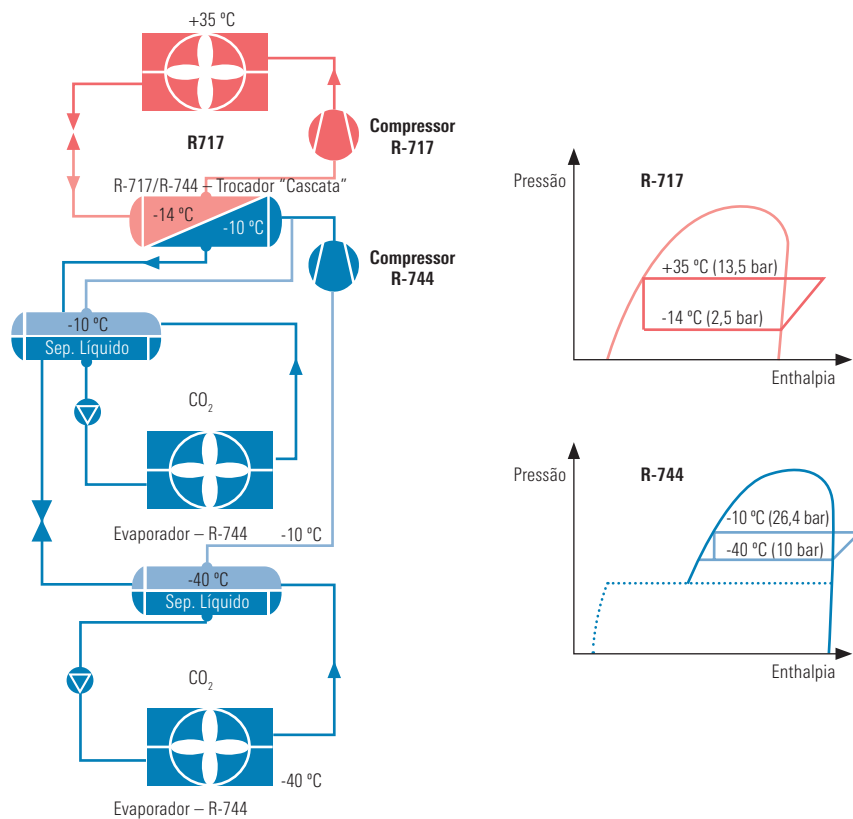


Figura 3 – Ciclo Cascata CO₂ / Amônia, com CO₂ Circulando no Regime Intermediário como Fluido Secundário [5]

2.6.4 Conjuntos de Válvulas e Elementos de Controle:

Uma contribuição em menor escala na redução da carga de refrigerante, mas que reduz em muito o trabalho de montagem em campo e proporciona uma maior segurança operacional são os conjuntos de válvulas e elementos de controle montados em um único corpo, para aplicações em câmaras frigoríficas (incluindo injeção de líquido, retorno para a sucção e injeção de gás quente para degelo).

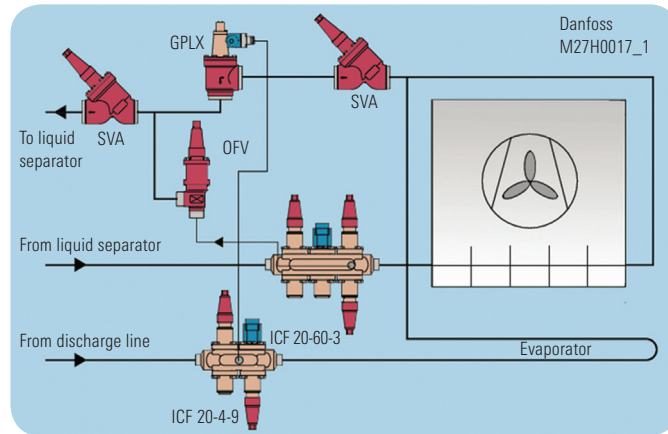


Figura 4 – Conjunto de Válvulas montado em único corpo (Cortesia: Danfoss A/S)

2.6.5 Degelo com Gás Quente

Sistemas que utilizam degelo com “gás quente” podem limitar a pressão de condensação em um patamar alto, provocando um maior consumo de energia.

Para evitar isto e garantir que o restante do sistema possa operar com uma pressão de condensação menor, utiliza-se um compressor recíproco de pequena capacidade, onde a sucção do mesmo é conectada no topo do recipiente de líquido (fase vapor). Assim, este compressor supre toda carga para o degelo e, ainda que pequeno, tem uma capacidade relativamente elevada devido à alta pressão de sucção.

Outra alternativa seria uma unidade resfriadora de líquido (chiller), também utilizando um compressor recíproco operando em alta pressão de sucção com controle por bóia de alta na saída do gás quente condensado da serpentina, e finalmente um evaporador PHE brazado em níquel, o qual vai ter a função de sub-resfriar a Amônia líquida do sistema principal e aumentar o COP mesmo no período do degelo. A vantagem deste conceito é que, durante o degelo, a eficiência do sistema principal aumenta.

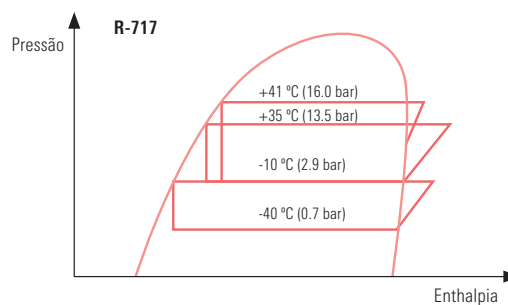


Figura 05 – Diagrama Pressão x Entalpia para sistemas com compressor para degelo com gás quente

2.7 Legislação

O setor de refrigeração industrial está atentando cada vez mais para a importância e necessidade de se executar projetos seguros, com dispositivos de segurança adequados, de acordo com a legislação internacional sobre segurança em sistemas de refrigeração industrial.

Infelizmente o Brasil ainda não possui uma legislação específica sobre este tema, mas em breve estará sendo lançada uma norma pela ABNT, que está sendo desenvolvida por uma das comissões de estudos do CB-55 (CE-55:001.04 – Refrigeração Industrial), e que com o apoio do setor e das agências de proteção ao meio-ambiente, deverá ter um impacto muito positivo na melhoria da qualidade das instalações de refrigeração industrial, incluindo segurança, eficiência energética e facilidade operacional.

A seguir uma relação das normas e recomendações internacionais mais utilizadas no mercado para projeto, instalação e operação, além de requisitos para segurança, aplicáveis aos sistemas de refrigeração. Vale observar que a maioria delas serve para todos os refrigerantes:

- ∴ ANSI/ASHRAE 15-2007 – Safety Code for Mechanical Refrigeration.
- ∴ ANSI/IIAR 02-1999 – Equipment, Design and Installation of Ammonia Mechanical Refrigeration Systems.
- ∴ EN 378:2007 – Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements:
 - ∴ Part 1 – Basic requirements, definitions, classification and selection criteria
 - ∴ Part 2 – Design, construction, testing, marking and documentation
 - ∴ Part 3 – Installation site and personal protection
 - ∴ Part 4 – Operation, maintenance, repair and recovery
- ∴ ISO 5149-2007 – Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements:
 - ∴ Part 1 – Basic requirements, definitions, classification and selection criteria
 - ∴ Part 2 – Design, construction, testing, marking and documentation
 - ∴ Part 3 – Installation site and personal protection
 - ∴ Part 4 – Operation, maintenance, repair and recovery
- ∴ ASME/ANSI B31.5-2006 – Refrigeration Piping and Heat Transfer Components.

3 Conclusão

O objetivo deste artigo foi o de apresentar o estágio atual da tecnologia para sistemas de refrigeração por Amônia em aplicações do setor de refrigeração industrial.

Os principais avanços estão no desenvolvimento de sistemas cada vez mais compactos, eficientes e seguros, de modo a viabilizar a utilização da Amônia em novas de aplicações. A utilização de chillers de alta eficiência energética com trocadores a placas e outros tipos de trocadores ainda mais compactos e a alteração de alguns conceitos para aplicações existentes no setor de refrigeração industrial, tem resultado em soluções com reduções de carga de Amônia superiores a 90% e um aumento de eficiência energética maior que 20% quando comparado com sistemas convencionais.

Nas plantas industriais, novas tecnologias também estão sendo implementadas, dentre as quais a introdução de sistemas de resfriamento indireto, utilizando chillers, sistemas “cascata” operando com CO₂ e Amônia, unidades satélites e otimização de componentes auxiliares, com foco específico na segurança operacional e no ganho de eficiência energética.

A Amônia, por suas excelentes características operacionais e termodinâmicas, continua sendo o principal fluido refrigerante utilizado no setor de refrigeração industrial, e por isso, se torna cada vez mais importante o contínuo aprimoramento do conhecimento sobre o uso seguro deste fluido. Finalmente no Brasil está sendo desenvolvida uma norma sobre segurança em instalações de refrigeração (que envolve todos os fluidos refrigerantes) e que contribuirá em muito para a utilização viável de sistemas com Amônia para várias aplicações.

4 Referências bibliográficas

Literatura:

Cleto, L. T. **Conceito de Instalação Frigorífica Visando a Racionalização do Consumo de Energia** – II Workshop de Refrigeração Industrial, São Paulo, Brasil – 1999

Stubkier, Bo. **The Optimum Ammonia System** – IR Consensus – Danfoss A/S – Sønderborg – Denmark – 2004.

Hrnjak P. S. **Charge Minimization In Ammonia Refrigeration Systems** – IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, Macedonia – 2005.

Litch A. D. and Hrnjak P. S. **Condensation of Ammonia in Microchannel Heat Exchangers** – ACRC Report CR-22 – 1999.

Nielsen, P.S & Lund, T. **Introducing a New Ammonia/CO₂ Cascade Concept for Large Fishing Vessels**, IAR Annual Meeting – Albuquerque, USA – 2003.

Wilcox M.H. – **State-of-the-Art Energy Efficiency in Refrigerated Warehouses** – IAR Annual Meeting, Technical Papers pp. 327 – Dallas, USA – 1999.

Softwares:

COMP1 – **Ver.18.01F Computation and Balancing of Components and Plants** – International Technical Computing – York Denmark – Ed. 2008.

CoolPack – **Ver.1.46 Simulation Tools for Refrigeration** – Dept. of Mechanical Engineering – Technical University of Denmark – Ed. 2001.



CO₂ (R-744) em equipamentos de refrigeração comercial

CLÁUDIO MELO, PH.D.

CHRISTIAN J. L. HERMES, DR.ENG.

POLO Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

88040-900, Florianópolis, SC, Brasil, Tel: 55 48 3234 5691, Fax: 55 48 3234 5166

e-mail: melo@polo.ufsc.br, hermes@polo.ufsc.br

35

RESUMO

De acordo com o último relatório publicado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), a atividade industrial é a principal responsável pelo aquecimento do planeta Terra. Segundo as projeções apresentadas no documento, a temperatura média pode aumentar de 1,5 a 4,0 °C até o final do século, o que provocará uma elevação de aproximadamente 60 cm no nível dos oceanos, além de graves desequilíbrios climáticos. Nas últimas décadas, a indústria de refrigeração e ar condicionado tem sido pressionada pelas restrições ao uso de fluidos refrigerantes sintéticos amparadas pelos protocolos de Montreal e de Kyoto. Soluções de longo prazo têm sido avaliadas, o que inclui o uso de refrigerantes naturais. Neste contexto, o dióxido de carbono (CO₂, R-744) ressurgiu como um candidato em potencial, já que é uma substância natural, estável, atóxica, não inflamável, e com GWP relativamente baixo (Kim et al., 2004). No entanto, sua aplicação em sistemas comerciais de refrigeração tem sido restringida por um baixo desempenho energético, que pode elevar a emissão indireta de CO₂ através do aumento do consumo de combustíveis fósseis. Neste contexto, este artigo se propõe a analisar criticamente o uso de CO₂ como fluido refrigerante para sistemas de refrigeração comercial, discutindo os principais avanços tecnológicos e as limitações práticas à essa aplicação.

Palavras-chaves: refrigerantes naturais, dióxido de carbono, refrigeração, refrigeradores comerciais

1 Introdução

O dióxido de carbono foi introduzido como fluido refrigerante pelo norte-americano Thaddeus Lowe em 1866, 32 anos depois de Jacob Perkins ter proposto o princípio de refrigeração por compressão mecânica de vapores. O primeiro compressor para CO_2 foi inventado pelo alemão Franz Windhausen em 1886, enquanto a produção em série de sistemas de refrigeração que empregavam CO_2 como fluido refrigerante foi iniciada em 1897, 33 anos depois da introdução do CO_2 como fluido refrigerante, graças à Kroeschell Bros., de Chicago. A partir desta data, os sistemas de refrigeração com CO_2 tiveram uma aceitação cada vez maior no mercado, estimulando os engenheiros a aperfeiçoarem a tecnologia existente. Como consequência, J. & E. Hall propuseram, em 1890, um ciclo com dois estágios de compressão a fim de melhorar a eficiência do ciclo de refrigeração com CO_2 e, em 1905, G. Voorhees introduziu um ciclo com um separador de líquido no estágio intermediário.

No início do século XX, os refrigerantes mais comuns no mercado eram a amônia (NH_3), o dióxido de enxofre (SO_2) e o dióxido de carbono (CO_2), sendo os dois primeiros extremamente tóxicos. Dessa época, existem registros de mortes de famílias inteiras devidas à vazamentos de refrigerante, situação que levou ao desenvolvimento de refrigerantes atóxicos. Em 1930, um grupo de pesquisadores liderado por Thomas Migley identificou a família dos clorofluorcarbonos (CFCs), que tiveram uma ampla aceitação no mercado, particularmente nos setores doméstico e comercial, uma vez que são fluidos extremamente estáveis, não tóxicos e não inflamáveis, e suas pressões de trabalho são significativamente menores que as observadas para o CO_2 . A partir dessa data, a indústria de refrigeração entrou em franco desenvolvimento. Materiais não-ferrosos puderam ser utilizados, as válvulas de expansão foram substituídas por tubos capilares e o compressor hermético tornou-se o padrão. Como resultado, os sistemas baseados em CO_2 caíram gradativamente em desuso até a década de 1950, quando este refrigerante foi retirado do mercado.

Em 1974, contudo, Sherwood Rowland e Mario Molina, da Universidade da Califórnia, publicaram um artigo alertando que a emissão de compostos a base de cloro, particularmente os clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), poderia contribuir para a degradação da camada de ozônio na estratosfera, responsável pela absorção da maior parte da radiação ultravioleta proveniente do Sol. Em 1987, foi estabelecido um protocolo internacional, denominado Protocolo de Montreal, com o intuito de definir metas para a eliminação completa dos CFCs, o que ocorreu em 1996 nos países desenvolvidos e ocorrerá em até 2010 nos países em desenvolvimento. A partir do Protocolo de Montreal, a maioria dos produtos no mercado foi convertida para R-134a, um refrigerante da família dos hidro-flúor-carbonos, com nenhum efeito sobre a camada de ozônio. O problema ambiental parecia ter sido resolvido.

No entanto, percebeu-se recentemente que a solução adotada contribui significativamente para o agravamento do efeito estufa, responsável pelo aumento da temperatura média global e de todos os fenômenos dela decorrentes, como, por exemplo, o derretimento das geleiras (IPCC, 2007). Em 1997, estabeleceu-se então outro protocolo internacional, denominado Protocolo de Kyoto, com o objetivo de promover uma redução gradual da emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, entre eles os HFCs. Desde então, fluidos refrigerantes naturais, tais como os hidrocarbonetos (HCs), a amônia (NH_3) e o dióxido de carbono (CO_2) têm sido considerados como alternativas para a substituição de fluidos refrigerantes sintéticos, como os CFCs e os HFCs. Esses refrigerantes possuem índices de ODP (Potencial de Depleção de Ozônio) e de GWP (Potencial de Aquecimento Global) muito inferiores aos fluidos sintéticos: enquanto o CO_2 tem GWP igual a 1, o R-12 tem GWP igual a 8100 e o R-134a igual a 1300. Isto significa que, em termos de efeito estufa, a emissão de 1 g de CFC-12 equivale à emissão de 8100 g de CO_2 em 100 anos. O desafio, no entanto, está em desenvolver sistemas a base de CO_2 que tenham eficiências energéticas similares ao R-134a, uma vez que a contribuição indireta ao efeito estufa, oriunda da queima de combustíveis fósseis, deve ser levada em conta.

2 Refrigerante R-744

Embora, na atualidade, o CO_2 não seja empregado em escala industrial, ele tem sido motivo de diversas pesquisas recentes deflagradas pelo trabalho pioneiro de Lorentzen e Pettersen (1992), que construíram um protótipo de um sistema de climatização automotivo que fazia uso do CO_2 , mostrando que seu desempenho termodinâmico poderia ser comparável ao de um sistema que empregava R-12. Como conseqüência, a pesquisa na área passou a crescer vigorosamente, como mostra a Fig. 1.

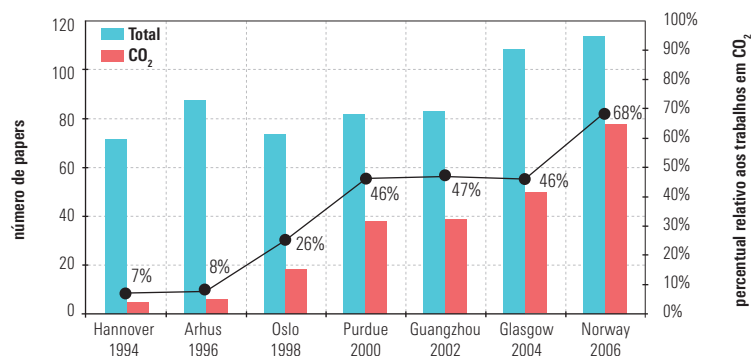


Figura 1 – Número de publicações sobre CO_2 na Gustav-Lorentzen Conference on Natural Working Fluids

Uma vez que a temperatura ambiente de um dia típico de verão facilmente excede $31,1\text{ °C}$ – a temperatura crítica do CO_2 – a rejeição de calor para o ambiente nos ciclos de refrigeração a base de CO_2 ocorre acima do ponto crítico (Fig. 2). Diferentemente dos ciclos de refrigeração tradicionais (subcríticos), em que há condensação e a pressão é definida pela temperatura de saturação (Fig. 3a), no caso do CO_2 , o ciclo de refrigeração é transcrito (Fig. 3b), e a pressão de alta é estabelecida principalmente pela massa de refrigerante, uma vez que o efeito da temperatura é pouco significativo. Isso leva à existência de uma pressão ótima de operação que maximiza o coeficiente de performance do ciclo, definido como a relação entre a capacidade de refrigeração e a potência consumida.

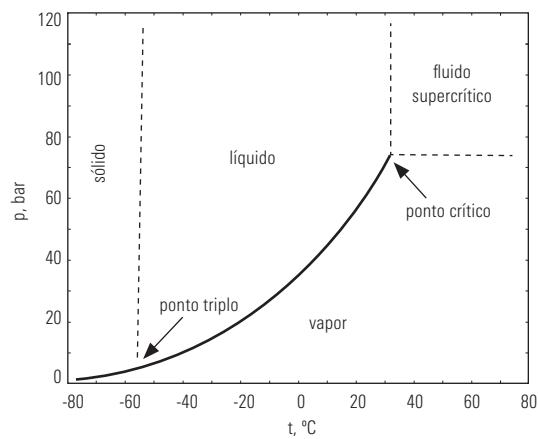


Figura 2 – Diagrama de fase do CO_2

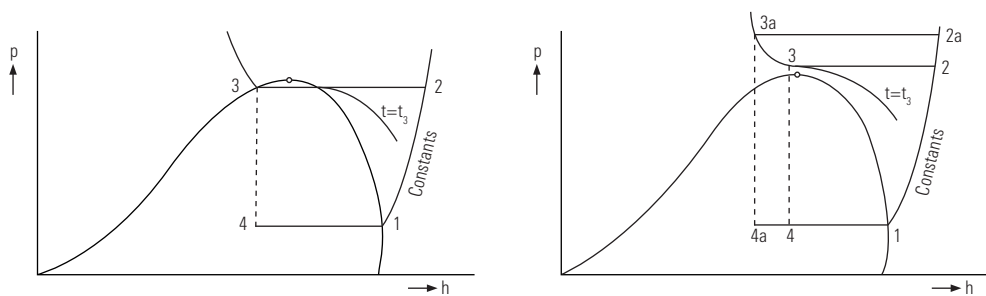


Figura 3 – Ciclos de refrigeração: (a) tradicional (subcrítico); (b) CO_2 (transcrito) (Gosney, 1982)

Conforme salientado por Kim et al. (2004), as propriedades termodinâmicas e termofísicas do CO_2 variam intensamente da região subcrítica para a transcrito, afetando principalmente a transferência de calor no arrefecedor de gás (gas cooler) e o processo de expansão. A Fig. 4 mostra

as variações do calor específico (4a) e da densidade (4b) em função da temperatura e da pressão, calculadas com base na equação de estado proposta por Span e Wagner (1996). Na Fig. 5a, observa-se que o calor específico do CO₂ passa por um ponto de máximo na região próxima do ponto crítico, enquanto a Fig. 4b ilustra a redução abrupta da densidade do fluido a partir da temperatura do ponto crítico. Tais características, associadas ao fato dos equipamentos de refrigeração a base de CO₂ trabalharem com pressões internas de 5 a 10 vezes maiores do que um equipamento convencional, deixam evidente a necessidade de cuidados especiais ao se projetar os componentes do sistema de refrigeração com CO₂ (compressor, condensador, evaporador e dispositivo de expansão).

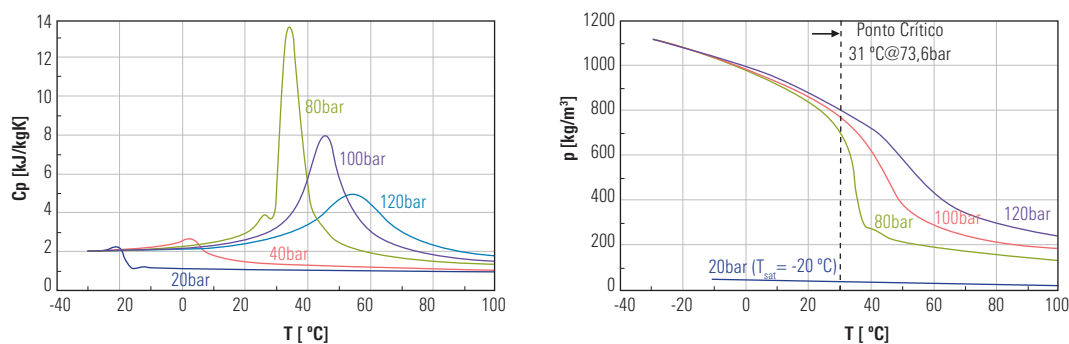


Figura 4 – Variação do calor específico (a) e da densidade (b) do CO₂ com a temperatura

3 CO₂ versus R-134a

A utilização de CO₂ em sistemas comerciais de refrigeração, do tipo resfriadores de bebida e com capacidade de refrigeração na faixa de 0,5 a 2 kW, tem se revelado uma alternativa promissora. Um dos primeiros trabalhos publicados na área (Veje e Süß, 2004), comparava o desempenho de dois sistemas de refrigeração, uma vending machine e um double door cooler, adaptados para uso com CO₂, com o desempenho desses mesmos sistemas na condição original.

Os sistemas original e modificado foram testados na condição “C” (temperatura ambiente de 32 °C e umidade relativa de 65%). Eles observaram uma redução de 37% e de 18% no consumo de energia com a introdução de CO₂, respectivamente para a vending machine e para o cooler.

Esse trabalho vende uma falsa imagem da aplicação de CO₂ em sistemas comerciais de refrigeração, pois muito sutilmente não informa ao leitor que modificações substanciais foram introduzidas no sistema de CO₂, como a introdução de gas cooler e trocador de calor de calor intermediário de micro-canais, uma

válvula de expansão para controle da pressão de alta e um acumulador de líquido. Além disso nenhuma referência é feita ao compressor de R-134a, usado como baseline.

Mais recentemente De Angelis e Hrnjak (2005), compararam o desempenho de um sistema típico de refrigeração comercial de 1kW de capacidade, usando R-134a, com o desempenho de sistemas alternativos usando CO_2 . Para tanto foram construídos aparatos experimentais do tipo breadboard, usando diversas associações de componentes. Testes foram realizados em 7 condições de operação diferentes. Eles mostraram que o sistema referenciado como BC3, o mais otimizado, apresentava coeficientes de performance superiores em até 95% ao sistema original. Eles mostraram também que essa diferença caía para 28% quando a comparação era feita entre os sistemas BC2 e BC3, ambos com CO_2 . Eles concluíram, portanto, que uma comparação entre os dois refrigerantes só seria inteiramente válida, caso os dois sistemas utilizassem o mesmo tipo de tecnologia em todos os componentes do ciclo.

Em resumo, os trabalhos realizados compararam sistemas e não os refrigerantes propriamente ditos. Sabe-se que o CO_2 é termodinamicamente inferior ao R-134a. Sabe-se também que os compressores de CO_2 possuem eficiências isentrópicas iguais ou superiores a dos compressores de R-134a. Em última análise, dependendo do sistema e do compressor utilizado, a balança pode pender para um lado ou para o outro.

4 Avanços recentes

Para que sistemas de refrigeração a base de CO_2 se tornem viáveis tanto técnica como economicamente para aplicações de baixa capacidade, deve-se buscar soluções que tenham custo e eficiência compatíveis aos refrigeradores existentes, além de uma concepção simples, aplicável à todos os mercados consumidores. A melhor estratégia consiste no desenvolvimento de produtos no âmbito de parcerias entre o setor produtivo e os centros de pesquisa, já que a necessidade de respostas durante o desenvolvimento de produtos fomenta a pesquisa, enquanto esta auxilia na tomada de decisão durante o desenvolvimento do produto. A fim de dar suporte ao desenvolvimento de sistemas de refrigeração a base de CO_2 , particularmente de cassetes comerciais, atividades de pesquisa têm sido realizadas no POLO – Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica da Universidade Federal de Santa Catarina para melhor compreender os fenômenos relativos à utilização do CO_2 em sistemas de refrigeração, particularmente do escoamento transcrito em tubos capilares e de alternativas para o controle da pressão na descarga do compressor.

Embora seja cada vez maior a tendência de utilização de tubos capilares em sistemas comerciais de refrigeração que operam com CO_2 , muito pouco tem sido estudado a respeito. Numa primeira iniciativa para preencher essa lacuna, uma bancada experimental capaz de operar com CO_2 foi especialmente projetada e construída, como ilustra a Fig. 5.

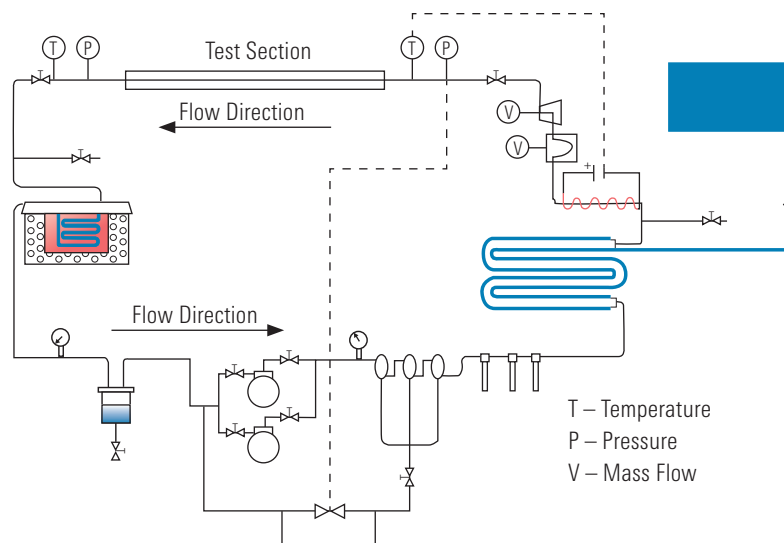


Figura 5 – Esquema da bancada experimental para ensaios de tubos capilares operando com CO_2

Ensaio experimentais foram planejados estatisticamente, de acordo com uma técnica de experimentação fatorial, tanto com o objetivo de extrair o máximo de informações dos experimentos como de gerar uma correlação empírica para a vazão mássica em função das variáveis geométricas (diâmetro e comprimento) e de operação (pressão e temperatura na entrada). Um modelo computacional para simular o escoamento de R-744 em tubos capilares adiabáticos foi também desenvolvido. As equações de conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento foram resolvidas analiticamente ao longo de uma linha isentálpica, o que permitiu a utilização de uma equação algébrica para computar o fluxo de massa de refrigerante. O modelo foi validado contra 36 pontos experimentais obtidos para a expansão de CO_2 em diferentes condições geométricas e de operação. Observou-se que o modelo é capaz de prever mais de 90% dos dados experimentais com erros na faixa de $\pm 10\%$. O modelo auxilia no dimensionamento de tubos capilares permitindo que o sistema de refrigeração com CO_2 seja ajustado adequadamente.

Uma vez que para cada condição de operação, existe uma pressão de descarga ótima que maximiza o COP do sistema, uma outra importante linha de pesquisa consiste em avaliar alternativas

para o controle da pressão do lado de alta e para o processo de expansão do fluido refrigerante no circuito. Para tanto, uma bancada experimental foi especialmente projetada e construída para esse fim, como ilustra a Fig. 6. Com isso, arranjos diferenciados de ciclo, com adição de novos componentes para permitir o controle da pressão de alta e uma alimentação adequada do evaporador, podem ser estudados. Como atividade adicional, modelos computacionais tem sido desenvolvidos para simular o comportamento de sistemas de refrigeração, diminuindo a necessidade de trabalhos experimentais.

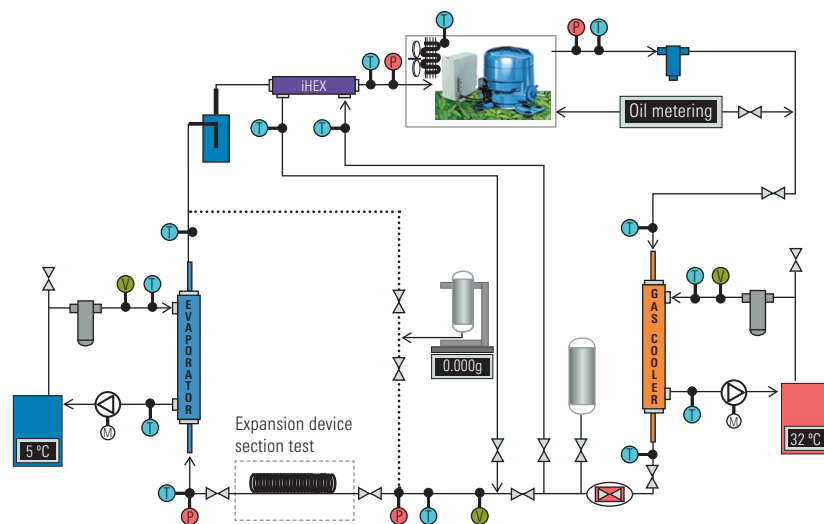


Figura 6 – Esquema da bancada experimental para estudar estratégias de controle para ciclos a base de CO₂

Além das atividades de pesquisa mencionadas, produtos têm sido desenvolvidos no POLO/UFSC em parceria com a Empresa Brasileira de Compressores S.A. Como exemplo pode-se citar o desenvolvimento de cassetes para aplicação em vending machines e em beverage coolers (Fig. 7), de acordo com as normas Coca-Cola, que estabelecem critérios de desempenho para os cassetes com relação a curva de vazão do lado do ar (evaporador e ventilador), a capacidade de refrigeração e o coeficiente de performance para ambientes em condições distintas de temperatura e umidade relativa. Outro exemplo consiste no desenvolvimento de um freezer horizontal de 350 litros para conservação de sorvetes. Originalmente projetado para operar com a mistura R-404A, tal sistema foi convertido para CO₂ através de uma estratégia drop-in, na qual os trocadores de calor originais foram mantidos, enquanto o compressor e o tubo capilar foram substituídos. Como mostra a Fig. 8, a carga de R-744 foi ajustada juntamente com o tubo capilar de modo a minimizar o consumo de energia do produto.

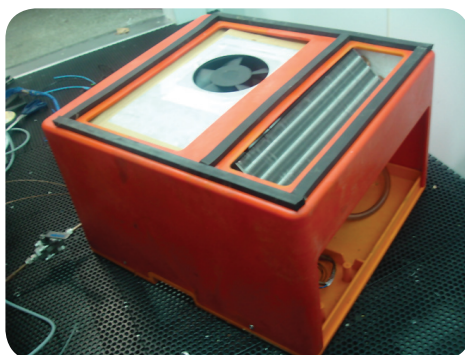


Figura 7 – Sistema de refrigeração do tipo cassete desenvolvido no POLO

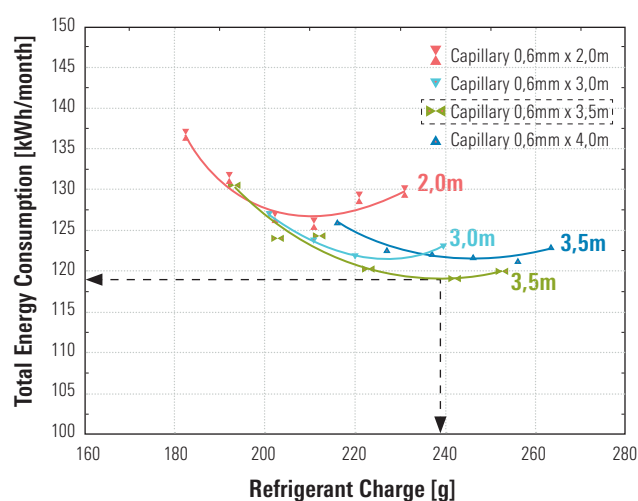


Figura 8 – Ajuste da carga e do capilar para um freezer horizontal

5 Considerações finais

A aplicação de CO_2 em sistemas de refrigeração de pequena e média capacidade tem sido limitada por uma série de paradigmas originados da publicação de Lorentzen e Petersen (1992). Kim et al. (2004), por exemplo, sugerem que os trocadores de calor, particularmente o arrefecedor de gás, devem possuir uma construção extremamente robusta para se adequarem às altas pressões de trabalho do CO_2 , e que sistemas sofisticados de controle e de expansão devem ser desenvolvidos.

No entanto, para que sistemas de refrigeração com CO₂ para aplicações de baixa capacidade se tornem viáveis tanto técnica como economicamente, deve-se buscar uma solução que tenha custo e eficiência compatíveis às existentes, além de uma concepção simples, aplicável à todos os mercados consumidores. Para tanto, é fundamental que as atividades de desenvolvimento de produto sejam acompanhadas por um conjunto de atividades de pesquisa, com foco em cada um dos componentes do ciclo. Neste contexto, as pesquisas realizadas no POLO/UFSC têm mostrado que é possível desenvolver sistemas comerciais a base de CO₂ com performance igual ou superior a dos produtos existentes no mercado. Também é possível desenvolver sistemas comerciais a base de CO₂ de acordo com uma estratégia drop-in, bastando para tanto o ajuste do tubo capilar e da carga de refrigerante.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Compressores S.A. e às agências brasileiras de fomento CAPES, CNPq e FINEP pelo apoio financeiro.

44

7 Referências bibliográficas

De Angelis, J, Hrnjack, P, 2005, **Development of transcritical R744 systems for small commercial applications**, Proceedings of the IIR Vicenza Conference, pp. 167-178.

Gosney WC, 1982, **Principles of refrigeration**, Cambridge University Press, Cambridge, UK

IPCC, 2007, **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France

Kim MH, Pettersen J, Bullard CW, 2004, **Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems**, Progress in Energy and Combustion Science, 30, pp.119-174

Lorentzen G, Pettersen J, 1992, **New possibilites for non-CFC refrigeration**, IIR International Symposium on Refrigeration, Energy and Environment, Trondheim, Norway, pp.147-163

Span R, Wagner W, 1996, **A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa**, J. Phys. Chem, 25, 6

Veje, C., Süß, J., 2004, **The transcritical cycle in light commercial refrigeration applications**, Danfoss report.

Novas soluções para fluidos secundários em refrigeração

FRANK CHAVIANO PRUZAESKY

EPIFANIO MAMANI TICONA

SERGIO LEAL BRAGA

JOSÉ ALBERTO R. PARISE

Departamento de Engenharia Mecânica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – 22453-900 – Rio de Janeiro – RJ

E-mail: parise@puc-rio.br – Tel: (21) 3527-1380

45

RESUMO

O presente trabalho apresenta as perspectivas de utilização de novos fluidos secundários (i.e., pasta de gelo e nanofluidos) em sistemas de refrigeração, com uma potencial diminuição do impacto ambiental e maior eficiência energética. Sistemas de geração de pasta de gelo (ice slurry), ao mesmo tempo em que propiciam melhor aproveitamento energético para a produção de frio, contribuem reduzir significativamente os custos de capital inicial e operação, quando comparados com tecnologias de sistemas de termoacumulação. No caso dos nanofluidos, há um grande potencial para um desempenho térmico superior aos fluidos secundários convencionais, muito embora ainda haja uma grande lacuna de informação e conhecimento quanto às aplicações que podem usufruir do desenvolvimento desta nova tecnologia. A aplicação de fluidos secundários de alto desempenho em sistemas de refrigeração poderia vir a se refletir: 1) em maior eficiência energética e; 2) na diminuição da área necessária de transferência de calor e, conseqüentemente, do porte total do equipamento, o que resulta na diminuição da carga volumétrica dos respectivos fluidos de trabalho e de seu correspondente impacto ambiental.

Destaca-se, finalmente, a crescente importância assumida pela nanotecnologia, com possibilidades de aplicação em amplos setores da indústria. Ambas (a nanotecnologia e a indústria de refrigeração) são áreas estratégicas para o país. A primeira, pelas inúmeras possibilidades de aplicação futura e a segunda, por envolver problemas candentes que incluem, entre outros, a conservação de alimentos.

1 Introdução

Em virtude dos acordos que regulam o uso das substâncias que destroem a camada de ozônio e que contribuem para o aquecimento global, a indústria de refrigeração voltou sua atenção a fluidos refrigerantes que vinham sendo usados antes da era dos CFCs e que nunca foram abandonados completamente. Alguns destes refrigerantes alternativos são conhecidos como refrigerantes naturais, porque são parte do ambiente natural ou porque, no longo prazo, não prejudicam o meio ambiente em caso de vazamento para a atmosfera. Estes refrigerantes incluem, principalmente, o ar, a água, o dióxido de carbono, os hidrocarbonetos e a amônia (Bedecarrats et al., 2003; Egolf e Kauffeld, 2005 e Meewisse, 2004).

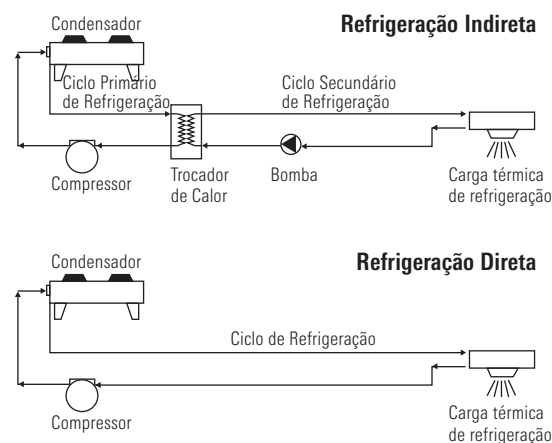


Figura 1 – Refrigeração com fluido secundário em comparação com refrigeração direta

Alguns destes refrigerantes alternativos apresentam algumas desvantagens, em função de sua segurança e de perigos de saúde imediatos. O propano, por exemplo, é inflamável e a amônia, igualmente inflamável e também tóxica. Os riscos associados à refrigeração com o uso de amônia ou propano são contornáveis, mas as medidas de segurança requeridas podem exigir investimentos custosos (Meewisse, 2004). Um caminho para reduzir os perigos da inflamabilidade é diminuir a carga total de refrigerante, a partir da utilização de um sistema de refrigeração. Num sistema como este, o frio é gerado em um ciclo de refrigeração primário, sendo eventualmente armazenado, e, então, transferido a um ciclo de refrigeração secundário através de um trocador de calor intermediário. Neste ciclo de refrigeração secundário, um fluido térmico a baixa temperatura, "portador de frio", não-tóxico, não-inflamável é, então, utilizado para distribuir a potência de refrigeração para as posições requeridas. Um diagrama básico de um sistema que opera com um ciclo secundário é apresentado na Fig. 1.

Os sistemas convencionais de refrigeração direta, isto é, sem circuito de fluido secundário, são normalmente de baixo custo e tecnicamente confiáveis. Sem a necessidade de um trocador de

calor indireto, podem operar com temperaturas de evaporação mais favoráveis. Entretanto, utilizam o mesmo fluido refrigerante tanto para a “produção” quanto para o “transporte” de frio de uma unidade central de refrigeração aos usuários finais (Fig. 1). Como resultado, estes sistemas contêm grandes quantidades de fluido refrigerante e, no caso de vazamento permanente ou acidental, podem levar a perdas elevadas, com danos maiores para o meio ambiente. Além do mais, cargas elevadas e vazamentos de refrigerante elevam os custos de operação (Egolf, 2004). Um sistema com ciclo de refrigeração secundário permitiria reduzir, portanto, a quantidade de fluido refrigerante no ciclo primário.

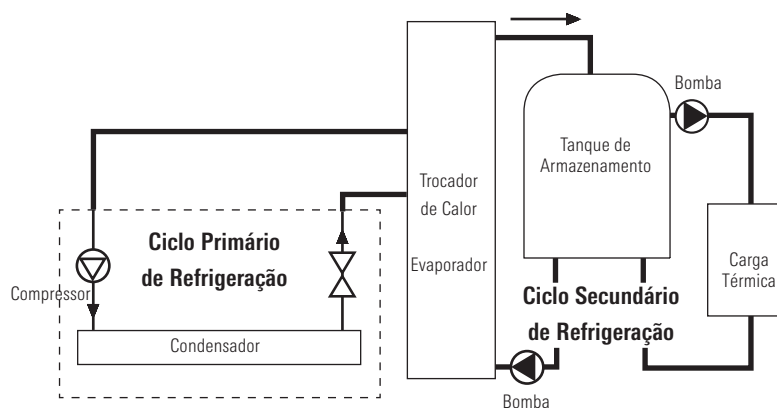


Figura 2 – Refrigeração com fluido secundário com armazenamento de energia térmica

A utilização de um ciclo de refrigerante secundário também aumenta a flexibilidade de um sistema de refrigeração. Por exemplo, se o frio for armazenado em um tanque (Fig. 2), durante o ciclo de resfriamento, as demandas de energia elétrica podem ser deslocadas para os horários de baixo custo da energia elétrica ou de melhor rendimento do sistema de refrigeração. Mesmo que não haja nenhuma estrutura de tarifa dupla ou diferenciada de eletricidade, ainda assim benefícios energéticos podem ser obtidos, em virtude da eficiência do ciclo de refrigeração primário ser maior durante o período noturno (temperatura de condensação mais baixa). Também as cargas de pico podem ser reduzidas nivelando-se a demanda de frio por um período mais longo do dia, de modo que a capacidade do sistema de refrigeração primário possa ser menor.

1.1 Vantagens

A utilização de sistemas de refrigeração indireta (com uso de refrigerante secundário) resulta em vantagens significativas. Um dos primeiros impactos desta escolha é a considerável redução da

carga de refrigerante, que pode chegar até 40% da carga de refrigerante, segundo Kazachki e Hinde (2006), ou até 85% da carga do sistema convencional (Palm, 2007), conduzindo à instalação de sistemas de refrigeração muito mais compactos e com um menor potencial de impacto ambiental. Outro ganho gerado desta prática é o confinamento do refrigerante primário à “casa de máquinas” o que simplifica o circuito do refrigerante, obtendo-se um funcionamento (e, conseqüentemente, uma temperatura de resfriamento) mais estável e seguro.

1.2 Desvantagens

Ao custo adicional referente à instalação de uma bomba de circulação e de um trocador de calor intermediário soma-se a operação do sistema com uma maior diferença de temperatura, o que equivale a um maior consumo de energia.

Outra desvantagem é encontrada na dificuldade de se compatibilizar as características e limites operacionais dos refrigerantes secundários com as necessidades da instalação.

Fluidos convencionais como água, etileno glicol e óleo, amplamente utilizados em diferentes ramos da indústria como fluidos secundários, apresentam deficiências entre as quais encontram-se a elevada temperatura de congelamento e baixa temperatura de evaporação, no caso da água, e a baixa condutividade térmica e elevada viscosidade, no caso dos óleos e do etileno glicol.

Fluidos sintéticos, também conhecidos como fluidos térmicos, não têm conseguido apresentar desempenhos melhores no que diz respeito à transferência de calor, somente ampliando, moderadamente, os limites de aplicabilidade, em termos de suas temperaturas de evaporação e de congelamento.

1.3 Demandas para o fluido secundário

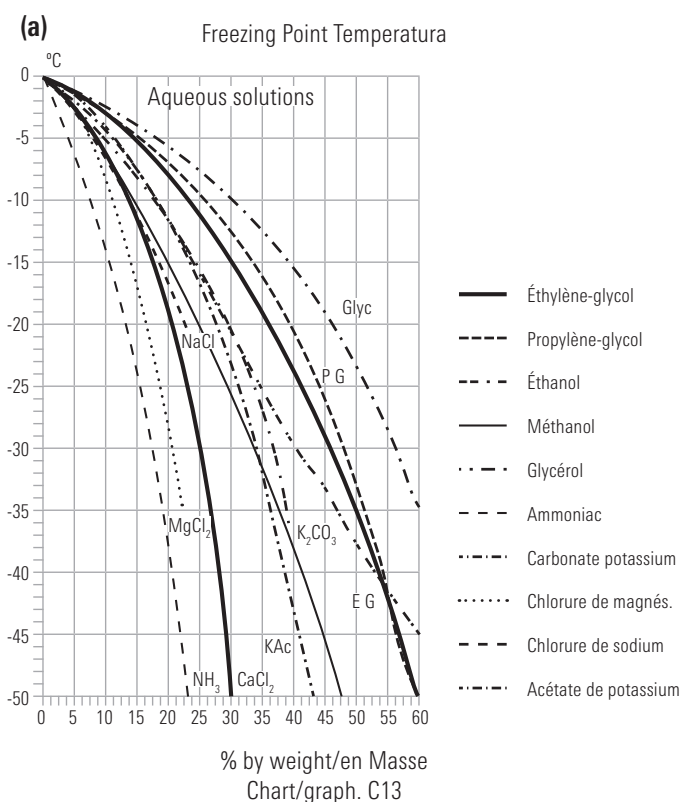
Partindo do constatado nos itens anteriores, espera-se do fluido secundário: a) baixa viscosidade, o que redundará em uma baixa perda de pressão e, conseqüentemente, uma baixa potência de bombeamento; b) boa performance na transferência de calor, o que implica em um elevado calor específico e boa condutividade térmica; c) ausência de problemas de corrosão e, pelo contrário, espera-se que o fluido a iniba; d) compatibilidade com os materiais habitualmente utilizados; e) adequação à regulamentação de segurança e saúde, sendo seguros para alimentos, não tóxicos, seguros à manipulação, apresentando baixo, ou nenhum, impacto ambiental; f) não inflamável; g) mecânica e quimicamente estável, enquanto à separação e degradação; e h) disponibilidade a preços razoáveis.

1.4 Tipos de fluidos secundários

Entre os fluidos secundários de mais ampla utilização encontram-se a água, etileno e propileno glicóis, álcoois etílico e metílico, glicerina, amônia, e soluções de carbonato de potássio, CaCl_2 , MgCl_2 e NaCl .

1.5 Propriedades termofísicas relevantes

As propriedades termofísicas que determinam a escolha de um ou outro refrigerante secundário são: a) a temperatura do ponto de solidificação, que limita a aplicação em refrigeração; b) a temperatura de ebulição, que limita a aplicação em arrefecimento; c) a tensão superficial, a massa específica e a viscosidade dinâmica, as quais determinam a queda de pressão e, por conseguinte, a potência de bombeamento; d) o calor específico e a condutividade térmica, os quais garantem o desempenho na troca de calor; e e) o coeficiente de expansão térmica.



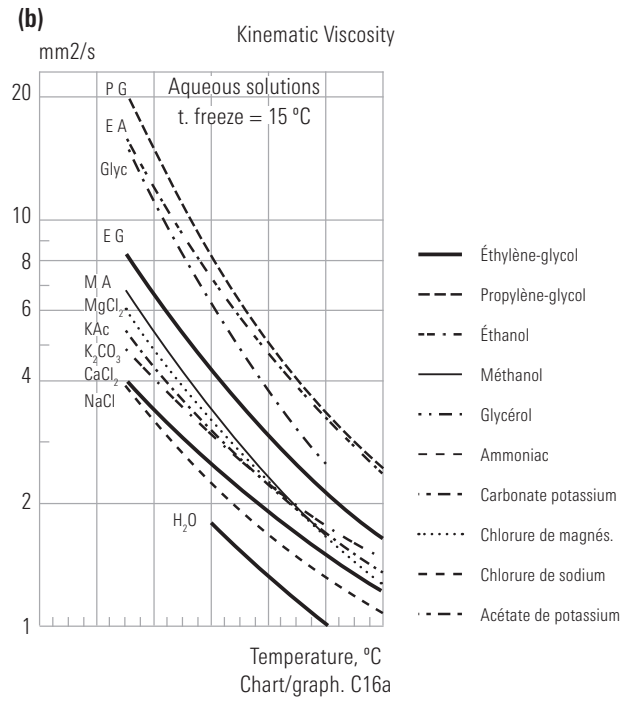
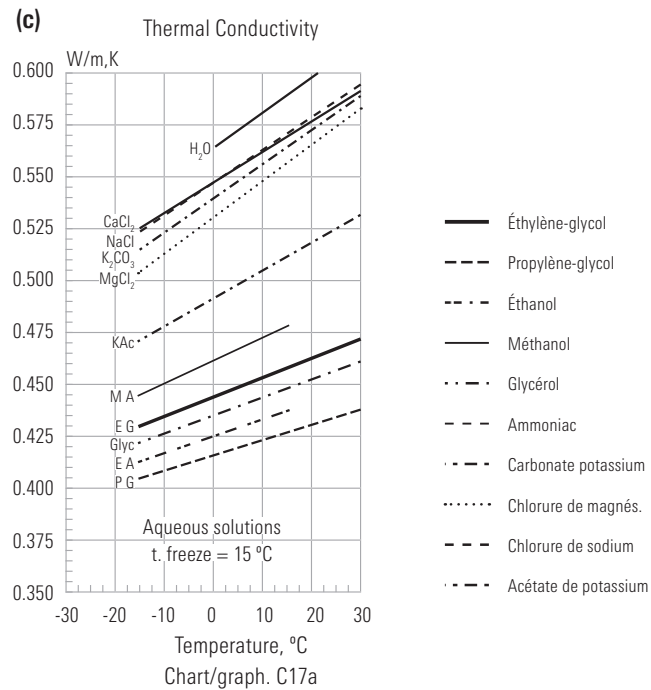


Figura 3 – (a) Temperatura de solidificação e (b) viscosidade cinemática de soluções aquosas (Melinder, 1997)



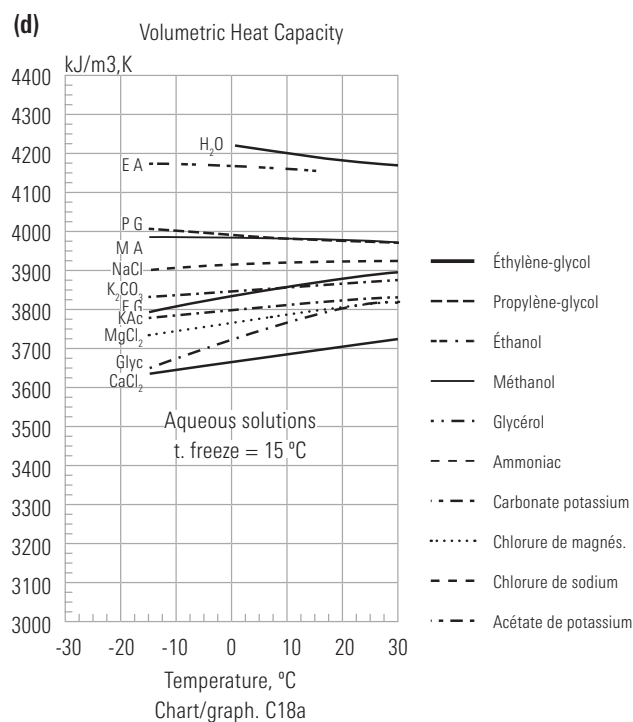


Figura 3 (cont.) – (c) Condutividade térmica e (d) capacidade térmica volumétrica de soluções aquosas (Melinder, 1997)

As figuras 3a e 3d apresentam a variação com a temperatura de algumas das propriedades relevantes de soluções aquosas. Em resumo, conclui-se que, a menos da impossibilidade de operação a temperaturas abaixo de zero graus Celsius, figura 3a, a água pura sempre apresenta vantagem em relação a qualquer outra solução aquosa, figuras 3b, 3c e 3d.

2 Fluidos multifuncionais

Misturas de um fluido térmico ideal (fase contínua) com aditivos (partículas sólidas fase dispersa), preparadas para se atingir uma ou mais funções específicas (por exemplo alta troca de calor, magnetização ou viscosidade variável) são conhecidas como fluidos multifuncionais. Dividem-se estes em: 1) Fluidos Transportadores de Calor Sensível, os quais possuem baixo atrito ou apresentam algum incremento de troca de calor; e 2) Fluidos com Mudança de Fase.

Dois exemplos serão apresentados a seguir, para aplicações como fluidos secundários em sistemas de refrigeração: são estes, respectivamente, a pasta de gelo, já disponível comercialmente,

e os nanofluidos, ainda em estágio embrionário de investigação, motivo pelo qual apresenta-se aqui um estudo sobre a potencialidade desta nova tecnologia.

2.1 Pasta de gelo

Foram encontrados na literatura termos como: pasta de gelo, gelo líquido, binary ice, flo ice, mushy ice, etc. Estes termos têm sido utilizados para descrever quaisquer tipos de cristais de gelo com diâmetros entre 25 μm e 4 mm suspensos em uma solução aquosa em fase líquida, com ou sem um agente que baixe a temperatura do ponto de solidificação (Hansen et al., 2003). A seguinte definição pode ser adotada para descrever pastas de gelo.

2.1.1 Definição

Pasta de gelo consiste de partículas de gelo dispersas em um fluido formando uma suspensão de duas fases. Por outro lado, a pasta cristalina fina de gelo (fine-crystalline ice slurry) consiste de uma pasta de gelo na qual ocorre uma suspensão de partículas de gelo com um diâmetro (característico) médio igual ou menor que 1,0 mm (Egolf e Kauffeld, 2005).

Esta última definição, para a pasta cristalina fina de gelo, é um pouco arbitrária com respeito ao tamanho dos cristais. Entretanto, estas definições dão uma idéia da espécie de suspensões as quais são denominadas pastas de gelo. Na atualidade, para a produção de pasta de gelo, os dispositivos mais utilizados são os geradores do tipo de superfície raspada, os quais produzem pasta de gelo com cristais de diâmetro de partícula médio característico de aproximadamente 200 μm (Egolf e Kauffeld, 2005). Cumpre lembrar que o gerador de pasta de gelo, acoplado ao evaporador, representa um acréscimo substancial ao custo da instalação.

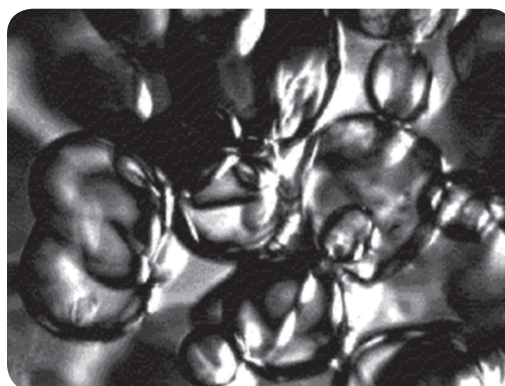


Figura 4 – Fotografia de cristais de gelo em uma pasta de gelo com tamanho da fotografia de 1061 μm \times 762 μm (Egolf e Kauffeld, 2005)

2.1.2 Aplicações

Pasta de gelo é uma tecnologia relativamente nova, utilizada com uma variedade de propósitos diferentes, onde alta performance de resfriamento é requerida. Seu uso mais difundido é como fluido refrigerante secundário em sistemas de ar condicionado e armazenamento de energia térmica (Fukusako et al., 1999). Um exemplo interessante é o condicionamento de ar de aeronaves em terra, através do transporte de frio com pasta de gelo em linhas umbilicais de longa distancia.

Outras aplicações da pasta de gelo incluem áreas tais como a engenharia de alimentos e a indústria pesqueira (Fukusako et al., 1999). Pode-se produzir pasta de gelo a partir da água de mar e aplicar diretamente nos tanques de armazenamento de peixe. Da mesma forma, é possível produzir pasta de gelo a partir de soluções aquosas de sacarose e aplicar diretamente em frutas.

Sua aplicação se estende, também, à área da medicina, onde é utilizada em técnicas menos invasivas, tais como a cirurgia laparoscópica no tratamento de rins. Neste caso específico, induz-se uma hipotermia localizada nos rins com a ajuda de pasta de gelo tópico, para evitar danos por isquemia (falta de oxigenação) (Orvieto et al., 2007).

Pesquisadores do Laboratório de Energia Argonne procuram formas para resfriamento rápido do cérebro e coração de pessoas que sofrem ataques cardíacos. Novamente, pasta de gelo tópico de alta fluidez, especialmente formulado, utilizando compostos químicos compatíveis com tecidos humanos, seria bombeada através da artéria carótida, veia jugular e pulmões, produzindo hipotermia localizada dos órgãos vitais. Os resultados mostram que se pode baixar a temperatura a 25 °C em 10 minutos, período relativamente curto, se comparado aos métodos convencionais.

2.1.3 Resumo propriedades físicas

As propriedades termofísicas da pasta de gelo diferem notoriamente das propriedades termofísicas da solução em estado líquido da qual é produzida, por causa da suspensão dos cristais de gelo em sua composição. Na Fig. 8 pode-se observar a variação da condutividade térmica da pasta de gelo com a fração de gelo e com a concentração de etanol na solução aquosa.

A figura 5 ilustra uma vantagem importante da pasta de gelo: sua condutividade térmica é maior do que a da solução em fase líquida. Esta característica, aliada à possibilidade de a pasta de gelo escoar como um fluido monofásico, favorece o mecanismo de troca de calor com uma superfície.

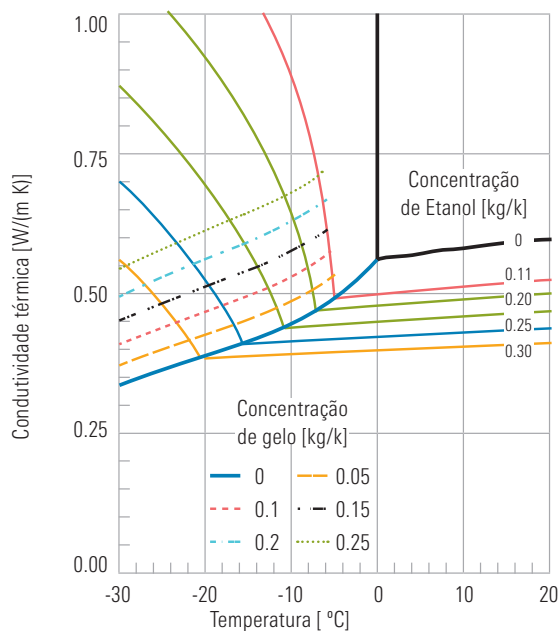


Figura 5 – Variação da condutividade térmica da pasta de gelo com a fração de gelo e com a concentração de etanol (Ticona, 2007)

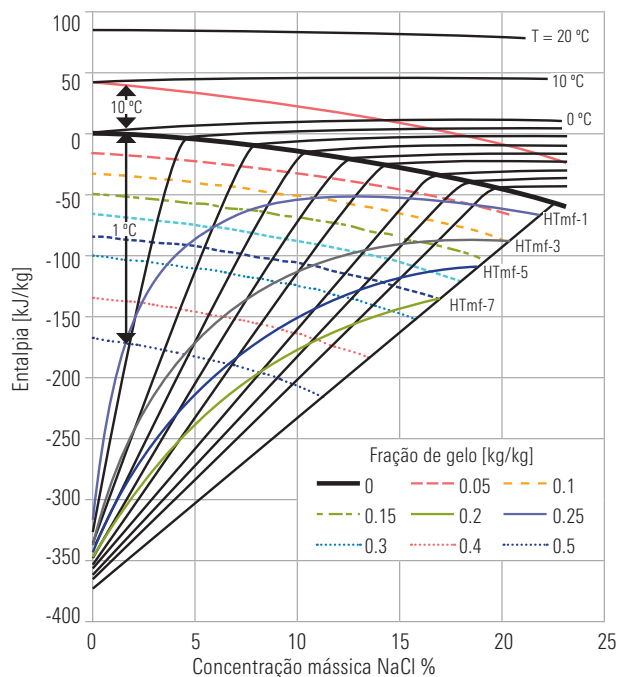


Figura 6 – Variação da entalpia específica da pasta de gelo com a fração de gelo e com a concentração de NaCl (Ticona, 2007)

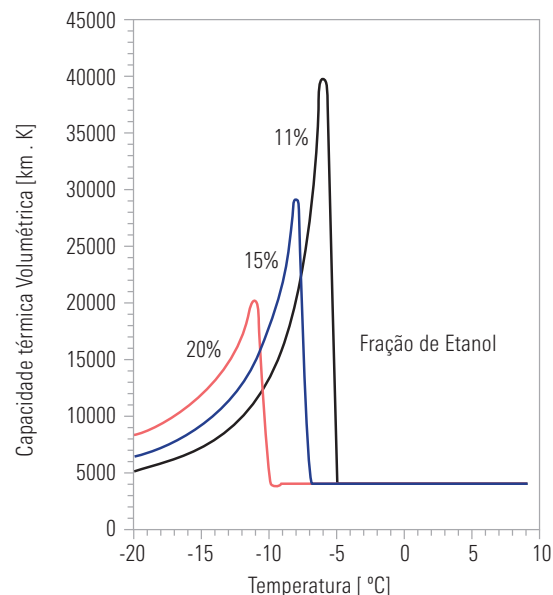


Figura 7 – Capacidade térmica volumétrica da pasta de gelo em função da temperatura (Ticona, 2007)

Uma das propriedades mais importantes da pasta de gelo, para avaliar sua capacidade de resfriamento, é sua entalpia específica. A figura 6 mostra a variação da entalpia específica da pasta de gelo com a fração de gelo e com a concentração de cloreto de sódio (NaCl) na solução aquosa. A pasta de gelo possui uma maior capacidade térmica volumétrica, isto é, armazena maior quantidade de energia térmica por unidade de volume, como pode ser visto na figura 7.

2.2 Nanofluidos

A suspensão de partículas sólidas e fibras de dimensões nanométricas num fluido base tem sido proposta como uma rota para aumentar o desempenho na transferência de calor dos líquidos correntemente disponíveis (Kebinski et al., 2005), com pequeno ou nulo peso sobre a queda de pressão do sistema, segundo Daungthongsuk e Wongwises (2005).

Os nanofluidos, segundo Wen e Ding (2005), podem ser obtidos mediante a mistura de nanopartículas (Xuan e Li, 2000 e Das et al. 2003a,b), previamente tratadas com uma substância que atende à função de dispersante, num fluido base (dry particle dispersion). Outros métodos conhecidos como one-step methods (Liu et al. 2006, Zhu et al. 2006) produzem as nanopartículas em suspensão no fluido-base por meio de uma reação química controlada ou de uma seqüência de reações e tratamentos, dispensando, em alguns casos, o uso de dispersantes.

2.2.1 Composição dos nanofluidos

Diferentes combinações de nanopartículas e de fluido-base têm sido estudadas em diferentes condições: Xuan e Li (2000), Chein e Huang (2005), Liu et al. (2006) e Jang e Choi (2006) estudaram partículas de cobre em fluido aquoso (cobre/água). Koo e Kleinstreuer (2005) fixaram a atenção em esferas de óxido de cobre em diferentes fluidos bases: CuO / (água, etileno glicol).

O efeito da alumina (Al_2O_3) sobre diferentes fluidos base foi estudado por Maïga et al. (2005) que estudou as combinações Al_2O_3 /(água, etileno glicol). Já Hays et al. (2006) e Lee e Mudawar (2006) só estudaram seu efeito sobre a água (Al_2O_3 /água).

Outras combinações, em estudos mais extensos, foram as realizadas por Zhang et al. (2006): Au/Tolueno; (Al_2O_3 , CuO, CNT) / água, Hwan et al. (2006a; 2006b): (Cu, CuO, SiO_2 , MWCNT – multi-walled carbon nanotubes) / água; CuO/etileno glicol, Hwang et al. (2006): (MWCNT, SiO_2 , CuO, Ag) / (água, etileno glicol, óleo, silicon oil, poli-a-olefin oil – PAO).

Yang et al. (2005) estudaram as características dos nanotubos de carbono (CNT) com razão de aspecto $l/d = 0,02$. Wen e Ding (2005) e Zhang et al. (2006) estudaram o par (Ti_2O /água). E Jung et al. (2006), as propriedades das partículas de cobre, óxido de cobre e alumina.

2.2.2. Condutividade térmica dos nanofluidos

Diversos estudos têm sido desenvolvidos no intuito de determinar os parâmetros que influenciam as diferentes propriedades (termofísicas e de transporte) dos nanofluidos. Calor específico, condutividade térmica, massa específica e viscosidade da “solução” são alguns dos focos desses estudos, com uma maior ênfase nas pesquisas relacionadas à condutividade térmica.

Diferentes trabalhos têm revelado um aumento da condutividade térmica com respeito à do fluido-base, em muitas vezes excedendo as predições de teorias bem estabelecidas (como o modelo de Hamilton–Crosser). Se confirmados, estes resultados, unidos a experimentos sistemáticos, novas descrições teóricas surgirão, para interpretar o comportamento térmico destes fluidos.

O estudo e a compreensão do aumento da condutividade térmica dos nanofluidos, segundo Hays et al. (2006), constitui uma área de pesquisa relativamente jovem e em crescimento, mas a caracterização de amostras, especialmente das propriedades in situ, tem sido incompleta e não muito bem definida.

As nanopartículas mudam drasticamente as propriedades do fluido base (Wang e Mujumdar, 2006). Uma das propriedades mais estudadas tem sido a condutividade térmica efetiva (ou aparente) da suspensão. Vários autores, entre eles Hwang et al. (2006a ; 2006b) e Yang et al. (2005), citam o aumento desta propriedade associado ao aumento da fração volumétrica de nanopartículas. Hwan et al. (2006b) notam que uma fração volumétrica de nanotubos de carbono multi-camadas (MWCNT) de 0,01% aumenta em 11% a condutividade térmica da água e Liu et al. (2006) que uma fração volumétrica de partículas de cobre de 0,1% conduz ao aumento de 23% da condutividade térmica do mesmo fluido base.

Hays et al. (2006) destacam como o aumento de aglomerados de Al_2O_3 (relacionado este ao controle do pH) faz diminuir a condutividade térmica da suspensão e Keblinski et al. (2005) relacionam, encontrando forte dependência, a condutividade térmica à temperatura do nanofluido.

A aplicação de nanofluidos ao arrefecimento de fontes de calor de microcanais (uma provável aplicação ao arrefecimento de microprocessadores e outros circuitos integrados) e seu desempenho térmico e hidrodinâmico foi estudada por Chein e Huang (2005), Koo e Kleinstreuer (2005), Jang e Choi (2006) e Lee e Mudawar (2006). Os primeiros, através de modelos teóricos e correlações experimentais prevêm o aumento da transferência de calor, antecipando, também, a não influência do tamanho das nanopartículas e da fração volumétrica na queda de pressão do sistema. Os últimos apontam, também, para o aumento do coeficiente de transferência de calor em escoamento laminar, ressaltando o melhor desempenho térmico na região de entrada quando comparado ao da região desenvolvida. Ressaltam, finalmente, o efeito negativo que as nanopartículas causam na evaporação, em função da deposição das partículas.

Koo e Kleinstreuer (2005) recomendam, para este tipo de dispositivos: elevado número de Prandtl do fluido; fração volumétrica de nanopartículas em torno de 4%; elevada condutividade térmica das partículas; constante dielétrica das partículas próxima à do fluido; microcanais com razão de aspecto muito maior que a unidade; e paredes e geometria favoráveis à não-acumulação.

Daungthongsuk e Wongwises (2005) e Wang e Mujumdar (2006), em suas revisões, assinalam que tem se dado muito maior atenção à condutividade térmica do que ao desempenho na transferência de calor, com a maioria dos artigos dedicados à discussão da condutividade térmica efetiva e da viscosidade. Também apontam para o baixo número de publicações em transferência de calor por convecção forçada. Podemos somar a isto os poucos trabalhos relacionados com evaporação e condensação, dentre os quais se contam os estudos de Das et al. (2003a, 2003b) e Vasallo et. Al (2004) em condições de pool boiling.

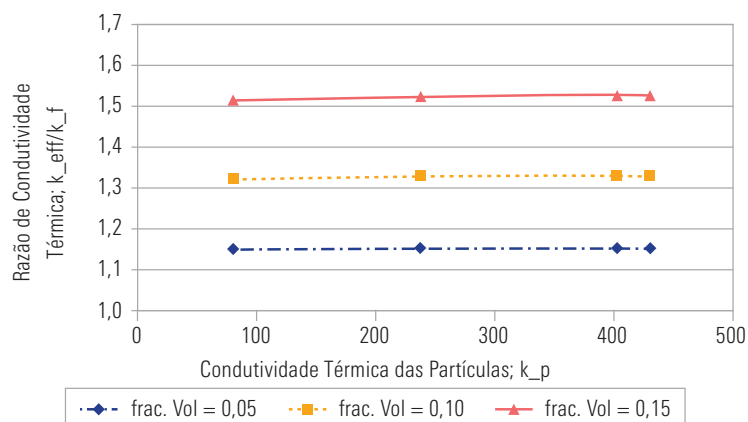


Figura 8 – Comportamento da condutividade térmica da água com adição de partículas (Puzaesky e Parise, 2007a e 2007b)

A figura 8 apresenta o comportamento da condutividade térmica de uma suspensão de partículas esféricas, conforme previsto por Puzaesky e Parise (2007a, 2007b) na medida em que aumentam a razão entre a condutividade térmica do fluido base e das partículas, e a concentração de partículas na suspensão. Percebe-se uma forte dependência da fração volumétrica no aumento da condutividade térmica efetiva.

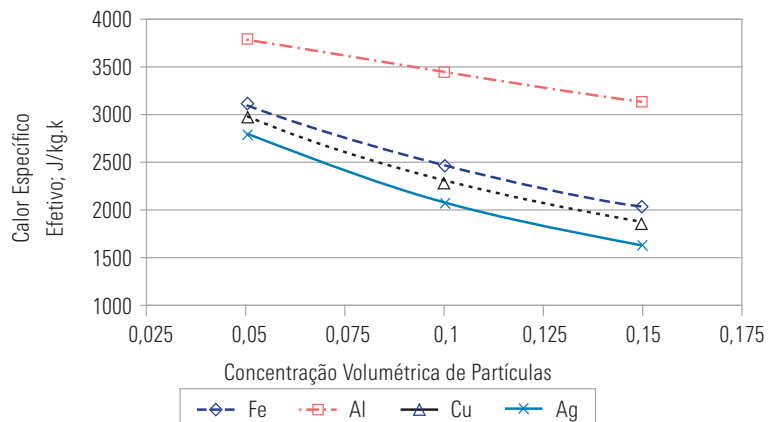


Figura 9 – Comportamento do calor específico da água (Puzaesky e Parise, 2007a e 2007b)

Já na figura 9 pode-se apreciar como, ao se acrescentar partículas ao fluido base, faz-se com que diminua o calor específico efetivo, independentemente do material utilizado. Observa-se, também, a diminuição do calor específico efetivo com o aumento da concentração de partículas de

um mesmo material. Sendo o calor específico e a condutividade térmica do fluido parâmetros que influenciam fortemente a troca de calor, faz-se necessária uma análise do efeito que a variação dos mesmos tem sobre o coeficiente convectivo de transferência de calor.

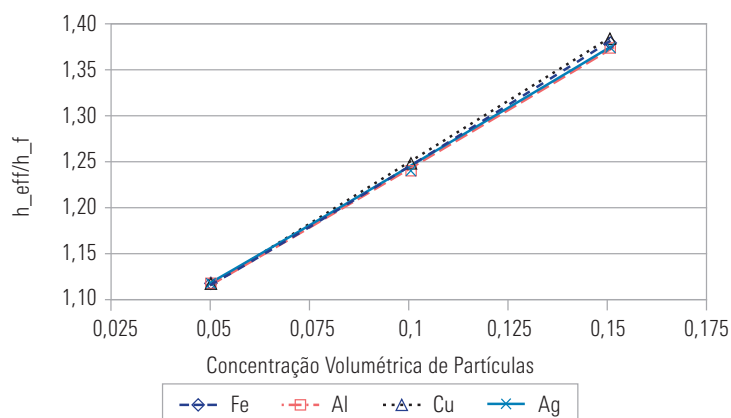


Figura 10 – Comportamento do coeficiente convectivo de troca de calor do lado da água com adição de partículas, em um trocador do tipo casco e serpentina (Puzaesky e Parise, 2007a e 2007b)

A figura 10 representa o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor para o caso do escoamento do fluido resfriado do lado da carga de um trocador de calor do tipo casco e serpentina (Pruzaesky et al., 2001 e 2002). Algumas considerações e aproximações foram aplicadas: número de Reynolds constante ($Re = 37$, não afetado pela presença das nanopartículas) e viscosidade cinemática da suspensão constante e igual à do fluido-base (no caso, água).

Aprecia-se nestes cálculos como a concentração de partículas tem um caráter dominante no aumento do coeficiente de transferência de calor, desde que obtidos valores muito aproximados para iguais concentrações de partículas de diferentes materiais.

Ainda não foram encontrados na literatura trabalhos que permitam fazer uma comparação destes resultados com dados experimentais.

3 Conclusão

A atual demanda por sistemas de refrigeração com menor impacto ambiental trouxe um novo foco aos sistemas de refrigeração indireta, que utilizam fluidos secundários para o transporte do frio. Em favor destes, destaca-se a significativa redução da carga necessária de refrigerante. Para

fluidos sintéticos, com alto GWP, tal medida representa imediato paliativo para o impacto ambiental. No caso de fluidos naturais que apresentem flamabilidade ou toxicidade, a redução de carga é igualmente benéfica, em adição ao fato de que o circuito secundário permitirá o confinamento do sistema de compressão de vapor em sítio de segurança.

Em não se ultrapassando seu limite de congelamento, água é a melhor opção para o fluido secundário. Qualquer outra alternativa, que atenda a temperaturas mais baixas, apresentará desempenho térmico inferior ao da água. A menos que se parta para a utilização de fluidos multifuncionais. Dentre estes comentou-se, no presente trabalho, sobre pasta de gelo e nanofluidos.

Pastas de gelo, a despeito do maior custo de capital, em função do evaporador/gerador de pasta, representam um eficaz meio de transporte de frio, principalmente em sistemas que façam uso da termoacumulação. Por seu lado, nanofluidos apresentam um notável potencial de desempenho térmico, muito embora ainda careçam de intenso desenvolvimento tecnológico, que atenda às questões de propriedades físicas, estabilidade e custo.

4 Referências bibliográficas

- Bedecarrats, J., Strub, F., Peuvrel, C. e Dumas, J. **“Heat transfer and pressure drop of ice slurry in a heat exchanger”**, International Congress of Refrigeration, 2003, Washington, DC, EUA.
- Chein, R. e Huang, G. **“Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids”**. Applied Thermal Engineering, v. 25, pp. 3104–3114, 2005.
- Daungthongsuk, W. e Wongwises, S. **“A critical review of convective heat transfer of nanofluids”**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005.
- Das, S. K., Putra, N. e Roetzel, W. **“Pool boiling characteristics of nano-fluids”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 46 (5), pp. 851-862, 2003a.
- Das, S. K., Putra, N. e Roetzel, W. **“Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes”**. International Journal of Multiphase Flow, v. 29 (8), pp. 1237-1247, 2003b.
- Egolf, P. W. **“Ice slurry, a promising technology. (technical note of the IIR)”**. International Institute of Refrigeration, pp. 1-3, July 2004.
- Egolf, P. W. e Kauffeld, M. **“From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications”**. International Journal of Refrigeration, vol. 28, pp. 4-12, January 2005.
- Fukusako, S., Kozawa, Y., Yamada, M. e Tanino, M. **“Research and development activities on ice slurries on Japan”**. Second Workshop IIR on ice slurries, Yverdon-les Bains, Switzerland, pp. 83-105, 1999.

- Hansen, M. T., Kauffeld, M., Radosevic, M. e Zwieng, T. **“Investigation of ice crystal growth and geometrical characterization in ice slurry (rp-1166)”**. HVAC&R Research, vol. 9, pp. 19-31, 2003.
- Hays, A., Marsh, C. P., Alvarado, J. E Franks, R. **“The Effect of Nanoparticle Agglomeration on Enhanced Nanofluidic Thermal Conductivity”**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20, 2006
- Hwang, Y. J., Ahn, Y. C., Shin, H. S., Lee, C. G., Kim, G. T., Park, H. S. e Lee, J. K. **“Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids”**. Current Applied Physics, v. 6, pp. 1068–1071, 2006a.
- Hwang, Y. J., Park, H. S., Lee, J. K. e Jung, W. H. **“Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids”**. Current Applied Physics, 6S1, pp. e67–e71, 2006b.
- Jang, S. P. e Choi, S. U. S. **“Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids”**. Applied Thermal Engineering, v. 26, pp. 2457–2463, 2006.
- Kazachki, G. S. e Hinde, D. K. **“Secondary coolant systems for supermarkets”**. ASHRAE Journal. September, pp. 34-46, 2006.
- Kebllinski, P., Eastman, j. A. e Cahill, D. G. **“Nanofluids for thermal transport”**. MaterialsToday, June, 2005.
- Koo, J. e Kleinstreuer, C. **“Laminar nanofluid flow in microheat-sinks”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 2652–2661, 2005
- Lee, J. e Mudawar, I. **“Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, article in press.
- Liu, M. S., Lin, M. C. C., Tsai, C. Y. e Wang, C. C. **“Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 49, pp. 3028–3033, 2006.
- Maïga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G. e Galanis, N. **“Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows”**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 26, pp. 530–546, 2005.
- Meewisse, J. W. **“Fluidized Bed Ice Slurry Generator for Enhanced Secondary Cooling Systems”**. PhD thesis, Delft University, Nederland, 2004.
- Melinder, Å. **“Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, Tables and diagrams for the refrigeration industry”**. International Institute of Refrigeration, France, vol. 1, 1st ed., 1997.
- Orvieto, M. A., Zorn, K. C., Lyon, M. B, Tohurst, S. R., Rapp, D. E., Mikhail, A. A., Oras, J. J., Son, H., Kasza, K. E., Brendler, C. B. e Shalhav, A. L. **“Laparoscopic ice slurry coolant for renal hypothermia”**. International Journal of Urology, vol. 177, pp. 382-385, 2007.

- Palm, B. **"Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant"**. Applied Thermal Engineering, vol. 27 (10), pp. 1693-1701, 2007.
- Pruzaesky, F. C., Braga, S. L. e Parise, J. A. R. **"Determinação do coeficiente de troca de calor no lado da carcaça de um trocador de calor tipo casco-serpentina"**. MERCOFRIO 2002 - Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Florianópolis, Santa Catarina. 20 a 23 de agosto, 2002.
- Pruzaesky, F. C., Braga, S. L. e Parise, J. A. R. **"Um modelo de simulação para os evaporadores casco e serpentina"**. CIAR 2001 – VI Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración. Bs.As., Argentina. 2001.
- Pruzaesky, F. C. e Parise, José Alberto Reis. **"Uso de nanofluidos em aplicações de Refrigeração"**. Artigo submetido ao X CONBRAVA, São Paulo, SP, Brasil. 19 – 21 de setembro, 2007.
- Pruzaesky, F. C. e Parise, José Alberto Reis. **Estudo Preliminar Sobre a Aplicação de Nanofluidos em Processos de Transferência de Calor**. CITARE 2007 – Congresso Ibero-Americano de Inovação Tecnológica e Áreas estratégicas / NanoBio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 11 – 14 de Junho, 2007.
- Ticona, E. M. **"Determinação Experimental das Características de Transferência de Calor de um Gerador de Pasta de Gelo"**. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Brasil, 2007.
- Vassallo, P., Kumar, R. e D'Amico, S. **"Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 47 (2), pp. 407-411, 2004.
- Wen, D. e Ding, Y. **"Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications"**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 26, pp. 855–864, 2005.
- Wang, X. e Mujumdar, A. S. **"Heat transfer characteristics of nanofluids: a review"**. International Journal of Thermal Sciences, article in press.
- Xuan, Y. e Li, Q. **"Heat transfer enhancement of nanofluids"**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 21, pp. 58-64, 2000.
- Yang, Y. Zhang, Z. G., Grulke, E. A., Anderson, W. B. e Wu, G. **"Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 1107–1116, 2005.
- Zhang, X., Gu, H. e Fujii, M. **"Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles"**. Experimental Thermal and Fluid Science, article in press.
- Zhu, H., Linb, Y. e Yin, Y. **"A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids"**. Journal of Colloid and Interface Science, v. 277, pp. 100–103, 2004.

Uso de fluidos refrigerantes hidrocarbonetos – Estado atual e tendências

ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO, DR. ENG.

Instituto Mauá de Tecnologia

E-mail: robertopeixoto@maua.br

63

RESUMO

Desde o estabelecimento do Protocolo de Montreal, a indústria de refrigeração tem procurado substitutos para os refrigerantes CFCs e HCFCs. A adoção de hidrocarbonetos (HCs), como refrigerantes em algumas aplicações de refrigeração e ar condicionado notadamente o isobutano (HC-600a) na refrigeração doméstica, foi resultado, em grande parte, de pressões exercidas por organizações ambientalistas e por trabalhos de pesquisa e avaliação de alternativas conduzidos pelas empresas, universidades e institutos de pesquisa. Isto se deve ao fato de que HCs atendem o requisito de potencial de destruição de ozônio zero e também têm potencial de aquecimento global (GWP) muito baixo e são substâncias encontradas abundantemente na natureza o que coopera para sua compatibilidade com o meio ambiente global.

Os hidrocarbonetos são tecnicamente viáveis para serem utilizados em todos tipos de sistemas e podem ser utilizados em uma ampla faixa de temperatura de evaporação até o limite inferior de -170 °C, no entanto aplicações práticas são restringidas por códigos de segurança e regulamentos nacionais. Os hidrocarbonetos são inflamáveis e medidas adequadas de segurança devem ser usadas durante sua manipulação, fabricação, manutenção e assistência técnica e quando da disposição final do equipamento. Diversos países têm legislação e normas técnicas sobre as limitações de uso e dos aspectos de segurança necessários.

Neste artigo são apresentados o estado atual e as principais questões relativas à utilização dos refrigerantes hidrocarbonetos no cenário internacional e nacional, considerando as várias aplicações de refrigeração e ar condicionado.

1 Introdução

Em meados do século XIX foi desenvolvida a tecnologia de refrigeração utilizando o ciclo termodinâmico de compressão de vapor constando de quatro componentes básicos (compressor, condensador, evaporador e dispositivo de expansão) e de um fluido de trabalho, chamado de fluido refrigerante, ou simplesmente refrigerante. De uma forma geral, a indústria de refrigeração e ar condicionado evoluiu significativamente durante o século XX e se faz presente hoje em diversos setores da sociedade.

As aplicações de refrigeração, condicionamento de ar e de bomba de calor representam o setor que é o maior consumidor de substâncias químicas halogenadas usadas como refrigerantes; é também hoje em dia um dos setores usuário de energia mais importante da sociedade. Estima-se que em média, para os países desenvolvidos, o setor de refrigeração e ar condicionado responda por 10-20% do consumo de eletricidade.

O impacto econômico das aplicações de refrigeração é muito mais significativo do que se imagina. Estimativas indicam 300 milhões de toneladas de mercadoria continuamente refrigeradas, com um enorme consumo anual de eletricidade, e cerca de US\$ 100 bilhões de investimentos em maquinaria e equipamentos, sendo que o valor estimado dos produtos tratados por refrigeração é da ordem de quatro vezes esta quantia. Isto é uma das razões porque os impactos econômicos da eliminação de substâncias químicas refrigerantes (tal como CFCs e HCFCs no futuro previsível) foram e ainda são difíceis de calcular.

O processo de seleção do refrigerante para um ciclo de compressão de vapor é complexo, envolvendo a investigação de um grande número de parâmetros, incluindo:

- ∴ propriedades termodinâmicas e de transporte;
- ∴ faixas de temperatura;
- ∴ relações de pressão e temperatura;
- ∴ requisitos para o processo de compressão;
- ∴ compatibilidade com materiais e óleo;
- ∴ aspectos de saúde, segurança e flamabilidade;
- ∴ parâmetros ambientais como ODP, GWP.

Desde o estabelecimento do Protocolo de Montreal, a indústria de refrigeração tem procurado substitutos para os refrigerantes CFCs e HCFCs. A adoção de hidrocarbonetos (HCs), como refrigerantes em algumas aplicações de refrigeração e ar condicionado notadamente o isobutano

(HC-600a) na refrigeração doméstica, foi resultado, em grande parte, de pressões exercidas por organizações ambientalistas e por trabalhos de pesquisa e avaliação de alternativas conduzidos pelas universidades. Isto se deve ao fato de que HCs atendem o requisito de potencial de destruição de ozônio zero e também têm potencial de aquecimento global (GWP) muito baixo e são substâncias encontradas abundantemente na natureza o que coopera para sua compatibilidade com o meio ambiente global.

Os hidrocarbonetos são tecnicamente viáveis para serem utilizados em todos tipos de sistemas e podem ser utilizados em uma ampla faixa de temperatura de evaporação até o limite inferior de -170 °C, no entanto aplicações práticas são restringidas por códigos de segurança e regulamentos nacionais. Os hidrocarbonetos são inflamáveis e medidas adequadas de segurança devem ser usadas durante sua manipulação, fabricação, manutenção e assistência técnica e quando da disposição final do equipamento. Diversos países têm legislação e normas técnicas sobre as limitações de uso e dos aspectos de segurança necessários. A tabela abaixo apresenta requisitos referentes à carga máxima permissível estabelecidos em normas internacionais e da União Européia.

Graças as suas excelentes características termodinâmicas, os hidrocarbonetos se constituem em fluidos refrigerantes que contribuem para que sistemas de refrigeração tenham uma operação energeticamente eficiente. São mais pesados que ar e tem efeito anestésico e asfixiante em altas concentrações. Um aspecto importante a destacar e que os hidrocarbonetos estão disponíveis a baixo custo no mundo inteiro.

A utilização de refrigerantes hidrocarbonetos exige que engenheiros e técnicos envolvidos no desenvolvimento, fabricação, projeto, instalação, operação e assistência técnica, tenham orientação e treinamentos específicos com relação aos procedimentos adicionais e precauções associadas ao uso de refrigerantes inflamáveis.

Diversas publicações reportam que sistemas com refrigerantes HCs apresentam eficiência mais alta quando comparados com sistemas equivalentes utilizando HFCs. Outras reivindicam que essa eficiência mais alta pode ser alcançada também pelos sistemas com HFCs, se os custos extras usados para atender os requisitos de segurança necessários aos sistemas com HCs forem usados para melhorar a eficiência de sistemas com HFCs.

Empresas como a Unilever e Coca-Cola se comprometeram a não utilizar mais HFCs nos seus equipamentos de refrigeração e de aumentar a sua eficiência energética e o uso de refrigerantes HCs é uma das alternativas em implantação.

Tabela 1 – Requisitos com relação à carga de refrigerante HC apresentados nas principais normas

Norma	Tipo de equipamento	Limites de carga máxima para HCs	Outros aspectos tratados pela norma
EN 378	Comercial e industrial	<p>Carga < 150 g: (sem requisitos de segurança para sistemas herméticos)</p> <p>Carga > 150g: (requisitos com relação ao volume da sala e ventilação natural)</p> <p>Carga > 5kg: (requisitos com relação válvula de segurança, detector de HC, ventilação mecânica)</p>	Componentes, dispositivos de segurança, local de instalação, manutenção
ISO 5149	Comercial e industrial	Depende da aplicação	
IEC 60335-2-24	Pequenos refrigeradores e congeladores	150 g	Testes de pressão
IEC 60335-2-40	Equipamentos compactos de ar condicionado e bombas de calor	1 kg ou 5 kg em ambientes externos	Testes de pressão Manutenção
IEC 60335-2-89	Refrigeradores e congeladores comerciais compactos	150 g	Testes de pressão

2 A questão dos HFCs, o Protocolo de Kyoto e os refrigerantes naturais

Os refrigerantes hidrofluorcarbonos (HFCs) foram desenvolvidos nos anos 80 e 90 como refrigerantes alternativos aos CFCs e HCFCs. HFCs não contém cloro e desta forma não destroem a camada de ozônio, mas contribuem para o processo de aquecimento global. HFCs são gases de efeito estufa e fazem parte da “cesta de seis gases” cujas emissões devem ser reduzidas de acordo com o Protocolo de Kyoto. Estes gases são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nítrico (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆).

Pelo Protocolo de Kyoto as emissões individuais dos gases de efeito estufa serão integradas como emissões equivalentes de CO₂ utilizando seus potenciais de aquecimento global (GWPs). Muitos países desenvolvidos devem reduzir suas emissões equivalentes em CO₂ em 5,2% abaixo dos níveis de 1990 para CO₂, CH₄, N₂O, e níveis de 1995 para HFCs, PFCs, SF₆ durante o período de 2008-2012.

Os hidrocarbonetos junto com a amônia, CO₂ e água, fazem parte de um grupo chamado de “refrigerantes naturais”. Todos “refrigerantes naturais” existem em ciclos materiais da natureza mesmo sem a interferência humana. Evolução e inovações tecnológicas tem ajudado na consideração dos “refrigerantes naturais” como uma solução segura e econômica para aplicações em numerosas áreas. Por causa dos menores impactos ambientais e por serem mais adequados dentro da perspectiva de desenvolvimento tecnológico sustentável, sistemas de refrigeração com refrigerantes naturais podem vir a ter um papel importante no futuro como soluções técnicas em diversas aplicações.

O uso de “refrigerantes naturais” também é defendido do ponto de vista econômico. Os refrigerantes são muito baratos, o que tem um efeito positivo não só no custo associado a carga inicial de refrigerante de uma instalação, mas também, considerando os custos operacionais devido a necessidade de reposição em função dos vazamentos. Além disso, “refrigerantes naturais” são altamente eficientes, o que ajuda a diminuir o consumo de energia de uma instalação. Por outro lado, devido à questão de segurança, estima-se que os custos de investimento para instalações usando “refrigerantes naturais” é sempre 10 a 20 por cento mais alto que para instalações usando refrigerantes sintéticos, dependendo do tipo e tamanho do sistema. Estes aspectos podem ser compensados pelos menores custos operacionais relacionados ao menor custo de refrigerante para manutenção e ao reduzido consumo de energia.

3 Cenário internacional

O estado atual e as principais questões relativas à utilização dos refrigerantes hidrocarbonetos no cenário internacional considerando as varias aplicações de refrigeração e ar condicionado são apresentadas abaixo.

3.1 Refrigeração

3.1.1 Refrigeração Doméstica

No panorama global, HC-600a e HFC-134a continuam a ser as alternativas dominantes para refrigerantes substitutos do CFC-12 em novos equipamentos de refrigeração doméstica. Outros candidatos alternativos têm apelo regional, principalmente devido à disponibilidade de compressores adequados ou de refrigerantes específicos. Como exemplo de candidatos regionais

podem ser citados: misturas de HC-600a e de HFC-152a na Rússia, misturas de HC-600a e HC-290 na Índia. A aplicação de misturas HC-600a/HC-290 na Europa durante os 1990's foi um passo interino em direção a uma transição final a HC-600a.

3.1.1.1 Questões relativas a reparos e manutenção no campo

O setor de serviços de equipamentos de refrigeração doméstica e comercial compactos, tem hoje, em muitos países, uma nova realidade caracterizada pela necessidade de lidar com o uso de múltiplos refrigerantes. Existe atualmente, uma necessidade de maior limpeza do circuito refrigerante ditada pela redução das folgas nos compressores de alta eficiência e a exigência de pureza dos refrigerantes. Lidar com múltiplos refrigerantes complica esta tarefa. A sensibilidade à umidade dos óleos polyolester exige o controle cuidadoso de níveis de umidade quando do uso do refrigerante HFC-134a. A natureza inflamável dos hidrocarbonetos exige, quando do uso do refrigerante HC-600a, o controle cuidadoso de potenciais fontes de ignição. A presença de múltiplos refrigerantes no setor de serviços aumenta a probabilidade de existência de erros nos procedimentos de carga de refrigerante nos sistemas, tanto referente à quantidade quanto ao tipo de refrigerante.

3.1.1.2 Uso de refrigerantes HCs em alguns países em desenvolvimento

O uso de fluidos refrigerantes hidrocarbonetos na Índia apresenta as seguintes características:

- ∴ Um fabricante de refrigeradores domésticos está utilizando como refrigerante a mistura de HCs (R-600a e R-290). Esta empresa é responsável por 20% da produção indiana que é atualmente de 3,5 milhões de refrigeradores.
- ∴ Foram feitos alguns esforços para divulgar e promover o uso de refrigerantes HCs em produtos de refrigeração comercial ("stand-alone") mas não foi obtido muito progresso devido ao fato que os principais usuários eram empresas que preferiram o HFC-134a. Devido aos princípios anunciados por Unilever e Coca-cola esta situação pode mudar.
- ∴ Alguns esforços ainda estão sendo feitos para o retrofitting de refrigeradores domésticos e produtos de refrigeração comercial, espera-se que eles mostrem mais resultados após 2007 quando a disponibilidade de CFCs irá diminuir.

Estudos desenvolvidos pelo PNUMA (UNEP) na Indonésia, Costa Rica e Cuba são relatados em UNEP, 1999.

Em Cuba, a partir de 1994 foi desenvolvido um refrigerante a partir de GLP (gás liquefeito de petróleo) constituído por uma mistura ternária de hidrocarbonetos (propano, isobutano e n-butano), chamado de LB-12, que tem sido utilizado como um substituto "drop-in" para o refrigerante CFC-12 em

refrigeradores domésticos, bebedouros e pequenos refrigeradores e congeladores comerciais. 1040 técnicos foram treinados para desempenhar estas atividades de conversão de equipamentos com CFC-12. A partir de 1997 iniciou a produção de refrigeradores domésticos com refrigerante isobutano e a partir de 2001 com o apoio da GTZ e da Agencia Ambiental do Canadá foi instalada uma planta de destilação para produzir propano e isobutano com alto grau de pureza. Até 2003, contabilizava-se a conversão de 400.000 refrigeradores domésticos para e 10.000 refrigeradores comerciais para o uso de LB-12; e a produção de 40.000 refrigeradores com refrigerante isobutano.

3.1.2 Refrigeração Comercial

Refrigeração comercial é composta por três tipos de equipamentos: unidades compactas (“stand-alone”), unidades condensadoras e sistemas centralizados.

Alguns equipamentos autônomos (“stand-alone”), que tem tecnologia semelhante a dos refrigeradores domésticos, e que usam hidrocarbonetos como refrigerantes estão disponíveis em países europeus, com carga de refrigerante reduzida para obedecer às limitações estabelecidas pela norma de segurança europeia EN 3781.de 1999. Expositores, “vending machines” e equipamentos comerciais compactos de pequeno porte foram desenvolvidos por várias companhias em vários países usando HC-600a, HC-290 e misturas de HC como refrigerante. As limitações da carga de refrigerante HC são especificadas nas normas de segurança (e.g. EN 378, IEC 60335-2-89), onde as máximas quantidades por circuito depende da aplicação. Não obstante, cargas de HC tendem a ser aproximadamente 50% menores que as equivalentes de HFCs e HCFCs, devido à baixa densidade do refrigerante HC, o que reduz o impacto de tais limites. Desenvolvimentos recentes utilizando técnicas de minimização de carga tornam possível prever que as cargas de sistemas futuros serão ainda menores.

Na área de refrigeração para supermercados na Europa, sistemas indiretos estão recebendo cada vez mais atenção para limitar a carga de refrigerante (independente do tipo de refrigerante) ou para permitir o uso de refrigerantes amônia ou hidrocarbonetos.

Sistemas com amônia e hidrocarbonetos como refrigerantes primários em sistemas indiretos (incluindo HC 1270, HC 290 e misturas HC290/170) estão implantados e operando em vários países europeus. Alguns resultados publicados mostram que sistemas indiretos com amônia e hidrocarbonetos apresentam custo inicial 10% a 35% maior e têm consumo de energia 5% a 20%

1 A norma europeia EN 378 “Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements” se refere a requisitos de segurança e ambientais de sistemas de refrigeração e contem 4 partes: 1: Requisitos básicos, definições, classificação e critério de seleção; 2: Design, construção, teste, e documentação; 3: Instalação e proteção pessoal; 4: Operação, manutenção, reparo e recolhimento.

maior que sistemas de expansão direta, devido aos requisitos adicionais do sistema (trocadores de calor e bombas para circulação com seus custos e penalidades de consumo de energia). O trabalho de aprimoramento dos projetos de sistemas indiretos continua com as metas de reduzir o custo o consumo de energia nestes sistemas.

3.1.3 Refrigeração Industrial e Armazenamento Frigorificado

Refrigerantes HCs são usados em alguns equipamentos de refrigeração industrial incluindo o HC-290, HC-1270 e misturas HC-290/600a. Todos estes refrigerantes possuem condições de saturação (pressão e temperatura) muito semelhantes as do HCFC-22 e CFC-502. O desempenho do sistema, considerando a sua eficiência, é comparável e, em alguns casos, superior ao dos sistemas com fluidos halocarbonos. Além dos aspectos específicos de segurança, os procedimentos normais de refrigeração, que são utilizados para os sistemas com HCFCs e CFCs, podem ser usados sem prejuízo importante para a integridade do sistema.

Em função das preocupações com a inflamabilidade, considerações de projeto, como as que são detalhadas nas normas de segurança relevantes, devem ser adotadas. Medidas adicionais de segurança devem ser consideradas para reparo e manutenção. Várias normas europeias permitem o uso de HCs em aplicações industriais e ditam requisitos específicos de segurança.

3.1.4 Transporte Refrigerado

O setor de transporte refrigerado inclui o transporte de produtos refrigerados em navios refrigerados, navios porta-containers, caminhões e trens refrigerados.

Caminhões refrigerados utilizando refrigerante HC-290 (propano) foram desenvolvidos na Austrália, Alemanha e em outros países europeus e já estão comercialmente disponíveis. Os sistemas exigem um detector de vazamento no reboque e treinamento especial do motorista para assegurar uma operação segura.

Tecnicamente esta solução poderia ser adotada a nível mundial em sistemas de refrigeração instalados em certos tipos de caminhões e trens, particularmente em sistemas compactos. No entanto os sistemas em uso teriam que ser adaptados para atender certas regulamentações, que impõem requisitos especiais (por exemplo para as garagens etc.). É provável que as mudanças para hidrocarbonetos seriam limitadas em princípio para caminhões refrigerados e ao nível nacional, ou seja para transporte dentro de um determinado país sem cruzar as fronteiras.

O uso de refrigerantes hidrocarbonetos em aplicações de transporte refrigerado exigirá medidas adicionais de segurança, aumentando os custos do sistema, e no começo provavelmente também valores de seguro. No caso de containers refrigerados, pode também exigir mudanças nos navios transportadores.

3.2 Equipamentos de Ar Condicionado Compactos

Em algumas categorias de produtos, equipamentos com baixa carga de refrigerante, os refrigerantes hidrocarbonetos também podem ser substitutos adequados para o HCFC-22. Para isto é necessário que normas internacionais de segurança sejam desenvolvidas para definir os requisitos específicos de projeto e de aplicação (instalação, manutenção, etc.).

Informações detalhadas para o projeto de equipamentos com HCs são fornecidas em "Guidelines for the Safe Use of Hydrocarbon Refrigerants", Air Conditioning and Refrigeration Industry Board", um documento que apresenta diretrizes para o projeto de sistemas de refrigeração e ar condicionado usando refrigerantes hidrocarbonetos.

Equipamentos compactos de ar condicionado de pequeno porte com baixa carga de refrigerante hidrocarboneto (HC-290) são fabricados em alguns países da Europa (por exemplo, os condicionadores de ar portáteis fabricados pela empresa DeLonghi na Itália).

Os fatores que são considerados como barreiras para a ampliação da aplicação de refrigerantes hidrocarbonetos em sistemas de ar condicionado são os problemas de segurança relativos a manipulação de níveis relativamente altos de carga de HC, estabelecimento de normas técnicas para procedimentos de instalação e a necessidade de capacitação e treinamento de técnicos para serviços de campo. O uso de hidrocarbonetos em equipamentos de ar condicionado resfriados a ar com carga de refrigerante maior que 1 kg tem sido o foco do desenvolvimento de significativas atividades de análise de risco e de normas de segurança. Diversas organizações conduziram avaliações de risco de condicionadores de ar usando refrigerantes hidrocarbonetos. A maioria destas avaliações conclui que o risco de fogo ou explosão é razoavelmente baixo e é proporcional à quantidade de refrigerante no sistema. No entanto, a questão mais significativa que deverá ser analisada pelos fabricantes quando considerarem a aplicação de refrigerantes hidrocarbonetos é a determinação de um nível aceitável de risco e a responsabilidade associada.

A decisão final sobre o uso de se refrigerantes hidrocarboneto em equipamentos de ar condicionado, parece ser, basicamente, uma decisão baseada em aspectos financeiros.

3.3 Unidades Resfriadoras de Líquidos (“Chillers”)

Embora refrigerantes hidrocarbonetos tenham uma longa história de aplicação em chillers industriais em plantas petroquímicas, antes de 1997/98 eles não eram usados em chillers para aplicações de condicionamento de ar devido a questões relativas à segurança dos sistemas.

Atualmente, vários fabricantes europeus comercializam chillers com refrigerantes hidrocarbonetos para diversas capacidades e aplicações. Existem no mercado chillers resfriados (com condensação) a ar e a água para aplicações de temperaturas de evaporação médias e altas usando refrigerantes HC-1270 (propileno), HC-290 (propano), e uma mistura HC-290/HC-170 (propano/etano).

Chillers/bombas de calor reversíveis usando HC-290 como refrigerante estão disponíveis em capacidades de até 173 kW com uma carga máxima de propano de 15 kg. Os mercados mais importantes são edifícios de escritório, resfriamento de processos industriais e supermercados, onde são utilizados em sistemas secundários de refrigeração. Nestes casos, o chiller é, em geral, instalado numa sala de máquinas com um ventilador a prova de explosão (sem faíscas) para ventilação constante ao exterior da sala. Uma configuração alternativa é a instalação externa do chiller, ao ar livre.

O custo de chillers com refrigerantes HCs pode ser mais alto que com refrigerante HCFCs ou com HFCs, parcialmente devido ao fato que chillers com hidrocarbonetos ainda são um equipamento para um nicho de mercado.

Os refrigerantes hidrocarbonetos são usados em chillers centrífugos em plantas petroquímicas, onde materiais muito perigosos são usados rotineiramente e o pessoal é altamente qualificado em medidas de segurança e respostas a situações de emergência

3.4 Bombas de calor

Em diversos países europeus, os hidrocarbonetos estão se mostrando como uma opção viável para substituição de CFCs e HCFCs em bombas de calor residenciais de baixa carga de refrigerante. Os hidrocarbonetos mais importantes para aplicações em bombas de calor de temperaturas médias são propano (HC-290), propileno (HC-1270), e misturas de etano/propano (HC-170/HC-290). Vários fabricantes norte-europeus usam HC-290 ou HC-1270 como refrigerantes em pequenas bombas de calor residenciais e comerciais, água – água e ar – água.

No Brasil, devido às características climáticas, o uso de bombas de calor para aquecimento residencial praticamente não existe, a não ser em pequena escala nos estados do sul e empregando equipamentos reversíveis de condicionamento de ar (refrigeração no verão e aquecimento no inverno). No entanto, bombas de calor para aquecimento de piscinas têm apresentado uma utilização crescente

e estes equipamentos, devido às condições de instalação (em geral ao ar livre) e da baixa carga de refrigerante, podem vir a utilizar refrigerantes hidrocarbonetos (principalmente propano).

3.5 Sistemas de Ar Condicionado Automotivo (“MAC”)

Sistemas de ar condicionado de veículos (freqüentemente referidos como sistemas de ar condicionado móveis – “mobile air conditioning, MACs”) incluem sistemas de condicionamento de ar instalados em automóveis, caminhões, e ônibus.

Os veículos construídos antes de 1995 usavam CFC-12 como refrigerante. Com a implantação do Protocolo de Montreal, basicamente todos novos veículos com sistema de ar condicionado foram equipados com HFC-134a como fluido refrigerante. Há uma possibilidade, segundo representantes da indústria automotiva, que um refrigerante alternativo possa ser introduzido antes de 2008 para competir com HFC-134a.

Uma das alternativas promissoras e que está sendo bastante investigada é representada pelo uso de CO₂ como refrigerante em ciclo transcrito (ciclo cujos processos ocorrem acima da temperatura crítica da substância) . Esta tecnologia está sendo desenvolvida por vários fabricantes de veículo em cooperação com fornecedores de componentes do sistema de condicionamento de ar.

Além do CO₂, o uso de refrigerantes inflamáveis (principalmente HFC-152a e HC-290 – propano) foi proposto para substituir o HFC-134a . Deve-se ressaltar que o uso de refrigerantes HCs, ou outros inflamáveis, em sistemas futuros, poderá ser feito utilizando-se sistemas com a mesma configuração adotada atualmente para o HFC-134a, ou seja de expansão direta, desde que sejam projetados para levar em conta a questão de segurança. Uma alternativa a essa opção seria a adoção de configuração de sistemas baseados na tecnologia de circuito secundário.

Um aspecto que merece ser destacado no uso de propano, o melhor hidrocarboneto para ser utilizado como refrigerante em sistemas de condicionamento de ar veicular, é a sua disponibilidade. Propano é usado universalmente para aquecimento e para cozinhar. Como resultado disso, sua manipulação, com segurança, é bastante comum no mundo todo. Isto pode ser uma vantagem nos países Artigo 5 (1) do mundo. Para sistemas de expansão direta usando propano, a carga de refrigerante necessária para um veículo de porte médio seria relativamente pequena, da ordem de 300 gramas. Esta carga seria ainda mais baixa para um sistema com circuito secundário. Devido a inflamabilidade extrema do propano, o seu possível uso seria restringido, em muitos países, ao emprego em sistemas com circuito secundário.

4 Cenário nacional

Existe uma empresa de refrigeração doméstica estabelecida no Brasil que já está produzindo e comercializando no mercado nacional e também para exportação, refrigeradores domésticos utilizando refrigerante HC, é o caso da Bosch na sua unidade de produção em Hortolândia no interior do estado de São Paulo. Outra empresa, a Multibras em sua unidade industrial em Joinville, Santa Catarina, produz refrigeradores domésticos com HCs mas só para exportação, principalmente para Europa.

As empresas nacionais fabricantes de refrigeradores e congeladores comerciais que fornecem equipamentos para empresas que estabeleceram políticas de não utilizar HFCs, como é o caso da Unilever-Kibon, devem se adaptar a esta determinação dos seus clientes e passar a utilizar HCs em alguns de seus produtos ainda no ano de 2006, tanto para comercialização no mercado nacional quanto para exportação. Durante os levantamentos de dados e contatos realizados para elaboração deste estudo, as empresas que mencionaram que vão passar a utilizar refrigerantes HCs, não apresentaram as datas precisas a partir de quando vão utilizar estes refrigerantes alegando questões de sigilo que devem ser observadas no relacionamento com o mercado.

Considerando o cenário internacional de crescente uso de refrigerantes HCs e a importância de difundir informações e discutir os principais aspectos relacionados com o uso desta tecnologia, o MMA promoveu o Seminário: "Uso de Fluidos Refrigerantes Hidrocarbonetos: Situação Atual e Tendências Futuras". O Seminário foi organizado pelo Núcleo de Ozônio da Diretoria de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente – MMA em conjunto com a Agência Alemã para Cooperação Internacional – GTZ e foi realizado em São Paulo, nos dias 19 e 20 de Setembro de 2005.

Os objetivos principais do evento foram:

- .: apresentar o estado da arte da tecnologia de refrigeração com refrigerantes hidrocarbonetos a partir das experiências de uso desta tecnologia em diversos países, tanto na fabricação de equipamentos novos como na assistência técnica e na conversão de equipamentos existentes.
- .: discutir os aspectos tecnológicos e relacionados à legislação e normas técnicas com o objetivo de auxiliar no estabelecimento de políticas específicas ao nível empresarial e governamental.

O Seminário contou com diversas apresentações de palestrantes nacionais e internacionais convidados. Ao final do primeiro dia, os participantes responderam um questionário sobre a tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos para auxiliar a avaliação do potencial e das perspectivas de uso

desses refrigerantes no Brasil. No segundo dia, na fase final do Seminário, os participantes foram organizados em grupos que discutiram a tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos considerando os seguintes aspectos: treinamento de mecânicos de refrigeração, questões de segurança, políticas e ações governamentais e possibilidade de conversão “retrofit” de equipamentos existentes para a eliminação do uso de CFCs.

5 Conclusões e recomendações

As análises realizadas durante a elaboração deste estudo, os contatos realizados com diversas empresas, instituições e associações industriais; e as questões e sugestões levantadas nos debates ocorridos no “Seminário sobre Refrigerantes Hidrocarbonetos”, permitem apresentar uma série conclusões e recomendações. Os principais pontos, mencionados abaixo, poderão ser considerados nos âmbitos governamentais e empresariais para o encaminhamento de ações futuras com relação ao uso tecnologia dos refrigerantes HCs no Brasil.

- ∴ A tecnologia de uso de refrigerantes HCs está consolidada em algumas aplicações de refrigeração e ar condicionado (refrigeração doméstica e comercial “stand alone”) e está evoluindo em outros segmentos (uso como refrigerante primário em sistemas secundários de refrigeração para supermercados, chillers e bombas de calor);
- ∴ A questão da segurança está sendo discutida internacionalmente e já conta com diversas normas que auxiliam o seu equacionamento;
- ∴ No Brasil, a maior parte da base instalada de refrigeradores e congeladores domésticos e comerciais ainda tem CFC-12 como refrigerante devido à longa vida útil desses equipamentos, o que retarda o phaseout de CFC-12 nas operações de serviço. Este fato cria a oportunidade para o uso de opções “drop-in”, entre elas misturas de HCs;
- ∴ Alguns fabricantes brasileiros já estão utilizando refrigerantes HCs em produtos para a exportação. No mercado interno já existe um fabricante oferecendo refrigeradores domésticos com refrigerante HC. Outras empresas fabricantes de refrigeradores domésticos e comerciais que já tem tecnologia e/ou já fabricam para exportação estão avaliando a possibilidade de colocação de seus produtos com HCs no mercado nacional;
- ∴ O mercado internacional já apresenta restrições ao uso de HFCs em determinadas aplicações de RAC, caso de alguns países da U.E. Além disso a política estabelecida por

alguns grupos empresariais globais, (Unilever, Coca-cola, MacDonalDs) cria motivação para avaliação da adoção no Brasil da tecnologia de refrigerantes HCs;

- ∴ O uso da tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos apresenta diversas vantagens: melhor eficiência energética em algumas aplicações, baixo custo do refrigerante e de sua importação, possibilidade de fornecimento nacional, compressores fabricados no Brasil, menor impacto ambiental;
- ∴ O principal aspecto negativo da tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos é o fato do refrigerante ser inflamável e explosivo, o que origina uma serie de preocupações com segurança, alguns custos adicionais e a necessidade de treinamento de pessoal;
- ∴ O uso de uso de refrigerantes HCs para a conversão de refrigeradores domésticos e comerciais que utilizam CFC-12 deve ser analisado a luz das questões de custo e segurança. A opção que parece ser mais atrativa é a quando a conversao não exige alterações significativas equipamento;
- ∴ A questão de não haver fornecimento local de refrigerantes HCs, pode ser contornada com a instalação de plantas de produção destes refrigerantes a partir de GLP. O custo apresentado por um dos palestrantes no Seminário sobre Refrigerantes HCs para uma planta com capacidade de produção anual de 100 ton é de cerca de €330,000;
- ∴ Constata-se que há uma falta de divulgação sobre a tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos no Brasil. O MMA poderia promover uma divulgação nacional com marketing “mais agressivo”;
- ∴ Com relação à questão logística, a ser considerada na discussão de distribuição de refrigerantes HCs, considera-se que a rede nacional de distribuição de GLP deve ser aproveitada;
- ∴ Constata-se a falta de mecânicos qualificados para lidar com refrigerantes HCs e considera-se que uma das ações para incentivar o uso destes refrigerantes deveria ser a criação de um programa de capacitação e certificação de mecânicos de refrigeração nesta tecnologia;
- ∴ Normas técnicas nacionais devem ser criadas tomando-se como referência as normas internacionais já existentes. As associações industriais e profissionais têm um papel importante nesta mobilização;
- ∴ Discussões sobre aspectos específicos levantados no Seminário sobre Refrigerantes HCs deveriam ser incentivadas a partir da realização de outros encontros com apoio das associações industriais e instituições de ensino e pesquisa.

5 Referências bibliográficas

ACRIB, **Air-conditioning and Refrigeration Industry Board, Guidelines for the use of Hydrocarbon Refrigerant in Static Refrigeration and Air-conditioning Systems**, Carshalton, UK, 2000.

ASHRAE, **Handbook Fundamentals**, ASHRAE, Atlanta, USA, 1997.

Calor Gas Refrigeration Taking Care, Fact Sheets, Slough, UK, 1994.

Choi, D. K., Domanski, P.A., Didion, D., **Evaluation of Flammable Refrigerants for Use in a Water-to-Water Residential Heat Pump, Applications for Natural Refrigerants**, Conference Proc, Aarhus, Denmark, 1996.

Deloitte & Touche, **Assessment of the Prospects for Hydrocarbon Technology in the Global Domestic Refrigeration Market**, Deloitte & Touche Consulting Group, London, England, 1996.

Elefsen, F. et al, **Field test of 75 R404A and R290 ice cream freezers in Australia**, 5th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, September 17-20, Guangzhou, China., 2002.

Elefsen, F., Pedersen, P.H., Mogensen, L. **Going towards natural refrigerants: experience from Danish industry**, Environmental project no. 301, Ministry of Environment and Energy Denmark, 1995.

GTZ, Yearbook 1996, **Hydrocarbon Technology II**, Eschborn, Germany, 1996.

IPCC/TEAP, **Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons**, Cambridge University press, 2005.

Kruse, H., **The State of the Art of Hydrocarbon Technology in Household Refrigeration**, Proc. of the Int. Conference on Ozone Protection Technologies, Washington D.C., USA, 1996.

PEIXOTO, R. A. **Impacto Ambiental de Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado**. Revista da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, ventilação e Aquecimento – ABRAVA, 1999.

PEIXOTO, R. A., **Fluidos Refrigerantes Hidrocarbonetos – Uso Atual e Perspectivas Futuras**, Núcleo de Ozônio da Diretoria de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2006.

UNEP, (United Nations Environment Programme), 2002: Report of the Refrigeration, Air 41 Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (2002 Assessment).

UNEP, **Study on the Potential for Hydrocarbon Replacements in Existing Domestic and Small Commercial Refrigeration Appliances**, 1999.



Uso de hidrocarbonetos refrigerantes em aplicações residenciais

JOÃO M. D. PIMENTA

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração

pimenta@unb.br – www.laar.unb.br

RESUMO

O uso de hidrocarbonetos como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração e climatização residenciais têm se expandido e consolidado nas últimas décadas. Atualmente a busca por refrigerantes que não causem impactos sobre o meio-ambiente tem se concentrado no desenvolvimento de fluidos naturais, entre os quais, os hidrocarbonetos, têm um papel importante a desempenhar, particularmente no segmento residencial. O presente trabalho apresenta uma revisão do uso de hidrocarbonetos em aplicações residenciais, discutindo aspectos técnicos relacionados a seu desempenho energético, custo, condições para uso seguro e perspectivas de pesquisa.

1 Introdução

Desde o advento do ciclo de compressão a vapor em 1834, o progresso da indústria de refrigeração e ar condicionado mundial tem estado diretamente relacionado à capacidade de desenvolver fluidos refrigerantes que permitam atender de forma adequada as exigências de projeto de cada aplicação. As mais diferentes alternativas de fluidos de trabalho tem sido examinadas desde então, num processo que continua ainda nos dias atuais.

Até 1930, uma primeira geração de fluidos refrigerantes foi implementada em diferentes sistemas de refrigeração e climatização, com ênfase para o setor industrial. Essa primeira geração era formada por refrigerantes que, em sua maioria, eram fluidos naturais, ou seja, diretamente disponíveis na natureza e obtidos a partir de processos simples de produção. Entre os fluidos então usados encontravam-se, por exemplo, diferentes éteres, o dióxido de carbono, a amônia, o dióxido de enxofre, a água e os hidrocarbonetos (HC's). Tais fluidos, contudo, tinham sua aplicação limitada de forma geral em função de sua inflamabilidade, toxicidade ou barreiras tecnológicas de então. Assim, o mercado de refrigeração residencial era incipiente e pouco representativo. O advento de sistemas herméticos de refrigeração permitiu atenuar em certo o problema da inflamabilidade e toxicidade possibilitando alguma expansão da refrigeração e climatização em residências.

A efetiva penetração dos refrigeradores e aparelhos de ar condicionado no dia-a-dia das pessoas, só foi possível com o desenvolvimento de uma nova geração de refrigerantes que eliminava os problemas da toxicidade e inflamabilidade mantendo ainda excelentes características de desempenho. Tal avanço resultou do trabalho liderado por Thomas Midgley que em 1929 permitiu o desenvolvimento dos CFC's a partir da síntese de hidrocarbonetos como o metano que passaram então a dominar o mercado, marcando uma segunda geração comprometida com a segurança e desempenho.

Durante mais de cinco décadas os fluidos sintéticos representaram a solução absolutamente predominante nas mais diferentes aplicações de refrigeração e climatização. Os fluidos de primeira geração foram então descartados em sua maioria, a exceção da amônia que continuou se mantendo como o refrigerante principal no setor industrial, particularmente no setor de alimentos. Tal cenário contudo começou a mudar a partir de 1974, com a demonstração da relação existente entre as emissões de CFC's e a destruição do ozônio estratosférico por Rowland e Molina. Pouco depois, pesquisadores da estação britânica Halley Bay na Antártica descobrem o buraco na camada de ozônio publicando artigo na revista *Nature* em maio de 1985. Tais fatos, entre outros, levaram em Setembro de 1987 a assinatura do Protocolo de Montreal sobre "Substances That Deplete the Ozone Layer" que impôs metas para a eliminação do CFC's e HCFC's, entre outras substâncias. Desde então o Protocolo de Montreal sofreu cinco revisões: Londres (1990), Copenhague (1992), Viena (1995), Montreal (1997) e Beijing (1999). Em resposta, a indústria de fluidos refrigerantes sintéticos se

mostrou bastante ágil na apresentação de novas soluções, isentas de cloro, como os HFC's e seus "blends" que hoje dominam o mercado.

A questão do impacto ambiental causado pela indústria de refrigeração e climatização parecia então resolvida. Entretanto, a discussão sobre o aquecimento global que há algum tempo vinha ganhando força na comunidade científica, findou por levar, em 1997, a realização de conferência das Nações Unidas na cidade de Kyoto, no Japão, onde se assumiram metas para a redução da emissão de gases de efeito estufa (entre eles os HFC's) pelos países desenvolvidos em 5.2 % dos níveis de 1990, no período de 2008-2012. Tal ficou conhecido como o "Tratado de Kyoto", que teve suas origens na "Earth Summit" (Rio 92), quando foi criada a "U.N. Framework Convention on Climate Change" (UNFCCC) que já então definia objetivos para estabilizar as emissões de gases de efeito estufa. O acordo de Kyoto entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005, contando com a adesão de 140 países.

Novamente, a comunidade industrial e científica atuando no setor de refrigeração e climatização mundial se encontrava em face da necessidade de desenvolver uma nova geração de fluidos refrigerantes, agora comprometidos também com a preservação do meio-ambiente. No momento, contudo, essa terceira geração de refrigerantes ainda não se encontra definida, mas, a julgar pelos desenvolvimentos de pesquisa atuais, os fluidos refrigerantes naturais, entre os quais os hidrocarbonetos, deverão representar soluções de longo prazo, existindo um certo consenso de que os HFC's e seus "blends" são soluções transitórias que precisarão dentro em breve ser banidas, o que já começa a se verificar em certos países.

2 Aplicações domésticas de refrigeração e ar condicionado

O mercado mundial de refrigeradores e aparelhos de ar condicionado domésticos conta atualmente mais de 1 bilhão de unidades em operação (800 milhões de refrigeradores e 345 milhões de aparelhos de ar condicionado). A cada ano aproximadamente 60 milhões de novos refrigeradores e 19 milhões de novos aparelhos de ar condicionado são introduzidos no mercado global (Little, 2002).

O setor residencial no Brasil consome cerca de 23 % de toda a energia elétrica produzida sendo que deste montante as aplicações domésticas de refrigeração e ar condicionado são responsáveis por 74 % do consumo residencial de energia elétrica. A título de comparação, a energia elétrica consumida no aquecimento de água e na iluminação representa 26 e 23 % do consumo global respectivamente (Geller et al., 1991).

Do ponto de vista do consumidor, contudo, um estudo realizado na Europa (The Open University, 2007) revela que o preço de venda é o fator mais importante para a maioria dos compradores sendo o consumo de energia apenas o 4º. Fator em ordem de importância enquanto o impacto ambiental é levado em consideração por apenas 4 % dos entrevistados (Fig. 1)

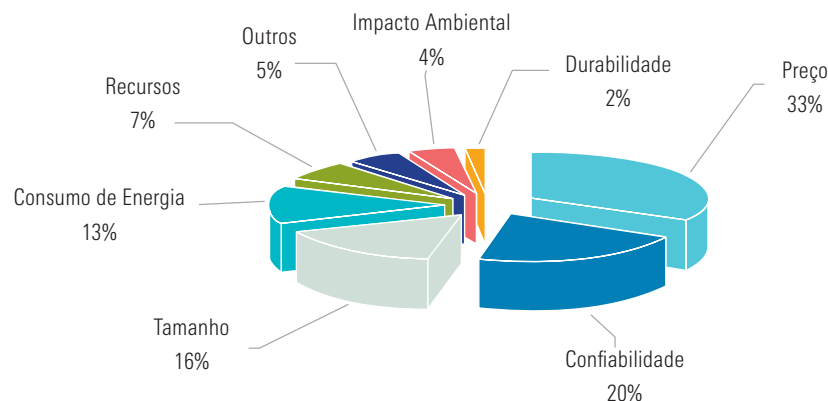


Figura 1 – Fatores que influenciam a decisão do consumidor na compra de um refrigerador ou ar condicionado (The Open University, 2007)

Muito embora a conscientização da população em relação à conservação do meio ambiente seja crescente, é interessante notar que sem a implantação de políticas que favoreçam a introdução no mercado de produtos mais eficientes e de menor impacto ambiental, o cenário em curto prazo não promete grandes resultados.

3 Impacto ambiental

O impacto ambiental de um fluido refrigerante pode ser avaliado com base em sua influência sobre a camada de ozônio e sobre o aquecimento global.

Em relação ao impacto do fluido refrigerante sobre a camada de ozônio, o parâmetro ODP (Ozone Depletion Potential) é considerado. O índice ODP traduz o potencial de uma substância para a depleção da camada de ozônio. O CFC11 é tomado como referência, tendo o maior potencial (ODP = 1). Neste aspecto os hidrocarbonetos apresentam ODP nulo sendo assim soluções perfeitamente adequadas.

A avaliação do impacto ambiental por sua vez baseia-se em índices como o GWP (Global Warming Potential), TEWI (Total Equivalente Warming Potential), LCCP (Life Cycle Climatic Performance) e LCA (Life Cycle Analysis), abaixo descritos:

3.1 GWP (Global Warming Potential)

Mede o impacto de uma substância como gás de efeito estufa, relativo ao efeito de aquecimento global de uma massa similar de dióxido de carbono por um intervalo de tempo específico cujo valor deve ser especificado. O GWP é calculado pela razão entre o efeito radiante temporal integrado da liberação instantânea de 1 kg de uma dada substância, em relação a liberação de 1 kg de um gás de referência – CO₂ (IPCC, 1990):

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r [r(t)] dt}$$

onde,

<i>TH</i>	Horizonte de tempo dentro do qual o cálculo é considerado.
<i>a_x</i> , <i>a_r</i>	Eficiência radiante devido ao crescimento unitário na abundância atmosférica da substância em questão (em W/m ² .kg).
<i>x(t)</i> , <i>r(t)</i>	Decaimento transiente na abundância da liberação instantânea de substância, e as quantidades correspondentes para o gás de referência no denominador.

O GWP de uma substância expressa, portanto a contribuição integrada (sobre um certo horizonte de tempo) de uma dada massa de substância, em relação a contribuição integrada da mesma massa de um gás de referência (tipicamente o CO₂) sobre o mesmo horizonte de tempo.

O GWP de alguns fluidos refrigerantes usuais é mostrado na Tab. 1. Como se vê, os hidrocarbonetos apresentam valores muito reduzidos de GWP, em comparação com os fluidos sintéticos.

Tabela 1 – Valores de GWP para refrigerantes selecionados

	Refrigerante	GWP	Vida Atmosférica (anos)
R290	Propano	< 3	---
R600	Butano	< 3	< 1
R600a	Iso-butano	< 3	< 1
R1270	Propileno	~ 3	< 1
R22	Clorodifluormetano	1900	11.8
R134a	1,1,1,2 Tetrafluormetano	1600	13,6
R407c	R32/R125/R134a	1980	< 32,6
R410a	R32/R125	2340	< 32,6
R744	Dióxido de Carbono	1	> 50
R717	Amônia	< 1	---

Como se vê, do ponto de vista do GWP os refrigerantes hidrocarbonetos são soluções perfeitamente adequadas à conservação do meio ambiente.

3.2 TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

Enquanto o GWP permite apenas avaliar o impacto direto causado pelas emissões de refrigerante sobre o aquecimento global, o TEWI inclui também o impacto indireto associado ao uso do refrigerante em uma dada aplicação de climatização e refrigeração. Tal impacto indireto está associado às emissões de dióxido de carbono na geração da energia elétrica consumida ao longo da vida do equipamento. Assim, a porção de refrigerante é convertida para o montante equivalente de CO₂ (CO₂equ,DIRETO) e então adicionada às emissões equivalentes de CO₂ causadas pela geração (CO₂equ,INDIRETO), ou seja,

$$TEWI = CO_{2, equ, DIRETO} + CO_{2, equ, INDIRETO}$$

Deve-se observar que tanto o componente direto quanto o componente indireto dependem do sistema em questão, não fazendo sentido apresentar o TEWI para um refrigerante em particular, pois, vazamentos e eficiência do sistema não são propriedades do refrigerante em si. Além disso, o impacto pode exceder a vida do equipamento, logo se deve escolher uma base de tempo adequada (um horizonte de tempo integrado de 100 anos é com freqüência usado.)

A parcela associada ao impacto direto,

$$CO_{2, equ, DIRETO} = M_{ref} \cdot L_{rate} \cdot V_{util} \cdot GWP$$

onde,

M_{ref}	Carga de refrigerante no equipamento	[kg]
L_{rate}	Taxa anual de refrigerante emitido (reposições, vazamentos)	(%)
V_{util}	Vida útil econômica do equipamento	(anos)

Por sua vez, a parcela associada ao efeito indireto é calculada como,

$$CO_{2, equ, INDIRETO} = W_{el} \cdot T_{serv} \cdot V_{util} \cdot E_{CO_2, G}$$

onde,

W_{el}	Potência elétrica do equipamento	[W]
T_{serv}	Número de horas de operação anual	[-]
$E_{CO_2, G}$	Emissão de CO ₂ na geração de eletricidade	[kg CO ₂ /kWh]

Assim, a noção de TEWI introduz uma abordagem tecnologicamente orientada para a avaliação do impacto sobre o aquecimento global de sistemas de refrigeração e ar condicionado.

A título de exemplo a Fig. 2 ilustra de forma simplificada o impacto de um refrigerador doméstico. Desse exemplo observamos que a contribuição indireta representa, de fato, a parcela mais significativa, i.e., o uso de um refrigerante com GWP elevado é menos relevante que a eficiência energética envolvida em seu uso.

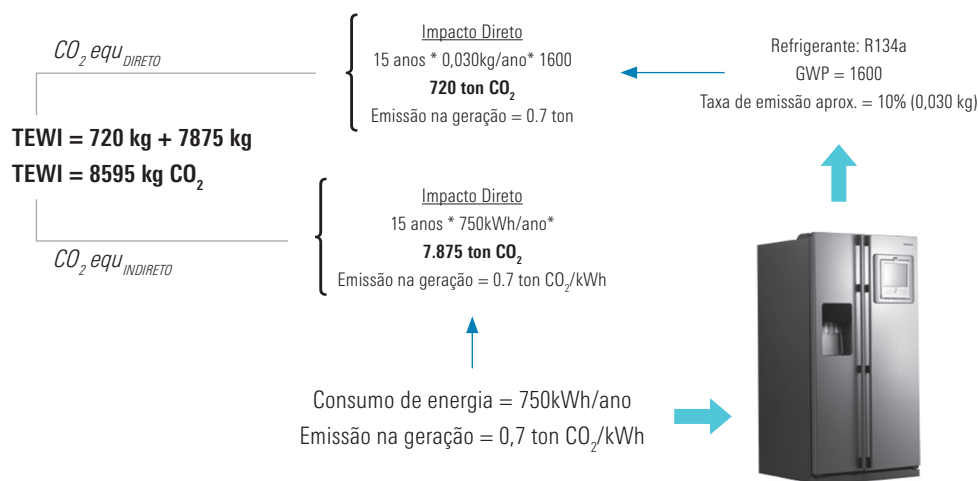


Figura 2 – Ilustração do impacto direto e indireto pelo cálculo simplificado do TEWI

3.3 LCCP (Life Cycle Climatic Performance)

Originado do conceito de TEWI, calcula o impacto ao longo da vida útil devido às emissões direta e indireta de gases de efeito estufa, incluindo emissões não intencionais durante o processo de produção das substâncias químicas, energia envolvida na fabricação dos componentes, energia consumida na operação e emissões quando da disposição final ou reciclagem.

O conceito de LCCP corrige certos “erros” específicos na aplicação de análises baseadas no TEWI, como: i) Não inclusão da energia e emissão de gases de efeito estufa associados com a produção de refrigerantes; ii) Uso inadequado do ITH (Integrated Time Horizon) de 100 anos em conjunção com certos gases de efeito estufa de longa vida, e iii) Não consideração das perdas/emissões associadas aos fluidos de trabalho no fim de vida do produto.

A Figura 3 apresenta resultados para o LCCP para a climatização residencial com 3 TR (36.000 BTU/h) de capacidade na cidade de Atlanta, EUA (Goetzler, W. e Dieckmann, J., 2001). Como se pode observar, da mesma forma que em uma análise via TEWI, o impacto indireto associado ao consumo de energia é a parcela mais importante, a qual é afetada pela eficiência do equipamento.

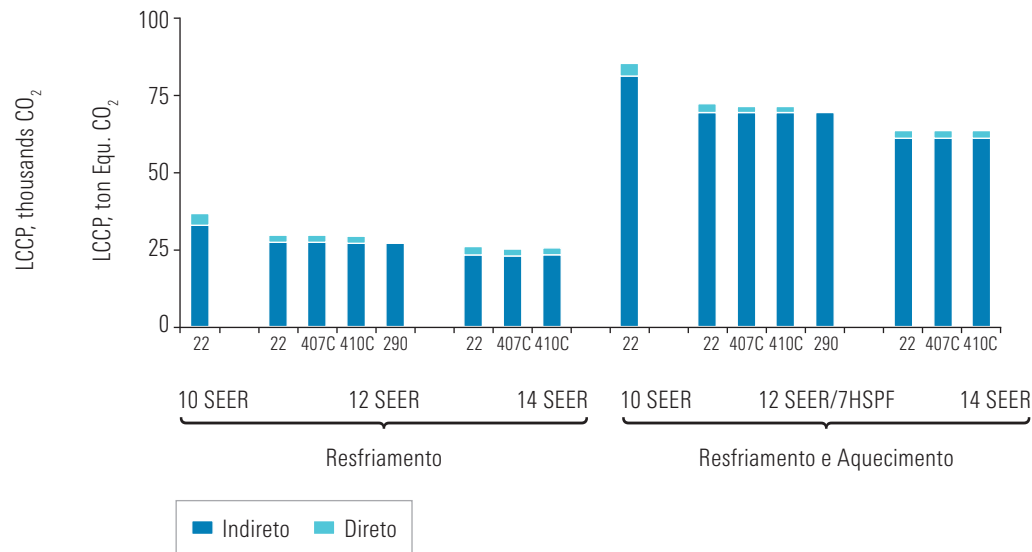


Figura 3 – Valores de LCCC para um climatizador residencial (Goetzler, W. e Dieckmann, J., 2001)

4 Propriedades térmicas

Um fluido refrigerante tem por objetivo o transporte de energia na forma de calor. Para um desempenho adequado é essencial, entre outros fatores, que as propriedades térmicas do refrigerante favoreçam a transferência de calor e não impliquem em perdas de carga elevadas. Os gráficos a seguir apresentam algumas propriedades relevantes para o R600a, o R134a e o R12.

A Fig. 4 ilustra as pressões de saturação dos refrigerantes selecionados para uma ampla faixa de temperaturas. Observa-se que o uso do R600a resulta em menores pressões de saturação em qualquer condição de temperatura. Tal característica permite operar com menores razões de compressão em favor de um melhor desempenho do compressor. Além disso, a vantagem do R600a é ainda mais relevante para maiores temperaturas o que favorece o desempenho do condensador.

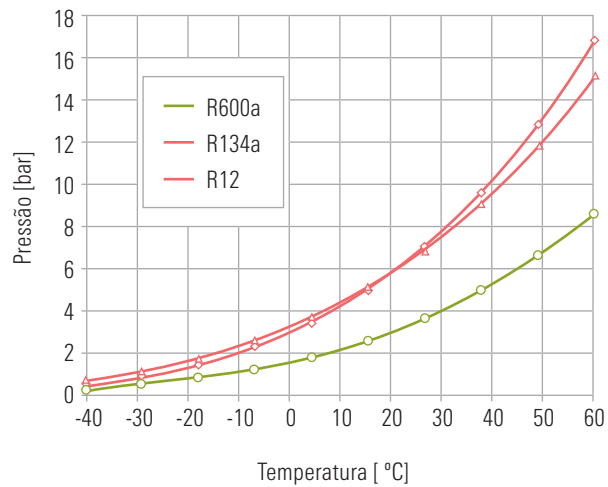
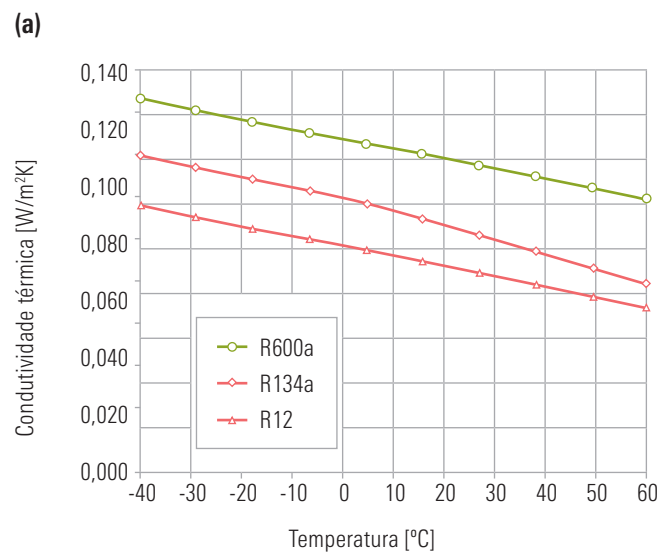


Figura 4 – Pressão de saturação para o R600a, R134a e R12 em função da temperatura

A Figura 5 apresenta a condutividade térmica das fases líquido e vapor para o R600a em relação ao R12 e ao R134a. Observa-se que em qualquer condição o R600 possui condutividade térmica mais elevada, favorecendo a operação com coeficientes de transferência de calor mais elevados o que favorece um melhor desempenho energético.



(b)

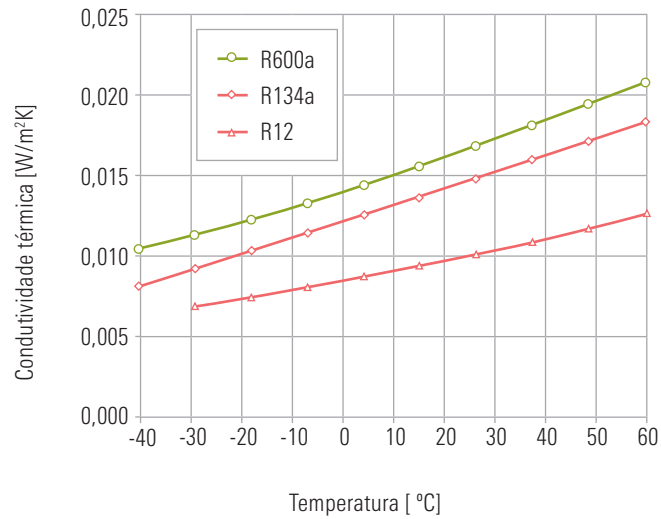
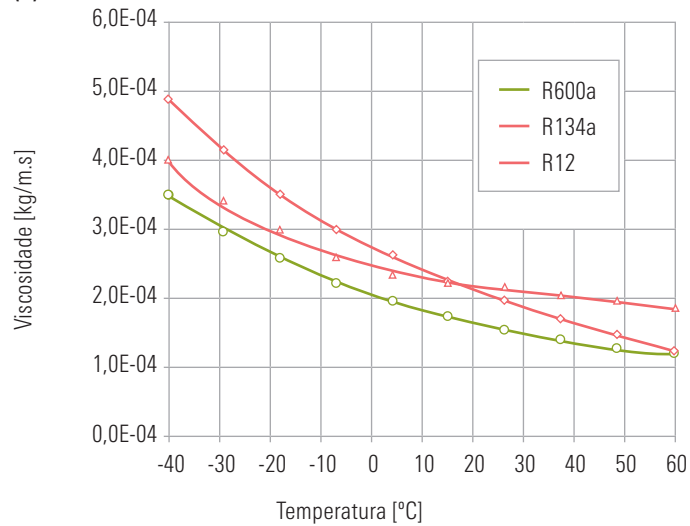


Figura 5 – Condutividade térmica do líquido (a) e do vapor (b) para o R600a, R134a e R12 em função da temperatura

Em relação a viscosidade (Fig. 6) o R600a apresenta valores menores que o R12 e ao R134a, exceto em relação a viscosidade do vapor do R12 em temperaturas inferiores a aprox. -5 °C. Uma viscosidade reduzida é também um aspecto favorável já que implica em menores perdas de carga.

(a)



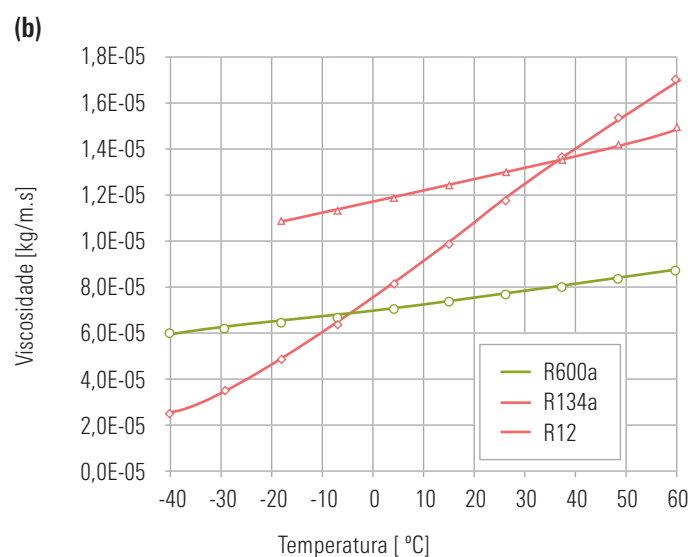
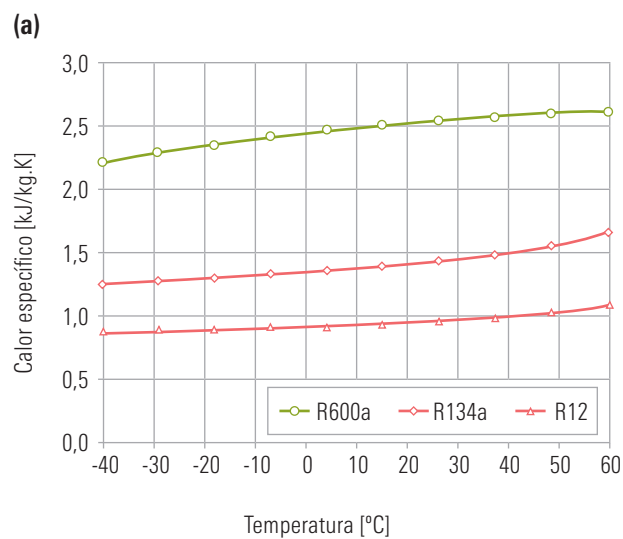


Figura 6 – Viscosidade do líquido (a) e do vapor (b) para o R600a, R134a e R12 em função da temperatura

A Figura 7 apresenta o calor específico das fases líquido e vapor para o R600a em relação ao R12 e ao R134a. Observa-se que em qualquer condição o R600 possui calor específico mais elevado que o R134a ou que o R12, em favor de taxas de transferência de calor mais elevadas.



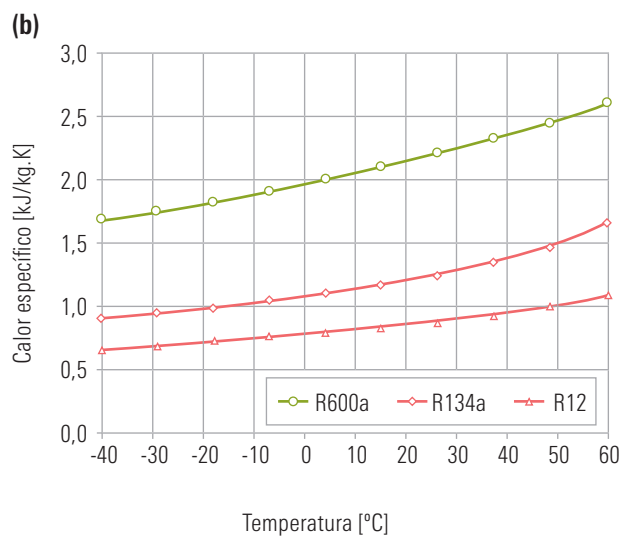
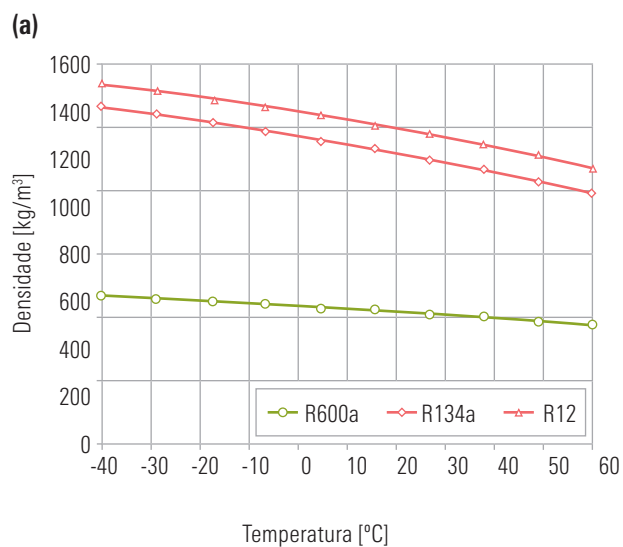


Figura 7 – Calor específico do líquido (a) e do vapor (b) para o R600a, R134a e R12 em função da temperatura

Um aspecto relevante no uso do R600a é sua reduzida densidade (Fig. 8) em relação ao R12 e ao R134a. Tal característica faz com que a capacidade volumétrica com o R600a seja, grosso modo, 50% menor em relação ao R12 e ao R134a. Por esta razão, o deslocamento volumétrico de compressores deve ser cerca de 2 vezes maior.



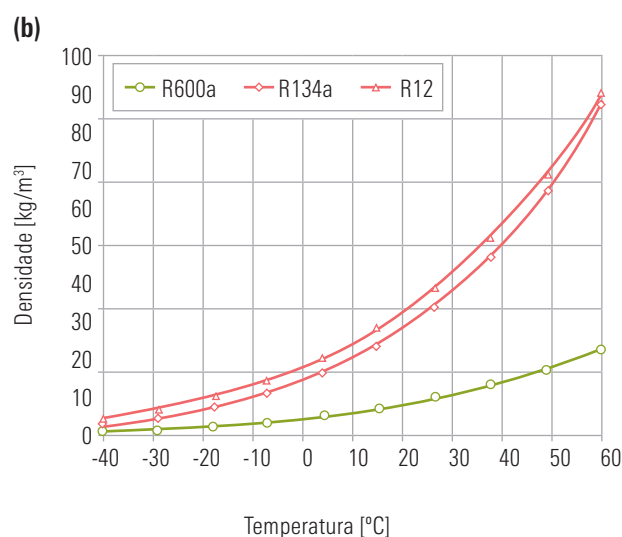


Figura 8 – Densidade do líquido (a) e do vapor (b) para o R600a, R134a e R12 em função da temperatura

5 Compatibilidade com lubrificantes e materiais

Os hidrocarbonetos possuem total compatibilidade química com a quase todos os lubrificantes de uso comum em refrigeração. Contudo, lubrificantes aditivados com silicone e silicatos não são compatíveis com hidrocarbonetos (Lommers, 2003).

De uma forma geral, a compatibilidade com a maioria dos materiais usados em sistemas de refrigeração é adequada. Praticamente todos os elastômeros e plásticos de uso comum em sistemas e componentes de refrigeração usados como "O" rings, sede de válvulas, vedações e gaxetas são compatíveis com refrigerantes hidrocarbonetos. Neoprene, viton, borracha nitrílica, HNBR, PTFE e nylon são exemplos comuns de materiais compatíveis. Dada a compatibilidade de hidrocarbonetos com óleos minerais a relação de materiais compatíveis é similar a do CFC12. Exemplos de materiais não compatíveis são borracha natural, polietileno, PVC e EPDM. (Danfoss, 2000; ACRIB, 2001).

6 Aspectos relacionados a segurança

A avaliação da segurança de aplicação de um fluido refrigerante requer que se considerem dois fatores: i) toxicidade e flamabilidade.

A toxicidade de um fluido refrigerante é avaliada por “níveis de exposição” que indicam o quanto um indivíduo pode ser exposto regularmente ao refrigerante, sem apresentar nenhum efeito adverso. Um índice de uso comum é o TLV-TWA (Threshold Limit Value-Time Weighted Average) definido pela “American Conference of Government and Industrial Hygienists” (ACGIH). O TLV-TWA é uma medida da quantidade do produto químico ao qual um indivíduo pode ser exposto, 8 horas/dia, 40 horas/semana, sem efeitos adversos. O máximo admissível (para qualquer substância) é de 1.000 ppm, ainda que vários refrigerantes não causem nenhum efeito adverso, mesmo a valores bem mais elevados que este.

Segundo a norma ASHRAE 34 os diferentes refrigerantes são divididos em duas classes de toxicidade: Classe A) baixa toxicidade - refrigerantes cuja toxicidade não é verificada em concentrações ≤ 400 ppm e; Classe B) alta toxicidade - refrigerantes cuja toxicidade não é verificada em concentrações ≥ 400 ppm.

A norma ASHRAE 34 classifica os hidrocarbonetos na Classe A, ou seja, de baixa toxicidade (da mesma forma que a maioria dos refrigerantes sintéticos). A Tabela 2 apresenta alguns valores de toxicidade para hidrocarbonetos e outros refrigerantes.

Tabela 2 – Níveis de toxicidade para refrigerantes selecionados

Refrigerante	TLV-TWA	Classe ASHRAE – Std. 34	
R290	Propano	2500 ppm	A
R600	Butano	800 ppm	A
R600a	Iso-butano	800 ppm	A
R1270	Propileno	375 ppm	A
R22	Clorodifluormetano	1000 ppm	A
R134a	1,1,1,2 Tetrafluormetano	1000 ppm	A
R407c	R32/R125/R134a	1000 ppm	A
R410a	R32/R125	1000 ppm	A
R744	Dióxido de Carbono	5000 ppm	A
R717	Amônia	25 ppm	B
R764	Dióxido de Enxofre	2 ppm	B

Em relação a flamabilidade, um fluido refrigerante é classificado segundo a norma ASHRAE 34 em três classes: Classe 1) Sem propagação de chama, Classe 2) Baixa flamabilidade e Classe 3) Alta flamabilidade. Dentro dessa classificação os hidrocarbonetos são considerados como Classe 3 o que implica, segundo a referida norma em refrigerantes com limite inferior de flamabilidade inferior a 0,00625 lb/ft³ e calor de combustão maior ou igual a 8174 BTU/lb.

Sendo os hidrocarbonetos fluidos de trabalho inflamáveis é obviamente essencial e indispensável adotar soluções de engenharia que permitam minimizar o risco de acidente quando de seu uso em um sistema de refrigeração.

A Fig. 9 ilustra o mecanismo associado ao estabelecimento de uma condição segura ou de acidente no uso de um hidrocarboneto. Primeiramente é importante observar que um acidente só poderá ocorrer se existir um vazamento que leve a uma concentração no ar dentro dos limites de flamabilidade (LF) e uma fonte de ignição acarrete a liberação de energia contida na mistura, isto é, esses três fatores devem ocorrer simultaneamente, caso contrário não há possibilidade de acidente. Ao mesmo tempo é suficiente controlar (ou evitar) um desses fatores para que o risco de acidente seja anulado.

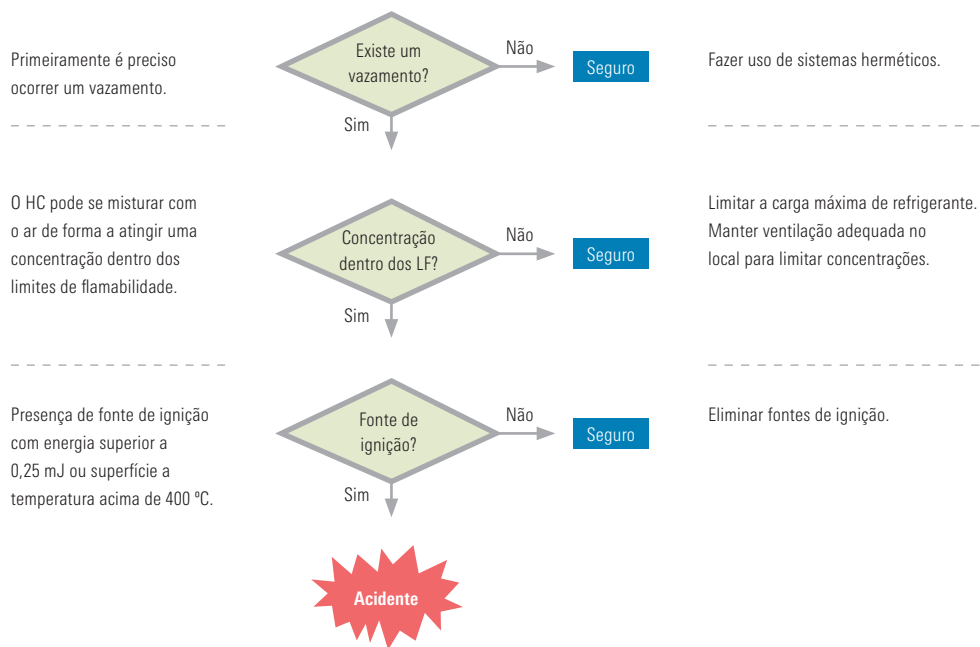


Figura 9 – Sistemática de análise do mecanismo conduzindo a uma condição segura de uso

Deve-se notar que a condição de ocorrência simultânea dos fatores de risco (vazamento, concentração e ignição) na verdade induz necessariamente a ocorrência de acidente. É preciso de fato uma conjunção adequada desses fatores para que um acidente de fato ocorra.

Em relação à ocorrência de vazamentos, deve-se primeiramente observar que não se trata apenas de responder sim ou não há questão colocada (se há um vazamento). Pequenos vazamentos implicam em liberações tão reduzidas de HC no ambiente que as concentrações não chegam a atingir os limites que acarretam uma condição inflamável. Além disso, os sistemas de ar condicionado e refrigeração são tipicamente herméticos de forma que a ocorrência de um vazamento é minimizada.

Em relação aos LF, para a ocorrência de um acidente, é necessário que a concentração do HC no ar apresente valor que se encontre dentro de tais limites. Para os HC's, os limites inferiores de flamabilidade (LIF) são mostrados na Tab. 3.

Tabela 3 – Limites inferiores de flamabilidade para refrigerantes selecionados

	Refrigerante	LIF
R290	Propano	2,3 %
R600	Butano	1,9 %
R600a	Iso-butano	1,8 %
R1270	Propileno	2,0 %
R22	Clorodifluormetano	---
R134a	1,1,1,2 Tetrafluormetano	---
R407c	R32/R125/R134a	---
R410a	R32/R125	---
R744	Dióxido de Carbono	---
R717	Amônia	14,8
R764	Dióxido de Enxofre	---

Quanto a fonte de ignição, esta deve ser liberar energia superior a 0,25 mJ ou ainda pode estar associada a uma temperatura de superfície superior a 440 °C. o que requer cuidados especiais no projeto de componentes elétricos de sistemas de refrigeração.

Para que o projeto de um refrigerador doméstico seja aprovado para comercialização este deve ser estar em conformidade as exigências de normas técnicas específicas. Na Comunidade Européia, a Norma "IEC Technical Sheet TS 95006" é utilizada desde 1994, bem como outras normas nacionais como EN 378, DIN 7003, BS 4344, SN 253 130 que se diferenciam em certos aspectos. Em linhas gerais, as seguintes exigências são colocadas:

- ∴ Componentes elétricos como termostatos, interruptores de porta para iluminação, relés de compressores, chaves “on/off”, ‘timers’, etc.são considerados como possíveis fontes de ignição e como tal requerem soluções específicas;
- ∴ Todas as partes contendo refrigerante são consideradas como possíveis fontes de vazamento. Isto inclui os evaporadores, condensadores, aquecedores de portas, tubulação e compressor.
- ∴ Máxima carga de refrigerante permitida de 150 gramas. Tal limitação de carga implica em reduzir a concentração a cerca de 25 % do LEL (o qual é de aprox. 8 g/m³, para uma cozinha típica, no caso do R600a), tornando o risco de ignição muito reduzido.

Vários estudos disponíveis na literatura relatam análises de risco no uso de hidrocarbonetos como refrigerantes em aplicações de refrigeração e ar condicionado. Tais estudos baseiam-se em diferentes métodos de análise a fim de estabelecer valores numéricos que representam a probabilidade estatística de risco em diferentes circunstâncias.

A Tab. 4 apresenta valores calculados para a probabilidade estatística de acidentes fatais com hidrocarbonetos em diferentes circunstâncias e em outras atividades (Colbourne e Ritter, 1998). Como se pode concluir desses resultados, a probabilidade de acidentes fatais com hidrocarbonetos usados em refrigeração é, de fato, bastante remota (na verdade, menor que muitas atividades do dia-a-dia). Além disso, é ininteressante notar como referencia que órgãos como o “Health and Safety Executive” (HSE) da Inglaterra, consideram riscos individuais de $1,0 \times 10^{-5}$ como intoleráveis e riscos de $1,0 \times 10^{-6}$ como desprezíveis.

Tabela 4 – Riscos associados a acidentes com hidrocarbonetos refrigerantes e outras situações (Colbourne e Ritter, 1998)

Condição	Probabilidade
Risco de lesão devido ao uso de HC's em ar condicionado automotivo	$0,3 \times 10^{-7}$
Risco anual de acidente fatal com moradores em bomba de calor residencial usando propano (R290)	$1,8 \times 10^{-7}$
Risco anual de acidente fatal com mecânicos em bomba de calor residencial usando propano	$3,8 \times 10^{-7}$
Risco anual de acidente fatal envolvendo mecânicos durante manutenção em tanque de leite refrigerado usando R290	$9,0 \times 10^{-7}$
Risco de acidente automobilístico fatal nas estradas européias	$1,0 \times 10^{-4}$
Risco de morte por eletro-choque em residências	$1,0 \times 10^{-6}$
Risco de ser atingido por um raio	$1,0 \times 10^{-7}$

Apesar disso, a possibilidade de desenvolver hidrocarbonetos de flamabilidade inerte foi investigada por Dlugogorski et al. (2002) que investigaram o efeito do uso do CF_3I e C_3HF_7 como aditivos supressores de flamabilidade de misturas de gás natural/ar e propano–isobutano/ar. Como aparato experimental os autores adotaram, com bons resultados, um “queimador tubular” em vez de “vasos de explosão” para a determinação dos limites de flamabilidade dos hidrocarbonetos inertes com os agentes halogenados. Infelizmente os resultados indicam que não é possível, usando CF_3I or C_3H_7 , formular uma mistura refrigerante que com conteúdo substancial de hidrocarboneto já que, por exemplo, para tornar inerte uma mistura de propano-butano é necessário empregar 87.7% e 94.2% em massa dos supressores CF_3I and C_3HF_7 , respectivamente. Além disso, nenhuma consideração é feita pelas autores quanto a alteração das propriedades físicas.

7 Desempenho energético

Ao se avaliar o desempenho de um fluido refrigerante duas abordagens são possíveis: i) uma análise unicamente baseada em balanços de energia com base em um mesmo ciclo padrão de operação e, ii) uma análise que leve em conta a interação entre o fluido refrigerante e o sistema. Entre essas duas possíveis abordagens, devemos notar que a primeira é algo limitada uma vez que as interações a adoção de um ou outro fluido refrigerante requer modificações que implicam na operação segundo ciclos termodinâmicos distintos. Ao mesmo tempo, a segunda abordagem nem sempre é aplicada de forma correta na literatura, quando a substituição do refrigerante é feita com uma adaptação limitada do sistema ao fluido. Dessa forma, a apresentação de resultados de desempenho energético é em geral polêmica. Contudo, com base em alguns estudos mais cuidadosos publicados podemos considerar que os hidrocarbonetos propiciam, em geral, um desempenho energético superior. Observa-se ainda que não existem dados suficientes sobre testes de confiabilidade de refrigeradores domésticos convertidos para o uso de propano ou isobutano (UNEP, 1999).

Vários artigos na literatura têm reportado resultados do desempenho energético de refrigerantes hidrocarbonetos e suas misturas, normalmente através de comparações com refrigerantes sintéticos como os CFC's, HCFC', HFC's e seus “blends”. Em geral, os resultados desses trabalhos apontam para COP's até 15 % superiores com o uso de refrigerantes hidrocarbonetos em relação ao HFC's e HCFC's. Tal rendimento energético superior é justificado da seguinte maneira (Goetzler, W. e Dieckmann, J., 2001):

- ∴ Propriedades de transporte favoráveis: como discutido acima, a menor viscosidade e maior condutividade térmica, propiciam coeficientes de transferência de calor mais elevados e menores perdas de carga;
- ∴ Melhor miscibilidade com o lubrificante, favorecendo a transferência de calor no evaporador;
- ∴ Do ponto de vista unicamente de operação de um ciclo termodinâmico padrão, as propriedades dos hidrocarbonetos favorecem, de forma geral, seu melhor desempenho energético.

Num estudo recente Park et al. (2007) realizaram uma análise de dois hidrocarbonetos puros e sete misturas de propileno, propano, HFC152a, e dimetil-eter foi estudada como substitutos do HCFC22 em aparelhos de ar condicionado e bombas de calor residenciais. A determinação das composições ótimas foi realizada por uma análise do ciclo termodinâmico antes de seu teste em laboratório com temperaturas de evaporação e condensação de 7 e 45 °C, respect.) Os COP's obtidos foram até 5.7% superiores ao do HCFC22. Enquanto o propano mostrou uma redução de 11.5% na capacidade, a maioria dos fluidos levou a capacidades similares as do HCFC22. Além disso, a temperatura de descarga do compressor foi reduzida em 11 to 17 °C enquanto para todos os fluidos testados a carga foi reduzida em até 55%, em comparação com a carga do HCFC22.

Também recentemente a avaliação do desempenho de hidrocarbonetos como refrigerantes tem sido alvo de estudos onde mais do que examinar resultados para hidrocarbonetos puros, são avaliadas alternativas de misturas dos mesmos.

Sekhar e Lal (2005) investigaram o desempenho de uma mistura de HFC134a/HC, em um refrigerador doméstico de 165 l e um freezer de 400 l. Os autores concluíram que a mistura denominada M09 (HFC134a/HC com 9% em massa de HC) elevou o efeito refrigerante em 10% e reduziu o tempo de "pull down" em 9.8 % resultando em uma diminuição do consumo diário de energia entre 4,1 e 7,6 % . Em geral, o COP foi aumentado de 5 a 17% quando da operação a baixas temperaturas. Os autores relatam que os tubos capilares usados em sistemas com CFC12 podem ser usados para a mistura mas o uso de válvulas de expansão requer um ajuste adequado do grau de superaquecimento.

Jabaraj et al. (2007) relatam um estudo experimental de misturas de HFC407C/HC290/HC600a como alternativa para a substituição do HCFC22 em aparelhos climatizadores de janela, buscando a composição ótima desse blend. Em linhas gerais, o melhor blend encontrado acarretou um aumento do comprimento do condensador em 19% (afim de manter a pressão de descarga dentro de limites aceitáveis), elevou a potencia durante o "pull down" de 2 a 10 % em relação ao HCFC22 mas como a duração do "pull down" foi reduzida em 32% o COP foi superior entre 8 e 11%, reduzindo o consume de energia em 5 a 10,5 %.

8 Custo de sistemas baseados em hidrocarbonetos

Informações sobre custos de refrigeradores e climatizadores empregando hidrocarbonetos como refrigerantes são escassas na literatura.

Em relação ao uso de um refrigerante sintético, a aplicação de um hidrocarboneto refrigerante implica ao mesmo tempo em reduções e em acréscimos nos custos iniciais do produto. Entre os fatores favorecendo uma redução do custo destacamos,

- ∴ Menor custo do refrigerante;
- ∴ Menor carga de refrigerante;
- ∴ Compatibilidade com óleo mineral de menor custo;
- ∴ Melhores propriedades de transporte.

Entre os fatores acarretando uma elevação do custo temos,

- ∴ Componentes com projeto orientado para minimização do risco;
- ∴ Investimentos e custos operacionais do processo produtivo;
- ∴ Custos de instalação e serviço;
- ∴ Taxas de seguro.

Em relação ao custo do refrigerante, hidrocarbonetos usados como refrigerantes devem ser processados para graus de pureza elevados. Apesar disso, em condições normais um refrigerante hidrocarboneto apresenta custo consideravelmente inferior ao dos refrigerantes sintéticos. Por outro lado, a necessidade de importação, custo de transporte sob condições especiais e possível existência de um mercado consumidor ainda incipiente, podem fazer com que o custo do refrigerante hidrocarboneto seja algo equivalente ao do refrigerante sintético. Entretanto mesmo em tais condições desfavoráveis, o custo global associado ao uso do HC será notavelmente menor já que menores cargas de refrigerante são requeridas. Em todo caso, deve-se observar que o custo do refrigerante é de fato um componente menor no custo global de um refrigerador doméstico.

Em termos de custo global, Douglas et al. (1999), apresentaram resultados teóricos baseados em um modelo desenvolvido para computar diferentes custos em condições fixas de desempenho. Para aparelhos condicionadores do tipo "janela" usando propano (R290) os autores relatam um custo global 4 % menor que no caso do HCFC22. Em comparação com o R407c, o custo global do aparelho variaria em $\pm 1\%$ (custo 1% maior com o HC em relação ao R410a). Os autores concluem que as diferenças no custo global são principalmente devidas aos trocadores de calor (condensador

e evaporador) e aos requisitos ligados à combinação refrigerante-óleo. Por sua vez, verificou-se que o custo devido a diferenças no deslocamento volumétrico do compressor tem pouca influência no custo global. Considerando comparações entre sistemas otimizados para cada refrigerante, verificou-se ainda que os custos variaram dentro de 4 % em comparação com o R22. Contudo o estudo não levou em consideração o fato de que um projeto de um equipamento que empregue HC como refrigerante é predominantemente orientado por requisitos de segurança sendo este o fator mais crítico para a elevação do custo global de um sistema de refrigeração e climatização com hidrocarbonetos.

9 Tendências e necessidades de pesquisa

Embora o mercado de aplicações residenciais de refrigeração usando hidrocarbonetos como refrigerantes encontre-se consolidado há vários anos em diversos países, sua contínua expansão depende da evolução da pesquisa científica e tecnológica com respeito a três aspectos principais: aumento da segurança, custos do sistema e otimização de componentes.

Enquanto o desempenho energético dos HC's continua motivando trabalhos de pesquisa orientados para o desenvolvimento de novas misturas, estudos de otimização de sistemas baseados em HC's permitem antever a obtenção de componentes que retirem maior vantagem das propriedades favoráveis desse refrigerante. Contudo um elemento motivador dos esforços de pesquisa atuais refere-se à minimização dos riscos de acidentes associado a redução dos custos derivados dessa necessidade. Nessa linha tem despontado estudos orientados para a redução da carga de refrigerante hidrocarboneto.

Além disso, como apontado por (Goetzler, W. e Dieckmann, J., 2001) foi em alguns casos observada uma redução da viscosidade a ponto de comprometer a lubrificação do compressor, sendo necessário segundo os autores o esclarecimento desse impacto em longo termo. Além disso, testes mais específicos sobre o desempenho ao longo da vida útil são necessários para misturas de HC's sob condições severas de operação, tais como temperaturas ambientes extremas combinadas com tensões variáveis de acionamento elétrico (UNEP, 1999).

Garland e Hadfield (2005) descrevem os impactos de refrigerantes hidrocarbonetos em compressores herméticos de refrigeradores domésticos baseado em ensaios tribológicos estabelecendo o mecanismo de desgaste e coeficientes de atrito em componentes críticos. O desempenho tribológico do R600a foi comparado com o R134a com óleo mineral e poly-ol-ester. Com

isso o desempenho de longo termo foi modelado obtendo-se os subseqüentes custos ambientais. Os autores concluem que o R134a sofre uma redução de desempenho em relação ao R600a, ao longo do tempo. Dessa forma, o impacto ambiental indireto com o R600a sofre um aumento ao longo da vida útil do compressor.

10 Conclusões

Embora o uso dos HCs como refrigerantes acumule quase um século de experiência, sua característica inflamável limitou durante muito tempo sua aplicação em sistemas industriais. Mais recentemente, a necessidade de aplicar fluidos de trabalho que não acarretem impacto sobre camada de ozônio e o aquecimento global, estimulou a aplicação dos hidrocarbonetos como refrigerantes, principalmente em sistemas de refrigeração e climatização residenciais. Atualmente o mercado para aplicações residenciais dos hidrocarbonetos encontra-se bem consolidado mas condicionantes ligados a segurança e custos estimulam o desenvolvimento de pesquisas que deverão permitir uma penetração ainda maior dos hidrocarbonetos no setor residencial e ainda, possivelmente no segmento comercial com limitações específicas de carga de refrigerante.

11 Referências bibliográficas

ACRIB, 2001, **Guidelines for the use of hydrocarbon refrigerants in static refrigeration and air conditioning systems**. Air Conditioning and refrigeration Industry Board. ISBN 1872719139, www.acrib.org.uk, UK.

Colbourne, D. e Ritter, T. J., 1998. **Quantitative Risk Assessment: Hydrocarbon Refrigerants**. IIF-IIR – Sections B and E – Oslo, Norway – 1998.

Danfoss, 2000, **Practical Application of Refrigerant R 600a Isobutane in Domestic Refrigerator Systems**. November 2000 CN.60.E2.02 Danfoss Compressors GmbH.

Dlugogorski, B. Z., Hichens R. K. and Kennedy E. M.. **Inert hydrocarbon-based refrigerants**. Fire Safety Journal, Volume 37, Issue 1, February 2002, Pages 53-65.

Douglas, J.D., Braun, J. E., Groll, E. A. e Tree, D. R. 1999. **A cost-based method for comparing alternative refrigerants applied to R-22 systems**. International Journal of Refrigeration, Volume 22, Issue 2, March 1999, Pages 107-125.

Garland, N.P., Hadfield, M. 2005, **Environmental implications of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor**. Materials and Design 26 (2005) 578–586.

Geller, H., Tolmasquim, M., Schaeffer, R., 1991, **O Uso Eficiente da Eletricidade – Uma Estratégia de Desenvolvimento para o Brasil**, Instituto Nacional de Eficiência Energética. PROCEL.

Goetzler, W., Dieckmann, J, 2001, **Assessment of the Commercial Implications of ASHRAE A3 Flammable Refrigerants in Air Conditioning and Refrigeration Systems**. ARTI-21CR/610-50025-01 Final Report, Air-Conditioning And Refrigeration Technology Institute, September 12, 2001, USA.

Jabaraj D.B., Narendran A., Lal D. M. e Renganarayanan S. 2007. **Evolving an optimal composition of HFC407C/HC290/HC600a mixture as an alternative to HCFC22 in window air conditioners**. International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 276–283 578–586.

Little, A. D., 2002. **Global Comparative Analysis of HFC and Alternative Technologies for Refrigeration, Air Conditioning, Foam, Solvent, Aerosol Propellant, and Fire Protection Applications**. Final Report. The Alliance for Responsible Atmospheric Policy. March 21, 2002

Lommers, C.A., 2003, **Air Conditioning And Refrigeration Industry Refrigerant Selection Guide – 2003**, ISBN 0-949436-41-0, The Australian Institute of Refrigeration Air conditioning and Heating Inc (AIRAH), Seventh Edition – January 2003, www.airah.org.au.

Park, K.J, Seo, T., Jung, D. 2007. **Performance of alternative refrigerants for residential air-conditioning applications**. Applied Energy 84 (2007) 985–991.

Sekhar S.J. e Lal, D.M., 2005. **HFC134a/HC600a/HC290 mixture a retrofit for CFC12 systems**. International Journal of Refrigeration 28 (2005) 735–743.

The Open Universit, 2007. T172_1 **Working with our Environment**: An introduction. The Open University. <http://openlearn.open.ac.uk/file.php/1285/formats/print.htm>.

UNEP, 1999, **Study on the Potential for Hydrocarbon Replacements in Existing Domestic and Small Commercial Refrigeration Appliances**. United Nations Environment Program – Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol Jan, 1999.



Aplicações do CO₂ no setor automotivo

PROF. DR. ENIO PEDONE BANDARRA FILHO

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

E-mail: bandarra@mecanica.ufu.br

1 Introdução

A utilização do dióxido de carbono (CO₂) em sistemas de refrigeração não é novidade, visto que o CO₂ foi primeiramente proposto como um fluido refrigerante por Alexander Twining apud Bodinus (1999) em 1850. Lowe apud Bodinus (1999) realizou experiências com o CO₂ em balões militares e também projetou uma máquina de gelo utilizando o CO₂ em 1867. O mesmo autor desenvolveu, ainda, uma máquina para transportar carne congelada em navios.

Uma rápida análise da literatura mostrou que sistemas de refrigeração, que utilizam o CO₂ como fluido refrigerante, foram desenvolvidos durante os anos seguintes e atingiram um pico entre os anos de 1920 e 1930. O CO₂ foi bastante utilizado em navios enquanto outro refrigerante natural, amônia (NH₃), era mais comum em sistemas frigoríficos utilizados em terra.

Com a chegada dos refrigerantes halogenados, denominados comercialmente de “FREON”, principalmente o CFC-12, as aplicações com o CO₂ foram sendo suprimidas. A principal razão para esse declínio foi a rápida perda de capacidade e aumento da pressão às elevadas temperaturas. Nessas condições, a amônia continuou a ganhar espaço ao longo dos anos, dominando o mercado de refrigerantes num segmento denominado refrigeração industrial ou de grande porte.

Na década de 90 ressurgiram as discussões sobre as vantagens de se utilizar o CO₂, devido suas características de ODP (Potencial de Destruição do Ozônio) e GWP (Potencial de Aquecimento Global). O motivo para esse ressurgimento foi, principalmente, a eliminação e restrição de uso dos refrigerantes CFC's e HCFC's e também a redução do inventário de refrigerante NH₃ (amônia) em sistemas de refrigeração.

Os denominados refrigerantes naturais, como o CO_2 , amônia, e hidrocarbonetos, como o Propano e Butano, foram as opções mais utilizadas, porém esses últimos possuem suas desvantagens como a toxicidade (amônia) e inflamabilidade (hidrocarbonetos). Em comparação, o CO_2 não é tóxico, somente em grandes quantidades, e não é inflamável, mas possui um duplo papel no meio ambiente. O dióxido de carbono é necessário à vida na terra, mas também colabora, em menor escala, para o efeito estufa.

Hoje em dia, há duas linhas de pesquisas bem definidas sobre aplicações com o CO_2 . A primeira delas se concentra nos denominados ciclos transcíticos, de único estágio, principalmente associados ao ar condicionado automotivo. A segunda aplicação incide em ciclos denominados cascata, que consiste na combinação de dois ciclos de simples estágio, onde o CO_2 é o fluido refrigerante do circuito de baixa temperatura (ou baixa pressão), com temperaturas de evaporação variando entre -50 e -30 °C e condensação entre -30 e -10 °C. O presente artigo trata do estado da arte dos sistemas de Ar Condicionado Automotivo que utilizam o dióxido de carbono, CO_2 , como fluido refrigerante.

Atualmente, as principais pesquisas sobre o dióxido de carbono se concentram no norte da Europa, Estados Unidos da América e alguns países da Ásia. Infelizmente, no Brasil, não há pesquisas voltadas ao CO_2 , utilizado como fluido refrigerante.

2 Fundamentos e Revisão Bibliográfica

2.1 Ciclo Transcítico

O ciclo transcítico é caracterizado pelo fato de existir um processo durante o ciclo, onde as condições de pressão e temperatura superam o ponto crítico. Para o caso do CO_2 , como pode ser observado na Fig. 1, a temperatura crítica é de $31,1$ °C, portanto, o processo 2-4 da figura, se caracteriza por se encontrar na região acima do ponto crítico. Já no caso do R-134a, os processos ocorrem abaixo do ponto crítico, lado direito da figura. No caso, a maior diferença entre os ciclos com CO_2 e o R-134a se dá na linha após a compressão, onde no sistema convencional ocorre a mudança de fase (vapor-líquido), conhecida como condensação do fluido, ao passo que no ciclo transcítico o vapor altamente superaquecido é resfriado, sem mudança de fase.

A Figura 2 ilustra o conceito utilizado para sistemas de ar condicionado atualmente utilizando o CO_2 . A função do compressor, evaporador e válvula de expansão é a mesma do

circuito tradicional utilizado com fluido halogenado. As elevadas temperaturas e pressões do fluido são resfriadas no denominado resfriador de gás ou, como é comumente conhecido, *Gas Cooler*. Praticamente, é um processo similar ao que ocorre no condensador, no entanto, no *Gas Cooler* (resfriador de gás), a temperatura do CO₂ é mais elevada que a temperatura crítica do mesmo, 31,1 °C. O dióxido de carbono permanece sempre no estado de vapor e vale lembrar que não ocorre a condensação. É interessante ressaltar que esse ponto é o que difere mais do ciclo operando com CO₂ e o sistema tradicional com R-134a, por exemplo. Outra característica interessante do sistema operando com o CO₂ é a utilização de um trocador de calor intermediário, instalado antes da válvula, que tem por objetivo resfriar o CO₂ para elevar a eficiência do sistema. O acumulador se encontra no interior do conjunto denominado Acumulador e Trocador de Calor Interno, na saída do evaporador. Em sistemas com R-134a, o acumulador se localiza na linha de alta pressão, após o condensador. Com tais alterações no sistema com CO₂, o coeficiente de eficácia, COP, do sistema é melhorado.

A Figura 3 ilustra de forma esquemática, o circuito de ar condicionado automotivo com CO₂, instalado num veículo. Conforme é possível notar, o sistema completo é menor que o sistema instalado com R134a comumente encontrado no mercado. Mesmo com a adição de material por causa das elevadas pressões, o sistema completo é mais leve que o utilizado pelo R134a em 2 kg.

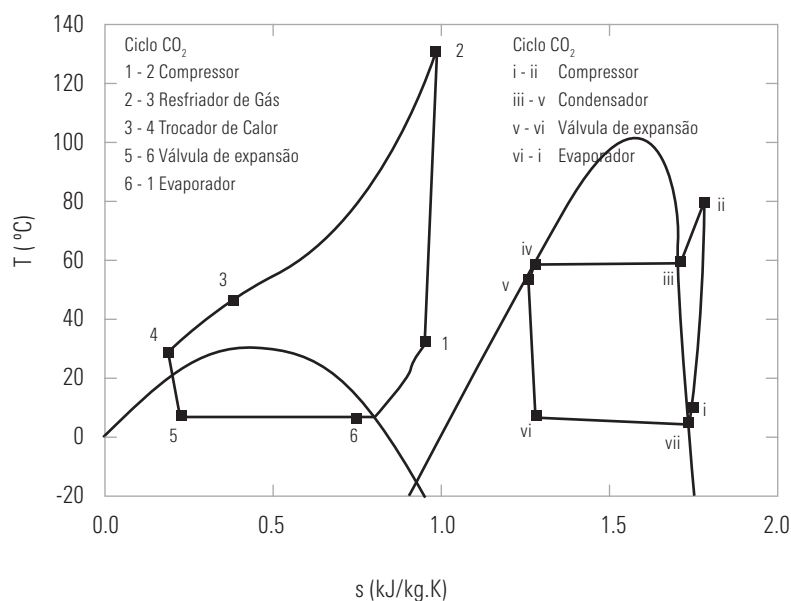


Figura 1 – Diagrama Temperatura – Entropia para o ciclo transcrito com o CO₂ e o ciclo com R-134a

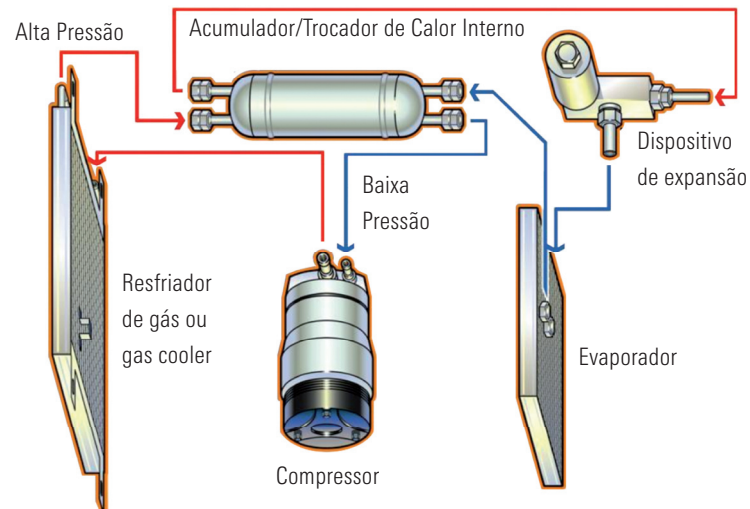


Figura 2 – Diagrama esquemático de um circuito de ar condicionado automotivo utilizando o CO_2

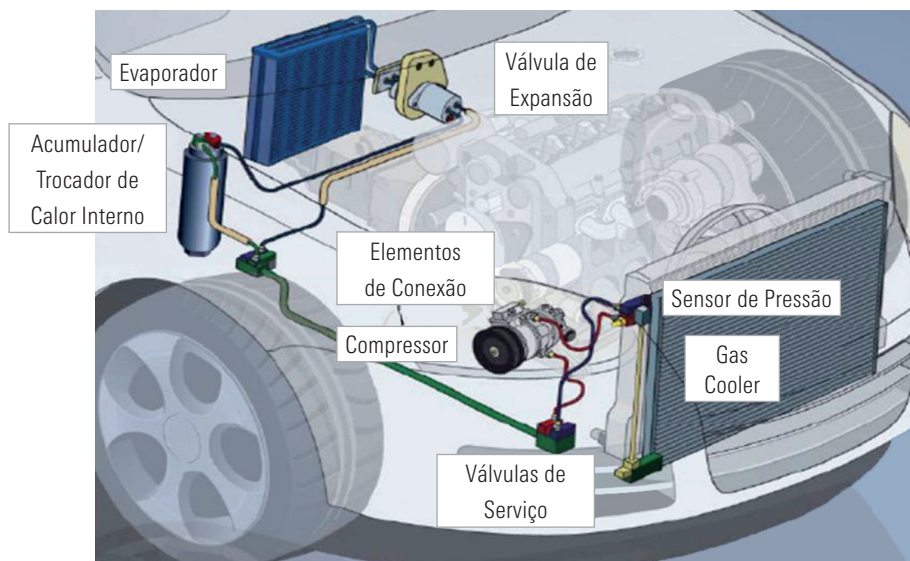


Figura 3 – Figura ilustrando de forma esquemática, o circuito de ar condicionado automotivo com CO_2 , instalado num veículo

3 Resultados

Essa seção apresenta de maneira sucinta alguns resultados mais interessantes obtidos na literatura, utilizando o CO_2 como fluido de trabalho. A Figura 4 ilustra uma comparação do Coeficiente de eficácia, COP, em função da temperatura de saída do CO_2 do *Gas Cooler*. É possível notar que o COP é melhorado à medida que a temperatura de saída do *Gas Cooler* é reduzida.

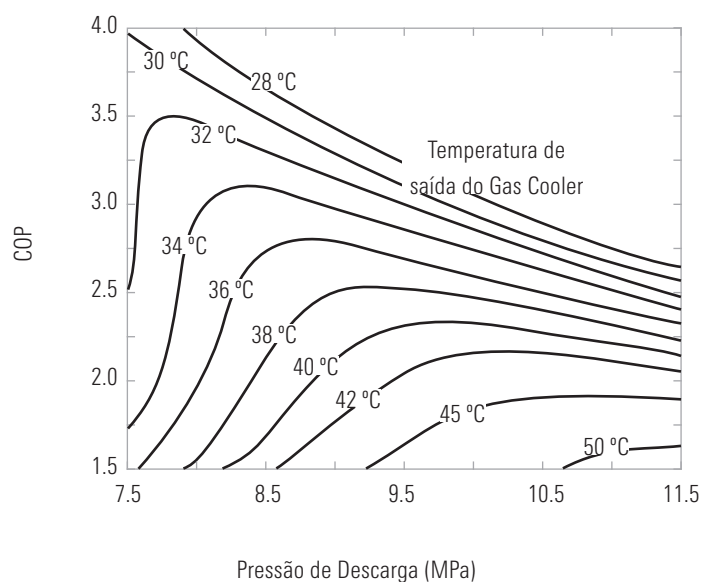


Figura 4 – COP em função da temperatura de saída do Gas Cooler

A Figura 5 mostra os resultados de uma simulação, comparando o COP e temperatura do ar no *Gas Cooler* ou Condensador para distintas rotações do compressor realizada por Brown et al (2002) mostrando que o sistema com R-134a apresenta o melhor COP. Vale lembrar que tais ensaios foram realizados em 2002 e, possivelmente, haviam problemas em modelar o *Gas Cooler* e o compressor, visto que foram os equipamentos que apresentaram a maior geração de entropia.

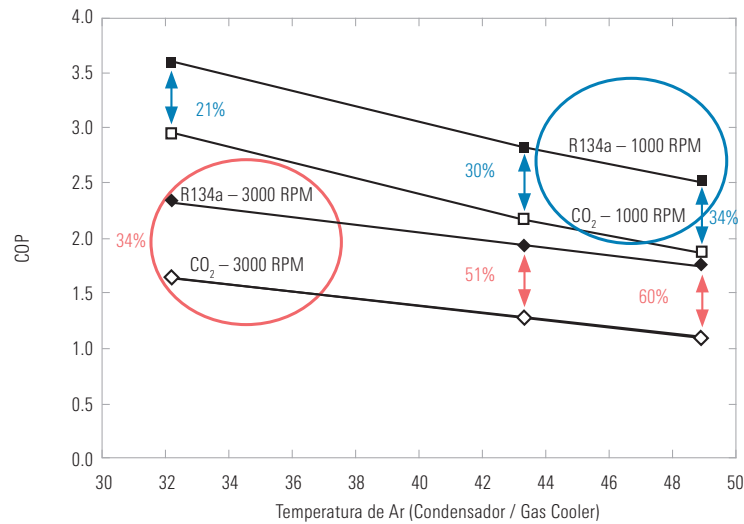


Figura 5 – Comparação do COP e temperatura do ar no Gas Cooler ou condensador para distintas rotações do compressor

A Figura 6 ilustra uma comparação de um trabalho realizado na China (Liu et al, 2005), entre a capacidade de refrigeração, o COP e a temperatura de entrada de ar no *Gas Cooler* com a variação da velocidade de face do ar no evaporador. É interessante notar que o COP diminui com o aumento da temperatura de entrada do ar no *Gas Cooler* para as duas velocidades de face ensaiadas, 1,4 e 2,5 m/s. Entretanto, os valores do COP para velocidade de face de 2,5 m/s é cerca de 50% maior que o obtido para velocidade de 1,4 m/s.

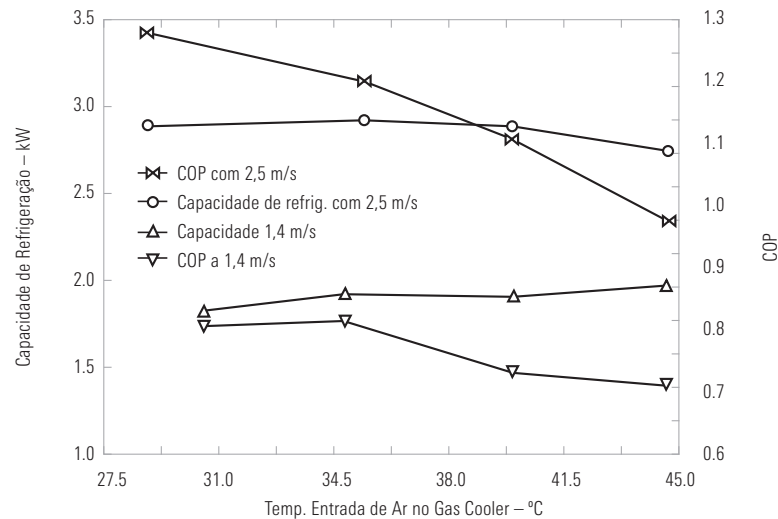


Figura 6 – Comparação entre a capacidade de refrigeração, o COP e a temperatura de entrada de ar no Gas Cooler com a variação da velocidade de face do ar no evaporador

A seguir são apresentados os resultados experimentais resultantes de pesquisas em veículos, considerados de potência entre média e elevada, onde foram realizadas comparações entre sistemas instalados em veículos utilizando R-134a e CO₂. As Figs 7, 8 e 9 ilustram os testes realizados em três veículos distintos, BMW série 3; Audi A4 e Mercedes-Benz “full size”, sendo que os resultados foram similares, mostrando uma redução no consumo de combustível quando o sistema de ar condicionado operava com CO₂. Os resultados mais interessantes demonstraram que com a utilização do CO₂, o tempo de resfriamento da cabine foi reduzido significativamente. Vale destacar, ainda, que o tempo para reduzir a temperatura de 60 °C para a temperatura de conforto foi de 17 minutos para o sistema com CO₂ e de 29 minutos para o sistema com R134a, para o carro BMW. Já para o AUDI, esse tempo foi de 10 minutos para o sistema com CO₂ e de 30 minutos para o sistema com R134a e no último caso, Mercedes, de 12 minutos para o sistema com CO₂ e de 25 minutos para o sistema com R134a. É interessante destacar, ainda, que num teste com a BMW, Fig. 7, enquanto o sistema operando com CO₂ demorou 58 minutos para atingir a temperatura estipulada, o sistema com R134a não alcançou tal condição.

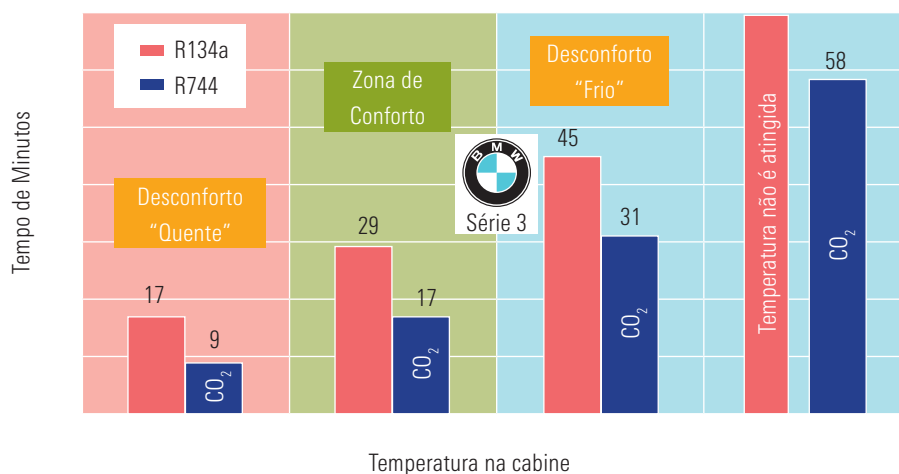


Figura 7 – Comparação do tempo de resfriamento da cabine e a zona de conforto em um veículo BMW série 3

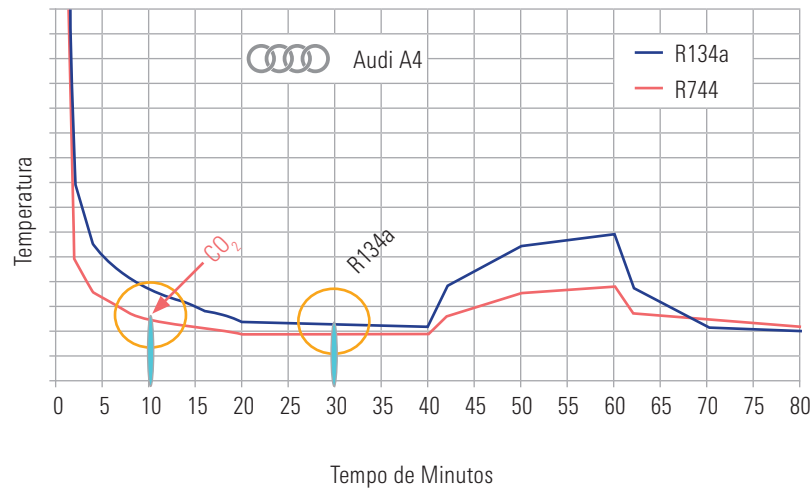


Figura 8 – Comparação do tempo de resfriamento da cabine num veículo AUDI A4

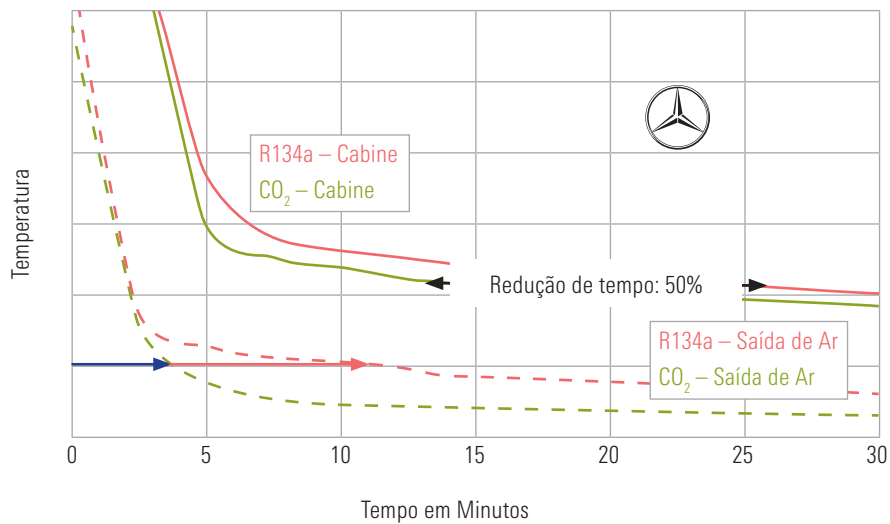


Figura 9 – Comparação do tempo de resfriamento da cabine e a saída de ar do evaporador em um veículo Mercedes-Benz "full size"

Novos ensaios foram realizados em um automóvel de pequena potência, denominados de carros populares, tipo 1.0. Os resultados foram bastante encorajadores, demonstrando que o veículo que continha o sistema de ar condicionado com CO₂ também teve o tempo de resfriamento da cabine reduzido, o consumo de combustível foi menor e o Coeficiente de Eficácia, COP, também mostrou-se superior aquele com o sistema com R134a. Os ensaios foram realizados, ainda, com

temperatura ambiente distinta, variando entre 10 e 45 °C e evidenciaram um maior consumo de combustível do veículo equipado com R-134a em todas as temperaturas ensaiadas, numa média de 0,4 litros por cada 100 km rodados, conforme ilustram as Figs 10, 11 e 12.

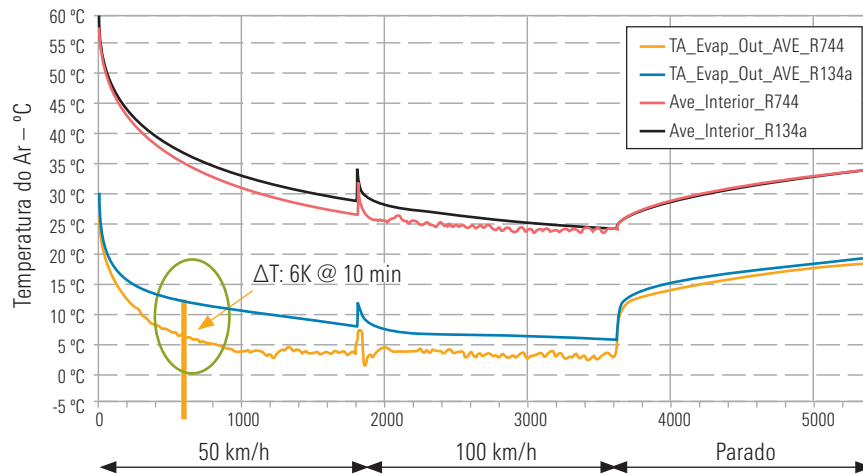


Figura 10 – Comparação do tempo de resfriamento da cabine e a saída de ar do evaporador num veículo Toyota 1.0

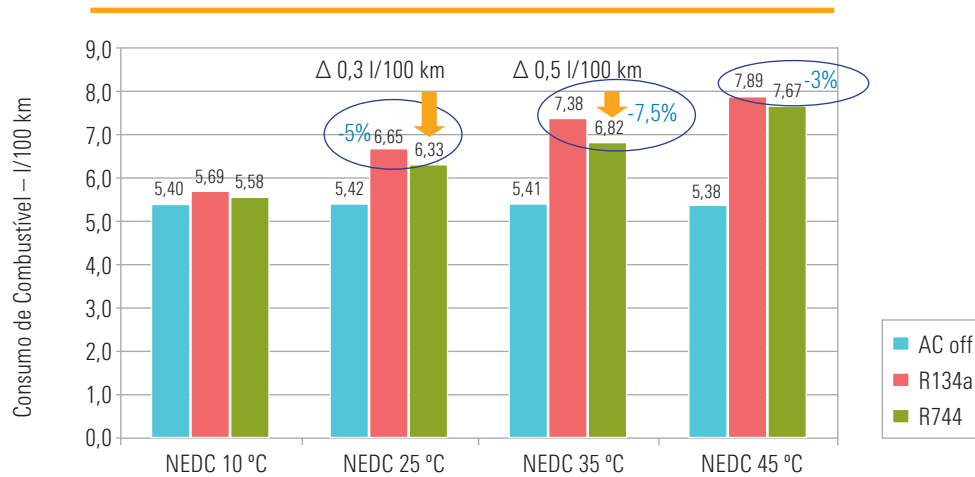


Figura 11 – Comparação do consumo médio de combustível em função da temperatura ambiente num veículo Toyota 1.0

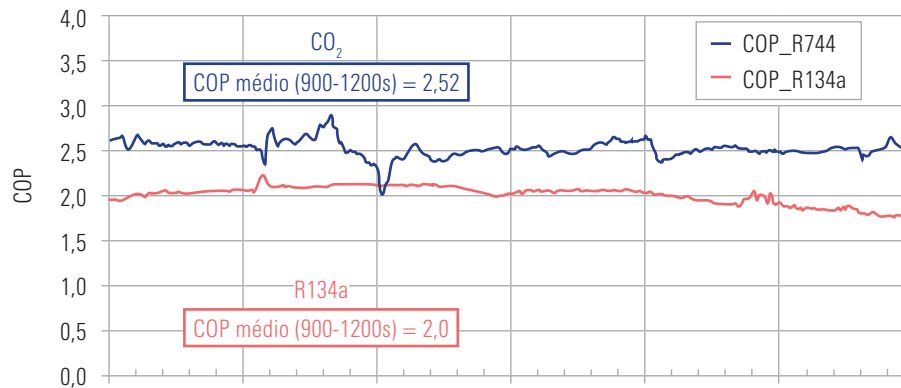


Figura 12 – Comparação do COP médio entre os sistemas com CO₂ e R-134a num veículo Toyota 1.0, para temperatura ambiente de 45 °C

Finalmente, seria interessante comentar a respeito da análise e projeção feita por empresas a respeito da porcentagem de veículos que saíram e irão deixar as montadoras com o aparelho de ar condicionado instalado, conforme ilustra a Fig. 13.

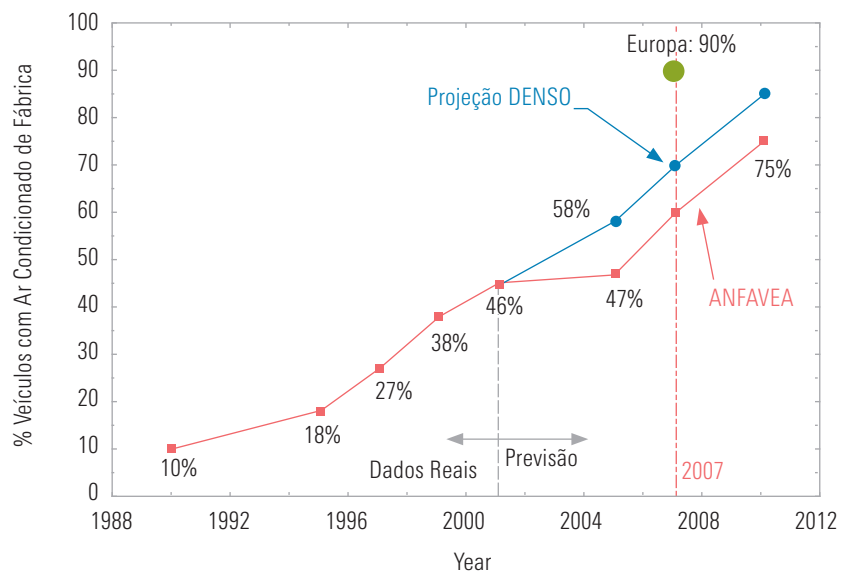


Figura 13 – Dados e projeção da porcentagem de veículos que deixam as montadoras com o aparelho de ar condicionado instalado no Brasil

4 Conclusões

Diversas pesquisas desde o final da década de 90, já demonstravam as potencialidades para a utilização do CO₂ como fluido em sistemas de ar condicionado automotivo e novas tecnologias estão sendo continuamente propostas. Tais vantagens referem-se ao melhor desempenho relativo ao R134a nos que diz respeito aos seguintes itens:

- ∴ tempo de resfriamento da cabine;
- ∴ melhor eficiência em mais de 90% de condições de dirigibilidade;
- ∴ os sistemas completos são menores e mais leves;
- ∴ com sua utilização poderá haver uma redução de 5% do total das emissões indiretas e 7% das emissões diretas;
- ∴ na Europa há a possibilidade de se reduzir 30 milhões de toneladas até 2011 com a introdução de 3 milhões de novas unidades de A/C com CO₂ a partir de 2008;

Como comentário final, é importante destacar que o CO₂ já dispõe de tecnologia desenvolvida para utilização em sistemas de Ar Condicionado automotivo, o que leva a concluir que o CO₂ será o fluido refrigerante da próxima década na Europa. Verifica-se, ainda, a necessidade de se realizar pesquisas em climas como o Brasil, com o objetivo de se levantar resultados de desempenho de veículos com o CO₂ nos sistemas de ar condicionado, para que seja possível verificar a eficácia de sua utilização.

5 Referências bibliográficas

Bodinus, W.S., 1999, **The Rise and Fall of Carbon Dioxide Systems**. ASHRAE Journal, Vol. 41, No. 4, pp. 37–42.

Brown, J.S., Yana-Motta, S.F., Domanski, P.A., 2002, **Comparitive Analysis of an Automotive Air Conditioning Systems Operating with CO₂ and R134a**. International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 19–32.

Dang, C., Hihara, E., 2004, **In-tube Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide**. Part 1. Experimental Measurement. International Journal of Refrigeration. In Press.

Dang, C., Hihara, E., 2004, **In-tube Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide**. Part 2. Comparison of Numerical Calculation with Different Turbulence Models. International Journal of Refrigeration. In Press.

Kauf, F., 1999, **Determination of the Optimum High Pressure for Transcritical CO₂ – Refrigeration Cycles**. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 38, pp. 325-330.

Liu, H.; Chen, J.; Chen, Z., 2005, **Experimental Investigation of a CO₂ automotive air conditioner**. International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 1293-1301.

Pearson, A. 2001, **New Developments in Industrial Refrigeration**. Ashrae Journal, Vol. 43, No. 3, pp 54-59.

Thome, J.R.; Hajal, J.E., 2004, **Flow Boiling Heat Transfer to Carbon Dioxide: General Prediction Method**. International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 294-301.

Zhu, M.S.; Shi, L., 2002, **Researches on the CO₂ Transcritical R/AC/HP Systems in China**. IIR/ IIF-Commission B1, B2, E1 and E2-Guangzhou, China-2002.

Experiência da União Européia em Refrigerantes Naturais – Status e Tendências

ENG. BERND KALTENBRUNNER

EURAMMON

E-mail: b.kaltenbrunner@kw.at

1 Introdução

115

A indústria de refrigeração encara diversos desafios na União Européia (EU). Um dos problemas mais desafiadores é o do meio ambiente. De um lado, o consumo de energia dos sistemas tem um papel importante e, por outro, os problemas dos vazamentos causados pelos denominados Gases-F (HFCs), que é discutido não só no nível das operadoras e fabricantes mas também no âmbito do Protocolo de Kyoto por diversos governos da UE.

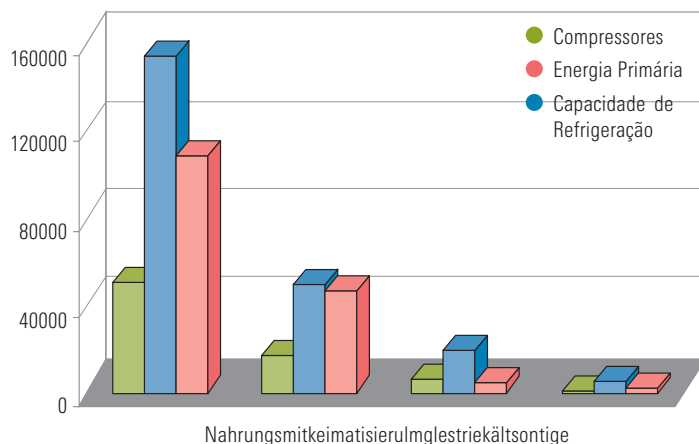


Figura 1

2 Padrões e Regulamentações na União Européia

A União Européia tenta reduzir os vazamentos produzidos pelos Gases-F usando alguns padrões e regulamentações objetivando proteger o meio ambiente.

Um dos padrões mais importantes é o EN 378. Nele, o meio ambiente tem um papel importante em muitas questões técnicas relacionadas não só aos refrigerantes HFCs. O EN 378 é internacionalmente reconhecido; assim sendo, o foco deste *paper* é destacar as questões da regulamentação 842/2006 sobre Gases-F.

O primeiro objetivo desta regulamentação é reduzir a emissão de gases fluorados de efeito estufa (Gases-F), mencionados pelo Protocolo de Kyoto, para proteger o meio ambiente. O regulamento abarca questões sobre contenção, utilização, recuperação e destruição desses gases.

2.1 Principais medidas:

- ∴ melhorar a contenção,
- ∴ rotulagem de produtos e equipamentos que contenham gases fluorados que produzam efeito estufa,
- ∴ restrições de uso e comercialização para certas aplicações,
- ∴ recuperação de Gases-F,
- ∴ treinamento e certificação de pessoal (e empresas),
- ∴ relatório de obrigações.

2.2 Comissões de regulamentação incluem:

- ∴ 1-5. Qualificação mínima de quadros (equipamentos de refrigeração, sistemas de proteção contra incêndios, comutadores...), verificação de vazamentos, instalação, manutenção ou conservação, recuperação (em algumas áreas).
- ∴ 6+7. Requisitos para verificação de vazamento (refrigeração estacionária e sistemas de proteção contra incêndios)
- ∴ 8. Requisitos de rotulagem.
- ∴ 9. Relatório de requisitos.

2.3 Alguns pontos importantes detalhados:

Artigo 3 “Contenção”

1. Operadores de refrigeração estacionária, ar condicionado e equipamentos de bombas de calor devem impedir vazamentos assim que for possível reparar eventuais fugas detectadas.
2. Operadores devem assegurar que o equipamento seja inspecionado para a detecção de vazamentos por pessoal certificado de acordo com o seguinte calendário:

Carga de refrigerante	Inspeção
3 – 30 Kg	uma vez a cada doze meses
30 – 300 Kg	uma vez a cada seis meses
300 ou mais Kg	uma vez a cada três meses / instalar sistemas de detecção de vazamentos

3. Os operadores têm de manter registros.

Artigo 4 “Recuperação”

1. Operadores são responsáveis pela recuperação apropriada realizada por pessoal certificado para garantir a reciclagem, a valorização ou destruição:
 - (a) Circuitos de arrefecimento de refrigeração, ar condicionado e bombas de calor.

Artigo 5 “Treinamento e Certificação”

1. A Comissão deve estabelecer requisitos mínimos (empresas e pessoal)
2. Estados membros devem estabelecer ou adotar seus treinamentos e requisitos de certificação próprios.
3. O operador deve assegurar que o pessoal responsável tenha obtido a certificação necessária.
4. Estados membros devem assegurar que as empresas entreguem os gases fluorados de efeito estufa somente quando os quadros detiverem os certificados.

Artigo 10 “Revisão”

Sistemas de ar condicionado, exceto em veículos de passageiros, devem ser revisados relatado em 31 de Dezembro de 2007.

Avaliação sobre a inclusão de outros produtos e equipamentos no Anexo II ser tecnicamente viável e com boa relação custo-eficácia → relatório no prazo de quatro anos após a entrada em vigor do regulamento. Sempre que necessário, a Comissão deverá apresentar propostas adequadas para a revisão de disposições relevantes do Regulamento.

3 Experiência em novas técnicas

Na primavera de 2007 a Alemanha fundou um grupo de especialistas com o objetivo de testar os potenciais de redução de HFCs em supermercados. Os membros são:

- .: Ministério do Meio Ambiente
- .: Agência Federal do Meio Ambiente
- .: Ecofys Alemanha
- .: Universidade de Ciências Aplicadas Karlsruhe – Instituto de Refrigeração, Ar Condicionado e Engenharia Ambiental.
- .: Cadeias de supermercados: Rewe, Lidl, Metro, Aldi
- .: Produtores de Componentes: Güntner, Bitzer, Bock, DuPont
- .: Empresas de Refrigeração: Linde, Epta, Dresdner Kühlanlagenbau
- .: Engenheiros de Planejamento: Tebeg, KWN
- .: DKV, Eurammon, Öko-Recherche, GTZ

3.1 As questões discutidas foram:

- .: Quais técnicas estão disponíveis no mercado? Quais são as experiências das partes envolvidas no mercado?
- .: Existem tecnologias para diminuir o uso de HFCs nos supermercados?
- .: Estas tecnologias são competitivas?

Muitas dessas questões sobre sistema de refrigeração em supermercados foram discutidas pelo Prof. Kauffeld da Universidade de Ciências Aplicadas Karlsruhe.

Mas não somente os refrigerantes destes sistemas foram discutidos, mas também os potenciais de economia de energia existentes nos supermercados ou naqueles que ainda usam HFCs.

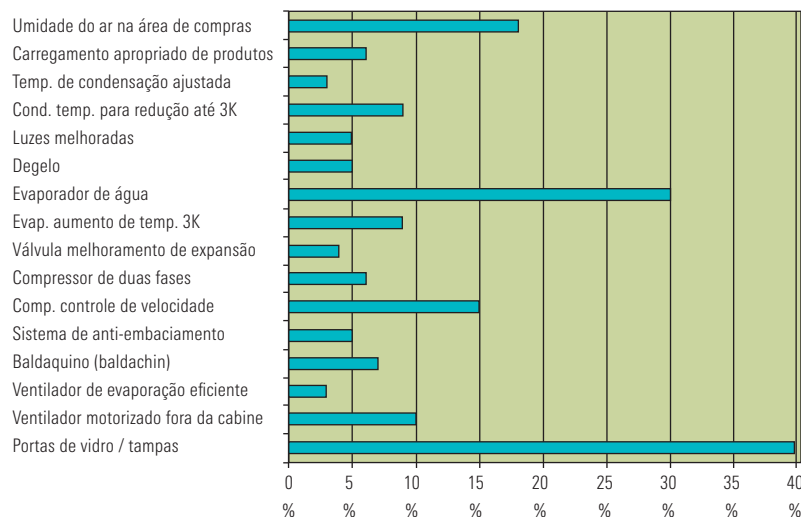


Figura 2 – Potenciais de Economia de Energia nos Supermercados

O grupo de especialistas e o governo alemão vêem um ótimo potencial de uso de CO₂ como um refrigerante em aplicações em supermercados. Esta opinião é garantida por alguns fabricantes que foram os primeiros a tomar estas medidas e experimentar estas técnicas.

Uma destas medidas segue na figura abaixo:

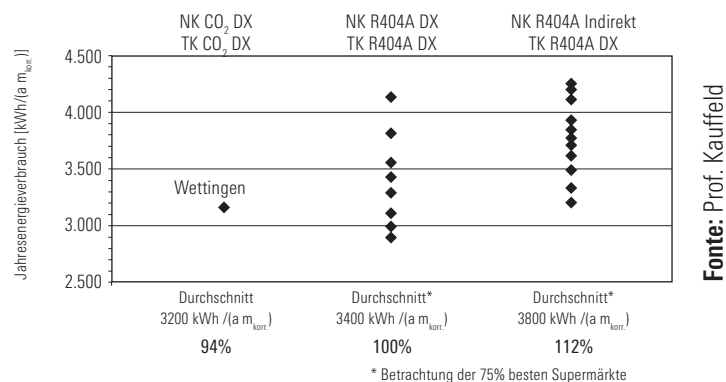


Figura 3 – Uso de energia por ifm em supermercados suíços medidos por COOP Basel, LKS Schweiz

A figura 3 mostra que usar CO₂ como refrigerante não é interessante somente devido às questões sobre potencial de aquecimento global (GWP), mas também muito interessante para usos eficientes de energia.

Atualmente existem aproximadamente sessenta instalações de supermercado usando CO_2 como refrigerante de supermercado na Europa. Estas instalações estão na Itália, Suécia, Noruega, Alemanha, Suíça, Luxemburgo, Grã-Bretanha, Suécia e Bélgica.

Capacidade de resfriamento disseminada por:

MT (Temperatura Média): 17 – 320 kW

LT (Temperatura Baixa): 2 – 80 kW

4 Conclusão

Se nós discutirmos as novas técnicas que utilizam refrigerantes naturais que não tenham impacto para o potencial de aquecimento global (GWP) ao invés dos HFCs, nós temos que sempre ter em mente que estamos falando sobre “técnicas velhas”.

Estes refrigerantes que estão agora em discussão devido a sua eficiência energética e zero ou quase zero GWP são, na verdade, refrigerantes muito antigos e que remontam para os primórdios da refrigeração no fim do século XIX.

Estes refrigerantes são amônia, CO_2 , HCs...

Instalações de frio alimentar em supermercados com a utilização de amônia

ALEXANDRE PRESOTTO JR. E CARLOS GUILHERME SÜFFERT

SPM ENGENHARIA S/C LTDA – Rua Eça de Queiroz, 998 – Porto Alegre /RS – Brasil

CEP.: 90670.020 – Fone: (55)51.332.1188 – Fax: (55)51.332.1246

E-mail: carlos.suffert@spm.com.br – site: www.spm.com.br

121

RESUMO

O artigo descreve o funcionamento do sistema de frio alimentar em supermercados utilizando a amônia como refrigerante primário e fluídos secundários para distribuição do “frio” até os expositores e câmaras frigoríficas. Mostrando suas vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e ambientais, em comparação com instalações tradicionais que utilizam a expansão direta de R-22.

Com base na experiência de diversas instalações em operação dentro do Brasil, o artigo mostra um estudo de caso comparando diversas configurações disponíveis atualmente em refrigeração comercial, analisando os aspectos de custos de implantação, operação e parâmetros ambientais.

1 Introdução

A partir da assinatura do “Protocolo de Montreal” a pressão social para reduzir o uso dos gases “condenados” tem aumentado progressivamente, acelerando o processo de eliminação dos CFCs e HCFCs e forçando o mercado a se adequar o mais rápido possível dentro desta nova realidade.

Como alternativa a utilização de CFCs e HCFCs em sistemas de frio alimentar para supermercados, temos desenvolvido no Brasil há mais de dez anos instalações com a utilização de fluídos intermediários. Estas instalações foram concebidas inicialmente com o objetivo de diminuir a quantidade do refrigerante na instalação, uma vez que ele se restringe apenas aos limites da central térmica, e o fluído intermediário faz o transporte do “frio” desde a central até os pontos de consumo (câmaras e expositores). E para a eliminação completa dos fluídos halogenados do sistema foi então utilizada a amônia como fluído refrigerante primário.

2 Funcionamento do sistema

O sistema, conforme descrito na *figura 1*, é formado por um grupo resfriador de líquido que resfria a solução em água de produto anti-congelante capaz de manter-se no estado líquido em baixas temperaturas. A solução circula na rede de distribuição, através da moto-bomba centrífuga, desde a central até os expositores e câmaras. A temperatura necessária para a conservação dos produtos é garantida através de um adequado balanceamento entre os níveis de temperatura do fluído intermediário e a superfície de troca térmica das serpentinas.

Uma vez que a distribuição do “frio” fica simplificada, todos os cuidados de operação e controle, como modulação da capacidade em regime de carga parcial, controle do superaquecimento e vazamento de refrigerante, ficam restritos à central térmica. E desta maneira facilmente controlados.

A utilização de amônia como fluído refrigerante primário em supermercados somente é viabilizada devido a utilização de fluídos secundários, sistema de expansão seca nos chillers para diminuir a carga de refrigerante e adotando os seguintes procedimentos de segurança:

- ∴ sistema de ventilação permanente para manter a central térmica em depressão constante de 2 mmca;
- ∴ descarga do sistema de ventilação em direção às torres de arrefecimento d’água;
- ∴ descarga das válvulas de segurança na bacia das torres de arrefecimento d’água.

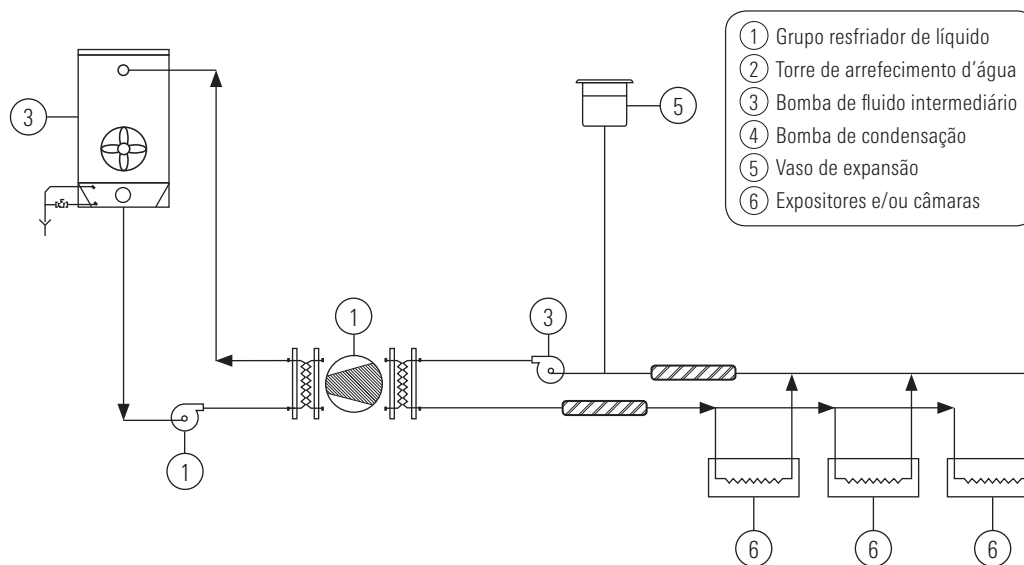


Figura 1 – Funcionamento do sistema

3 Descrição do sistema

3.1 Refrigerados

Usualmente as instalações de média temperatura para supermercados empregam a expansão direta de R-22 a uma temperatura de evaporação de aproximadamente -10°C . É para este regime que são dimensionadas as superfícies de transferência de calor dos evaporadores e selecionados os demais componentes da instalação. O grande diferencial entre a temperatura de evaporação e a temperatura de condicionamento do produto, provoca a necessidade de inclusão de malha de controle de temperatura para regimes de carga parcial e para degelo, já que a formação de gelo no evaporador é inerente ao processo.

Em instalações com fluido intermediário, normalmente se utiliza a solução na temperatura de -7°C . Assim é possível manter as serpentinas com a mesma área de troca térmica, mas mantém a necessidade das malhas de controle (temperatura e degelo), além de provocar uma perda significativa no desempenho energético.

A solução por nós desenvolvida, propõe operar a instalação com um menor diferencial entre a temperatura de fluido intermediário (aproximadamente -2°C) e a temperatura do produto. Através do balanceamento adequado entre fluxo de solução e a superfície de transferência de calor nas serpentinas, foi possível garantir as temperaturas necessárias para o bom condicionamento dos produtos eliminando as malhas de controle de temperatura e degelo em expositores e câmaras e ainda, um melhor desempenho energético global.

Os resultados obtidos quanto à conservação de produtos nas instalações com a utilização de fluido intermediário, foram equivalentes aos alcançados em instalações de refrigeração com sistema convencional de expansão direta de R-22. Mas como não ocorrem mais interrupções no fornecimento de fluido para a serpentina, estas condições não se alteram ao longo do dia. O que garante o perfeito condicionamento dos produtos dentro dos padrões de qualidade para comercialização, conforme apresentados na *figura 2*.

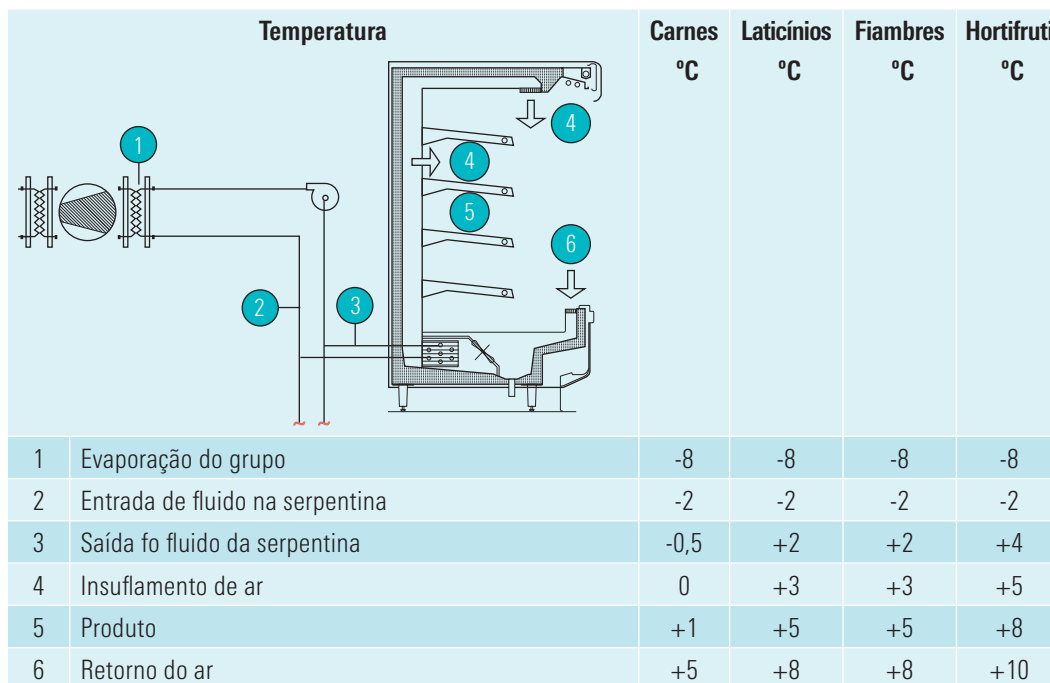


Figura 2 – Resultados obtidos em sistemas de refrigerados

3.2 Congelados

As instalações convencionais de baixa temperatura, com expansão direta de R-22, costumam operar com evaporação igual ou menor a -32°C . Então como critério de dimensionamento para

instalações com fluido intermediário, adotou-se a mesma temperatura de evaporação nos grupos resfriadores e uma temperatura de saída do fluido igual a -26°C . Nestas condições, e utilizando as mesmas serpentinas das instalações convencionais (com circuitação adaptada), é possível garantir as temperaturas necessárias em câmaras e expositores de congelados (-20°C sobre o produto).

O ganho na aproximação dos diferenciais de temperatura é conseguido em função dos seguintes fatores:

- ∴ fluxo de temperatura em contra corrente perfeita;
- ∴ melhor desempenho do trocador já que a distribuição da troca térmica na serpentina é mais eficiente e de melhor distribuição em sistemas líquido x ar do que em sistemas líquido/vapor x ar;
- ∴ otimização do super-aquecimento.

Os resultados obtidos em instalações operando da maneira descrita no item anterior, garantem as condições exigidas para o armazenamento e exposição de produtos congelados em supermercados, conforme apresentado na *figura 3*. E apesar de serem ainda necessárias as rotinas de degelo, foi observado que as oscilações na temperatura da solução, nos períodos pós degelo, são muito menores que as variações da temperatura de evaporação nos mesmos períodos em sistemas com evaporação direta.

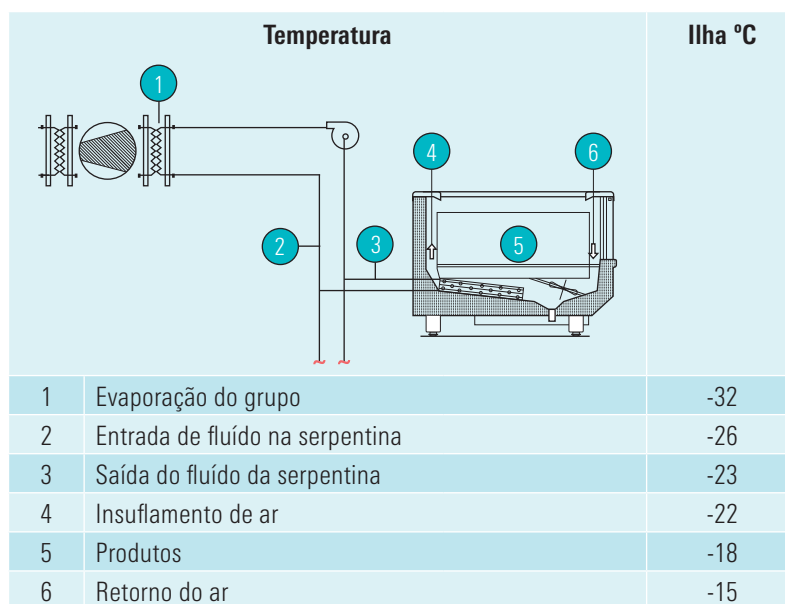


Figura 3 – Resultados obtidos em sistemas de congelados

4 Desempenho do sistema

Analisando o desempenho da instalação em dois períodos distintos, não apenas em regime de carga total, mas também em regime de carga parcial quando temos a loja fechada ao público e conseqüentemente diminuição da carga térmica. Nestas condições observamos que ao contrário do que acontece em sistemas de evaporação direta, a temperatura de evaporação do chiller aumenta, devido a diminuição do diferencial de temperatura do fluido secundário e conseqüentemente aumenta o COP da instalação.

Assim devido ao aumento da temperatura de evaporação no circuito de refrigerados, também para congelados durante o período de regime de carga parcial e otimização do superaquecimento, conseguimos ganho de COP quando comparamos com sistemas de expansão direta de R-22, conforme indicado na tabela a seguir:

Sistema	Regime de carga	Congelados				Refrigerados				COP global
		t. ev. °C	t. cd. °C	s.h °C	s.c. °C	t. ev. °C	t. cd. °C	s.h °C	s.c. °C	
Expansão direta R-22	Total	-32	+35	20	5	-10	+35	10	5	2,97
	Parcial	-33	+35	20	5	-11	+35	10	5	
Amônia com fluido secundário	Total	-32	+35	5	5	-8	+35	5	5	3,05
	Parcial	-31	+35	5	5	-7	+35	5	5	

5 Estudo de caso

Comparando o sistema proposto com amônia como refrigerante primário e fluídos secundários com as instalações utilizadas atualmente. Analisando consumo de energia, custos de implantação, custos de operação e questões ambientais para um supermercado médio com 4.000 m² de área de venda, localizado na cidade de Porto Alegre e com carga térmica de refrigerados de 260 Mcal/h e congelados de 80 Mcal/h temos:

Sistema	Cond.	Consumo de energia			
		Congelados	Refrigerados	Total	Diferença
		kW	kW	kW	%
Expansão direta – R22	ar	75,2	119,3	194,5	0,0
Expansão direta – R22	água	52,9	82,9	135,8	-30,2
Expansão direta – R507a	ar	84,4	138,8	223,2	+14,8
Fluído secundário – R22	ar	66,1	94,7	160,8	-17,3
Fluído secundário – R507a	ar	71,3	106,0	177,3	-8,8
CO ₂ subcrítico – R507a	ar	28,6	145,0	173,6	-10,7
CO ₂ transcrito	ar	26,2	229,8	256,0	+31,6
Fluído secundário – amônia	água	54,9	77,2	132,1	-32,1

Sistema	Custos de implantação					
	Central	Bal./câm.	Fluídos	Instal.	Total	Dif
	mil R\$	mil R\$	mil R\$	mil R\$	mil R\$	%
expansão direta – R22	296	1.250	34	261	1.841	0,0
expansão direta – R507a	296	1250	153	261	1.960	+6,5
fluído secundário – R22	421	1.297	35	241	1.994	+8,3
fluído secundário – R507a	421	1.297	49	241	2.008	+9,1
CO ₂	sem preço no Brasil					
fluído secundário – amônia	562	1.297	31	241	2.131	+15,8

Sistema	Custos de operação				
	Energia	Fluídos	Manutenção	Total	Dif.
	mil R\$/ano	mil R\$/ano	mil R\$/ano	mil R\$/ano	%
expansão direta – R22	328,4	6,3	24,0	358,7	0,0
expansão direta – R22	229,3	0,4	12,0	241,7	-32,6
expansão direta – R507a	377,4	29,4	24,0	430,8	+20,1
fluído secundário – R22	273,7	0,4	12,0	286,1	-20,2
fluído secundário – R507a	302,9	1,5	12,0	316,4	-11,8
CO ₂ subcrítico – R507a	295,8	6,0	36,0	337,8	-5,8
CO ₂ transcrito	435,5	2,7	36,0	474,2	+32,2
fluído secundário – amônia	223,0	0,3	12,0	235,3	-34,4

Obs.: O cálculo do custo de energia foi considerado segundo a tarifa "horo-sazonal verde".

Sistema	Questões ambientais				
	ODP	GWP	Refrigerante kg	Energia MWh/ano	TEWI
expansão direta - R22 - ar	0,03	1.700	2.000	1.704	17.874.000
expansão direta - R22 - água	0,03	1.700	1.900	1.190	14.407.500
expansão direta - R507a	0	3.900	1.800	1.955	27.525.000
fluido secundário - R22	0,03	1.700	300	1.409	9.091.500
fluido secundário - R507a	0	3.900	270	1.553	10.634.300
CO ₂ subcrítico - R507a	0	3.900	270	1.521	10.449.000
	0	1	3.000		
CO ₂ transcrito	0	1	1.000	2.243	13.461.300
fluido secundário – amônia	0	0	40	1.157	6.942.000

Obs.: TEWI calculado para 10 anos de operação.

6 Conclusão

Existem no Brasil instalações de refrigeração comercial, instaladas a mais de 10 anos, utilizando amônia como refrigerante primário e fluidos secundários, operando com excelentes resultados quando comparados com os sistemas atualmente utilizados de expansão direta de R-22 e com diversas opções de configurações disponíveis no mercado, analisando tanto os aspectos técnicos, econômicos e ambientais, e comprovando a viabilidade desta configuração face às necessidades de eliminação dos fluidos halogenados estabelecido pelo “Protocolo de Montreal”.

Aplicações do CO₂ no setor de refrigeração comercial para supermercados

ALESSANDRO DA SILVA

Engenheiro da Bitzer Compressores

E-mail: aplicação@bitzer.com.br

RESUMO

Devido à conscientização mundial referente aos assuntos ambientais, tais como o Aquecimento Global (Efeito Estufa), o CO₂ está sendo adotado cada vez mais como um refrigerante ecologicamente correto, sendo um dos alternativos aos refrigerantes sintéticos convencionais (H) CFC's e HFC's usados atualmente nos sistemas de refrigeração. Graças as suas características ambientalmente satisfatórias, baixa toxicidade e propriedades termofísicas favoráveis em operação subcrítica, o Dióxido de Carbono (R744) está progressivamente sendo considerado um fluido refrigerante preferido para aplicação em sistema cascata para média e baixa temperatura de evaporação nas instalações frigoríficas de supermercados. Em comparação com outros sistemas convencionais utilizados nessas aplicações, a elevada capacidade volumétrica de refrigeração do CO₂ permite uma redução significativa do custo dos compressores, da tubulação e da carga de refrigerante do sistema frigorífico. Mesmo sendo aplicado em maiores solicitações de carga térmica, o potencial do CO₂ resulta na utilização de compressores de tamanhos normalmente encontrados em aplicações comerciais e industriais de pequeno, médio e grande porte. Por outro lado, sua elevada pressão de trabalho e mesmo quando o equipamento está parado, exigirá que o projeto da instalação e das medidas de segurança sejam feitos com critério especial. Este trabalho trata das propriedades termodinâmicas do CO₂, seu uso como refrigerante, dos componentes frigoríficos disponíveis atualmente e em particular, com maior atenção, das aplicações dos compressores semi-herméticos utilizados na condição subcrítica com CO₂ no setor de refrigeração comercial para supermercados.

1 Introdução

Após sua pequena importância no setor de refrigeração durante várias décadas, o CO_2 volta a ter suas aplicações re-descobertas principalmente por motivo ecológico. Ultimamente uma série de sistemas cascata com CO_2 em operação subcrítica têm sido empregados em instalações comerciais de supermercados na Europa e Austrália. O CO_2 tem propriedades termo-físicas favoráveis para este tipo de aplicação, também é quimicamente inerte, não é inflamável e somente é prejudicial à saúde em altas concentrações.

2 Propriedades termodinâmicas do CO_2

2.1 Pressões de trabalho

A principal característica que condicionará o projeto de uma instalação com CO_2 são as elevadas pressões às que opera o sistema de refrigeração. Comparando o CO_2 com outros refrigerantes utilizados atualmente no campo da refrigeração comercial e industrial, observa-se que a pressão de saturação deste está muito acima das faixas de temperaturas de qualquer outro refrigerante, especialmente nas de condensação. (Figura 1.1)

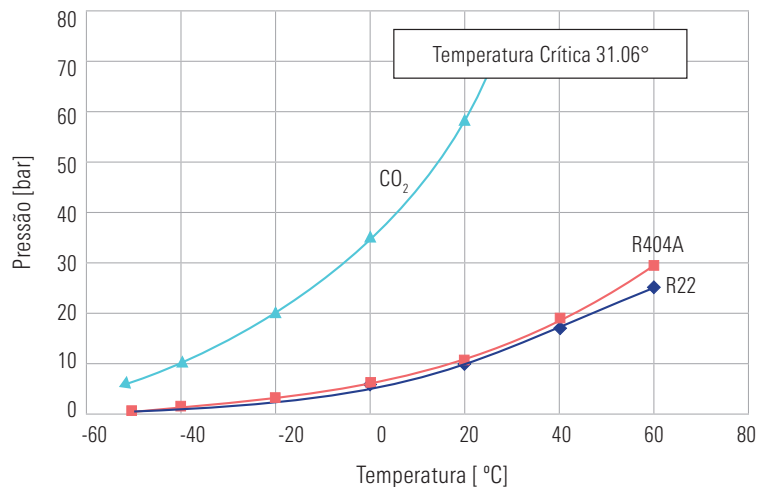


Figura 1.1 – Pressão de saturação em função da temperatura de saturação

Por que, de acordo com o tipo de refrigerante, os dados obtidos estão limitados a diferentes temperaturas de saturação?

Isto é devido à existência de pontos que limitam o processo de “condensação e evaporação”. Pela parte inferior as curvas estão limitadas pelo ponto triplo, que marca o limite entre o equilíbrio líquido/vapor e o equilíbrio sólido/vapor. Os processos de evaporação e condensação se referem às mudanças de estado entre líquido e vapor. Pela parte superior as curvas se vêem limitadas pelo ponto crítico, a partir do qual não se pode distinguir entre sólido e líquido. Por este motivo não existe condensação. (Figuras 1.2 e 1.3)

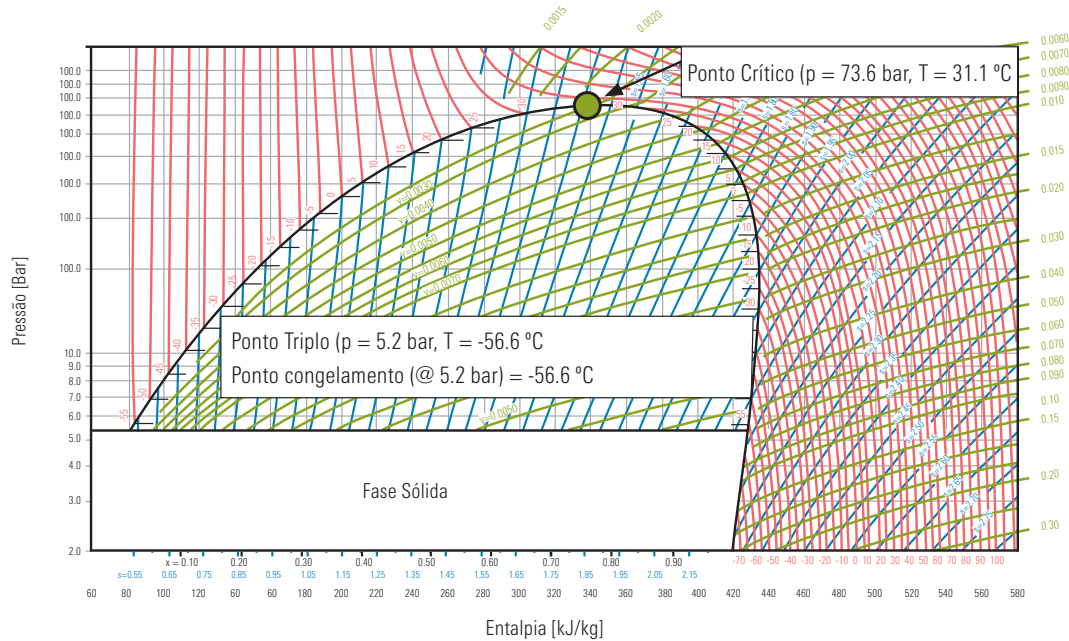


Figura 1.2 – Diagrama Log P e Entalpia do CO₂

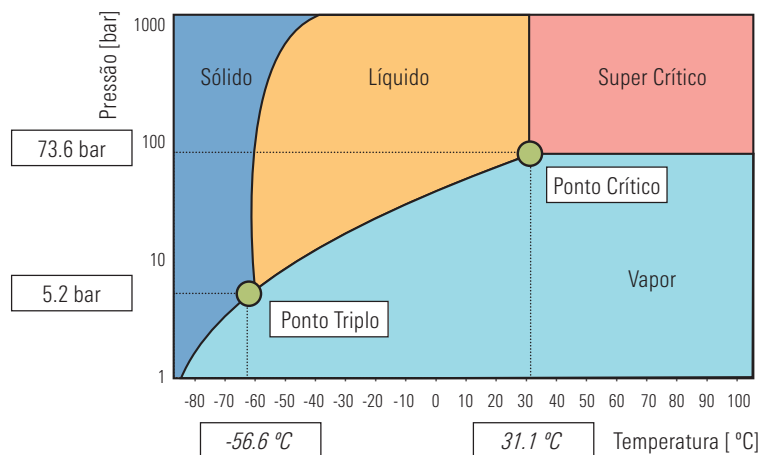


Figura 1.3 – Diagrama Pressão e Temperatura do CO₂

2.2 Ponto crítico

Estado de pressão e temperatura a partir do qual não se pode distinguir entre líquido e vapor. Exatamente nesse ponto, as densidades das duas fases são iguais. Caso continue aumentando a pressão ou a temperatura, o fluido se encontrará em estado supercrítico.

2.3 Ponto triplo

Limite que coexistem as três fases. Cabe destacar a elevada pressão a que se encontra esta condição para o CO_2 (5,2 bar abs.), encontrando-se no caminho de qualquer expansão produzida até a pressão atmosférica (1 bar abs.). (Figura 1.4)

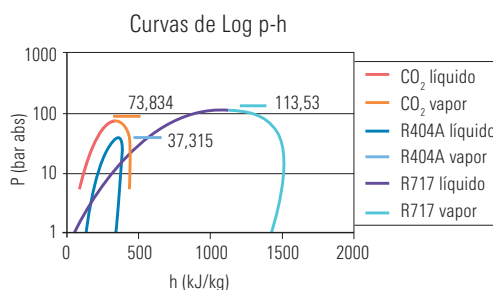


Figura 1.4 – Curvas de equilíbrio líquido-vapor para diferentes refrigerantes

Comparando as zonas de mudanças de fases para os diferentes refrigerantes observa-se que:

1. A pressão da linha triplo para o CO_2 é muito mais elevada comparada ao R404A ou a Amônia.
2. A entalpia de evaporação para a Amônia em geral é muito mais elevada.

Particularidades da linha triplo

Qualquer vazamento de refrigerante para atmosfera representa uma expansão até uma pressão de 0 bar relativo (1 bar abs.). Este fato provocará a aparição da fase sólida do CO_2 (conhecido como gelo seco), fato que não ocorrerá com o R404A e Amônia.

2.3.1 Vazamento na tubulação de refrigerante

Caso seja comprovado um vazamento em uma linha de líquido (através de uma válvula esfera), este por sua vez pode-se auto-selar devido à formação de sólido no processo de expansão CO_2 . Isso ocorrerá somente com uma mínima fuga de refrigerante.

2.3.2 Alívio de pressão de CO₂ através de válvula de segurança

Recomenda-se instalar válvula de segurança nos lados de alta e baixa pressão do sistema, para aplicação em cascata recomenda-se utilizar válvulas com pressão de 25 bar no lado de baixa e 40 bar no lado de alta. O alívio de pressão de CO₂ ao ambiente em caso de emergência representa uma expansão por abaixo do ponto triplo, resultando-se numa porção de sólido. Para evitar a obstrução pela formação de gelo, não se recomenda instalar nenhuma tubulação adicional após a válvula de segurança. Sua instalação poderá ser no próprio rack ou fora da sala de máquina, sendo que neste caso será necessário prolongar a tubulação antes da válvula pra evitar bloqueio pela formação de gelo na tubulação. (Fotos 1 e 2).



Foto 1 – Válvulas de segurança instaladas no rack



Foto 2 – Válvulas de segurança instaladas fora da sala de máquinas, “sem tubulação na saída das válvulas para evitar bloqueio por gelo”

1.4 Segurança

O CO_2 é mais denso que o ar, por isso sempre flui em direção ao piso (solo) em caso de vazamento. Este fato pode ser muito perigoso (especialmente em espaços reduzidos), uma vez que o CO_2 não é auto-alarmante (como a Amônia), o mesmo poderá deslocar o oxigênio até os limites prejudiciais à saúde. Isso necessita de uma especial atenção à detecção de fugas e uma ventilação (exaustão) de emergência. Recomenda-se uma exaustão para renovação do ar da sala de máquinas a cada 10 minutos em caso de vazamento de CO_2 .

1.5 Entalpias de evaporação

Os valores observados nas diferentes curvas de mudança de fase podem-se comparar com os valores de entalpias de evaporação em diferentes temperaturas. (Figura 1.5)

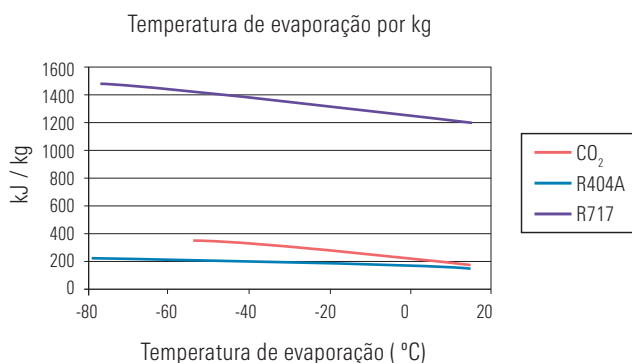


Figura 1.5 – Entalpia de evaporação para diferentes refrigerantes

Densidade do CO_2

A densidade do CO_2 é muito mais elevada comparada com outros refrigerantes, este fato tem diferentes conseqüências. Devido à maior densidade do vapor de CO_2 , o volume deslocado para obter a mesma potência de refrigeração é muito menor. Como vantagens teremos:

- ∴ Compressores de menor tamanho (menor volume deslocado)
- ∴ Menor quantidade de refrigerante na instalação
- ∴ Menor tamanho de recipiente e linhas de refrigerante

Concentrações de CO_2 no ar e seus efeitos

% _____ Efeitos

- 0.04 % _____ Concentração no ar atmosférico
- 2% _____ 50% de incremento no ritmo respiratório
- 3% _____ Tempos curtos de 10 min de limite de duração, incrementam o ritmo respiratório 100%.
- 5% _____ Incremento do ritmo respiratório 300%, depois de uma hora pode aparecer dor de cabeça e suor.
- 8% _____ Exposição limite a tempos muito curtos
- 8-10% _____ Dor de cabeça depois de 10 ou 15 minutos. Enjôos, vertigem, zumbido de ouvidos e aumento da tensão, pulso, excitação, vômitos.
- 10-18% _____ Depois de uma exposição curta aparecem ataques epiléticos, perda da consciência e choque (as vítimas se recuperam rapidamente com o ar fresco)
- 18-20% _____ Sintomas similares aos de uma trombose.

1.6 Temperatura de descarga

A compressão de qualquer gás acarreta um aumento acima da sua temperatura de saturação.

A compressão do CO₂ em um ciclo em cascata [-50/-5 °C], pode levá-lo a temperaturas de descarga próximas aos 80 °C.

2 Uso do CO₂ como refrigerante

2.1 Projetos frigoríficos

As elevadas pressões de trabalho do CO₂, tal como discutido no item 1, assim como seu ponto crítico situado a 31,1 °C, levam à projetos frigoríficos substancialmente distintos dos sistemas de refrigeração convencionais. Fundamentalmente os sistemas de refrigeração com o CO₂ se dividem em duas categorias:

1. Circuitos transcíticos: o lado de alta pressão do circuito se situa acima do ponto crítico. Nessa aplicação o CO₂ não se condensa, mas sim se dessuperaquece, ocorre o que chamamos de “resfriamento gasoso”.

As pressões do lado de alta se situam na ordem dos 100 a 120 bar.

2. Circuitos subcríticos: o lado de alta pressão do circuito se situa abaixo do ponto crítico. Nesse caso o CO_2 se condensa, esse processo é chamado de “condensação”.

As pressões do lado de alta se situam na ordem de 30 bar (-5 °C) a 25 bar (-12 °C)

Através do exposto acima, os circuitos subcríticos são os mais utilizados hoje em dia devido à tecnologia e conhecimentos atualmente disponíveis.

2.1.1 Sistemas transcíticos

Nas fotos 3 e 4 respectivamente observa-se uma instalação e um compressor Bitzer para aplicação transcítica com CO_2 .



Foto 3 – Rack com aplicação transcítica de CO_2



Foto 4 – Compressor Bitzer para aplicação transcítica de CO_2

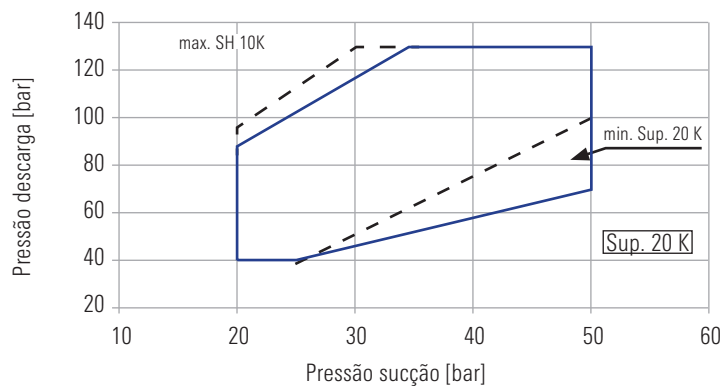


Figura 1.6 – Limites de aplicação dos compressores para operação transcritical de CO₂

2.1.2 Sistemas subcríticos

2.1.2.1 CO₂ como fluido secundário

Este tipo de sistema representa a forma mais simples de aplicação do CO₂ com a tecnologia atual, visto que neste tipo de sistema o CO₂ é utilizado como um refrigerante secundário, já que o mesmo é bombeado e não comprimido. Um sistema frigorífico (R404A, R717,...) é encarregado de re-condensar o CO₂ que se evapora parcialmente nos evaporadores, e uma vez condensado, armazena-se em um tanque de acumulação de CO₂.

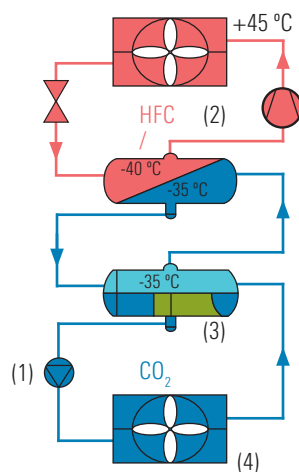


Figura 1.7 – Esquema de instalação de CO₂ como fluido secundário

O sistema da figura 1.7 consta dos seguintes elementos principais:

- (1) Estação de bombeamento do CO_2 .
- (2) Sistema de Resfriamento/condensação do CO_2 .
- (3) Tanque de acumulação de CO_2 .
- (4) Evaporadores de CO_2 .

2.1.2.2 Instalações tipo cascata

A figura 1.8 mostra um exemplo de aplicação em cascata para o uso com o Dióxido de Carbono (R744), no qual o mesmo é utilizado no sistema secundário para média e baixa temperatura de evaporação. No sistema primário utilizado para condensar o CO_2 , o fluido refrigerante poderá ser do tipo natural (R290, R717, etc.) ou sintético (HFC's, por exemplo: R134a, R404A, etc.), porém em menor quantidade, pois estará confinado somente no circuito que envolve o compressor, condensador e evaporador (trocador de calor cascata).

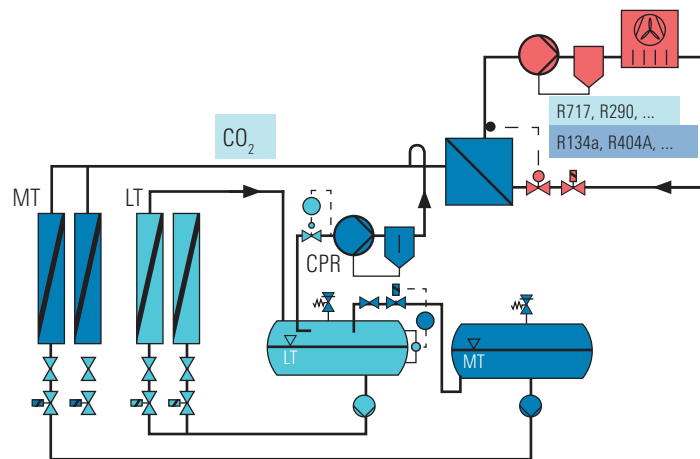


Figura 1.8 – Sistema Cascata com CO_2

De acordo com a figura 1.9, as aplicações de média temperatura nas instalações frigoríficas de supermercados, são obtidas através de um sistema com re-circulação de líquido, nesse caso os evaporadores trabalham inundados com CO_2 líquido a $-10\text{ }^\circ\text{C}$.

O sistema de baixa temperatura é realizado através de um ciclo de compressão a vapor utilizando compressores semi-herméticos alternativos, operando com expansão direta evaporando a $-30\text{ }^\circ\text{C}$, na qual o CO_2 é condensado na temperatura de aproximadamente $-10\text{ }^\circ\text{C}$.

O sistema de média temperatura está incluído no ciclo, no qual o CO_2 no estado líquido a -10°C é circulado através dos evaporadores de resfriados por uma bomba especialmente projetada para a re-circulação desse fluido.

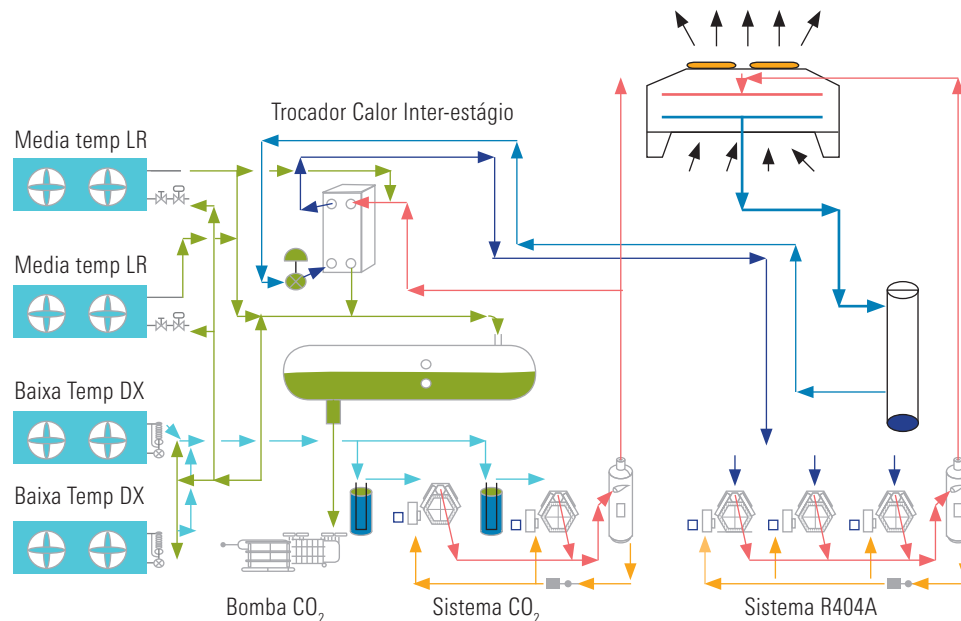


Figura 1.9 – Sistema Cascata com CO_2 / R404A: Evaporadores de baixa temperatura com expansão direta e os de média temperatura com re-circulação de líquido

Para obter vantagem da alta eficiência do refrigerante, o CO_2 é usado no estágio de baixa pressão em cascata onde o mesmo é condensado a -10°C (condição subcrítica).

O estágio de baixa pressão é conectado a um sistema primário de refrigeração (R404A), no qual transfere o calor absorvido dos evaporadores do sistema de média e baixa temperatura e o dissipa a atmosfera através de um condensador resfriado a ar ou água.

Devido à alta densidade do vapor e a elevada eficiência volumétrica, os compressores aplicados com CO_2 geram economias de energia bem superiores comparados aos sistemas de refrigeração convencionais.

O sistema cascata também tem a vantagem de obter um elevado grau de líquido sub-resfriado, que resulta em reduções significativas no diâmetro das linhas e também na carga de refrigerante – comparado com os refrigerantes convencionais.

Em geral, os diâmetros das linhas dos sistemas com CO_2 podem ser reduzidos em até 70% do diâmetro atualmente utilizado com R22 ou R404A para a mesma capacidade frigorífica.

Devido ao preço de aquisição do CO_2 ser muito mais barato do que os refrigerantes sintéticos atualmente comercializados, o custo total da carga de refrigerante poderá ser significativamente reduzido.

Embora o sistema de média temperatura - que é resfriado através da re-circulação de líquido - não ofereça reduções significativas no custo energético, as economias substanciais podem ser obtidas através da redução da carga de refrigerante e da redução real no custo do refrigerante.

Os benefícios adicionais também são obtidos através de evaporadores com menores áreas de troca de calor, também pela rápida queda da temperatura devido à elevada transferência de calor gerada pelos evaporadores inundados.

Os circuitos de média e baixa temperatura podem ser combinados em um sistema de tubulação integrada, assim pode-se reduzir significativamente o tamanho do equipamento, tornando-o mais compacto.

No coração do sistema está um tanque de líquido especialmente projetado que alimenta uma bomba de CO_2 líquido. Esta bomba alimenta todo o sistema (resfriados e congelados) com líquido refrigerante - CO_2 .

O CO_2 líquido, que está sendo bombeado através dos evaporadores de média temperatura, evapora parcialmente e retorna ao tanque de líquido através de uma mistura "líquido / vapor", permanecendo ainda na temperatura de aproximadamente $-10\text{ }^\circ\text{C}$.

Os evaporadores de baixa temperatura também são alimentados pela bomba de CO_2 . Porém, neste caso o refrigerante passa através de uma válvula de expansão, ao qual assegura que somente vapor refrigerante superaquecido retorna aos compressores de baixa temperatura de evaporação.

O vapor refrigerante que chega na sucção dos compressores de baixa temperatura, é por sua vez comprimido até a temperatura de condensação. Este gás comprimido é então enviado a um trocador de calor a placa juntamente com o retorno do refrigerante proveniente dos evaporadores de média temperatura, assim ambos são condensados e acumulados em um tanque de "Flash" - com circulação por "Termo-Sifão" a uma temperatura de aproximadamente $-10\text{ }^\circ\text{C}$.



Foto 5 – Racks para operação subcrítica com CO_2



Foto 6 – Rack para operação subcrítica com CO₂ utilizando bomba de recirculação para os evaporadores de média temperatura de evaporação

2.2 Pressões de projeto de instalações frigoríficas com CO₂

As pressões de projeto das instalações com CO₂ dependem do tipo de aplicação a que se destina, segundo a classificação comentada no item anterior. Não obstante, existe um certo consenso entre os distintos fabricantes de componentes frigoríficos para o CO₂ nas seguintes pressões de projeto:

Pressão de Trabalho	Lado de alta pressão	Lado de baixa pressão
Sistema transcrito	115 bar	25 bar (50 bar)
Sistema subcrítico	40 bar (50 bar)	25 bar (50 bar)

Nota: entre parêntese em caso de degelo por gás quente.

2.3 Tubulação para sistemas com CO₂

O CO₂ como gás inerte que é, resulta compatível com a totalidade dos metais, por isso a tubulação para os sistemas com CO₂ pode utilizar-se de:

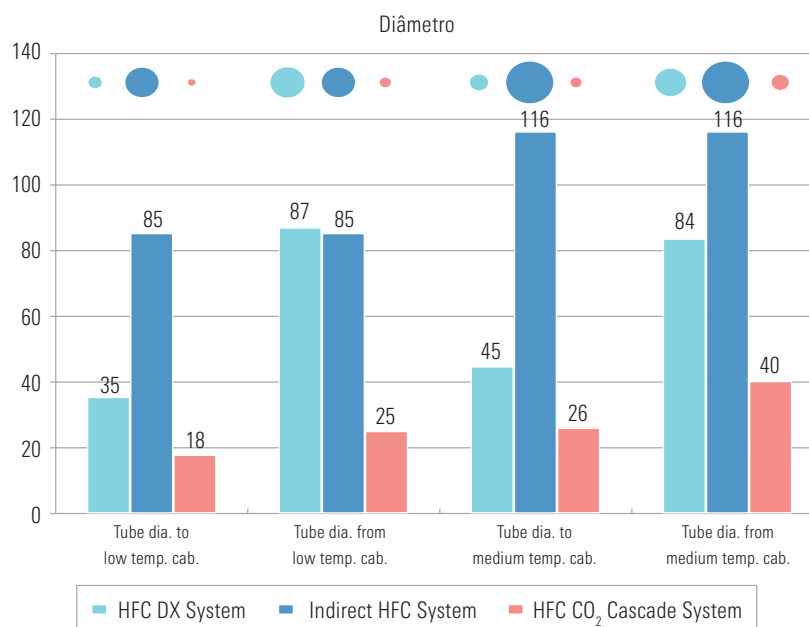
∴ Cobre ∴ Aço carbono ∴ Aço inoxidável

A única condição é que suporte as pressões de projeto indicadas no item anterior. A seguir indicamos as pressões de trabalho em função de seu diâmetro nominal exterior e sua espessura de parede. Segundo os valores indicados na tabela 1, os tubos padrões em cobre podem ser utilizadas até um diâmetro de 1 1/8" em instalações com pressões de projeto de 40 bar no lado de alta pressão.

Tabela 1 – Diâmetros, espessura de parede, pressão de trabalho e pressão de ruptura dos tubos de cobre

Tubo de Cobre (tubo flexível)			
Diâmetro (mm)	espessura parede	pressão trabalho	pressão ruptura – Valores aproximados
3/8	0.91	7680 kPa	38240 kPa
1/2	0.91	5630 kPa	28660 kPa
5/8	0.91	4440 kPa	22900 kPa
7/8	0.91	3125 kPa	16375 kPa
	1.22	4260 kPa	21950 kPa
1-1/8	1.22	3275 kPa	17080 kPa
	1.63	4010 kPa	20500 kPa
1-3/8	1.22	2660 kPa	13975 kPa
	1.63	3630 kPa	18670 kPa
1-5/8	1.22	1860 kPa	11825 kPa
	1.63	3050 kPa	15800 kPa
2-1	1.63	2315 kPa	12080 kPa

Tabela 2 – Comparação dos diâmetros da tubulação com sistema DX
HFC x sistema indireto HFC x sistema cascata CO₂ / HFC



Nota: os valores de pressão de trabalho da tabela 1 não devem ser confundidos com as pressões de ruptura da tubulação de cobre, os quais se situam muito acima dos valores tabulados.

2.4 Teste de vazamento nos sistemas com CO₂

O teste de vazamento deverá ser realizado com uma pressão de Nitrogênio de aproximadamente 40 bar no lado de alta e 25 bar no lado de baixa pressão do sistema frigorífico. Solicitamos também consultar os respectivos fabricantes dos evaporadores e intercambiadores de calor para saber qual a pressão de teste recomendada que deverá ser utilizada nesses componentes para evitar danos de ruptura.

2.5 Evacuação nos sistemas com CO₂

Após certificar-se de que o sistema não tem vazamento, a evacuação deverá ser realizada com uma bomba de alto vácuo (dois estágios) nos lados de alta e baixa pressão do sistema frigoríficos, inclusive nos evaporadores e intercambiadores de calor. Recomenda-se também romper o vácuo com Nitrogênio seco quando o sistema atingir uma pressão de 500 micron de mercúrio, repetir essa operação pelo menos duas vezes, pois o nitrogênio ajudará a remover a “umidade” do sistema mais rapidamente.

É muito importante chegar num menor nível de vácuo possível (mínimo recomendado: 250 micron de mercúrio), pois a presença de água no sistema de CO₂ é indesejável e pode provocar a formação de ácido carbônico que ataca o aço. A ação do ácido carbônico sobre o cobre é muito lenta e pode ser considerada desprezível. O aço inoxidável, pelo contrário, não sofre a ação pelo ácido.

143

2.6 Carga de refrigerante nos sistemas de CO₂

A carga de CO₂ nos sistemas de refrigeração é um dos pontos mais importantes e devemos ter muito cuidado durante esta operação. A atenção especial, como se comentou no item 1, deve ser dada ao ponto triplo do CO₂ que ocorre a uma pressão de 5,2 bar. Então, caso se realize a carga de CO₂ na fase líquida num sistema que estiver em “vácuo”, imediatamente irá formar dentro do sistema uma “neve carbônica” no estado sólido, a qual nos impedirá de continuar com essa operação. Por tal motivo, deve-se providenciar uma carga inicial no sistema com o CO₂ na fase gasosa, somente até superar o ponto triplo (5,2 bar abs).

Posteriormente, pode continuar com a carga em fase líquida diretamente no recipiente de líquido. Devido à alta pressão que os cilindros de CO₂ possuem, sempre deve realizar a carga através de uma válvula reguladora de pressão para evitar acidentes (Foto 7). Caso contrário, provocará uma alta evaporação do líquido refrigerante na saída do cilindro. Por este motivo, recomenda-se resfriar o cilindro de CO₂ durante a carga com líquido. Desta forma teremos:

- ∴ Menor evaporação do líquido CO₂.
- ∴ Menor aumento da pressão no sistema.

Para evitar um rápido aumento da pressão interna do sistema, recomenda-se colocar o sistema frigorífico primário em funcionamento para realizar a condensação do CO₂. O tipo de Dióxido de Carbono recomendado para utilização na refrigeração é o “Food Grade” (Grau Alimentício), que contém 5 ppm de umidade. Os cilindros de CO₂ são muito parecidos com os cilindros de Nitrogênio, os mesmos são comercializados em cilindros que variam de 25 a 45 Kg, recomenda-se consultar os fabricantes como a BOC, White Martins, etc.



Foto 7 – Detalhe da válvula reguladora de pressão instalada no cilindro de CO₂

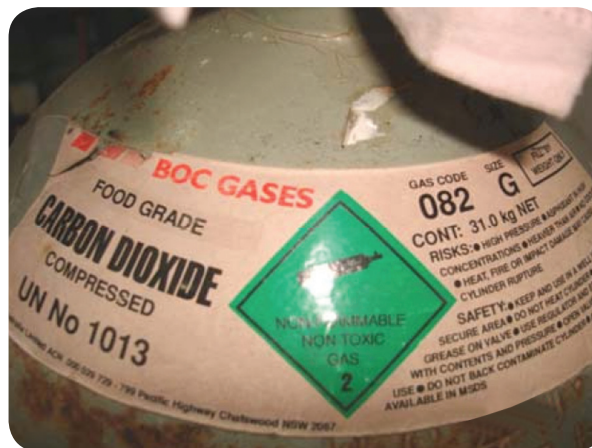


Foto 8 – Detalhe do grau de CO₂ recomendado para refrigeração: “Food Grade”

2.7 Miscibilidade do óleo com o CO₂

O óleo lubrificante utilizado nos sistemas de CO₂ é do tipo Polioléster (POE): BSE60K para operação subcrítica e BSE80K para transcítica (fonte Bitzer). São óleos miscíveis com o CO₂, beneficiando o retorno ao compressor. Entretanto, a alta solubilidade (capacidade de mistura com a fase gasosa) apresentada pelo CO₂, requer cuidados especiais, tais como:

- ∴ Obrigatório o uso de resistências de cárter nos compressores.
- ∴ Temperatura do óleo mínima de 40 °C (cárter).

O POE utilizado com CO₂ é um óleo higroscópico, portanto é necessário tomar as mesmas precauções que com os óleos POE usados para os HFC's.

3 Componentes frigoríficos para instalação cascata com o CO₂

Neste item realizaremos uma análise dos distintos componentes frigoríficos necessários para a realização de uma instalação frigorífica tipo cascata com o CO₂.

3.1 Compressores

3.1.1 Gama de compressores Bitzer Serie K

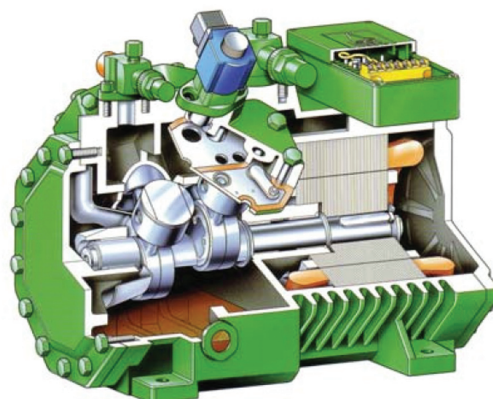


Foto 9 – Detalhe do compressor semi-hermético alternativo Bitzer série K para aplicações subcríticas com CO₂

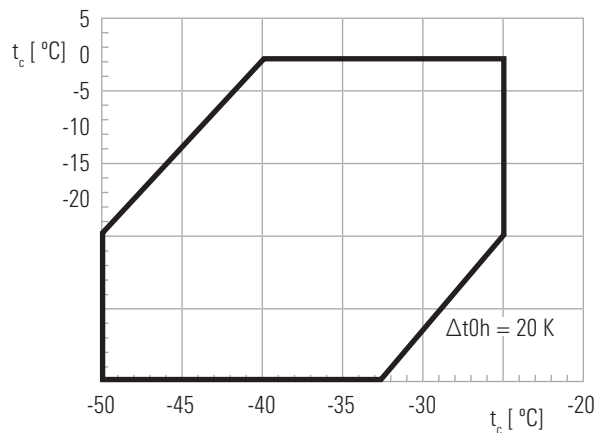


Figura 2 – Limites de aplicação dos compressores semi-herméticos alternativos Bitzer série K para aplicações subcríticas com CO_2

Características dos compressores para aplicação subcrítica com CO_2

Atualmente a gama de compressores Bitzer Serie K para aplicações subcríticas com o CO_2 abrange 16 modelos de compressor desde 2,71 a 46,9 m^3/h de deslocamento. A potência frigorífica vai desde 4,8 kW até 86,5 kW a $-35/-5$ °C. As características principais destes compressores são:

- ∴ Sistema de lubrificação centrífuga por disco dinâmico.
- ∴ Amortecedor de pulsações (mufla) integrado no cabeçote para diminuir vibração e ruído.
- ∴ Placas de válvulas especialmente projetadas para o CO_2 .
- ∴ Sistema de transmissão resistente ao desgaste com buchas revestidas com PTFE (Teflon).
- ∴ Carga de óleo POE específico (BSE60K).
- ∴ Carcaça de alta resistência à pressão sem a tampa base para pressões de serviço máximas de 40 bar (alta pressão).

3.2 Intercambiadores de calor

3.2.1 Evaporadores

Existem alguns fabricantes que oferecem uma gama de evaporadores preparadas para o CO_2 .

Por exemplo, *Güntner e Buffalo Trident*

A Güntner oferece 2 séries de evaporadores:

- a)** Serie CXGHN: pressão de trabalho até 28 bar.
- ∴ Construção: cobre e alumínio
- ∴ Degelo: elétrico (possibilidade de reforçá-lo até $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- ∴ Coeficiente K: $33\text{ W/m}^2\text{K}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ∴ Gama de 1 a 3 ventiladores com pás desde $\varnothing 400$ até $\varnothing 800$ mm.

- b)** Serie CPGHN: pressão de trabalho até 50 bar.
- ∴ Construção: aço inoxidável e alumínio.
- ∴ Degelo: elétrico, água e possível gás quente.
- ∴ Coeficiente K: $28\text{ W/m}^2\text{K}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ∴ Gama de 1 a 3 ventiladores com pás desde $\varnothing 400$ a $\varnothing 800$ mm.

A Buffalo Trident oferece 3 séries de evaporadores:

- a)** Serie BRLC e BBLC: para baixa temperatura de evaporação variando de -20 a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ∴ Construção: cobre e alumínio
- ∴ Degelo: elétrico
- ∴ Gama de 1 a 5 ventiladores com pás desde $\varnothing 300$ até $\varnothing 500$ mm.
- b)** Serie BRCLR: para média temperatura de evaporação com recirculação de líquido.
- ∴ Construção: cobre e alumínio.
- ∴ Degelo: natural
- ∴ Gama de 1 a 5 ventiladores com pás desde $\varnothing 300$ a $\varnothing 500$ mm.

3.2.2 Condensadores

Como comentado no item 2, nos sistemas com CO_2 tipo cascata, o condensador do CO_2 é o evaporador do sistema frigorífico primário que funciona com R404A, R717, etc. Por este motivo, os condensadores de CO_2 nestes sistemas são dos tipos:

- ∴ Multitubular.
- ∴ De placas.
- ∴ Tubo em tubo para pequenas potências.

Nos condensadores de placas ou de tubo em tubo, além das pressões de trabalho necessárias, é muito importante levar em conta a pressão de ruptura dos tubos caso o CO_2 circular por fora deles.

3.2.3 Intercambiadores de calor

Nas instalações do tipo cascata com CO_2 é muito importante à inclusão de um intercambiador de calor entre a linha de líquido (sistema primário) e a de sucção (sistema secundário). Os motivos são:

∴ Devido à temperatura negativa que temos inclusive no lado de média temperatura do circuito de CO_2 , as entradas de calor na linha de líquido podem chegar a provocar flash-gas.

O intercambiador gera um sub-resfriamento adicional que evita este fenômeno.

∴ Pela alta solubilidade do refrigerante CO_2 no óleo lubrificante, é necessário assegurar um superaquecimento mínimo de 20K para evitar que o óleo seja muito diluído e perca suas propriedades lubrificantes.

Os tipos de intercambiador usados preferentemente são os de placa.

3.3 Válvulas de expansão

148

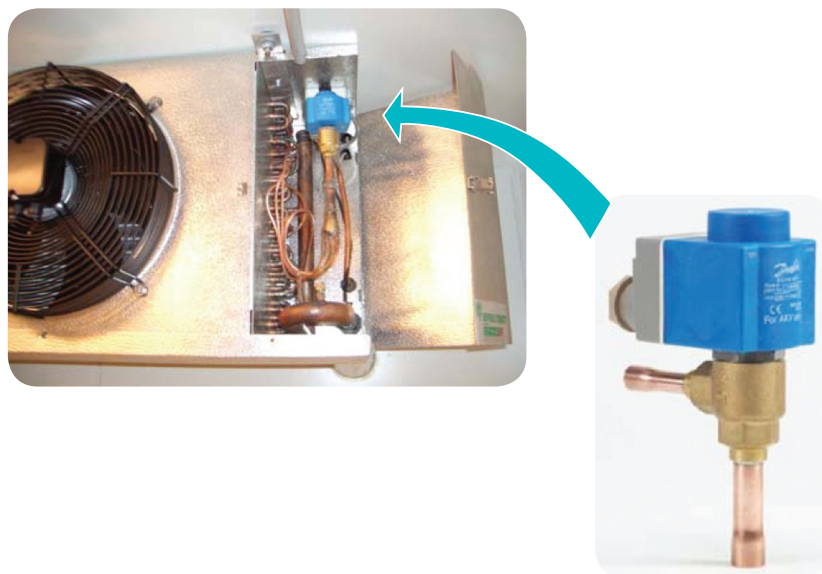


Foto 10 – Detalhe da válvula de expansão eletrônica utilizada nos evaporadores de baixa temperatura congelados), com expansão seca

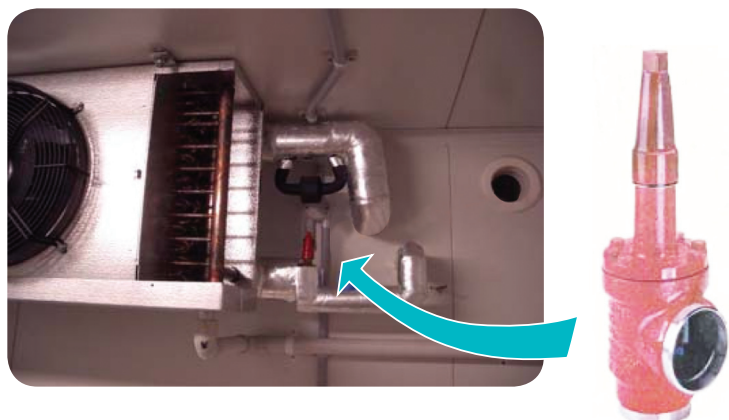


Foto 11 – Detalhe da válvula de expansão manual utilizada nos evaporadores de média temperatura (sistema de resfriados), trabalha com re-circulação de CO₂ líquido

Devido às propriedades termodinâmicas particulares do CO₂, considerado como fluido criogênico, o mesmo requer um tempo de resposta muito rápido durante sua expansão nos evaporadores de baixa temperatura de evaporação, sendo assim, somente as válvulas de expansão tipo eletrônica são as que atendem esta exigência. Os fabricantes como a Danfoss, Siemens e Carel possuem válvulas deste tipo preparadas exclusivamente para utilização com CO₂. O sistema de resfriados (média temperatura), como trabalha com re-circulação de CO₂ líquido, é bem mais simples e, portanto, requer apenas válvulas manuais para o controle da vazão de refrigerante, além do que, também se recomenda válvulas solenóides para o bloqueio do fluxo refrigerante de acordo com as operações de comando.

3.4 Recipientes de líquido

Os recipientes de líquido dos sistemas de CO₂ são comparavelmente de menor volume que nos sistemas com o HFC ou Amônia, esse fato é devido à menor vazão volumétrica que se necessita para a mesma capacidade frigorífica. Os recipientes de líquido devem ser projetados para as pressões de trabalho necessárias. Recomenda-se instalar no recipiente de líquido uma serpentina "exterior", esta por sua vez deverá estar conectada a uma unidade condensadora acionada por gerador em caso de emergência, assim evitaremos o aumento da pressão do sistema de CO₂ em caso de falha elétrica. Outra possibilidade seria instalar o recipiente de líquido dentro de uma das câmaras de congelados da instalação frigorífica, assim poderemos manter o líquido de CO₂ em baixas temperaturas por alguns dias (aprox. 3 á 5 dias) sem a elevação considerada da pressão.



Foto 12 – Exemplo de aplicação da serpentina utilizada para manter o CO₂ “frio” no tanque caso ocorra falha da energia elétrica. A mesma deverá ser conectada a uma unidade condensadora acionada por gerador



Foto 13 – Detalhe do tanque de líquido montado no rack “isolado” termicamente

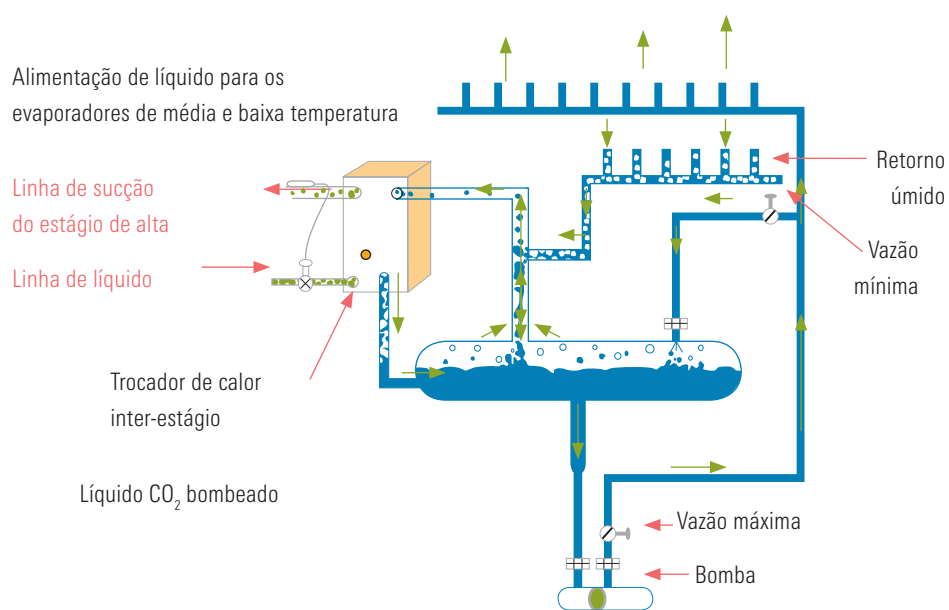


Figura 2.1 – Detalhe do sistema de bombeamento de CO₂ líquido



Foto 14 – Detalhe do rack com sistema de bombeamento do CO₂ líquido

3.5 Sistema de controle do óleo

O sistema de controle óleo de uma central do CO₂ tipo cascata é muito similar ao sistema de óleo de uma central de compressores de pistões convencional. Consta dos seguintes elementos:

- ∴ Separador de óleo (tipo centrífugo) + pulmão de óleo integrado (sistema de HP)
- ∴ Reguladores de nível de óleo tipo eletrônico (bóia).

Devido à alta solubilidade do CO₂ no óleo, recomenda-se instalar separadores de óleo do tipo centrífugo e pulmão de alta pressão, ambos incorporados numa única peça. Os reguladores de nível de óleo tipo eletrônico contribuem para uma maior segurança de operação dos compressores, além de controlar o nível de óleo de trabalho no cárter, controla também um nível de alarme mínimo e máximo (evitando uma eventual inundação com excesso de óleo no compressor).

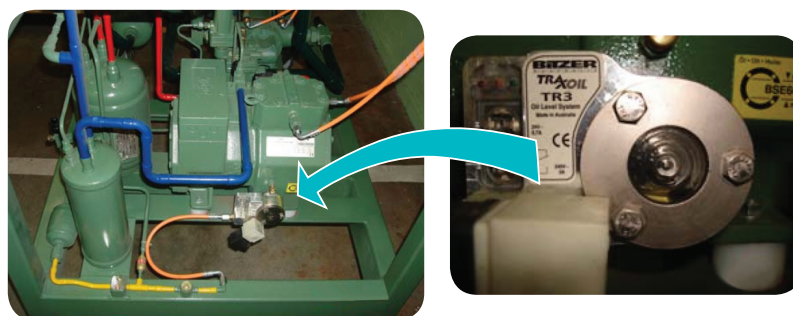


Foto 15 – Detalhe do regulador de nível de óleo eletrônico

3.6 Válvulas e componentes de linha

Já existe hoje no mercado uma importante variedade de válvulas e componentes de linha adaptados para o funcionamento com o CO₂. Neste sentido, válvulas disponíveis com os HFC's e/ou amônia também são válidas para o uso em sistemas com pressão de projeto de 40 bar.

Referente aos componentes de linha:

- .: Filtros de líquido
- .: Visores
- .: Solenóides
- .: Válvulas esferas, etc.

É importante verificar com o fabricante sua compatibilidade com o CO₂. É especialmente importante à função do filtro secador, que deve ser de grande dimensão para assegurar uma boa desidratação do circuito, caso contrário, pode provocar a formação de cristais de gelo e posteriormente ácido carbônico.

3.7 Detectores de vazamento de CO₂

O CO₂ é um gás incolor e inodoro, sendo asfixiante por deslocamento do oxigênio. É mais denso que o ar, por isso terá que ter especial cuidado nos ambientes fechados e garantir uma ventilação suficiente. Por este motivo, também é importante dispor de detectores do CO₂ estrategicamente colocados nos pontos onde o mesmo pode acumular-se, tais como: partes baixas das salas de máquinas próximas ao piso, tetos falsos por onde passam os tubos do CO₂, etc.



Foto 16 – Exemplo de detector de vazamento de CO₂

4 Conclusão

As aplicações em cascata do CO₂ na refrigeração comercial para supermercados já realizadas na Europa e Austrália têm mostrado que, a tecnologia atual dos compressores semi-herméticos alternativo é bem favorável, mesmo com os compressores standard existentes.

O projeto básico do compressor juntamente com medidas de segurança necessárias, resulta-se em pressões de operação permissíveis. Além disso, com adaptações otimizadas dos componentes dos compressores dentro de uma determinada série, superam as necessidades especiais com relação à carga mecânica, potência e resfriamento do motor.

Os óleos polioléster (POE) especialmente formulados apresentam propriedades favoráveis para a circulação através do sistema, possuem boas características de lubrificação com os compressores. Entretanto, os testes práticos continuam sendo realizados para obtenção de melhores lubrificantes que atendam ainda mais as exigências especiais na aplicação com Dióxido de Carbono (CO₂).

Devido à elevada capacidade de refrigeração volumétrica e da boa performance do CO₂ - resultando-se em projetos muito compacto e de baixo custo – há uma grande perspectiva no futuro para diversificação de sua aplicação e de ser favorável economicamente nos sistemas transcíticos. Sua aplicação já está em prática em alguns países da Europa e está começando também sua utilização na Austrália.

É muito importante que intensivos testes sejam feitos nas mais variadas aplicações, para que sejam coletadas informações necessárias sobre o comportamento dos compressores e outros componentes do sistema ao longo do tempo.

5 Referências

- 1 – Catálogos e manuais técnicos CO₂ – Bitzer – Brasil, Alemanha e Austrália
- 2 – Catálogos e boletins técnicos CO₂ – Danfoss – Dinamarca
- 3 – Catálogos e boletins técnicos CO₂ – Buffalo Trident – Austrália
- 4 – Manual técnico CO₂ instituto Tafe – Austrália
- 5 – Papers CO₂ – Pecomark – Espanha
- 6 – Catálogos técnicos CO₂ – BOC – Austrália
- 7 – Boletim técnico CO₂ – Linde Alemanha
- 8 – Catálogo técnico CO₂ – Güntner – Alemanha



Pesquisa e desenvolvimento para uso de refrigerantes naturais

P. HRNJAK

Professor Residente, Co-Diretor ACEC, Presidente CTS

Departamento de Ciência Mecânica e Engenharia

Universidade de Illinois em Urbana-Champaign

Rua W. St. Green, 1206, Urbana, IL 61801, EUA

pega@uiuc.edu

155

RESUMO

Este trabalho apresenta o estado da arte, panorama da pesquisa recente e desenvolvimento, com uma lista das questões sobre os principais refrigerantes naturais. Ele também oferece a visão do autor sobre as questões mais importantes e prospectivas. O documento também discute formas de melhorar o desempenho e aborda questões relacionadas com sistemas de transição com fluidos refrigerantes naturais alternativos para integrar a opção. O enfoque maior é sobre o CO₂ e amônia, enquanto hidrocarbonetos são mencionados brevemente.

1 Introdução

Nós somos testemunhas de atividades recentes significativas e realizações no desenvolvimento de sistemas baseados em refrigerantes naturais. Aqui está a lista de alguns:

- ∴ Dióxido de carbono:
 - a. Bombas de calor e aquecedores de água
 - b. Ar condicionado móvel
 - c. Sistemas comerciais de pequeno porte para supermercado: transcrito, cascata e circuitos secundários
 - d. Refrigeração industrial: transcrito e cascata
 - e. Aplicações secundárias de refrigerante
 - f. Extensores e ejetores
 - g. Outros sistemas de CO₂
- ∴ Amônia:
 - a. Cascatas industriais e comerciais de NH₃/CO₂
 - b. Sistemas de absorção
 - c. Baixa carga – sistemas de baixo vazamento
- ∴ Sistemas indiretos (normalmente amônia)
 - i. Fase única
 - ii. Chorume de gelo
 - iii. Dióxido de carbono
- ∴ Hidrocarbonetos:
 - Baixa carga – sistemas de baixo vazamento
 - Cascatas
 - Sistemas secundários
 - Ar
 - Água

2 Fluídos

2.1 Status do dióxido de carbono

2.1.1 Aplicações de bombas de calor

Atualmente as aplicações mais atraentes são aquecedores de água, bombas de calor, sistemas automotivos de ar condicionado e pequenas aplicações comerciais (resfriadores de garrafas e bebidas, equipamentos de restaurantes etc...) para mencionar apenas alguns. Alguns outros estão lentamente tomando este espaço. Ainda que aplicações de ar condicionado automotivos sejam provavelmente de maior importância devido ao potencial número de unidades, aquecedores de água estão atualmente liderando as vendas com uma previsão do governo japonês de que o número acumulado de unidades instaladas irá atingir 5,2 milhões em 2010. (Um notável aumento das vendas de aquecedores de água de CO₂ ao longo dos últimos cinco anos é mostrado na figura abaixo com a previsão para 2006).

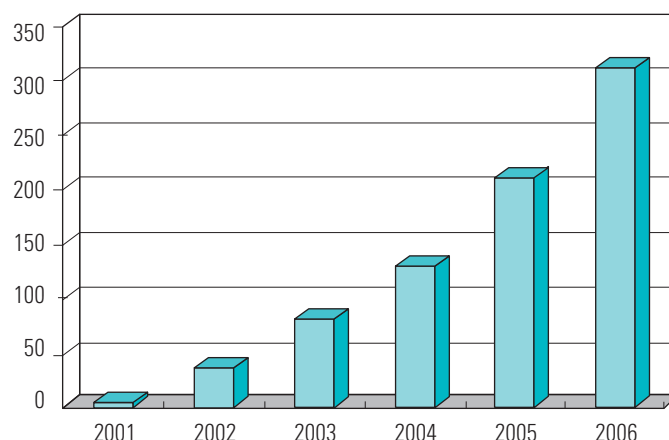


Figura 1 – Mercado de bombas de calor de CO₂ e aquecedores de água no Japão (dados de JARN, Edição Especial 25 de Fevereiro de 2006)

Fortemente apoiada pelo governo e distribuidores de eletricidade, vários fabricantes tem projetado diferentes, mas com desenhos semelhantes (ver Fig. 2) de sistema e vários tipos de compressor (não obstante todos rotatórios e herméticos). A forte penetração no mercado empurra continuamente o desenvolvimento de componentes novos e melhorados. Mesmo o COP poderia

ser ainda significativamente aumentado (atualmente perto de 4). Vale a pena mencionar que a primeira comercialização de ejetores foi nesta aplicação (Denso) e um trabalho de investigação e desenvolvimento ainda mais forte foi observado em aplicações automotivas.



Figura 2 – Algumas bombas de calor aquecedores de água (K. Hashimoto, IEA v.24.3.2006)

A comercialização começou também na Europa, mas foi menos bem sucedida em seus resultados iniciais. Tamanhos comerciais (maiores) foram desenvolvidos nos Estados Unidos (Figura 3), mas a penetração no mercado ainda é limitada. Neste ponto o mercado chinês parece ser bem mais promissor.



Figura 3 – Bombas de calor aquecedores de água industriais de 60 kW (T. Seinel, IEA v.24.3.2006)

2.1.2 Aplicações em ar condicionado móveis:

O futuro parece promissor para aquecedores de água, mas o tema que tem chamado a atenção das indústrias é o futuro das aplicações de ar condicionado móveis.

Uma das principais decisões que pode afetar o futuro do CO₂ como a aplicação principal (*mainstream*) parece ter sido feita: VDA (Associação Alemã das Indústrias Automobilísticas) anunciou sua opção por CO₂ transcrito como uma solução para atender os requisitos da União Europeia de que o refrigerante tenha um GWP (*global warming potential*) menor que 150. Neste ponto ela está sendo implementada somente na Europa. O que continua a ser considerada é sua opção para os mesmos modelos de carro vendidos fora da União Europeia e que será a escolha de outras OEMs para as vendas na Europa. Esta é uma decisão extremamente ousada. A introdução deste nível de mudança tecnológica requer não somente bons e aceitáveis preços dos componentes e sistemas, mas a alta confiabilidade de ambos componentes e sistemas. Além de mudanças no design do carro, as linhas de montagem devem ser modificadas, o pessoal qualificado, e ainda mais serviço técnico deve ser agregado junto ao pessoal da linha de montagem. Estações de serviço devem ser equipadas com procedimentos apropriados e ferramentas. Em uma palavra, numerosas mudanças devem ser feitas e muito provavelmente alguns problemas iniciais irão ocorrer.

É razoável esperar que as aplicações de CO₂ transcrito em ar condicionados automotivos tenham um impacto mais profundo no futuro do dióxido de carbono como refrigerante por várias razões. A mais importante é que com a produção em massa, muito mais do que em qualquer aplicação, a confiabilidade dos sistemas, a compactidade dos componentes, e a simplicidade do design serão drasticamente melhoradas. E ainda mais importante: os custos irão cair. Além disso, o desejo crescente de unificação dos sistemas globais por parte dos principais OEM deve expor esta tecnologia para numerosos tomadores de decisões em engenharia, setores reguladores das indústrias e sociedades profissionais. Há semelhanças com o cenário observado quando a MAC indústria conduziu a substituição de R 12 para R 134a surpreendendo a muitos. Esta semelhança sozinha pode gerar um efeito psicológico adicional a favor do R744 (dióxido de carbono).

Todavia, tudo que foi dito acima pode ser confrontado com diversos exemplos históricos (e atuais) na área de refrigerantes. Por exemplo, o isobutano (R 290) tem demonstrado excelente desempenho, custos baixos e ausência de incidentes inflamáveis em aplicações residenciais de refrigerador e congelador, mas nós ainda não podemos ver penetração significativa deste refrigerante em outros mercados importantes. Este lento desenvolvimento poderia acontecer com o dióxido de carbono? A verdade é que a indústria automobilística é muito mais globalizada e as pressões para um sistema de unificação são significativamente mais fortes.

Além disso, muitos fluídos novos com graus extremamente baixo de GWP (primeiro anunciado pela DuPont, depois pela Honeywell, INEOS, e logo em seguida por diversas fabricantes), mostram a viabilidade e o fato de ser a escolha preferencial de muitos fabricantes por várias razões.

Nós lembramos dez ou quinze anos atrás, a maioria dos círculos de engenharia ecoavam comentários céticos sobre o CO₂ relacionado à baixa eficiência de seu ciclo termodinâmico quando utilizado em sistemas contemporâneos. Desde lá, diversos projetos de demonstração deram origem a mais ampla aceitação do fato de que sua capacidade termodinâmica superior pode ser explorada para melhorar a eficiência do componente e do sistema. Em muitos casos, componentes protótipos permitiram os sistemas de dióxido de carbono transcíticos exceder a eficiência convencional. Nós podemos fazer um rápido percurso do estado da arte dos componentes CO₂ quando comparados com os seus homólogos R134a.

Muitos compressores de CO₂ são de 5 a 10 por cento mais eficientes que os atuais usados em compressores R134 a. Todavia, a direção dos desenvolvimentos recentes de compressores foi diferente na área de CO₂ e R134a, em comparação com os objetivos de dez anos atrás. Compressores de dióxido de carbono objetivaram a confiabilidade enquanto os desenvolvimentos recentes de compressores R134a enfatizaram a eficiência isotrópica. Os resultados têm melhorado a eficiência dos compressores R134a, o que apresentam um desafio aos sistemas de CO₂. Por um lado, esta situação cria a paridade entre compressores de CO₂ e o R134a, mas isso também é um incentivo para o próximo passo: o aperfeiçoamento de compressores de CO₂.

Quando bem desenhados, resfriadores de gás com o mesmo volume, barbatanas melhores e fluxo de ar como condensadores convencionais atingem temperaturas diferentes entre 1 – 2 °C. Este fato é inesperado e ele oferece uma ótima oportunidade para maiores reduções de tamanho e preço, quando explorados apropriadamente.

Evaporadores de ar frio não podem tirar a máxima vantagem da boa transferência de calor oferecida pelo CO₂ devido à predominância da resistência do ar, mas para líquido de arrefecimento há uma vantagem clara. A aceitação da existência de trocas internas de calor nos sistemas de CO₂ tem o efeito positivo de reduzir as conseqüências da distribuição imperfeita de refrigerantes, mas o recente aparecimento de resultados e designs para um permutador de calor para sistemas R134a podem tirar vantagem disto também. Redução da pressão lateral do refrigerante nos permutadores de calor irá proporcionar mais benefícios para sistemas de R134a do que de CO₂. Contudo, tubos de expulsão com dimensões reduzidas oferecem vantagens para o ar e o CO₂ requer portes menores do que o R134a. Em outras palavras, há uma necessidade de novas e criativas abordagens nos designs dos evaporadores de CO₂ que levem em conta suas propriedades termofísicas. Além disso, os novos designs de ar lateral aprimorados permitem uma melhor condensação de drenagem irá resultar na

diminuição da resistência do ar lateral, o que conseqüentemente irá beneficiar o CO₂ com o seu melhor lado refrigerante, com características de transferência de calor. Embora os designs atuais de evaporadores e resfriadores de gás para CO₂ sejam quase idênticos em tamanho e peso comparados aos de R134a – e, portanto com os mesmo custos para produção de volume semelhante – mais esforços são necessários para produzir designs com custos reduzidos.

O maior problema com os sistemas de CO₂ que usam o ciclo invertido convencional Rankine é a expansão de perdas. Designs significativos e mesmo atividades de pesquisa atuais focam estes e questões relacionadas para melhorar a operação na área. Uma das opções é o trabalho de recuperação da expansão usando inclusive extensores mecânicos de vários modelos ou ejetores. Os resultados destas atividades podem provar ser crucial na determinação de novas maneiras de melhorar os sistemas de CO₂. Algumas questões nos extensores são:

1. Escolher entre um extensor integrado com compressor em uma única unidade ou extensor separado que impulsiona os compressores convencionais existentes de controle de capacidade.
2. Se integrado, encontrar o caminho para um controle eficiente dos parâmetros de operação ótima do sistema.
3. Design simples e eficiente para extensor e extensor-compressor.

As questões nos designs de ejetores são semelhantes: boa geometria e controle eficiente. O ejetor parece ter o potencial de oferecer custos baixos e fácil controle, mas neste estágio de design de ejetores sua eficiência é baixa comparada aqueles expansores mecânicos. Um ejetor pode compensar essa carência e até mesmo superar um expansor no mesmo sistema devido aos efeitos secundários positivos no sistema. Um ejetor também fornece a maior parte das vantagens do gás flash: redução de pressão no evaporador, uma melhor distribuição do refrigerante e até mesmo um sutil aperfeiçoamento do evaporador.

Infelizmente ambos, extensores e ejetores (e algumas outras opções com potencial de aperfeiçoamento) competem pelo mesmo potencial cujo calor de troca interna já utiliza a menor complexidade e custo. Por esta razão qualquer análise que aborda tanto extensores quando ejetores devem incluir um permutador de calor como uma parte integrante do sistema.

Expansão multifásica oferece outra oportunidade adicional para ciclos de melhoria de eficiência, mas tal opção exige compressores multifásicos ou designs que permitem portes econômicos.

Com o objetivo de obter uma maior redução dos custos, quando comparados aos sistemas convencionais R134a, deve ser prestada especial atenção na simplificação do sistema: a melhor localização de componentes, redução do dimensionamento dos componentes de segurança,

encanamentos mais flexíveis etc. Pesquisas sobre as opções de controle estão se expandindo para além do controle de pressão ideal para investigar orifícios simples em tubos com características melhoradas, o que oferece significativa redução de custos.

Para dar crédito aos designs dos sistemas de CO_2 , eles estão trabalhando dentro de espaços físicos atualmente ocupados pelos componentes R134a por várias razões. Uma das mais significativas limitações para sistemas de CO_2 em aplicações de ar condicionado móveis é a necessidade de copiar os sistemas atuais de todos os modos.

Para dar crédito aos designs dos sistemas de CO_2 , eles estão trabalhando dentro de espaços físicos atualmente ocupados por componentes R134a por várias razões. Uma das mais significativas limitações para os sistemas de CO_2 em aplicações de sistemas de ar condicionado móveis é a necessidade de copiar os sistemas atuais de todos os modos. Se e quando o CO_2 é aceito como um padrão, os sistemas estão capacitados para serem diferentes dos sistemas que nós conhecemos hoje em muitos aspectos, permitindo inclusive uma otimização dos sistemas de CO_2 no futuro.

Afigura-se que o desempenho do CO_2 em aplicações em bombas de calor é universalmente incontestável, independentemente da aplicação. No entanto, essas vantagens não parecem ser suficientes para quebrar o terreno para a produção em massa nem em sistemas móveis de ar condicionado como um benefício adicional, nem para aplicações residenciais neste momento. Independentemente dessa situação, o autor está plenamente convencido de que as vantagens da bomba de calor se tornarão mais importantes, tanto para aplicações móveis (quando nem mais motores eficientes ou motores elétricos serão utilizados) e para aplicações residenciais.

Em temperaturas ambientes altas ao ar livre, a eficiência energética continua a ser um ponto fraco no argumento a favor do CO_2 . Em sistemas móveis de ar condicionado uma temperatura ambiente de 35 °C é atualmente considerada como o ponto de partida para o COP, o que torna difícil para o CO_2 competir com R134a. Cálculos de eficiência sazonal que integram a eficiência ao longo dos parâmetros operacionais ajudam a promover o CO_2 devido à sua eficiência superior em inferiores temperaturas de calor de rejeição. Com o mesmo volume de sistema externo e taxas de fluxo de ar, os sistemas de CO_2 oferecem maior capacidade de refrigeração. O mesmo vale para compressores - deslocamentos típicos são de 5 a 7 vezes menor. Todavia, a dimensão global e o peso são maiores para compressores de CO_2 na maioria dos casos. Alguns protótipos recentes de compressores de CO_2 foram feitos menores e mais leves do que os seus homólogos R134a; esta tendência deve ser mantida a fim de aumentar a atratividade dos sistemas.

Para garantir uma presença mais forte no mercado para sistemas de refrigeração e ar condicionado, seria interessante tentar melhorar a eficiência dos sistemas de CO_2 em altas condições

ambientais (mesmo que o autor não veja esta como a questão maior envolvida, devido ao pequeno número de horas operacionais na maioria dos climas), enquanto que, melhorando as estratégias de controle que não penalizem significativamente a eficiência quando reduzir a capacidade à condições ambientais baixas. Em outras palavras, estratégias de controle que troquem o excesso de capacidade dos sistemas de CO₂ a temperaturas ambientais baixas para eficientes benefícios poderiam ter um grande impacto no desenvolvimento de sistemas de CO₂.

2.1.3 Aplicações Comerciais

O maior impulso para realizar e melhorar os pequenos sistemas transcíticos para aplicações comerciais veio após o anúncio da Coca-Cola, na reunião em Bruxelas, juntamente com a Unilever e o McDonalds na qual eles teriam escolhido o sistema transcítico de CO₂ como um substituto amigo do meio ambiente para sistemas R134a, ao invés de R290 ou ciclos de movimentação. Esta decisão desencadeou significativo impulso na concepção de pequenos compressores herméticos, quase todos os principais fabricantes têm os seus produtos prontos: Danfoss, Embraco, Sanyo, ... A Sanyo anunciou recentemente a instalação de 5000 unidades de novas garrafas refrigeradas para ser colocada nas Olimpíadas de Pequim, além de outros fabricantes.

Todos os sistemas de CO₂ desenvolvidos com este processo tiveram uma performance superior aos seus homólogos R134a em capacidade e eficiência. O autor não enxerga qualquer questão técnica que impeça a realização do conceito e da aplicação.

Sistemas transcíticos para supermercados começaram a ganhar espaço no mercado, após o primeiro circuito secundário usando CO₂ como um refrigerante volátil e, posteriormente sistemas de cascata têm pavimentado o caminho para o CO₂. O elemento mais importante é a existência de bons compressores de operação de tamanho apropriado e boa engenharia prática. Os dados disponíveis a partir dos primeiros anos de funcionamento são muito favoráveis ao CO₂.

Sistemas de cascata continuam atraindo a atenção das aplicações em supermercados e indústrias. O equilíbrio entre sua ligeiramente maior eficiência, em comparação com a abordagem transcítica versus abordagem simples e, provavelmente, menos dispendiosas de CO₂ - só mesmo os sistemas irão determinar o vencedor.

Em circuitos secundários, CO₂ como refrigerador são soluções muito boas e se tornaram ainda mais fortes no comércio e na indústria, em sua maioria em aplicações de baixa temperatura. Novos dados significativos de transferência de calor estão se tornando disponíveis, mas o mais importante é o progresso do CO₂ como líquido em bombas e bombeamento e trocas de calor em cascata.

2.1.4 Aplicações em refrigeração industrial

A introdução do CO₂ em refrigeração industrial está acontecendo em diferentes ambientes comparados aos automotivos e comerciais. Engenheiros acostumados a lidar com amônia vêem CO₂ como uma abordagem razoável, o equipamento é semelhante, e eles estão habituados a trabalhar com diferentes sistemas, principalmente com designs personalizados. Em outras palavras, ao contrário do significativo confronto entre CO₂ em outros círculos, há uma atmosfera cooperativa entre o NH₃ e o CO₂ entre profissionais da refrigeração industrial. Uma das diferenças significativas é também o fato de que as primeiras baixas de preços nos sistemas de CO₂ são mais claras neste segmento do que nas aplicações móveis e comerciais. Outra diferença é que o principal cliente sustenta a mudança por razões operacionais, de segurança e de relação pública (entre aqueles é um elemento ambiental).

Sistemas de cascata são definitivamente as soluções dominantes até este momento. Os circuitos secundários não são tão comumente usados como no setor comercial. É importante destacar que a tendência definida no sentido do CO₂ só em sistemas (que são transcíticos por um pequeno período de funcionamento anual), embora não existam tantas instalações novas relatadas até o momento.

2.2. Status da amônia

Amônia é provavelmente o único fluido natural que tem mantido sua aceitação como refrigerante quase que exclusivamente no segmento da refrigeração industrial devido às suas excelentes propriedades, fácil de alcançar altos índices de eficiência e preços baixos. Esta aplicação é bastante segura para a amônia, mas há um potencial de expansão para outras áreas. Todos provavelmente concordarão que a única opção para o uso de amônia em outro tipo de aplicação de refrigeração exige a existência de algum outro fluido, e mesmo uma opção, se o circuito secundário ou com design de cascata minimizar os riscos para o público em geral. Boas aplicações para amônia são aquelas que já usam chillers, como supermercados ou ar condicionado em prédios comerciais.

Para cada uma dessas aplicações é crucial ter um sistema com:

- a) carga extremamente baixa
- b) uma taxa muito baixa de vazamento

Para atingir uma carga muito baixa são necessários chapas ou micro canais de trocas de calor. O atual baixo nível das cargas e a pequena capacidade (por volta de 50 kW) tanto para

sistemas de resfriamento de água e ar são de capacidade de refrigeração de aproximadamente 20g/kW. Questões com condensador de água resfriada referem-se a necessidade de um outro circuito secundário que reduza a eficiência e aumente os custos, enquanto os sistemas de ar resfriado (com micro canais) significam altas descargas de temperatura.

Muitos engenheiros identificam a necessidade de um compressor semi hermético para reduzir problemas de vazamento. A idéia é associada com questões de compatibilidade de materiais. Tipicamente, enrolamentos de cobre e de materiais isolantes são incompatíveis com amônia, especialmente em altas temperaturas e com o conteúdo de água. Enrolamentos de alumínio têm sido tentados, mas sem qualquer sucesso até agora. Os compressores semi herméticos disponíveis atualmente para a amônia utilizam o enrolamento do rotor do motor que acaba reduzindo sua eficiência. Nenhum dos modelos disponíveis atualmente são bem sucedidos e mais descobertas são necessárias para realizar bons compressores semi herméticos de amônia.

Sérias discussões foram geradas sobre a abordagem do melhor método para filtrar o óleo: miscível (PAG) e imiscíveis (PAO, AB, minerais,...). Infelizmente ainda não há um consenso nos meios profissionais.

2.3 Status dos hidrocarbonos

Propano e isobutano são provavelmente os HC mais frequentemente usados para refrigeração (exceto na indústria química). Propileno era também tentado com sucesso em alguns casos, mas não gerou segmentos significativos em termos de projetos. Isobutano é mais bem aceito em pequenas instalações domésticas. Estes sistemas têm somente uma pequena quantidade de refrigerante e são produzidas para reduzir o potencial de flamabilidade. Pelos conhecimentos do autor, não há qualquer registro de alarme de segurança nos sistemas de refrigeradores domésticos.

Hidrocarbonetos são excelentes refrigerantes (as propriedades termodinâmicas e termofísicas são boas) e sua compatibilidade de materiais são superiores com baixo custo para eles e seus lubrificantes fornecem uma base para sistemas baratos, mas infelizmente sistemas inflamáveis. Esta solução é definitivamente adequada sempre que compatível com as exigências de segurança.

A minimização de cargas é essencial para a aceitação razoável. A menor taxa específica atual para sistemas 1-1.5 kW é 8g/kW no evaporador, 22 g / kW no condensador, enquanto compressores tipicamente armazenam (boa parte do óleo), mais de 30 g em pequenas capacidades cerca de 1-1.5 kW.

3 Contribuição dos refrigerantes naturais para a área de refrigeração e condensação

Os refrigerantes naturais são muito frequentemente referidos como “alternativos”, sugerindo que esta possibilidade provavelmente jamais será considerada a opção principal. Se esta avaliação permanecer sendo uma realidade é a função de vários fatores e circunstâncias. No entanto, independentemente do resultado dos refrigerantes naturais, e do CO₂ em particular, já houve um grande impacto sobre o desenvolvimento de sistemas de refrigeração na área.

Normalmente, cada nova aplicação de dióxido de carbono introduz uma nova concepção de modelo para aumentar a eficiência, compactidade ou estética. Muitas vezes essas melhorias já ganharam a aceitação e foram aplicadas também a outros refrigerantes e sistemas. Um excelente exemplo é a aplicação de micro canais de trocas de calor como evaporadores (MCHes para condensadores já foram feitos). Esta é uma das razões porque o sucesso dos sistemas de CO₂ e os componentes dos modelos estão legitimamente contestando a base de custo. Alguns modelos de refrigeração com CO₂ foram diversas vezes menor para a mesma capacidade e ainda mais eficientes do que sistemas convencionais, porque eles representavam avanços tecnológicos significativos.

A disputa entre os sistemas R134a versus sistemas transcíticos de CO₂ no setor automotivo gerou melhorias significativas em eficiência em ambos os sistemas. Originalmente, o sistema R134a não foi modelado para ser eficiente, mas tem otimizado os componentes de luz e peso e os sistemas, puxando mais do que qualquer um os preços para baixo. De forma evolutiva, ao longo dos últimos dez anos temos assistido - e participado em grande medida - nas diversas melhorias no sistema de eficiência e o desempenho geral. Estas excepcionais melhorias na eficiência demonstrada nos resultados comprovam um potencial (dos quais uma boa parte é realizado) de uma maior economia em apenas um ano do que toda a investigação despendeu para todos os sistemas de CO₂.

4 De alternativa para solução principal

Com exceção da amônia em refrigeração industrial, nenhuma das opções de fluidos naturais tem alcançado o nível de aplicação principal desde então. Parece que o CO₂ poderia estar no caminho de se tornar o primeiro fluido a alcançar esse nível, pelo menos em algumas aplicações. A bomba de calor à água é uma aplicação madura que tem encontrado sua aceitação, pelo menos no Japão, onde o mercado aumentou para quase um milhão de unidades por ano (ver fig. 1). Outras opções de

bomba de calor, mesmo em excelentes aplicações onde CO₂ tem uma vantagem comparativa, estão longe de alcançar esse nível de realização.

A comercialização esperada à luz do mercado comercial (garrafas resfriadoras) não se materializou até agora, embora as unidades sejam tecnicamente bem desenvolvidas e uma razoável concorrência entre os fabricantes esteja presente.

A aceitação de qualquer solução usando CO₂ para aplicações de ar condicionado móveis é extremamente importante para o desenvolvimento porque: a) exige um nível técnico dos componentes e dos sistemas e b) o potencial de mercado. O potencial do número de unidades de produção em massa iria mudar drasticamente os custos de fabricação e melhorar a qualidade, abrindo novas possibilidades.

Nenhum destes sistemas ou soluções serão implementados em escala significativa sem uma análise racional e razões incontornáveis. Isto inclui, mas não limita os custos, confiabilidade, peso e tamanho dos componentes e sistemas. Razões para mudar geralmente caem em duas categorias: mudanças encomendadas ou benefícios econômicos (quer para o primeiro ou custos recorrentes).

O maior impulso para trabalhar fluidos naturais provém de universidades onde o conhecimento e a apreciação de todas estas considerações é quase inexistente. A academia está mais interessada em eficiência, e, em menor medida, na compactidade ou peso. Estas métricas são fáceis de quantificar. A corrida por mais elegância, mais compactidade, mais confiabilidade e de custo mais baixo é atraente para os entusiastas, e o sucesso nestes domínios não é tão fácil de demonstrar ou quantificar. Para tornar os componentes e sistemas mais confiáveis e de custo extremamente baixo que são capazes de competir no mercado com sistemas existentes requer esforço significativo, de conhecimentos e de investimento; mas é o próximo passo. Crucial para este passo são os engenheiros e empresas interessadas em conquistar novos mercados e desenvolver tecnologias novas e criativas. Idéias e algumas vezes soluções devem mover os interesses dos laboratórios de exploração da academia para aqueles que sejam capazes de fazer um mercado para os mesmos.

O trabalho com fluidos naturais estão passando pelo mesmo processo que qualquer nova idéia: tem o apoio daqueles que poderiam se beneficiar de tal abordagem no futuro e feroz oposição dos que podem perder caso se concretizem.

Mesmo se os primeiros protótipos e talvez mesmo alguns números de produção forem concretizados no mercado, estes produtos não irão sobreviver a menos que eles tenham reais vantagens sobre suas competitivas tecnologias. Talvez em alguns lugares este elemento seja ignorado e muito se espera da ajuda de legislação (por exemplo, pelos benefícios fiscais ou a

proibição de tecnologias concorrentes), mas esta não é a melhor maneira de esperar sucesso. Só com a realização de sistemas operacionais com claras vantagens econômicas é que os refrigerantes naturais refrigerantes serão aceitos. A menos que a totalidade dos custos de riscos ambientais seja internalizada nos preços dos refrigerantes, os benefícios ambientais dos refrigerantes naturais (zero ODP e PAG) devem ser tratados como uma razão complementar e atrativa, mas não a única razão pela qual nós devemos esperar que alguém compre o produto.

5 Conclusões

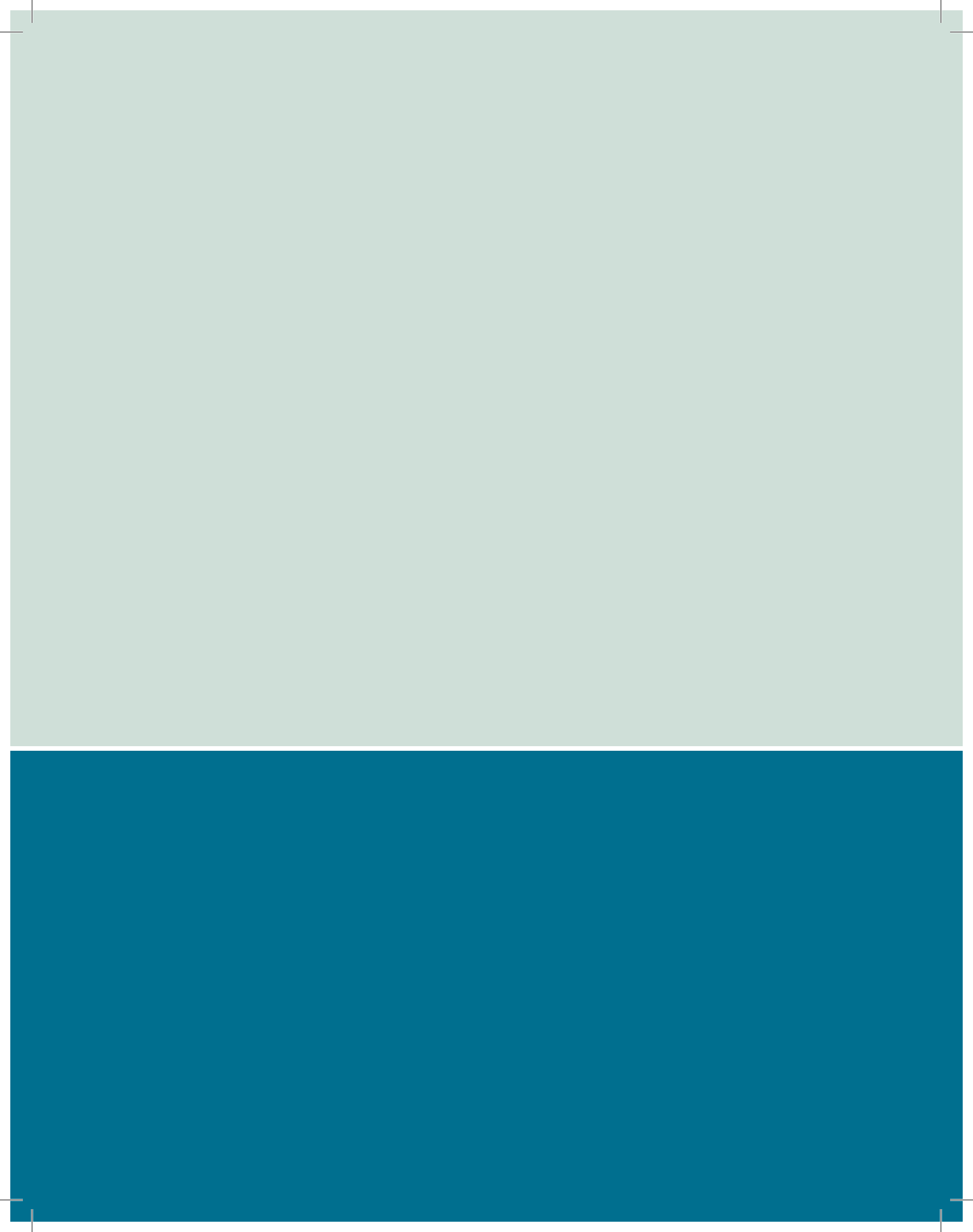
Esta visão analítica, tão genérica no título quanto para cobrir todos os fluidos naturais refrigerantes, foi principalmente centrada nos sistemas de CO₂ e NH₃, sendo o mais ativo e mais perto de se ser comercializado a este ponto.

Estamos ultimamente vivendo um grande progresso na melhoria dos sistemas naturais com fluidos refrigerantes. O interesse público é cada vez maior. Algumas aplicações (bombas de calor aquecedores de água, em particular) estão entrando em fase madura de produção. O apoio legislativo (principalmente na Europa) está cada vez mais forte. No entanto, estamos assistindo a lenta penetração das tecnologias de dióxido de carbono em algumas áreas, enquanto a tecnologia de oleodutos são ainda mais completas e desenvolvidas. Existe uma clara necessidade de mais trabalho em questões reais de produção e comercialização por aqueles que vêem oportunidades de mercado.

A introdução de novos fluidos com nível baixos de GWP que têm um bom desempenho em quedas poderia atrasar o processo, ou acelerá-lo, apresentando desafios para novas melhorias na eficiência, a simplificação dos sistemas e componentes e, conseqüentemente, uma redução de custo.

A questão lógica é perguntar como transformar o grande entusiasmo de milhares de apoiadores da abordagem dos líquidos naturais, brilhantes idéias inovadoras e soluções criativas de inúmeros engenheiros em um verdadeiro impacto sobre a economia e a humanidade? Existe alguma coisa além de falta de tempo para a idéia e a sensibilização do público se espalhar? Poderia um extenso período de incubação dos trabalhos em fluidos naturais tornarem-se tão longos a ponto do entusiasmo diminuir? Existe sempre a possibilidade de se tornar a "alternativa perpétua". O problema das máquinas é um bom exemplo de mais de 100 anos da longa história de tentativas em sua maioria frustradas.





The use of Natural Refrigerants

Technical Articles

The Seminar “The use of Natural Refrigerant in the Refrigeration and Air conditioning Systems”, held in Sao Paulo, during the period of 21 to 22 November 2007 and its publication are according to the National CFC Phase Out Plan. The National Plan is coordinated by Ministry of Environment and implemented by United Nations Development Programme, as a lead implementing agency, and GTZ - Germany Technical Cooperation Agency.



Summary

- 177 | **Applications of CO₂ as refrigerant in industrial refrigeration sector**
LEONILTON TOMAZ CLETO
- 193 | **Applications of ammonia as refrigerant fluid in air conditioning and industrial refrigeration sector**
LEONILTON TOMAZ CLETO
- 211 | **CO₂ (R-744) in commercial refrigeration equipments**
CLÁUDIO MELO | CHRISTIAN J. L. HERMES
- 221 | **New solutions for secondary fluids in refrigeration**
FRANK CHAVIANO PRUZAESKY | EPIFANIO MAMANI TICONA | SERGIO LEAL BRAGA | JOSÉ ALBERTO R. PARISE
- 239 | **The use of hydrocarbon refrigerant fluids – current state and tendencies**
ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO
- 253 | **Use of hydrocarbon refrigerants in residential application**
JOÃO M. D. PIMENTA
- 275 | **CO₂ applications in automotive sector**
ENIO PEDONE BANDARRA FILHO
- 287 | **The EU Experience on Natural Refrigerants – Status and Trends**
BERND KALTENBRUNNER
- 293 | **Installation of freezing food in supermarkets with ammonia use**
ALEXANDRE PRESOTTO JR. | CARLOS GUILHERME SÜFFERT
- 301 | **Applications of CO₂ in commercial refrigeration sector for supermarkets**
ALESSANDRO DA SILVA
- 327 | **Research and development for the use of natural refrigerants**
P. HRNJAK



Foreword

This publication reflects the results of a pioneering seminar that opened up a technical discussion with key actors from the Refrigeration and Air Conditioning sector on the use of natural fluids as an alternative to CFCs and HCFCs. Such a discussion is especially timely for the moment we are experiencing, in which the use of CFCs is at its final moments and the accelerated phasing-out of HCFCs is a reality.

During September 2007, when 20 years of success of the Montreal Protocol was being celebrated, a new historic decision was made by the body of signatory countries. With the end of CFCs fixed for 2010, it has been decided that the process to replace HCFCs is to begin already in 2013, therefore anticipating by ten years the term fixed by the Montreal Protocol for phasing-out these gases. Further to the benefits of re-establishing the Ozone Layer, which is the object of the Protocol, the measure also brings enormous benefits to the climate regime, due to the marked Global Warming Potential (GWP) of HCFCs.

This intention is made explicit in Decision XIX/6, especially in its Point 6, when it encourages the Parties to “promote the selection of alternatives to HCFCs that minimize environmental impact, in particular impact on climate, as well as meeting other health, safety and economic considerations”. In its Point 11, the Executive Committee also encourages giving priority to “Substitutes and alternatives that minimize other impacts on the environment, including on the climate, taking into account global-warming potential, energy use and other relevant factors” when examining project funding by the countries.

Gains to the climate regime made explicit with such emphasis are justified by the contribution of the Montreal Protocol to the mitigation of greenhouse gas emissions. Along the 20 years of this practice, the elimination of CFCs has significantly contributed to avoid the emission of billions of tonnes of CO₂ equivalent, and can continue to do so with the most favourable cost-benefit ratio. In Brazil only, advancement of the stated period to eliminate CFCs as determined by Conama Resolution 267/00 has avoided the consumption of 36.5 thousand ODP tonnes, equivalent to 360 million tonnes of CO₂ in relation to its global warming effect. For comparison purposes, the world’s most successful renewable fuels programme Proálcool avoided the emission of 650 million tonnes of CO₂ between 1975 and 2005. Advancing the stated periods for phasing-out HCFCs will bring new gains. Still in the case of Brazil, it can be estimated that Decision XIX/6 will avoid the consumption of some 750 thousand tonnes of HCFCs in relation to the previous Montreal Protocol schedule. If one ponders the proportional consumption of each substance and their respective GWP, this would be equivalent to around one billion tonnes of CO₂ equivalent.

It is worth remembering that the replacement of HCFCs will take place with the introduction of other gases. If HCDC-22 is replaced predominantly by HCFC-134a, one of the most consolidated alternatives in the market, a large part of this gain would be cancelled by the fact that the GWP of both substances is similar.

There lies the importance of this publication: it points out relevant aspects in the use of so-called natural fluids that may be chosen as replacement for HCFCs, therefore preserving the gains awaited for by Decision XIX/6 or of CFCs, by means of replacing equipment or retrofitting them. The little amount of discussion on the

subject that has predominated to date has helped the emergence of often unfounded concerns about security, efficacy or economicity of natural fluids. These are aspects that should be treated with due seriousness and justification. International experience, scientific justification and practical experience should be taken into account and are approached in the various papers of this publication. As a result of the seminar, there is a clearly growing trend in the use of natural fluids, leveraged by encouragement measures adopted in some countries, and by the progress produced by new technologies already available in the market. In the following years, many companies shall have to make decisions regarding new equipment to be produced or purchased. At times this equipment remains in activity for decades and the options to be considered shall have to take future trends into consideration. The debate regarding new technologies and products will be intense in the following years, but the bet to be made is on the adoption of gases that apart from not affecting the Ozone Layer, also have a low global warming potential.

It is up to the Ministry of the Environment, as coordinator of Prozon, the Interministerial Executive Committee for the Protection of the Ozone Layer, to design the National HCFC Phase-Out Programme – PNH – that will incorporate the new schedule within Brazil. It will be designed in the following months, in alignment with decisions to be adopted by the Parties to the Protocol. Although it is not yet designed, one can assert that part of the PNH mission will be to create conditions in which the adoption of options by companies may foster technological gain, competitiveness and compliance with Brazil's international obligations as part of the Protocol, with the ensuing environmental benefits. Therefore the diffusion of information is fundamental. We hope that this publication plays part of this role.

Last but not least, we would like to thank the United Nations Development Programme – UNDP, Technical Cooperation Agency – GTZ, the National Association of Refrigeration and Air Conditioning Professionals, and the Brazilian Association of Refrigeration, Air Conditioning, Ventilation and Heating – ABRAVA for their partnership in organising the event, and to Mauá University for kindly offering us accommodation during the event period.

Ruy de Goes Leite de Barros

Ministry of Environment

Director of Climate Change Department

Secretariat of Climate Change and Environmental Quality

Applications of CO₂ as refrigerant in industrial refrigeration sector

LEONILTON TOMAZ CLETO

Yawatz Engenharia Ltda.

Rua Agostinho Teixeira de Lima, 215 – São Paulo – SP – 04826-230 – Brasil

ABSTRACT

With resurgence of CO₂ (carbon dioxide) as refrigerant in refrigeration systems, were developed new technologies and applications in various sectors of refrigeration market to make its use feasible. As natural refrigerant, CO₂ is presented as a promising alternative to synthetic refrigerant in various applications of refrigeration systems. This article explores the applications of CO₂ in industrial refrigeration sector that also appears as an alternative to Ammonia. Ammonia, despite to be another natural refrigerant, has a higher rate of toxicity and usually in low-temperature applications, requires a huge load. On systems presented here, with introduction of cascading cycles, using CO₂ and Ammonia, the reduction of Ammonia load can have up to 97%, compared with conventional systems. Besides the reduction of Ammonia load, are examined other aspects of CO₂ systems that include energy efficiency, reducing the diameter of lines, some operational care and trends of their use in industry in the coming years.

1 Introduction

CO₂ (carbon dioxide - R-744) was one of the first refrigerants used for refrigeration systems and was widely used until the mid-30 of the twentieth century. With the emergence of CFCs and HCFCs fluids, CO₂ has been losing market to be virtually extinct in the sixties. With environmental problems and the establishment of Montreal and Kyoto Protocols, CO₂ resurfaces as a promising alternative to be used in many applications in various refrigeration sectors.

In the early of nineties, ancient books about refrigeration technology, with many applications using CO₂, were reopened. With technological development of recent years, new concepts have emerged thus enabling the renaissance of CO₂ as refrigerant natural. One of the main responsible for the "revival" of CO₂ was Professor Gustav Lorentzen (1915-1995) from Norwegian Institute of Technology (NTH), in Trondheim, who proposed and developed with his group several applications and systems using CO₂ as the refrigerant [1]. Already in the late nineties, appears in many refrigeration sectors, several commercial applications using CO₂ as refrigerant, on systems with sub-critical cycles, to low temperatures (below -30 C and until -55 °C), with cascading another refrigerant, or on systems with transcritical cycles for medium temperatures (above -15 °C), air conditioning (mainly in automotive sector) and heat pumps.

Industrial refrigeration sector covers large systems and usually refers to applications in food and beverage industry, where the main refrigerant is Ammonia (R-717). Here are included applications in chemical and petrochemical industries, that use mainly halogenated fluids (HFCs and, in Brazil, yet HCFC-22), besides Ammonia and some hydrocarbons (R-1270, R-290 and mixtures) and applications of air conditioning industry (mainly in pharmaceutical, automotive and textile), especially those that use HFCs.

Despite Ammonia and hydrocarbons are part of natural refrigerants group (so called because they were found in natural cycles on earth), both have some restrictions that limit its use.

Ammonia, with its excellent facilities for use in refrigeration systems, suffers many restrictions on its application to be a refrigerant with the highest rate of toxicity than most HFCs. In several countries, including Brazil, there are laws that require a range of care from the project until the operation of a refrigeration system that, depending on the load of refrigerant in the system and the place where it is installed, may even render them application. A recent example is several refrigeration installations with large loads of Ammonia, located in densely populated areas, that are being moved to isolated industrial areas, where the impact of a large leak of Ammonia becomes much smaller. In the last 15 years, only in the city of Sao Paulo, some 15

installations, a charge that amounted to more than 600 tons of Ammonia, were transferred to isolated areas, in other locations.

Hydrocarbons have a high rate of flammability and when used in large refrigeration systems, the equipment of the area requires specific classifications concerned to explosion. In chemical and petrochemical installations, often manufacturing products are themselves flammable, which makes the area classified independent of the type of refrigerant used. But if the load of hydrocarbon refrigerant is too large, the level of risk in area will be bigger.

In these scenarios, in systems with operating temperatures between -30 °C and -55 °C there is the alternative of a cascade system, with CO₂ cycle in sub-critical for low temperature and Ammonia or hydrocarbon in the cycle with final rejection of heat into atmosphere, in this case compact equipment, with loads extremely low.

Also, for refrigeration systems with Ammonia, with various levels of operation temperatures (eg systems for double stage, with frozen products to -40 °C and cooled to -10 °C), the CO₂ can be used as secondary pumped fluid, using latent heat, for the system of intermediate temperature (-15 °C to 0 °C), further reducing the load of Ammonia in the system.

2 Development

2.1 Systems with Cascade Cycles – CO₂ / Ammonia (R-744/ R-717)

The system with Cascade cycle is made by two (or more) independent refrigeration cycles, each one with its own refrigerant (in this case CO₂ and Ammonia), but with a heat exchanger common to both cycles. Heat exchanger “Cascade” has the function of condenser in low temperature cycle and function of evaporator in high temperature cycle. Systems with cascade cycle are normally used in applications where it is not possible to remove the heat from the lower level of required temperature (to cool the product of the process) and reject it into the atmosphere (through evaporative condenser, water or air), with application of a single fluid in a cycle of steam compression. Cascade systems are usually employed in applications with temperatures below -60 °C, because fluids as Ammonia and some halogenated fluids used in

conventional cycles (eg R-507, R-404A) have very low pressures of evaporation and also, cycle efficiency is very low, even considering various stages of compression. On the other hand, fluids with suitable bands of pressure for low temperatures (eg, R-23, R-170), have very low critic point, being necessary to reject the heat to a level well below the temperature of the outside air temperature (instead of a transcritical cycle). Thus, to remove the heat rejected in condenser of the low temperature cycle, it is used an independent cycle, with another fluid, which operates with evaporation temperature below the condensation temperature of the low temperature cycle and rejects the heat into atmosphere.

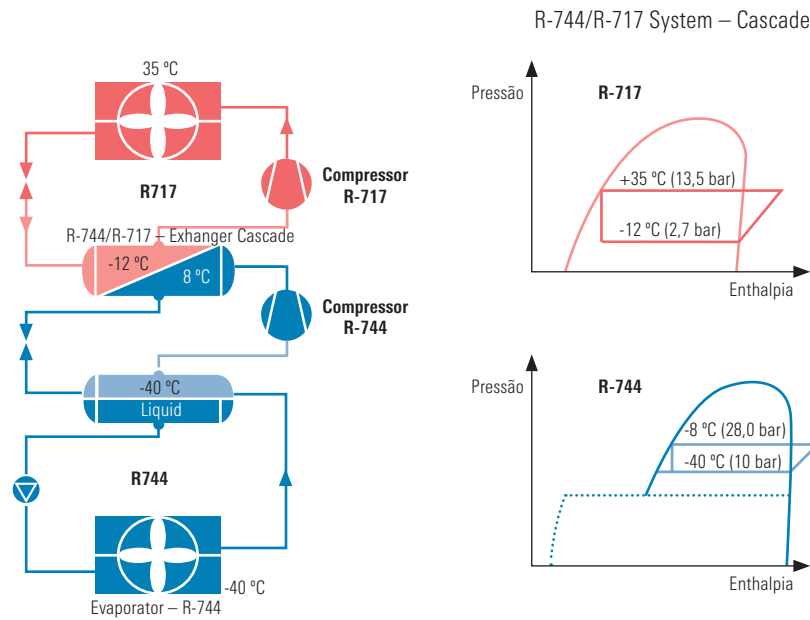


Fig. 01 – Cascade Cycle - CO₂ / Ammonia [3]

In the case of cascade system with CO₂, evaporation temperatures in the low side range from -55 °C to -30 °C (the triple point of CO₂ occurs at -56.6 C and, above -30 °C, the system becomes inefficient when compared with conventional systems) and condensation temperatures ranging from -18 °C (for systems with evaporation temperature around -55 °C) to 0 °C (for evaporation temperatures around -30 °C), with limit condensation temperature of operation around +5 °C

(depending on the design pressure of 40 bar for CO₂ compressors available in market). In fact, with condensation temperatures above -5 °C for CO₂, system appears increasingly inefficient when compared to conventional systems.

As mentioned, one of the biggest advantages of using CO₂ in refrigeration applications is due to load reduction of a fluid that gives more restrictions on use (Ammonia or hydrocarbons), but it is essential that the CO₂ system presents a efficiency (COP) level of energy equal to or better than a conventional system for the same application.

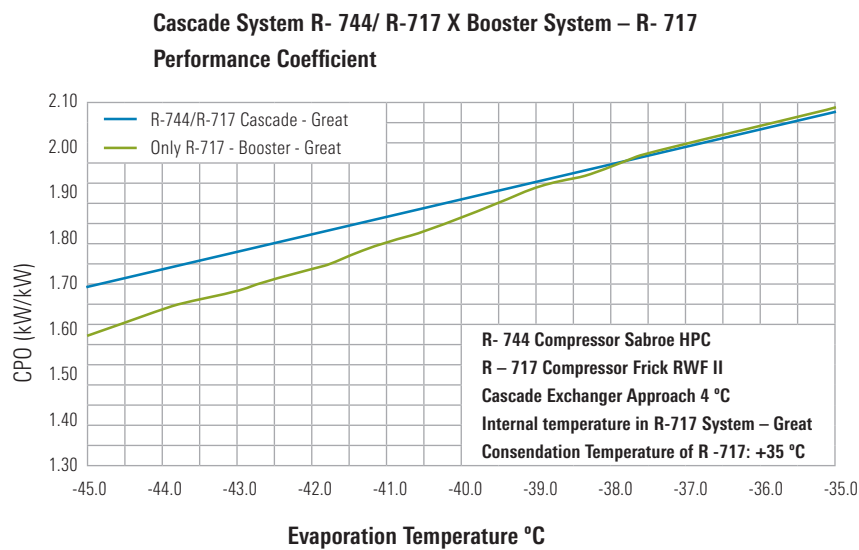


Fig 02 – Comparative Cascade System using CO₂ / Ammonia, with conventional system of Double-Stage (“Booster”) using only Ammonia

The graph of Figure 02 shows COP results of two real systems – CO₂/Ammonia cascade cycle and cycle in double stage (in “Booster”) with Ammonia - using compressors from the same manufacturer, varying evaporation temperature and maintaining condensing temperature of Ammonia constant (in two cycles) at +35 °C - typical for industrial refrigeration applications in Brazil. In both cases, ranged up intermediate temperatures (condensation temperature of CO₂ and intermediate temperature of “Booster” cycle of R-717) in order to obtain the best COP for each

evaporation temperature. From the chart you can see that for evaporation temperatures below -38 °C, the cascade system becomes more efficient than conventional system using Ammonia. For evaporation temperature of -45 °C the COP of the system with CO₂ is about 7% better than conventional system with Ammonia and at -50 °C the difference reaches 14%. Above -38 °C and up to around -30 °C systems have very similar performance, with conventional system with Ammonia by 1% more efficient than system with CO₂.

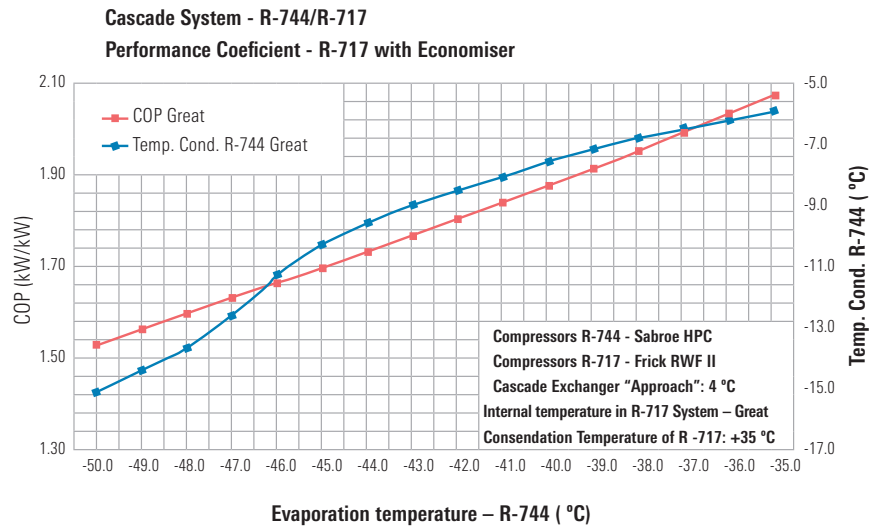


Fig 03 – Checking the condensation temperature of CO₂ Great (for the Great COP) in function of the Evaporation Temperature in Cascade System using CO₂ / Ammonia

Fig.03 indicates the curve of optimally condensation temperature for the best COP of cascade cycle CO₂ / Ammonia, depending on evaporation temperature of CO₂, condensation temperature of Ammonia constant at +35 °C. Fig.04 also indicates that, in the range of evaporation temperature from -38 °C to -47 °C, the COP difference is very small when condensation temperature of CO₂ varies between -5 °C and -15 °C, which allows some flexibility for definition the intermediate temperature, if the system involves a level of intermediate-temperature process (eg temperature to meet load of cold products).

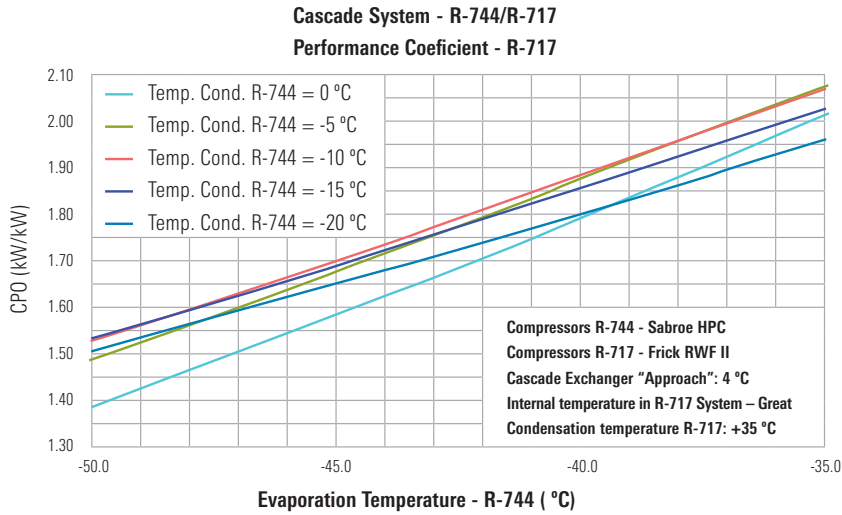


Fig 04 – COP curves of a Cascade System using CO₂ / Ammonia in function of Evaporation Temperature of CO₂, for various condensation temperatures of CO₂

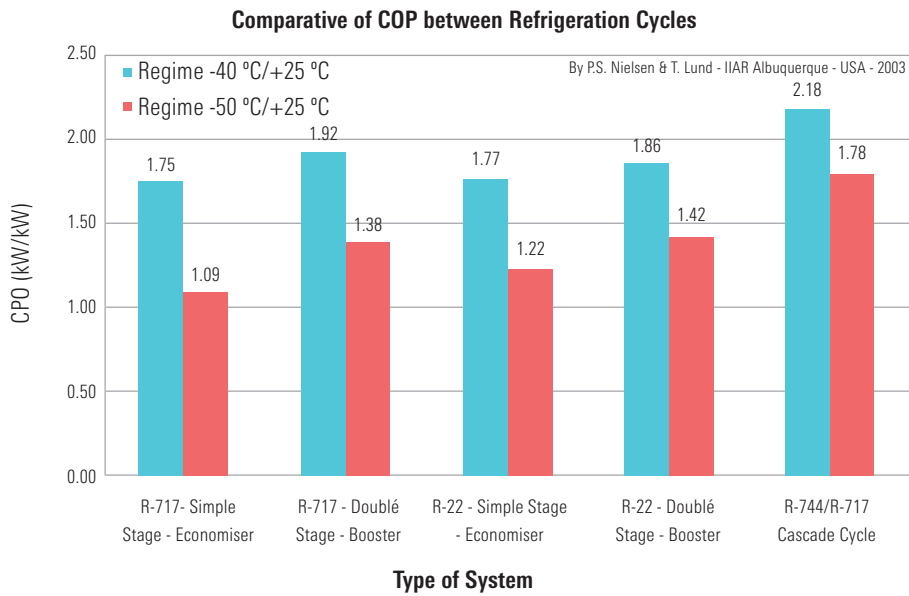
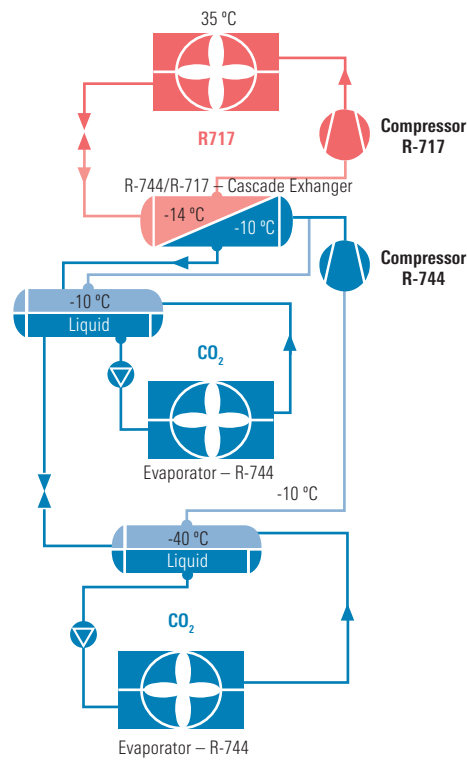


Fig 05 – Comparison of COP between refrigeration systems [4]

Fig.05 still indicates a comparison of COP between various refrigeration systems for evaporation temperatures of -40 °C and -50 °C, with condensing temperature of +25 °C (for naval applications), where there is an even greater advantage of system with CO₂ in relation to other systems.

2.2 Systems with CO₂ operating as secondary fluid



Cascade System R-744/R-717
with R-744 pumped in intermediary

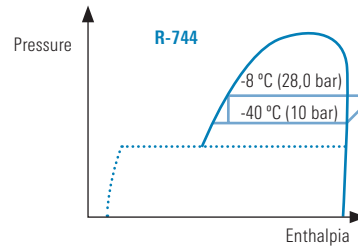
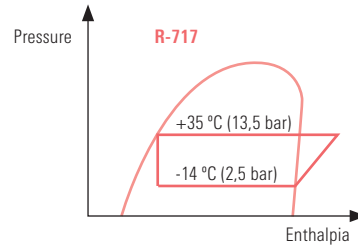


Fig 06 – Cascade Cycle CO₂ / Ammonia, with CO₂ circulating in Intermediate Regime as Secondary Fluid

Another alternative, developed by S. Forbes Pearson [5] in a cold store in Scotland, is shown in Figure 05, where CO₂ condensate in the Cascade heat exchanger (in the case, at -10 °C) follows a tab of liquid which is pumped into circulation as secondary cooling fluid for storage chambers with cold products. The return of liquid + steam is recondensate in Cascade heat exchanger without

going through compressor. The rest of the cycle remains similar to Fig 01. In this case, there will be a bigger decrease of Ammonia load in the system, but when comparing this system with a conventional “Booster” system with Ammonia (operating in -40° C/-10° C / +35° C), there will be a reduction of COP, since the capacity of Ammonia cycle (operating at -14° C / +35° C) should increase.

Depending on the system, this loss of COP may be negligible, in function of reduced relation to loss of saturation temperature on the loss of pressure of the CO₂circuit - the $\Delta T / \Delta P$ (0.55 K / bar for CO₂ against 8.46 K / bar for Ammonia in temperature of -10° C), it means, in CO₂ systems in saturation temperature of CO₂ can reach -7 C maintaining evaporation temperature of Ammonia in Cascade heat exchanger around -11° C.

2.3 Aspects of Project and Operation

2.3.1 Lines of Refrigeration

Following an analysis of lines of refrigeration system where they were used data from the table below, as basis for calculation, for comparison in Fig 07 and 08 about Resultant Diameters for systems with R-134a, Ammonia and CO₂. On average, diameter of the lines of refrigeration system with a CO₂ are 2.5 times smaller than a system with Ammonia and 7 times smaller than a system with R-134a.

Dada for calculation	
Capacity	250 kW
Loss of Load in Suction Line	0.8 K
Loss of Load in Wet Steam Return Line	0.8 K
Tax of re –circulation (Pump)	3:1
Speed in Liquid Line	0.8 m/s
Equivalent length	50 m
Evaporation Temperature	-40 °C
Condensation temperature	-15 °C

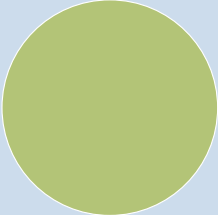





Refrigerant		R134a	R717	R744
Line of Suction	P (bar)	0.0212	0.0303	0.2930
	Speed (m/s)	20.4	37.5	15.4
	Diameter			
	mm	168	102	53
Line of Liquid	Diameter			
	mm	37	21	35

Fig 07 – Comparison of diameters of lines of Suction and Line of Liquid [3]

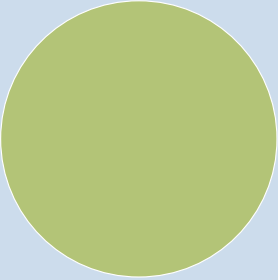
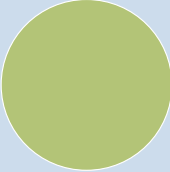




Refrigerant		R134a	R717	R744
Return Line Liquid + Steam	P (bar)	0.0212	0.0303	0.2930
	Speed (m/s)	11.0	20.2	8.2
	Diameter			
	mm	215	133	69
Line of Pumped Liquid (Low)	Diameter			
	mm	61	36	58

Fig 08 – Comparison of diameters of Wet Steam Return Line and Line of Pumped Liquid (at the side of Low Temperature) [3]

2.3.2 Defrost Systems

Among some ideas of defrost systems for cycles with CO_2 , the main ones are:

- ∴ small compressors in series with the discharge of main compressor of CO_2 (as shown in Figure 09),
- ∴ pumps of CO_2 associated with heating system (as developed by F. Pearson [5]);
- ∴ defrost with water or defrost with electrical resistance (more common in supermarket applications).

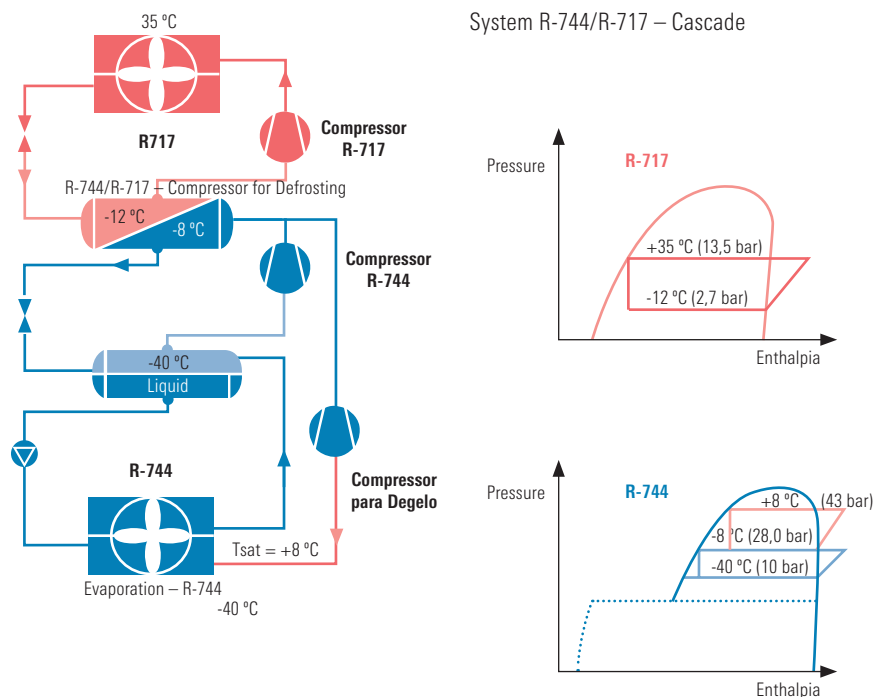


Fig 09 – Cascade Cycle CO_2 / Ammonia, with Defrost System Using Compressor CO_2 Extra in Series with Main Compressor [3]

2.3.3 Contamination with Water

Water in refrigeration systems with CO_2 is an issue that requires a different approach when compared with Ammonia. In systems with Ammonia the oil is periodically renewed, it must purge frequently, and several systems have systems to removal water. Such treatment is applied to prevent the degradation of the oil and Ammonia and the formation of fatty acids. Compared with Ammonia,

CO₂ is less susceptible to contamination problems, but if there is the presence of water (moisture) in refrigeration circuit may be some problems, and the first is the saturation of water in mixing with CO₂ that, if it occur below 0 °C will freeze, and may jeopardize mainly the functioning of control elements. Thus, it is extremely necessary the use of dryers filters on the lines of liquid CO₂, to maintain the concentration of water in an acceptable level, which is far lower than other refrigerants.

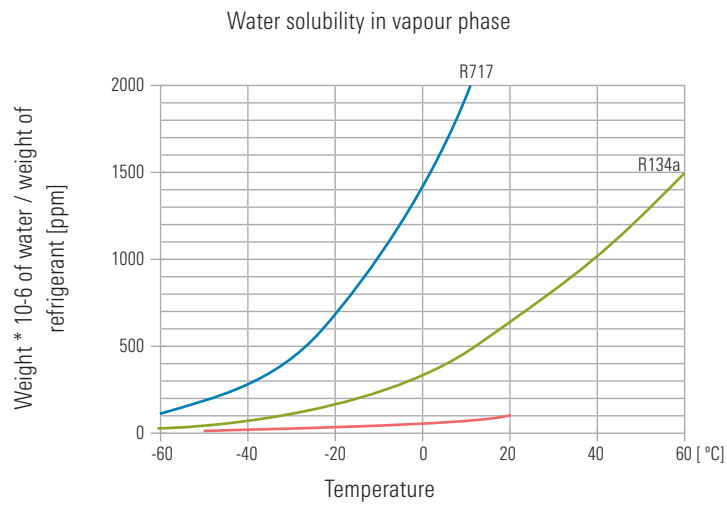


Fig 10 – Solubility curves of Water in vapour phase of CO₂, R-717 and R-134a [3]

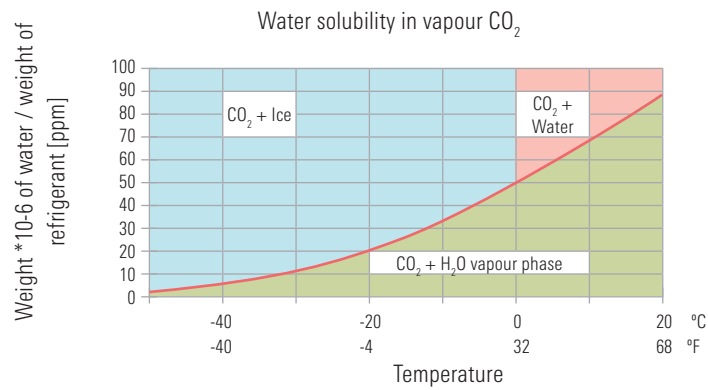


Fig. 11 – Solubility curves of Water in vapour phase of CO₂ [3]

Fig 10 indicates solubility curves of water in vapor phase of CO₂, Ammonia and R-134a, depending on the temperature. Unlike the formation of the mixture “Aqua-Ammonia,” the Fig 11 indicates that the saturation point occurs the formation of water (liquid state) in temperatures above 0 ° C and ice, for temperatures of CO₂ below 0 ° C. Moreover, could be the formation of carbonic acid, which can bring damage to components of the system (as well as the formation of fatty acids and nitrous compounds can damage the Ammonia systems).

2.3.4 Valves Security

The application of safety valves in CO₂ systems also require some care:

- ∴ The valve should be discharged directly into the atmosphere. The lines of discharge of safety valves should be assembled before the valves, in the way that safety valves are the final element of the circuit. As shown in Figure 12, depending on the pressure of safety valve opening, with the expansion of steam until atmospheric pressure, there may be formation CO₂ solid, because the triple point occurs a pressure of 5.2 bar.
- ∴ It is not possible to install safety valves or elements of relieving phase liquid directly into the atmosphere. In this condition there will be a great training of CO₂ solid, as we can see in figure 12. In this case, the discharge should be made for a vessel of the system with less pressure.
- ∴ Pressures of project recommended for systems in sub-critical cycles CO₂ are 52 bar for the circuit of hot gas compressor when using auxiliary gas hot (up to the valve injection of hot gas, before the evaporator), 40 bar for the circuit of the pressure of condensation (compressor, line of discharge, condenser, line of liquid and pressure vessels of pressure up to the valve of expansion), 25 bar for the circuit of low pressure (after the expansion valve and until compressor suction).

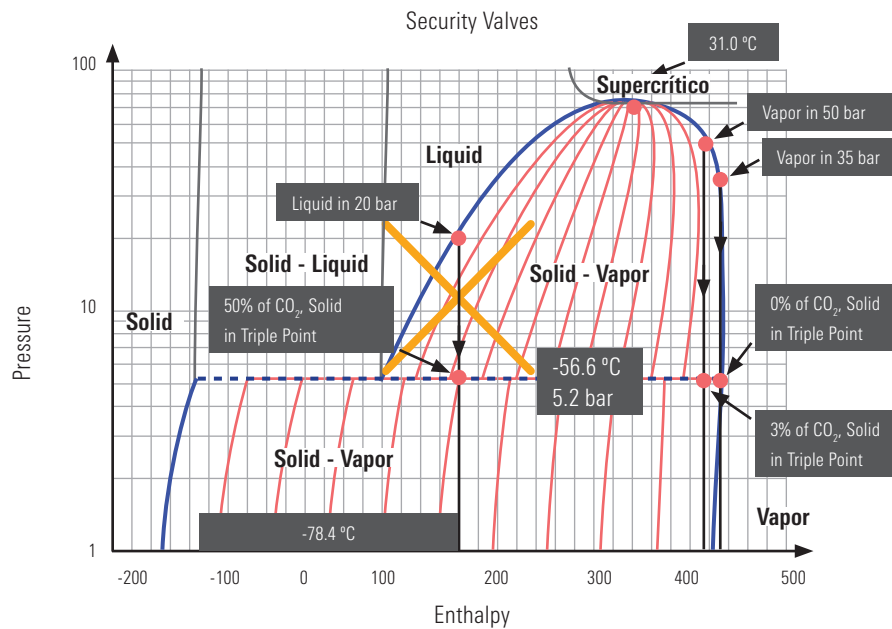


Fig 12 – Expansion of CO₂ in the discharge of Security Valve in Several Points of System Refrigeration, [3]

3 Conclusion

The purpose of this article was to present the most relevant aspects of refrigeration systems using CO₂ as refrigerant in applications of industrial refrigeration sector.

The system most used at this time is Cascade cycle CO₂ / Ammonia, which gives initial advantage as a drastic reduction in load of Ammonia in the system. Also, for systems operating with evaporation temperature below -38 ° C, there is better rates of COP when compared with conventional refrigeration systems by Ammonia, and is reasonably advantageous with temperatures below -45 ° C.

Also was presented a variation of cascade cycle that includes CO₂ acting as a secondary fluid for intermediate temperatures (to meet loads of cold products, for example), which provides a bigger decrease in load of Ammonia in two work temperatures systems. The loss of efficiency can be minimized with optimization of the project, worth up the advantages of the relationship T/P of CO₂.

We analyzed aspects of project involving the sizing of cooling lines, that in systems of CO₂ result in a reduction of average diameter of 2.5 times compared with lines of Ammonia; defrost

systems; problems related to contamination with water and the need to use filters and dryers and, finally, a proper application of safety valves.

Prospects for growth in the use of CO₂ in industrial refrigeration sector are very good, mainly by the fact that in Europe, the U.S. and in Brazil there are already restrictions on the use of systems with large loads of Ammonia in certain localities.

As the trend of customers option for this solution, we note that in Brazil there is still a reluctance to change to the new (who will be the first?). However, we can verify that various companies around the world are adopting cascade cycle CO₂ / Ammonia as a final solution for systems with temperatures below -40 °C.

3 References

Literature:

Lorentzen, G. **Revival of Carbon Dioxide as Refrigerant**, *International Journal of Refrigeration* – 1994 Vol. 17 Number 5, pag. 292-301.

Cleto, L. T. **Levantamento de Inventário de Amônia das Instalações de Refrigeração Desativadas na Cidade de São Paulo** – Pesquisa pessoal – 2005.

Vestergaard, N. P. **CO₂ Refrigerant for Industrial Refrigeration** – Danfoss A/S – 2004.

Nielsen, P.S & Lund, T. **Introducing a New Ammonia/CO₂ Cascade Concept for Large Fishing Vessels**, IIR Annual Meeting – Albuquerque, USA – 2003.

Pearson, S. F. **Development of Improved Secondary Refrigerants** – *International Journal of Refrigeration* – 1993, Preprint.

Softwares:

COMP1-Ver.18.01F **Computation and Balancing of Components and Plants** – *International Technical Computing* - York Denmark – Ed. 2008.

CoolPack-Ver.1.46 **Simulation Tools for Refrigeration** – Dept. of Mechanical Engineering – Technical University of Denmark – Ed. 2001.

DIRcalc-Ver.1.16 **Refrigeration Component Selection and Line Sizing** – Danfoss Industrial Refrigeration A/S – Ed. 2007.



Applications of ammonia as refrigerant fluid in air conditioning and industrial refrigeration sector

LEONILTON TOMAZ CLETO

Yawatz Engenharia Ltda.

Rua Agostinho Teixeira de Lima, 215 – São Paulo – SP – 04826-230 – Brasil

ABSTRACT

Ammonia (R-717) was one of the first refrigerants to be used in the production of refrigerators, initially used in cycles of absorption and immediately after that, also in the vapor compression cycles. With the arrival of halogenated fluids, the use of Ammonia was reduced to commercial area, but in industry the use of ammonia continued to develop. In almost 150 years of its use, there were major advances in technology developed, with emphasis on aspects of safety and energy efficiency.

After the Montreal Protocol, Ammonia is now considered one of the most important alternatives in the applications of refrigeration and air conditioning industry. With these opportunities, new concepts have emerged, among them, the systems extremely compact, with a load of soda very low and advanced security devices, making possible the use of Ammonia in a variety of applications. In this work are presented some of these applications and future trends for applications with Ammonia in the industry.

1 Introduction

The industrial refrigeration sector covers large systems and usually refers to applications in the food and beverage industry, where the main refrigerant is Ammonia (R-717). Here are included the applications in chemical and petrochemical industries, which use mainly halogenated fluids (HFCs and, in Brazil, although the HCFC-22), besides Ammonia and some hydrocarbons (R-1270, R-290 and mixtures) and the applications of air conditioning industry (mainly in the pharmaceutical, automotive and textiles), which still mainly use the HFCs.

Ammonia, with its excellent facilities for use in refrigeration systems, suffer many restrictions on its implementation because it is a refrigerant with the highest rate of toxicity than most HFCs. In several countries, including Brazil, there are laws that require a range of care from the project until the operation of a cooling system that, depending on the load of refrigerant in the system and the place where it is installed, may even render them application.

However, since Montreal Protocol, with programs for elimination of CFCs and HCFCs, and then Kyoto, with possible future restrictions on the use of HFCs, new opportunities for the use of Ammonia emerged.

Thus, to minimize the impact of toxicity problem, the emphasis was on developing the design of compact systems, with very low load of Ammonia. The main concept of system adopted for most new applications was the combined use with other fluids, in indirect cooling system (with the so-called secondary fluids), and in system with "Cascade" cycle, specifically with CO₂. On the other hand, with the introduction of a fluid is necessary that the level of minimum temperature (the evaporation temperature of the cycle with ammonia) is slightly lower than traditional systems with direct expansion of refrigerant, which results in a decrease in energy efficiency of the cycle. To compensate this, some applications have changed their design so as to minimize or neutralize this impact, and also, the components of new systems with Ammonia have been optimized to achieve a recovery of energy efficiency.

In this work are presented some applications developed for the use of compact systems, especially "Chillers" with plates of heat exchangers and new technology equipment for the use of systems with very low loads, plus some new concepts in industrial plants.

2 Development

2.1 Chillers with Exchangers by Plates

The “Chillers” (units of liquid cooling) with heat exchangers by plates represent one of major technological advances for the drastic reduction of the load of ammonia in a cooling system associated with a high COP (coefficient of performance).

The reduction of refrigerant load in the system reaches 80% when compared to chillers using heat exchangers, “Shell & Tube” conventional and up to 95% when compared with direct expansion systems. Also, there are two operational advantages of chillers exchangers by plates when compared with a system of direct expansion. In the latter, for the assembly of the installation in the field, it is difficult (usually it is even despised) the test of tightness and appropriate procedure vacuum within acceptable limits (of the order of 5 kPa abs) before the first load of refrigerant. This generates more frequent stoppages for maintenance, besides reducing the lifetime of internal components and loss of COP over time. The fact of chillers with exchangers by plate are completely assembled and tested at the factory, eliminates this problem. Moreover, the rate of ammonia and oil lubricant replacement to the system is extremely reduced. Following are two applications where the introduction of systems with chillers exchangers by plates brought great results related to safety and also to energy efficiency.

2.2 Applications of Chillers with exchangers by plates - Dairy Industry

Not so long ago, the only cooling system used in the process of milk cooling was the bank of ice, a serpentine coil with Ammonia evaporating to $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, plunged into a tank full of water in open system. In the process of milk cooling occur peak load in very small periods, which allows the use of bank of ice as a “lung” of thermal accumulation. Also, with the need to have iced water around $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (because the milk must be cooled to $+4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), the bank of ice is useful, because even with the freezing around the serpentine coil, thermal accumulation because the process is

However, the bank of ice presents major disadvantages. Its construction requires availability of space because of its large dimensions, as well as loads of Ammonia very high. Moreover, operates under conditions somewhat favorable, evaporating around -10.0°C produce ice and cold water. It has coefficients of heat transfer very low, mainly by the formation of ice around the serpentine coil that eventually becoming "insulating" for heat exchange.

In this application, the exchangers by plates for the cooling of water are a great alternative to the banks of ice. They can be used both in the expansion of an existing installation, eliminating the serpentine coil of tanks, leaving them only with the task of thermal accumulation of water, or in new plants, using chillers exchangers by plates. One advantage of this system is that the evaporators by plates have coefficients of exchanging heat with much greater efficiency (30 to 50 times than serpentine coil). Another advantage is that the load of Ammonia in the system is extremely low (around 0.5% to 2% of the load of a system using conventional bank of ice).

Due to the high heat transfer coefficients, it is possible get a very small difference in temperature between the exit of iced water and the temperature of evaporation in the evaporator by plates of the chiller. In the case of dairy is possible to obtain water at $+1.0^{\circ}\text{C}$ with refrigerant evaporating around 0.0°C . Involving up to a system of control of suction pressure, we avoid the risk of freezing the changer. It noted that, for the design of the system, this small difference between the temperatures of exit of water from the evaporation temperature is only viable in flood systems, and is not possible to deal with systems expansion drought.

Considering the loss in the system due to the constant pressure valve, the pressure of Ammonia in the suction of compressor chiller changer by plates is around 4.1 bar abs (evaporation temperature equivalent to -1.5°C). Comparing the system with bank of ice, where the suction pressure is 2.9 bar abs (with evaporation temperature equivalent to -10.0°C), note that the system changer by plates is much more efficient from a thermodynamic point of view.

For example, for a system of a large dairy with capacity of 1000 kW cooling, using screw compressor and Ammonia, we have the following comparison:

Table 01 – Comparison between the conventional and chiller with exchangers by plates in the application of milk cooling [1]

	System with Bank of Ice and evaporator condenser	System with Chiller exchangers by plates and Cooling Tower
Regime of operation (°C)	-10.0 / +35.0	-1.5 / + 36.0
Displacement of volumetric compressor (m ³ /h)	1438	1013
Power absorbed by the engine of compressor (kW)	264.6	204.0
Total power absorbed by the system (kW) *	349.5	271.4
Load of refrigerant (kg)	~10000	55

Total power absorbed:

- ∴ Bank System with the Ice: engines of compressors, evaporator condensers (fans + pump), iced water pump, agitators, pumps of Ammonia.
- ∴ System with Chiller exchangers by plates: engine compressors, fans of the cooling tower, the cooling water pump, pump water ice.

As we can note in the table 01, the system with chiller with exchangers by plate use a compressor about 30% smaller than conventional system and the total power absorbed in the system is 22% smaller. But the great reduction occurs in load of refrigerant required. The system with chillers with exchangers by plate uses only 0.55% of total load of conventional system.

In an existing system, considering only the replacement of banks of ice for evaporators by plate, with the compressors, it is possible to get an expansion of system capacity of 42% with an increase of only 5% in total power absorbed the same, and usually unnecessary to increase the installed power of the engines. In this case, the only increase of necessary equipment would be evaporator condensers which should increase by 34%. In this case also reducing the load of refrigerant is sensitive. Taking the capacity of example above, the load of refrigerant of amended system, would be approximately 600 kg (5% to 8% of the load of refrigerant in a system with bank of ice).

In the case of existing installations of small size, where the function of thermal accumulation of tanks is important, they need not be eliminated, just cut up the serpentine coil and takes up the volume of the tank to accumulate the iced water from the plate changer.

2.3 Applications of Chillers with exchangers by plates - Beverage Industry

The use of an indirect cooling system with ethanol solution (or other secondary fluid) operating with a large difference in temperature, provided a change in the concept of the installation of refrigeration in industries of non-alcoholic soft drinks. The new system consists of several chillers exchangers by plates that are placed in series in the circuit of ethanol solution.

Thus, we have the chillers operating under the following conditions:

Table 02 – Conditions of operation for cooling system of ethanol with chillers exchangers by plates, in the process of cooling of gasified drinks [1]

Chiller Nr.	01	02	03	04
Temp. Entry – Ethanol (°C)	16.0	12.1	8.6	5.5
Temp. Exit – Ethanol (°C)	12.1	8.6	5.5	0.0
Capacity (kW)	944.7	841.1	756.6	605.2
Absorbed Power (kW)	134.5	132.5	130.7	128.0
Tev / Tcd (°C)	+9.8/+36.5	+6.5/+35.7	+3.5/+35.1	-2.5/+35.1
COP (kW/kW)	7.02	6.26	5.79	4.73
COP medium (kW/kW)	6.00			

The chillers 01, 02 and 03 are in series and cool the ethanol until 5.5 ° C. Part of the flow of ethanol is still cool to 0.0 ° C in chiller 04. Found in table 02 that the COP average of chillers is 6.0 kW / kW. With conventional systems operating in the scheme -5.0 °C / +35.0 ° C, the COP is the order of 4.3 kW / kW. In this case, even using cooling system with indirect, the COP of the cooling system is about 40% higher than the conventional system, since the conventional system operates in a single scheme, with a temperature of evaporation adjusted -5.0 ° C. The total COP system (including pumps and fans) is still around 32% higher than the traditional system. Moreover, the system brings chillers with a reduction of the load of ammonia in the order of 90% compared with the conventional system.

Figure 01 indicates a flow schematic of a system with chillers with exchangers by plates in series for a process of cooling down of gasified drinks.

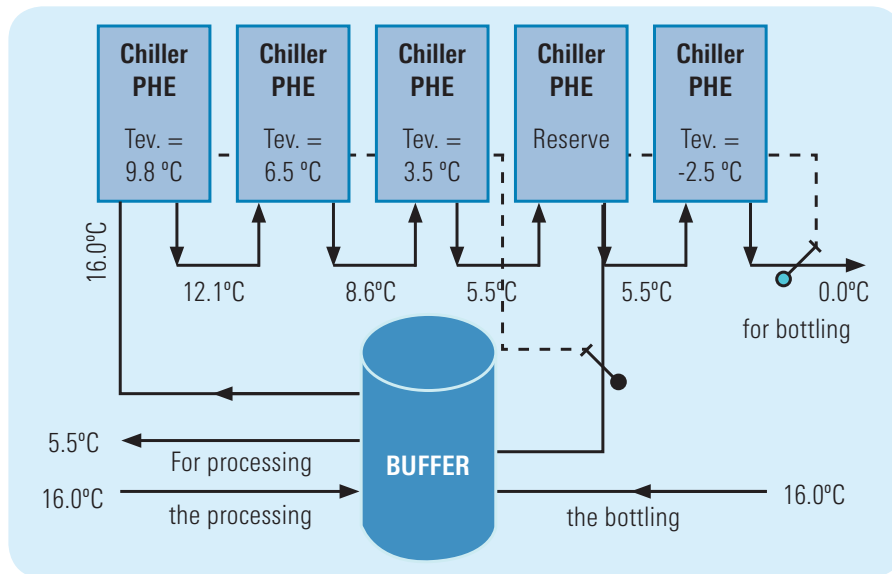


Fig 01 – Cooling system of ethanol with chillers exchangers by plates in series in the process of cooling of gasified drinks [1]

2.4 Applications of Chillers with exchangers by plates – Air Conditioning

In applications of iced water for cooling of air conditioning systems, the Ammonia is still one of the best alternatives in terms of energy efficiency. Compared with compressors centrifugal chillers using HFC-134a, with chillers with compressors screws exchangers by plate using Ammonia, both with high efficiency, the table 03 indicates the results. It may be noted that despite the COP (or kW / TR - term most used for comparison of energy efficiency in air-conditioning) be very close on condition of 100% load, with slight advantage for the system with Ammonia (2%) the average index of energy efficiency IPLV (Integrated Part Load Value), which considers conditions of operation in part load, indicates an advantage of 15% for the system with Ammonia.

Table 03 – Comparison of chillers for air conditioning applications

	Centrifugal Chiller – Std	Chiller with PHE – Std
Refrigerant	R-134a	R-717
Capacity – kW (TR)	2110 (600)	
Temp. Cold Water – °C	12.2 / 6.7	
Temp. Cooling Water – °C	29.5 / 35.0	
Power Absorbed	346	339
COP (kW/kW)	6.10	6.22
kW/TR	0.576	0.565
IPLV (ARI 550/590) – COP	8.33	9.58
IPLV (ARI 550/590) – kW/TR	0.422	0.367

Table 03 deals with equipment line without the use of inverters in the frequency of electric motors for compressors to control capacity. Table 04 shows a comparison of two chillers at the same level of capacity, however, using inverters of frequency. Here we see a slight advantage on the condition of 100% for the system with ammonia (5.5%) and IPLV virtually the same for both chillers, which indicates a recovery of the performance of compressors with centrifugal chillers with HFC-134a front of compressors screws with Ammonia.

Table 04 – Comparison of chillers with frequency inverters for air conditioning applications

	Centrifugal Chiller – VSD	Chiller with PHE – VSD
Refrigerant	R-134a	R-717
Capacity – kW (TR)	2110 (600)	
Temp. Cold Water – °C	12.2 / 6.7	
Temp. Cooling Water – °C	29.5 / 35.0	
Power Absorbed	335	317
COP (kW/kW)	6.30	6.65
kW/TR	0.558	0.529
IPLV (ARI 550/590) – COP	10.40	10.34
IPLV (ARI 550/590) – kW/TR	0.338	0.340

2.5 Reducing Even More the load Ammonia

The continuous technological development of components is causing a substantial reduction of the required load of Ammonia in compact systems. Table 05 indicates the result of development for the evaporators of line of standard chillers for a particular supplier in recent years.

Table 05 – Reduction of load of Ammonia in evaporators of chillers over the years. Chillers SABROE for iced water, with a capacity of 500 kW [2]

Year	Model/Type of Evaporator	Load of R-717 (100%)	Load of R-717 (20%)
1990	 <p>EOSB 415004 flooded (Shell & Tube)</p>	210 kg	210 kg
1994	 <p>ESSM 5040B3 flooded (Shell & Tube)</p>	120 kg	130 kg
1995	 <p>EPHE 100 (M10) flooded (PHE)</p>	45 kg	50 kg
2004	 <p>ESRA 70 flooded (Shell & Plate)</p>	20 kg	23 kg

Table 06 – Load of Ammonia in condensers for systems with capable of cooling of 500 kW [2]

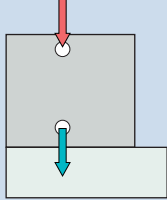
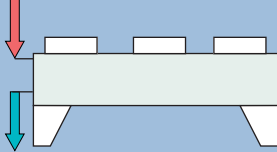
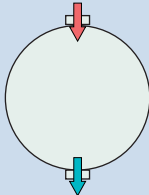
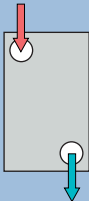
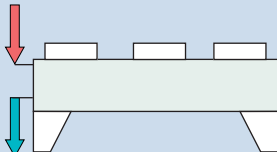
Model/Type of Condenser	Load of R-717 (100%)
	Evaporator 66 kg
	By air 50 kg
	By water COSB 412304 (Shell & Tube) 10 kg
	By water CPHE 100 (M10) (PHE) 5 kg
	By air (Micro-Channel) 3-5 kg

Table 06 indicates the various types of condensers used in Ammonia systems, including the latest developments with loads extremely low.

Litch and Hrnjak [3] presented still the result of a survey of data to load of Ammonia in small and medium systems available in the market for various types of chillers with condensation on air and water condensation, as the table 07.

Table 07 – Load of Ammonia in small and medium systems available in the market, using the condensation by Air and Water [3] [4]

Chiller – Type/Model	Capacity(kW)	Specific Load of R-717 (g/kW)
Condensation by air		
Litch & Hrnjak (MC condenser)	13	18
Refcomp VKA16-14	16	125
York YSLC F4F00UW	220	129
N.R. Koeling LK 25	25	159
Condensation by water		
ILKA MAFA 100.2-11K45	108	23
Gram (York) LC	38 – 228	228 – 37
Sabroe (York) PAC	57 – 1074	172 – 36

2.6 Industrial Plants

When it comes to new technologies in the sector of industrial refrigeration, you should remember that the center of main developments is still in Europe and aspects of safety and environmental impact, followed by energy efficiency, are the main elements to be considered. Thus we can cite some of the newest technologies already used in various applications of industrial refrigeration plants in the markets of Europe, Asia and U.S. and also from Brazil:

2.6.1 Systems of Indirect Cooling

The systems that use secondary fluid are already widely disseminated in many applications, but in the refrigeration industry sector there are still many opportunities. As already mentioned, the load of Ammonia is restricted to a chiller compact of high efficiency and distribution system is extremely simplified in hydronic circuit optimized, with variable flow pumps (using inverters of frequency) and elements of control that ensure operational stability.

For many applications there are already new secondary fluids, such as potassium acetate and format of potassium and also bi-phased fluid, such as CO₂ (Steam-Liquid) and Ice Slurries (Solid-Liquid), with excellent physical properties, providing high coefficient of heat transfer and lower back

pressure in the lines on the secondary, including lower power pumps and lower diameters of tubing. Thus, some applications have had their concept changed to provide a system much more efficient than traditional systems with direct expansion of ammonia.

2.6.2 Satellites Units

Pre-assembled in factories in containers and dedicated assembled beside the equipment containing the evaporator (tunnels of freezing or refrigerated chambers of large size). The example of chillers, much of the assembly is held in factory, with more rigorous procedures and insurance. The satellites units provide a reduction of load of Ammonia and reduce the loss of load on the lines, which are shorter.



Fig 02 – Satellite Unit of Refrigeration (Courtesy: Mayekawa of Brazil Refrigeration Ltda.)

2.6.3 Systems in “Cascade” Cycle operating with CO₂ (R-744)

Systems in “cascade” cycles of applications for low temperatures (below -35 ° C), using CO₂ (R-744) in the cycle of low temperatures, operating in sub-critical cycle, and ammonia (R-717) in the circuit of high, again restricted to a chiller. In this application, reducing the volume of displacement compressors stages of low temperature (with R-744) is up to 10 times compared to a traditional system with ammonia. Moreover, is a possible increase in efficiency of up to 15% in the circuit of low and a sharp reduction of time to freeze the product (for tunnels) with the decrease of temperature

of work, without loss of energy efficiency in the cycle. In this system, the lines are smaller, the equipment is more efficient and CO₂ is much less toxic than halogenated (TLV = 5000 ppm).

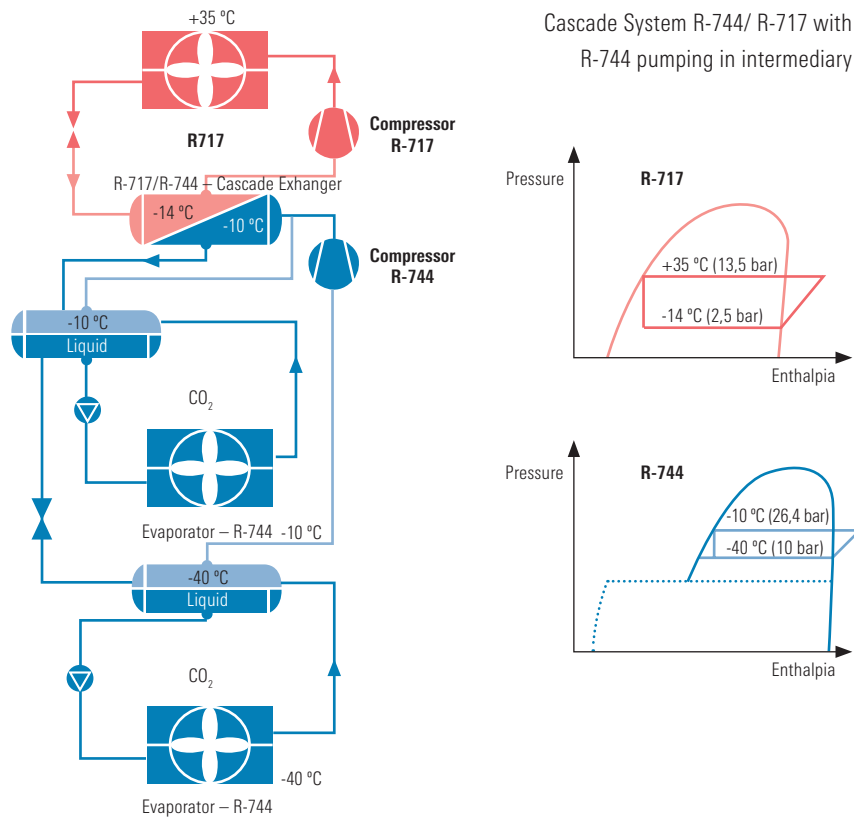


Fig 03 – Cascade Cycle CO₂ / Ammonia, with CO₂ circulating in the intermediate scheme as secondary fluid [5]

2.6.4 Sets Valve and Control Elements

A contribution to a lesser extent in reducing the load of soda, but it reduces a lot of work in assembly of the field and provides greater operational safety are the sets of valves and control elements assembled in a single body, for applications in refrigerated chambers (including injection of liquid, return to the suction and injection of hot gas to defrost).

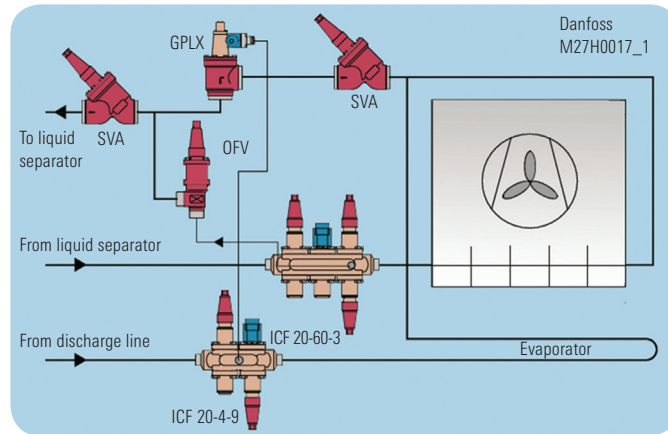


Fig 04 – Set valve mounted on single body (Courtesy: Danfoss A / S)

2.6.5 Defrost with Hot Gas

Systems using defrost with hot gas may limit the pressure of condensation on a high level, leading to higher energy consumption.

To avoid this and ensure that the rest of the system can operate with a pressure of less condensation, uses a compressor to be reciprocal of small capacity, where the suction of that is connected at the top of the container of liquid (vapor phase). So this compressor supplies whole load for defrosting and, though small, has a relatively high capacity due to high pressure of suction.

Another alternative would be a cooling unit of liquid (chiller), also using a reciprocal compressor operating at high pressure of suction with a control by float high in the output of hot gas condensate from the serpentine coil, and finally an evaporator PHE in nickel, which have the function of sub-cool the liquid Ammonia of the main system and increase the COP in the same period of defrost. The advantage of this concept is that, during defrost the efficiency of the main system increases.

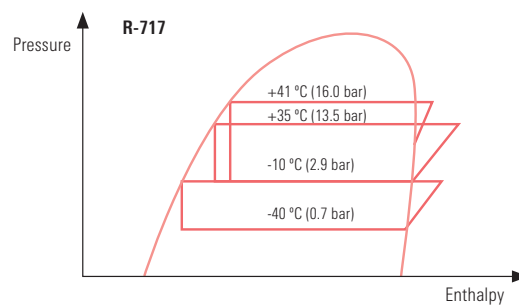


Fig 05 – Diagram pressure x enthalpy for systems with compressor to defrost with hot gas

2.7 Legislation

The industrial sector of refrigeration is looking increasingly to the importance and need to implement safe projects, with appropriate safety devices, according to international law on safety in industrial refrigeration systems.

Unfortunately, Brazil still does not have specific legislation on this subject, but soon will be launched by a standard ABNT, that have being developed by committees of studies of CB-55 (EC-55: 001.04 - Industrial Refrigeration), and that with the support of industry and agencies to protect the environment, should have a very positive impact on improving the quality of facilities, refrigeration industry, including safety, energy efficiency and ease operational.

Below is a list of recommendations and standards used in most international markets for design, installation and operation as well as requirements for security, for refrigeration systems. It noted that most of them serve for all refrigerants:

- ∴ ANSI/ASHRAE 15-2007 - Safety Code for Mechanical Refrigeration.
- ∴ ANSI/IIAR 02-1999 - Equipment, Design and Installation of Ammonia Mechanical Refrigeration Systems.
- ∴ EN 378:2007 - Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements:
 - ∴ Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria
 - ∴ Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation
 - ∴ Part 3: Installation site and personal protection
 - ∴ Part 4: Operation, maintenance, repair and recovery
- ∴ ISO 5149 - 2007 - Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements:
 - ∴ Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria
 - ∴ Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation
 - ∴ Part 3: Installation site and personal protection
 - ∴ Part 4: Operation, maintenance, repair and recovery
- ∴ ASME/ANSI B31.5 - 2006 - Refrigeration Piping and Heat Transfer Components.

3 Conclusion

The purpose of this article was to present the current stage of technology for refrigeration systems applications by Ammonia in the sector of industrial refrigeration.

The main advances in the development of systems even more compact, efficient and safe so as to enable the use of Ammonia in new applications. The use of high-efficiency chillers exchangers by plates and other types of exchangers even more compact and amendment of some concepts for existing applications in the refrigeration industry sector has resulted in solutions with reductions of Ammonia load over 90% and a increase energy efficiency greater than 20% when compared with conventional systems.

In industrial plants, new technologies are also being implemented, among them the introduction of indirect cooling systems, using chillers, systems "cascade" operating with CO₂ and Ammonia, satellite units and optimization of auxiliary components, with specific focus on operational safety and gain in energy efficiency.

Ammonia, for its excellent operational and thermodynamic facilities, remains the main refrigerant used in refrigeration industrial sector, and hence, it becomes increasingly important to continuous enhancement of knowledge about the safe use of this fluid. Finally in Brazil is being developed a standard security about refrigeration installations (which involves all refrigerants) and that go a long way to the use of viable systems with Ammonia for various applications.

4 References

Literature:

Cleto, L. T. **Conceito de Instalação Frigorífica Visando a Racionalização do Consumo de Energia – II Workshop de Refrigeração Industrial**, São Paulo, Brasil - 1999

Stubkier, **Bo The Optimum Ammonia System – IR Consensus** – Danfoss A/S – Sønderborg – Denmark – 2004.

Hrnjak P. S **Charge Minimization In Ammonia Refrigeration Systems – IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement**, Ohrid, Macedonia – 2005.

Litch A. D. and Hrnjak P. S. **Condensation of Ammonia in Microchannel Heat Exchangers – ACRC Report CR-22** – 1999.

Nielsen, P.S & Lund, T. **Introducing a New Ammonia/CO₂ Cascade Concept for Large Fishing Vessels**, IAR Annual Meeting – Albuquerque, USA – 2003.

Wilcox M.H. – **State-of-the-Art Energy Efficiency in Refrigerated Warehouses** – IAR Annual Meeting, Technical Papers pp. 327 – Dallas, USA – 1999.

Softwares:

COMP1-Ver.18.01F **Computation and Balancing of Components and Plants** –International Technical Computing - York Denmark – Ed. 2008.

CoolPack-Ver.1.46 **Simulation Tools for Refrigeration** –Dept. of Mechanical Engineering – Technical University of Denmark – Ed. 2001.



CO₂ (R-744) in commercial refrigeration equipments

CLÁUDIO MELO, PH.D.

CHRISTIAN J. L. HERMES, DR.ENG.

POLO Laboratory of Refrigeration and Thermophysic Research

Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Santa Catarina

88040-900, Florianópolis, SC, Brazil – Tel: 55 48 3234 5691, Fax: 55 48 3234 5166

e-mail: melo@polo.ufsc.br, hermes@polo.ufsc.br

ABSTRACT

According to last report published by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), industrial activity is the main responsible for planet warming. In accordance with projections presented in the document, medium temperature could increase 1,5 to 4,0 °C by the end of the century, what will cause an elevation of approximately 60 cm in the level of the oceans, in addition to severe climatic imbalances. In last decades, refrigeration and air conditioning industry have been had pressure by restrictions to use of synthetic fluids refrigerants based on Montreal and Kyoto Protocol. Long term solutions have been evaluated, what includes the use of natural refrigerants. In this context, carbon dioxide (CO₂, R-744) reappeared as a potential candidate, because it is a natural substance, stable, atoxic, non-flammable, and with relatively low GWP (Kim et al., 2004). However, its application in commercial refrigeration systems has been restricted by a low energy performance, which may raise indirect emissions of CO₂ by increasing consumption of fossil fuels. In this context, this article proposes to analyze critically the use of CO₂ as refrigerant for commercial refrigeration systems, discussing the major technological advances and practical limitations to this application.

Key words: natural refrigerants, carbon dioxide, refrigeration, commercial refrigerators.

1 Introduction

Carbon dioxide was introduced as refrigerant by North American Thaddeus Lowe in 1866, 32 years after Jacob Perkins had proposed refrigeration principle by mechanical compression of vapours. The first compressor to CO_2 was invented by German Franz Windhausen in 1886, while production in series of refrigeration systems that used CO_2 as the refrigerant began in 1897, 33 years after the introduction of CO_2 as a refrigerant, thanks to Kroeschell Brothers from Chicago. From this date, refrigeration systems with CO_2 had an increasing acceptance in the market, stimulating engineers to improve current technology. As a result, J. & E. Hall proposed in 1890 a cycle with two stages of compression to improve the efficiency of the cooling cycle with CO_2 and, in 1905, G. Voorhees introduced a cycle with a tab of liquid in the intermediate stage.

At the beginning of the twentieth century, the most common refrigerants on the market were ammonia (NH_3), sulphur dioxide (SO_2) and carbon dioxide (CO_2), with the first and the second extremely toxic. By that time, there are records of deaths of entire families due to leakage of refrigerant, which led to the development of atoxic refrigerants. In 1930, a group of researchers led by Thomas Migley identified the family of chlorofluorocarbons (CFCs), which had a wide market acceptance, particularly in domestic and commercial sectors, since fluids are extremely stable, non-toxic and non-flammable, and their pressure of work are significantly smaller than those observed for CO_2 . From that date, refrigeration industry entered into free development. Non-ferrous materials could be used, valves of expansion were replaced by capillary tubes and hermetic compressor has become the standard. As a result, systems based on CO_2 gradually fell into disuse until the decade of 1950, when it was taken from the market.

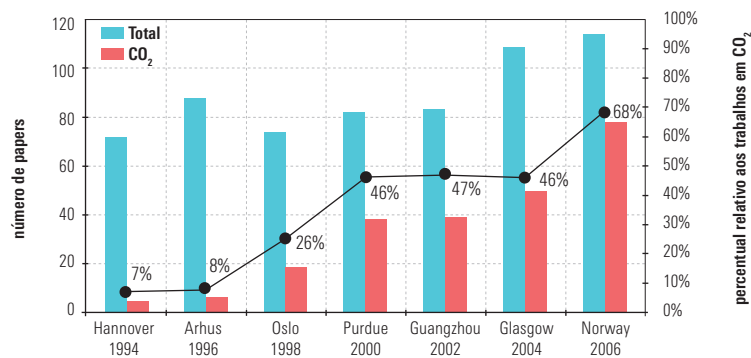
In 1974, however, Sherwood Rowland and Mario Molina from California University published an article warning that the emission of compounds with basis of chlorine compounds, particularly chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), could contribute to degradation of the ozone layer in the stratosphere, responsible for the absorption of most of ultraviolet radiation from the sun. In 1987 was established an international protocol called Montreal Protocol, with the aim of defining targets for complete elimination of CFCs, which occurred in 1996 in developed countries and will occur up to 2010 in developing countries. From Montreal Protocol, the most of products on the market was converted to R-134a, a refrigerant of the family of hydro-fluor-carbons, with no effect on ozone layer. The environmental problem seemed to have been resolved.

However, we recently realized that the solution adopted contributes significantly to the worsening of greenhouse effect, responsible for increasing global average temperature and all

kinds of phenomena arising from it, for example, melting of glaciers (IPCC, 2007). In 1997, was established another international protocol, called Kyoto Protocol, aiming to promote a gradual reduction of emissions that contribute to greenhouse effect, including the HFCs. Since then, natural refrigerants such as hydrocarbons (HCs), ammonia (NH₃) and carbon dioxide (CO₂) have been considered as alternatives to the replacement of synthetic refrigerants such as CFCs and HFCs. These refrigerants have rates of ODP (Potential of Ozone Depletion) and GWP (Global Warming Potential) much lower than the synthetic fluid: while CO₂ has GWP equal to 1, R-12 has GWP equal to 8100 and R-134a equal to 1300. This means that in terms of greenhouse effect, the issuance of 1 gram of CFC-12 equivalent to the emission of 8100 grams of CO₂ in 100 years. The challenge, however, is to develop systems based on CO₂ that have energy efficiencies similar to R-134a, as the indirect contribution to the greenhouse effect, come from burning fossil fuels, must be taken into account.

2 Refrigerant R-744

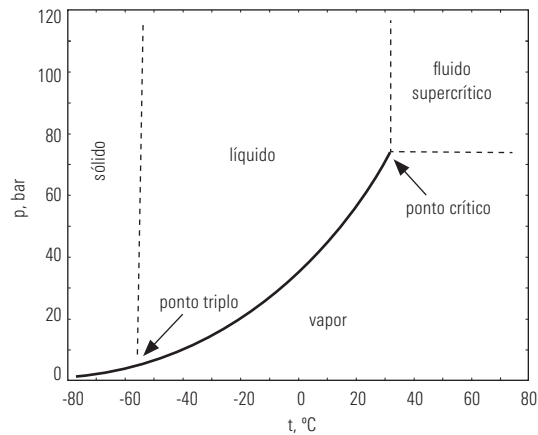
Although, at present, CO₂ is not employed on an industrial scale, it has been the subject of several recent researches started by pioneering work of Lorentzen and Pettersen (1992), which built a prototype of an automotive air conditioning system which uses CO₂, showing that their thermodynamic performance could be comparable to a system which employed R-12.



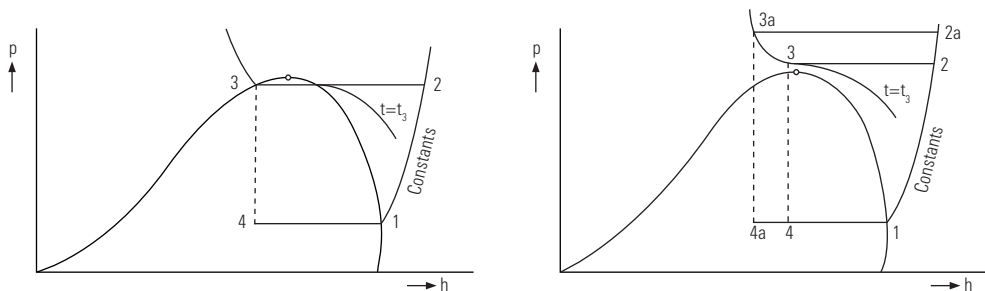
Picture 1 – Number of publications about CO in *Gustav-Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*

As temperature of a typical day of summer easily exceed 31.1 ° C – critical temperature of CO₂ – the rejection of heat to the environment in refrigeration cycles based on CO₂ occurs above

the critical point (Pic. 2). Unlike the traditional refrigeration cycles (subcritical), where there is condensation and pressure is defined by saturation temperature (Pic. 3a), in the case of CO₂, the refrigeration cycle is transcritical (Pic. 3b), and high pressure is established mainly by the mass of refrigerant, since the effect of temperature is negligible. This leads to a great pressure of operation that maximizes the coefficient of performance of the cycle, defined as the relationship between refrigeration ability and power consumption.



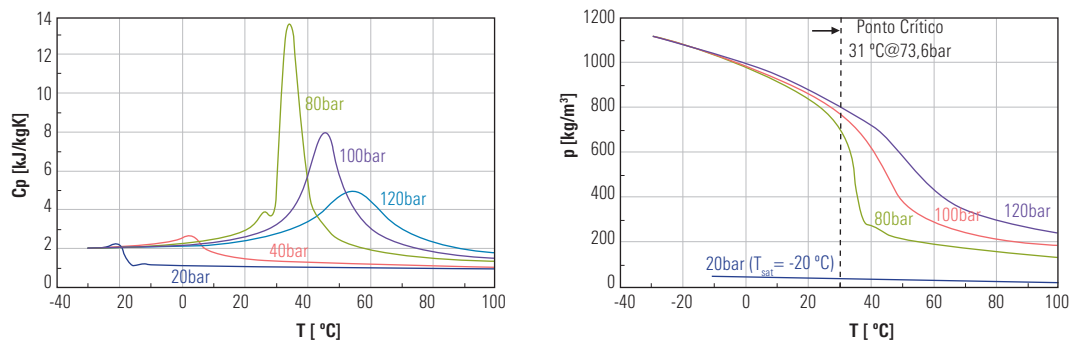
Picture 2 – Diagram of CO₂ phase



Picture 3 – Refrigeration cycles: (a) traditional (sub critic); (b) CO₂ (transcritical) (Gosney, 1982)

As highlighted by Kim et al. (2004), thermodynamic and thermophysical properties of CO₂ vary intensely to sub critic region for transcritical, affecting mainly the transfer of heat in the gas cooler and the process of expansion. The Fig 4 shows changes in specific heat (4th) and density (4b) depending on the temperature and pressure, using the equation of state proposed by Span and Wagner (1996). In figure 5a, we can see that the specific heat of CO₂ goes through a maximum point

in the region near critical point, while Figure 4b illustrates the abrupt reduction of density of the fluid from the temperature of the critical point. These characteristics, combined with the fact that refrigeration equipment based on CO₂ work with internal pressures from 5 to 10 times larger than a conventional equipment, leaving a clear need for special care when designing the components of the refrigeration system with CO₂ (compressor, condenser, evaporator and the expansion device).



Picture 4 – Change of specific heat (a) and density (b) of CO₂ with temperature

3 CO₂ versus R-134a

The use of CO₂ in commercial refrigeration systems, like beverage coolers with refrigeration capacity in range of 0.5 to 2 kW, has proved to be a promising alternative. One of the first published work in the area (Veje and Süss, 2004), comparing the performance of two refrigeration systems, a vending machine and a double door cooler, adapted to be used with CO₂, with the same performance of these systems in original condition.

Original and modified systems were tested on condition “C” (ambient temperature of 32 °C and humidity of 65%). They observed a reduction of 37% and 18% in energy consumption with the introduction of CO₂, respectively for the vending machine and the cooler.

This work sells a false image of application of CO₂ in commercial refrigeration systems, because doesn't inform the reader that substantial changes were introduced into the system of CO₂, such as introduction of gas cooler and changer heat of heat intermediary of micro-channels, a valve to control expansion of high-pressure and a liquid accumulator. Furthermore no reference is made to the compressor of R-134a, used as a baseline.

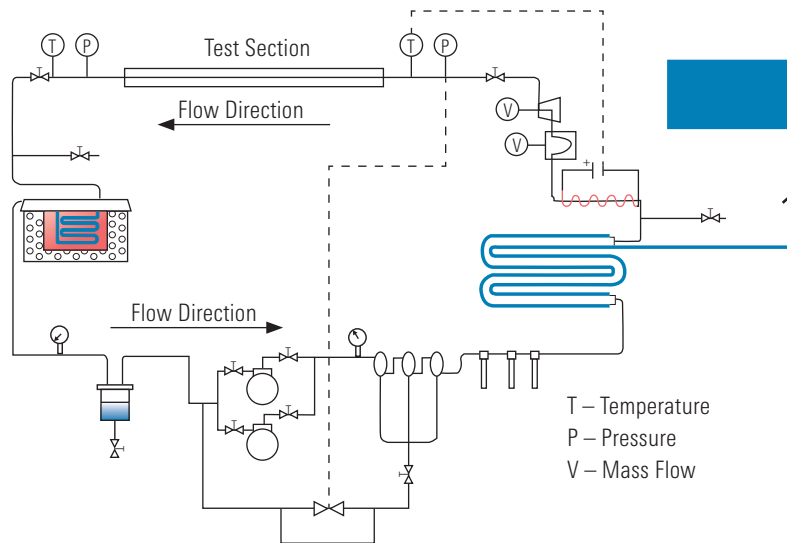
More recently De Angelis and Hrnjak (2005), compared the performance of a typical commercial refrigeration system of 1kW capacity, using R-134a, with the performance of alternative systems using CO₂. For both devices were built experimental type of breadboard, using several combinations of components. Tests were realized on 7 different operating conditions. They showed that the system listed as BC3, the most optimized, had coefficients of performance up to 95% higher than the original system. They also showed that difference falls to 28% when comparison was made between BC2 systems and BC3, both with CO₂. They concluded therefore that a comparison between two refrigerants would only be entirely valid, if both systems had use the same kind of technology in all components of the cycle.

In sum, these works compared systems and not refrigerants themselves. It is known that CO₂ is thermodynamically lower than R-134a. It is also known that compressors of CO₂ have isentropical efficiencies equal or greater than compressors of R-134a. Ultimately, depending on the system and the compressor used, the balance may tilt to one side or the other.

4 Recent advances

For refrigeration systems based on CO₂ become viable both technically and economically to a low-capacity applications, we should seek solutions that have costs and compatible efficiency to existing refrigerators, in addition a simple design, applicable to all consumer markets. The best strategy is the development of products in partnership with productive sector and research centers, as the need for answers during the development of products fosters research, as this helps in decision making during the development of the product. In order to support the development of refrigeration systems based on CO₂, particularly in commercial cassettes, research activities have been carried out POLO – Research Laboratories in Refrigeration and Thermopysic University of Santa Catarina to better understand the phenomena related to use of CO₂ in refrigeration systems, particularly the transcritical disposal in capillary tubes and alternatives to control the pressure in the compressor discharge.

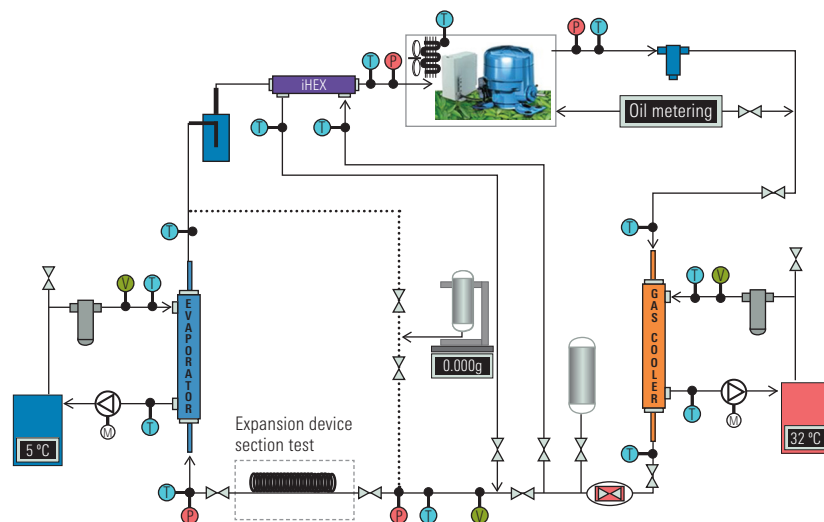
Although it has increasingly been the tendency of using capillary tubes in the commercial refrigeration systems that operate with CO₂, very little has been studied related to it. In a first initiative to fill this gap, a experimental bench capable to operate with CO₂ was specially designed and constructed, as shows Picture 5.



Picture 5 – Schedule of experimental bench for testing capillary tubes operating with CO₂

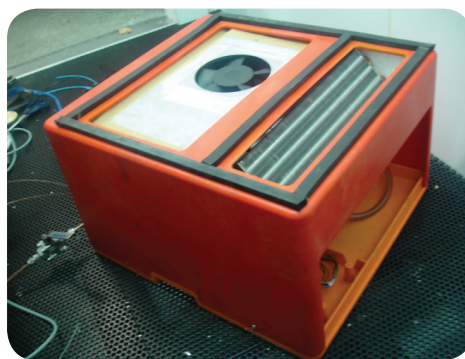
Experimental tests were statistically planned, according to a technical of experimentation factor, both in order to extract as much information as possible from experiments to create an empirical correlation to mass flow in terms of geometric variables (diameter and length) and operating (pressure and temperature at the entrance). A computer model to simulate the flow of R-744 in capillary tubes adiabatical was also developed. Equations of mass conservation, energy and the amount of movement were resolved analytically along an isentalpical line, which allowed the use of an algebraic equation to compute the mass flow of refrigerant. The model has been validated as against 36 points experiments for CO₂ expansion in different geometric and operating conditions. It was observed that the model is able to provide over 90% of experimental data with errors in the range of $\pm 10\%$. The model helps to size capillary tubes allowing that CO₂ refrigeration system to be appropriately adjusted.

As for each operation condition, there is great pressure to discharge that maximizes the system COP; another important line of research is to evaluate alternatives for controlling the pressure of the high side and the process of refrigerant expansion in circuit. To do so, an experimental bench was designed and built especially for this purpose, as shows Picture 6. With this, mending broken down cycle, with the addition of new components to enable the control of high pressure and adequate nutrition of the evaporator, can be studied. As additional activity, computer models have been developed to simulate the behavior of refrigeration systems, reducing the need for experimental studies.

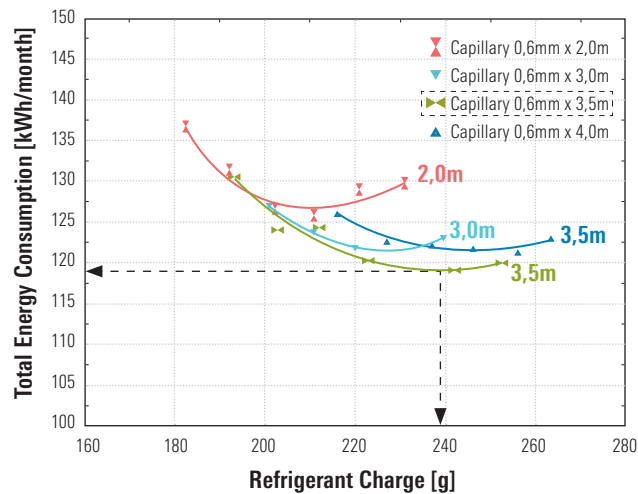


Picture 6 – Schedule of experimental bench to study strategies for controlling cycles based on CO₂

In addition to research activities mentioned, products have been developed in POLO / UFSC in partnership with Brazilian Company of Compressors SA. As an example we can point the development of cassettes for vending machines applications and in beverage coolers (Pic. 7), according to Coca-Cola norms, that establish performance criteria for cassettes related to flow curve of air side (evaporator and fan), the capacity of refrigeration and the coefficient of performance for environments in different conditions of temperature and relative humidity. Another example is the development of a horizontal freezer for ice cream conservation with 350 liters. Originally designed to operate with the R-404A mixture, this system was converted to CO₂ through a drop-in strategy, in which the original heat exchangers were kept, while compressor and capillary tubes have been replaced. As shown in Picture 8, R-744 load was adjusted with capillary tube to minimize the energy consumption of the product.



Picture 7 – Cassete type of refrigeration system developed by POLO



Picture 8 – Set of load and capillary for a horizontal freezer

5 Final considerations

The application of CO₂ in refrigeration systems of small and medium capacity has been limited by a series of paradigms that were originally published by Lorentzen and Petersen (1992). Kim et al. (2004), for example, suggest that heat exchangers, particularly cooler gas, must have an extremely robust construction to suit to high pressure of CO₂ working, and that sophisticated control systems and expansion should be developed. However, in order for refrigeration systems with CO₂ to a low-capacity applications become viable both technically and economically, we must seek a solution that has cost and efficiency compatible with existing, and a simple design, applicable to all consumer markets. For this it is essential that product development activities are accompanied by a set of research activities, focusing on each of components of the cycle. In this context, researches carried out POLO / UFSC have shown that it is possible to develop commercial systems based on CO₂ with performance equal to or greater than the existing products on the market. It is also possible to develop commercial systems based on CO₂ according to a drop-in strategy, simply to adjust both the capillary tube and refrigerant load.

6 Acknowledgements

Authors acknowledge Brazilian Company of Compressors SA and the Brazilian agencies CAPES, CNPq and FINEP for its financial support.

6 References

De Angelis, J, Hrnjack, P, 2005, **Development of transcritical R744 systems for small commercial applications**, Proceedings of the IIR Vicenza Conference, pp. 167-178.

Gosney WC, 1982, **Principles of refrigeration**, Cambridge University Press, Cambridge, UK

IPCC, 2007, **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France

Kim MH, Pettersen J, Bullard CW, 2004, **Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems**, Progress in Energy and Combustion Science, 30, pp.119-174

Lorentzen G, Pettersen J, 1992, **New possibilites for non-CFC refrigeration**, IIR International Symposium on Refrigeration, Energy and Environment, Trondheim, Norway, pp.147-163

Span R, Wagner W, 1996, **A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa**, J. Phys. Chem, 25, 6

Veje, C., Süß, J., 2004, **The transcritical cycle in light commercial refrigeration applications**, Danfoss report.

New solutions for secondary fluids in refrigeration

FRANK CHAVIANO PRUZAESKY

EPIFANIO MAMANI TICONA

SERGIO LEAL BRAGA

JOSÉ ALBERTO R. PARISE

Department of Mechanical Engineering

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – 22453-900 – Rio de Janeiro – RJ

E-mail: parise@puc-rio.br – Phone: (21) 3527-1380

ABSTRACT

This work presents the perspectives of new secondary fluids (i.e., ice slurry and nanofluids) use in refrigeration systems, with a potential reduction of the environmental impact and greater energy efficiency. Systems of generation of ice slurry, at the same time where they better provide energy utilization for the cold production, contribute significantly to reduce the costs of initial capital and operation, when compared to technologies of thermal accumulation systems. In the case of nanofluid, there is a great potential for a superior thermal performance to conventional secondary fluids, although there is still a great gap of information and knowledge as regards as the applications that can usufruct from the development of this new technology. The secondary fluid application of high performance in refrigeration systems could come to reflect itself: 1) into a greater energy efficiency and; 2) into the reduction of the necessary area of heat transference and, consequently, of the total transportation of the equipment, what results in the reduction of the volumetric load of respective work fluids and its corresponding environmental impact.

It is distinguished, finally, the increasing importance assumed by the nanotechnology, with possibilities of application in major sectors of the industry. Both (the nanotechnology and the industry of refrigeration) are strategic areas for the country. The first one, by the innumerable possibilities of future application and the second one, by involving fiery problems that include, among others, the food conservation.

1 Introduction

In virtue of the agreements that regulate the use of substances that destroy the ozone layer and that contribute for the global heating, the refrigeration industry turned its attention to the cooling fluids that had being used before the age of the CFCs and that had never been completely abandoned. Some of these cooling alternative are known as natural cooling, because they are part of the natural environment or because, in the long stated period, they do not harm the environment in case of leaking to the atmosphere. These coolings include, mainly, the air, water, carbon dioxide, the hydro-carbons and the ammonia (Bedecarrats et al., 2003; Egolf and Kauffeld, 2005 and Meewisse, 2004).

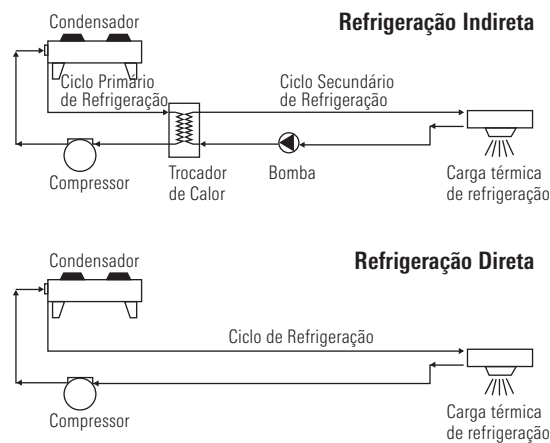


Figure 1 – Refrigeration with secondary fluid in comparison to direct refrigeration

Some of these cooling alternatives present some disadvantages, in function of its security and immediate danger of health. The propane, for example, is inflammable and the ammonia, equally inflammable and also toxic. The risks associated to the refrigeration by using ammonia or propane are possible to be overcome, but the required security can demand expensive investments (Meewisse, 2004). A way to reduce the dangers of the flammability is to reduce the total load of cooling, from the use of a refrigeration system. In a system like this, cold is born in a cycle of primary refrigeration, being eventually stored, and, then, transferred to a secondary cycle of refrigeration through an exchanger of intermediate heat. In this cycle of secondary refrigeration, a thermal fluid in low temperature, "carrier of cold", not-toxic, not-inflammable is, then, used to distribute the potency of refrigeration for the required positions. A basic diagram of a system that operates with a secondary cycle is presented in Fig. 1.

The conventional systems of direct refrigeration, that is, without secondary fluid circuit, are normally cheaper and technically trustable. Without the necessity of an exchanger of indirect

heat, they can operate with more favorable evaporation temperatures. However, they use the same fluid cooling for the “production” as much as for the “transportation” of cold of a central unit of refrigeration to the final users (Fig. 1). As result, these systems contain great amounts of cooling fluid and, in the case of permanent or accidental leaking, can take the losses raised, with bigger damages to the environment. Besides, high loads and leaking of cooling raise the operation costs (Egolf, 2004). A system with secondary cycle of refrigeration would allow reducing, therefore, the amount of cooling fluid in the primary cycle.

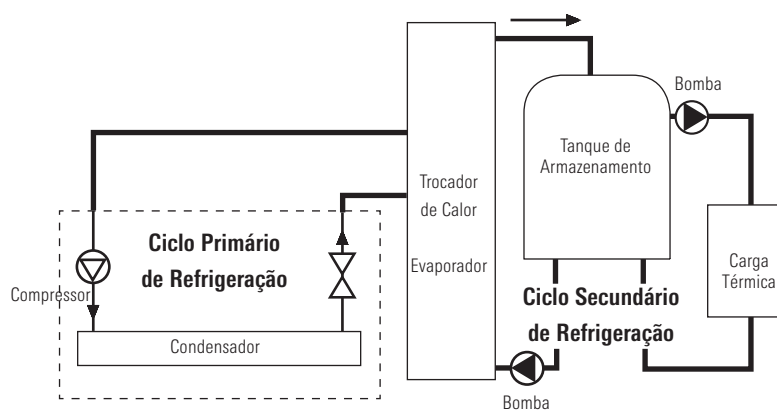


Figure 2 – Refrigeration with secondary fluid with storage of thermal energy

The use of a secondary cooling cycle also increases the flexibility of a refrigeration system. For instance, if the cold will be stored in a tank (Fig. 2), during the cooling cycle, the demands of electric energy can be dislocated to the schedules of low cost of the electric energy or of better income of the refrigeration system. Even if there is not a structure of double or differentiated tariff of electricity, even so energy benefits can be gotten, in virtue of the efficiency of the primary refrigeration cycle to be bigger during the nocturnal period (lower condensation temperature). Also the peak charges can be reduced leveling it to the demand of cold for a longer period of the day, so the capacity of the primary system of refrigeration can be lower.

1.1 Advantages

The use refrigeration indirect systems (using the secondary cooling) results in significant advantages. One of the first impacts of this choice is the considerable reduction of the cooling load, that it can get to 40% of the cooling load, according to Kazachki and Hinde (2006), or up to 85% of

the load of the conventional system (Palm, 2007), leading to the installation of much more compact systems of refrigeration and with a reduced potential of environmental impact. Another profit generated by this practical is the confinement of the primary cooling to the “house of machines” which simplifies the circuit of the cooling, getting a functioning (and, consequently, a temperature of cooling) safer and more stable.

1.2 Disadvantages

To the additional cost referred to the installation of a circulation bomb and an exchanger of intermediate heat, it adds to the operation of the system with a bigger difference of temperature, being equivalent to a better consumption of energy.

Another disadvantage is found in the difficulty of getting compatible the cooling characteristics and operational limits of the secondary ones with the installation necessities.

Conventional fluids as water, ethylene glycol and oil, widely used in different branches of the industry as secondary fluids, present deficiencies like high temperature of freezing and low temperature of evaporation, in the case of the water, and the low thermal conductivity and raised viscosity, in the case of oils and the ethylene glycol.

Synthetic fluids, also known as thermal fluids, have not obtained better performances in heat transference, only extending, moderately, the applicability limits, in terms of its evaporation temperatures and freezing.

1.3 Demands for the secondary fluid

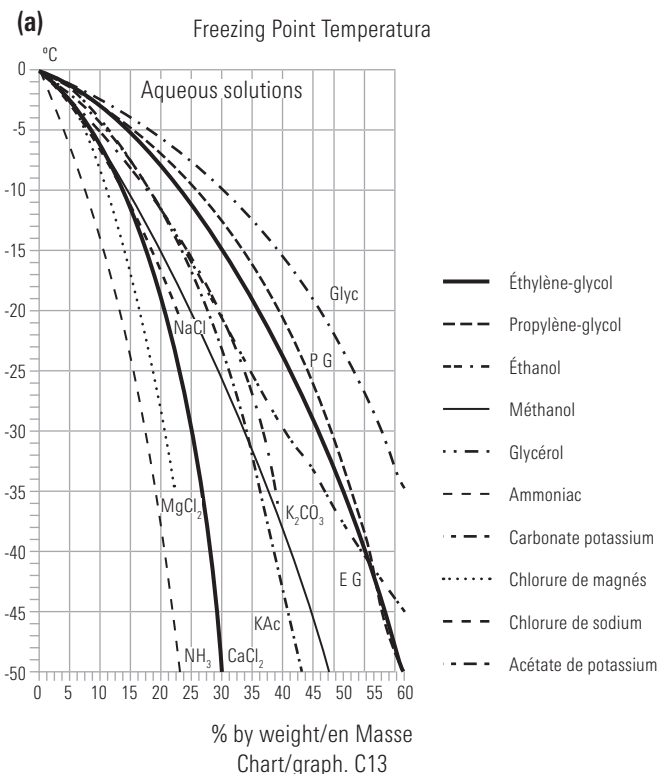
Based on the evidenced in previous items, it is expected from the secondary fluids: a) low viscosity, what results in a reduced loss of pressure and, therefore, a low power of bombardment; b) good performance in the heat transference, what implies in a high specific heat and good thermal conductivity; c) absence of corrosion problems and, on the other hand, expects that the fluid inhibits it; d) compatibility with the materials habitually used; e) adequacy to the security and health regulation, being safe for foods, not toxics, safe to the manipulation, presenting low, or none, environmental impact; f) fire resistant; g) stable chemically and mechanic, fort the separation and degradation; and h) availability to reasonable prices.

1.4 Types of secondary fluids

Among the secondary fluids which are better used there is water, ethylene and propylene glycols, ethylic and methyl alcohol, - glycerin, ammonia, and potassium carbonate solutions, CaCl_2 , MgCl_2 and NaCl .

1.5 Excellent thermophysical properties

Thermophysical properties that determine the choice of one or another secondary cooling are: a) the temperature of the solidification point, that limits the application in refrigeration; b) the temperature of boiling, that limits the application in cooling; c) the superficial tension, the specific mass and dynamic viscosity, which determines the pressure fall and, therefore, the bombardment power; d) the specific heat and the thermal conductivity, which guarantee the performance in the heat exchange; and e) the coefficient of thermal expansion.



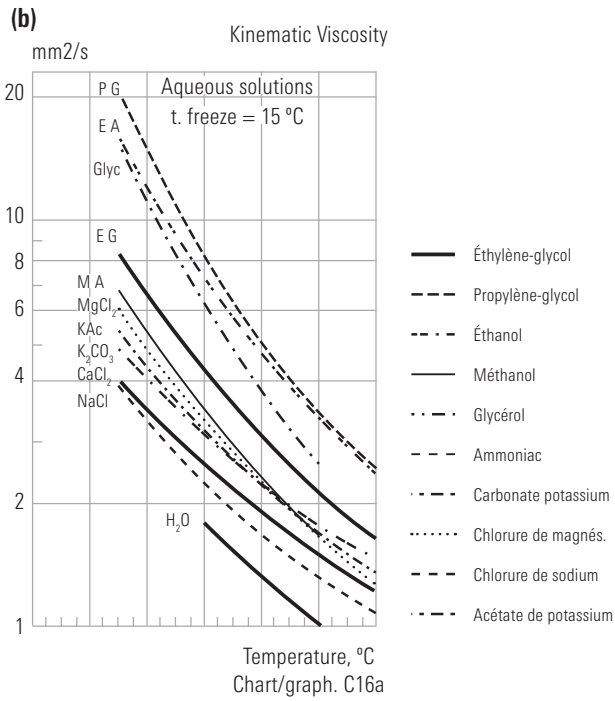
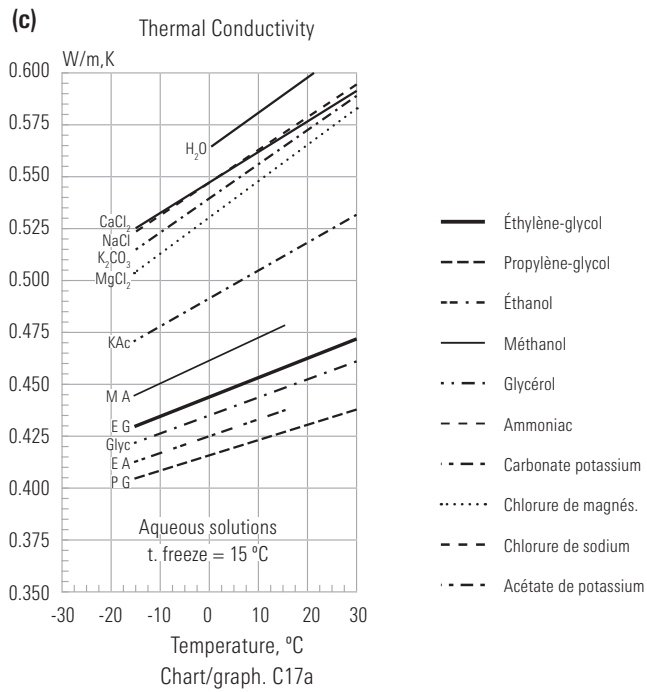


Figure 3 – (a) Temperature of solidification and (b) viscosity cinematic of watery solutions (Melinder, 1997)



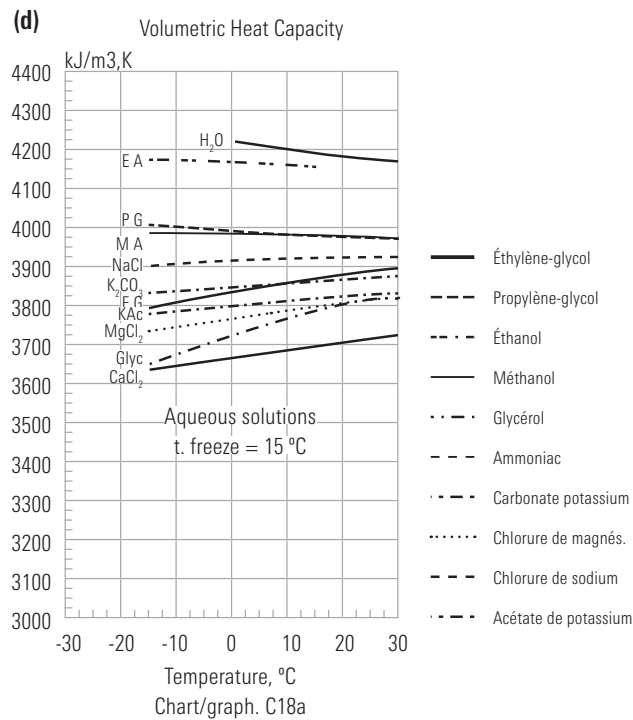


Figure 3 (cont.) – (c) Thermal conductivity and (d) volumetric thermal capacity of watery solutions (Melinder, 1997)

Figures 3a and 3d present the variation with the temperature of some of the relevant properties of watery solutions. In summary, the conclusion is that, to less of the operation impossibility at temperatures below-freezing degrees Celsius, figure 3a, the pure water always presents advantage over any another watery solution, figures 3b, 3c and 3d.

2 Multi-functional fluids

Mixtures of an ideal thermal fluid (continuous phase) with additives (solid particles dispersed phase), prepared to reach one or more specific functions (for example high exchange of heat, magnetization or changeable viscosity) are known as multi-functional fluids. These are divided in: 1) Transporting Fluids of Sensible Heat, which possess low friction or present some increment of heat exchange; and 2) Fluids with Change of Phase.

Two examples will be presented on, for applications as secondary fluids in refrigeration systems: they are, respectively, the ice slurry, already available commercially, and the nanofluids,

which are still in embryonic period of investigation, that's the reason why this study is presented here about the potentiality of this new technology.

2.1 Ice folder

Had been found in literature terms as: ice slurry, liquid ice, binary ice, flo ice, mushy ice, etc. These terms have been used to describe any types of ice crystals with diameters between 25 μm and 4 mm suspended in a watery solution in liquid phase, with or without an agent that lower the temperature of the solidification point (Hansen et al., 2003).A following definition can be adopted to describe ice slurries.

2.1.1 Definition

Ice Slurry consists of dispersed ice particles in a fluid that forms a suspension of two phases. On the other hand, the fine crystalline ice slurry consists of an ice slurry in which occurs an ice particle suspension with a diameter (characteristic) average equal or under than 1,0 mm (Egolf and Kauffeld, 2005).

This last definition, for the fine crystalline ice slurry, is a little arbitrary about the size of crystals. However, these definitions give an idea of the suspensions species which are called ice slurries. In the present time, for ice slurry production, the most used devices are the generators of the scraped surface kind, which produce ice slurry with crystals of average particle diameter characteristic of approximately 200 μm (Egolf and Kauffeld, 2005). It fulfills to remember that the generator of ice slurry, connected to the evaporator, represents a substantial addition to the installation cost.

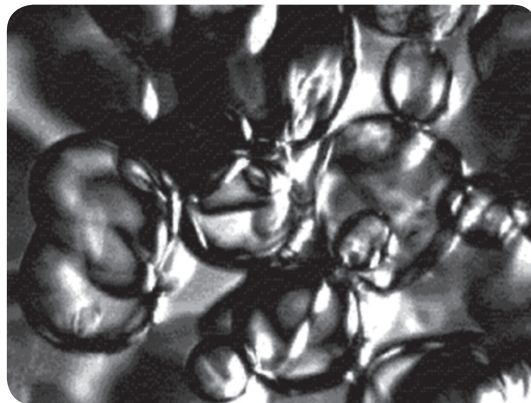


Figure 4 – Ice crystal photograph in ice slurry with size of the 1061 photograph $\mu\text{m} \times 762 \mu\text{m}$ (Egolf and Kauffeld, 2005)

2.1.2 Applications

Ice slurry is a relatively new technology, used with a variety of different purposes, where high performance of cooling is required. Its more diffused use is like secondary cooling fluid in air conditioning systems and thermal energy storage (Fukusako et al., 1999). An interesting example is the air conditioning of aircraft on land, through cold transportation with ice slurry on long distances umbilical lines.

Other ice slurry applications include such areas as food engineering and fishing industry (Fukusako et al. 1999). It can be produced ice slurry from sea water and be applied directly in fish storage tanks. The same way, it is possible to produce ice slurry from watery solutions of sucrose and apply directly in fruits.

Its application extends to the area of medicine, where it is used in less invasive techniques, such as laparoscopic surgeries in the treatment of kidneys. In this specific case, it is induced a hypothermia located in the kidneys with the aid of topical ice slurry, to prevent damages for oxygenation lack (Orvieto et al., 2007).

Researchers of the Energy Laboratory Argonne have been looking for ways to fast cooling of the brain and heart of people who suffer cardiac attacks. Again, topical ice slurry of high fluidity, specially formulated, using compatible chemical composites with human tissues, would be pumped through the carotid artery, vein jugular and lungs, producing hypothermia located of the vital organs. The results show that if it can low the temperature to 25° C in ten minutes, period relatively short, if compared with the conventional methods.

2.1.3 Summary physical properties

The thermophysical properties of the ice slurry really differ from the thermophysical properties of the solution in liquid state of which are produced, because of the suspension of ice crystals in its composition. In Fig. 8 the variation of the thermal conductivity of the ice slurry can be observed with the ice fraction and the concentration of ethanol in the watery solution.

Figure 5 illustrates an important advantage of the ice slurry: its thermal conductivity is bigger than the solution in liquid phase. This characteristic, allied to the possibility of the ice slurry to flow off as a single-phase fluid, favors the mechanism of exchange of heat with a surface.

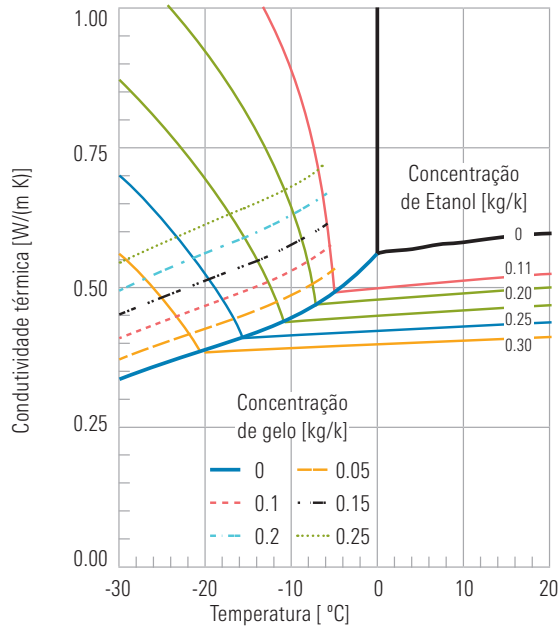


Figure 5 – Variation of the thermal conductivity of the ice slurry with ice fraction and the concentration of ethanol (Ticona, 2007)

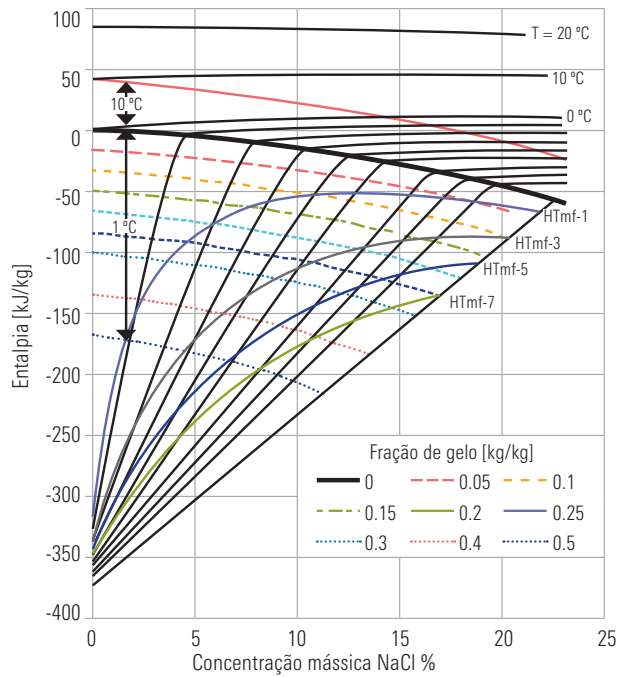


Figure 6 – Variation of the specific enthalpy of the ice slurry with the ice fraction and the concentration of NaCl (Ticona, 2007)

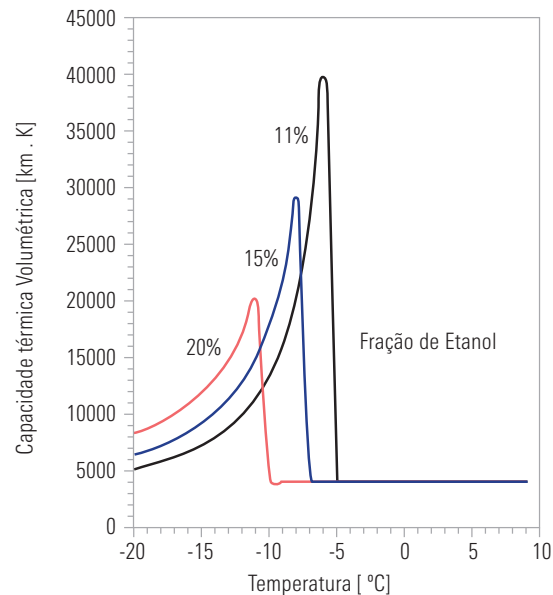


Figure 7 – Volumetric thermal capacity of the ice slurry in function of the temperature (Ticona, 2007)

One of the most important properties of the ice slurry, to evaluate its capacity of cooling, it is its specific enthalpy. Figure 6 shows the variation of the specific enthalpy of the ice slurry with ice fraction and the sodium chloride concentration (NaCl) in the watery solution. The ice slurry possess a bigger volumetric thermal capacity, that is, stores greater amount of thermal energy for unit of volume, as it can be seen in figure 7.

2.2 Nanofluids

The suspension of solid particles and filaments of nanometric dimensions in a fluid base has been propose as a route to increase the performance in the transference of heat of the currently available liquids (Kebllinski et al., 2005), with small or null weight on the fall of pressure of the system, according to Daungthongsuk and Wongwises (2005).

The nanofluids, according to Wen and Ding (2005), can be gotten by means of the mixture of nanoparticles (Xuan and Li, 2000 and Of et al. 2003a, b), previously treated with a substance that takes care of to the dispersant function, in a fluid base (dry particle dispersion). Other known methods as one-step methods (Liu et al. 2006, Zhu et al. 2006) produce nanoparticles in suspension in the fluid-base by a controlled chemical reaction or a sequence of reactions and treatments, dismissing, in some cases, the use of dispersants.

2.2.1 Composition of the nanofluids

Different combinations of nanoparticles and fluid-base have been studied in different conditions: Xuan and Li (2000), Chein and Huang (2005), Liu et al. (2006) and Jang and Choi (2006) had studied copper particles in watery fluid (copper/water). Koo and Kleinstreuer (2005) had fixed the attention in copper oxide spheres in different fluid bases: CuO/ (water, ethylene glycol).

The effect of alumina (Al_2O_3) on different fluids base was studied by Maïga et al. (2005) that studied the combinations Al_2O_3 /(water, ethylene glycol). But Hays et al. (2006) and Lee and Mudawar (2006) had only studied its effect on the water (Al_2O_3 /water).

Other combinations, in more extensive studies, had been carried through for Zhang et al. (2006): Au/Toluene; (Al_2O_3 , CuO, CNT)/water, Hwan et al. (2006a; 2006b): (Cu, CuO, SiO_2 , MWCNT - multi-walled carbon nanotubes)/water; CuO/ethylene glycol, Hwang et al. (2006): (MWCNT, SiO_2 , CuO, GAC)/(water, ethylene glycol, oil, oil silicone, I poli-a-olefin oil - PAO).

Yang et al. (2005) studied the characteristics of carbon nanotubes (CNT) with reason of aspect $l/d = 0, 02$. Wen and Ding (2005) and Zhang et al. (2006) had studied the pair (Ti_2O /water). And Jung et al. (2006), the properties of copper particles, copper oxide and alumina.

2.2.2 Thermal conductivity of the nanofluids

Several studies have been developed in intention to determine the parameters that influence the different properties (thermophysics and transportation) of the nanofluids. Specific heat, thermal conductivity, specific mass and viscosity of the "solution" are some of the focus of these studies, with a bigger emphasis in the research related to the thermal conductivity.

Different works have disclosed an increase of the thermal conductivity related to the fluid-base, in many times exceeding the predictions of well established theories (as the model of Hamilton-Crosser). If confirmed, these results, joined to systematic experiments, new theoretical descriptions will appear, to interpret the thermal behavior of these fluids.

The study and the understanding of the thermal conductivity increase of the nanofluids, according to Hays et al. (2006), it constitutes a seek area relatively young and in growth, but the characterization of samples, especially of the properties in situ, has been incomplete and not very well defined.

Nanoparticles drastically change the properties of fluid base (Wang and Mujumdar, 2006). One of the more studied properties has been the thermal conductivity effective (or apparent) of suspension. A lot of authors, between them Hwang et al. (2006a; 2006b) and Yang et al. (2005), mention the increase of this property associated with the increase of the volumetric fraction of nanoparticles. Hwan et al. (2006b) notices that a volumetric fraction of carbon nanotubes (MWCNT) of 0,01% increases in 11% the thermal conductivity of the water and Liu et al. (2006) that a volumetric fraction of copper particles of 0,1% leads to the increase of 23% of the thermal conductivity of the same fluid base.

Hays et al. (2006) emphasize how the increase of accumulations of Al_2O_3 (related this to the control of pH) decrease the thermal conductivity of the suspension and Koblinski et al. (2005) relate, finding strong dependence, the thermal conductivity to the temperature of the nanofluid.

The application of nanofluids to the cooling of micro channels heat sources (a probable application to the cooling of microprocessors and other integrated circuits) and its thermal and hydrodynamic performance was studied by Chein and Huang (2005), Koo and Kleinstreuer (2005), Jang and Choi (2006) and Lee and Mudawar (2006). The first ones, through theoretical models and experimental correlations foresee the increase of the heat transference, anticipating, also, the not influence of the size of nanoparticles and the volumetric fraction in the fall of pressure of the system. The last ones point, also, to the increase of the coefficient of heat transference in laminar draining, standing out the best thermal performance in the entrance region when compared to the one of developed region. They stand out, finally, the negative effect that nanoparticles cause in the evaporation, in function of the deposition of particles.

Koo and Kleinstreuer (2005) recommend, to this type of devices: raised Prandtl number of the fluid; volumetric fraction of nanoparticles around 4%; raised thermal conductivity of particles; dielectric constant of particles next to the fluid; microchannels with reason of very bigger aspect than the unit; and walls and geometry favorable to the not-accumulation.

Daungthongsuk and Wongwises (2005) and Wang and Mujumdar (2006), in their revisions, designate that it has given more attention to the thermal conductivity than to the performance in the heat transference, with the majority of dedicated articles to the discussion of the effective thermal conductivity and viscosity. Also they point to the low publication number in transference of heat for forced convection. We can add this few works related to evaporation and condensation, amongst they count the studies of Das et al. (2003a, 2003b) and Vasallo et. Al (2004) in conditions of pool boiling.

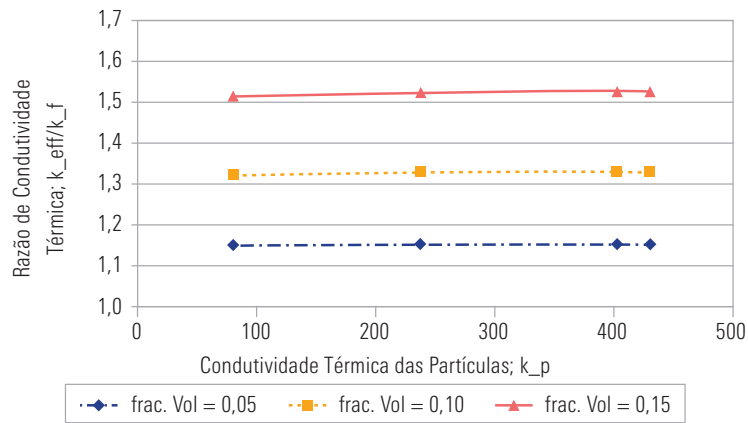


Figure 8 – Behavior of the thermal conductivity of water with particle addition (Puzaesky and Parise, 2007a and 2007b)

Figure 8 presents the behavior of the thermal conductivity of spherical particles suspension, as foreseen for Puzaesky and Parise (2007a, 2007b) as they increase the reason between thermal conductivity of the fluid base and particles, and the particle concentration in the suspension. A strong dependence of the volumetric fraction in the increase of the thermal conductivity is realized.

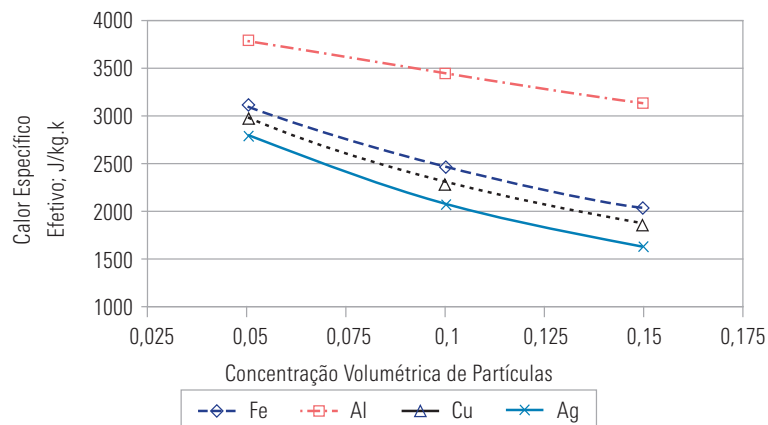


Figure 9 – Behavior of the specific water heat (Puzaesky and Parise, 2007a and 2007b)

However in **figure 9** it can be appreciated as, if adding particles to the fluid base, it diminishes the effective specific heat, independent the used material. It is observed, also, the reduction of the effective specific heat with the increase of the particles concentration of one same material. Being the specific heat and the thermal conductivity of the fluid parameters that really influence the heat

exchange, it becomes necessary an analysis of the effect that the variation of the same ones have on the convective coefficient of heat transference.

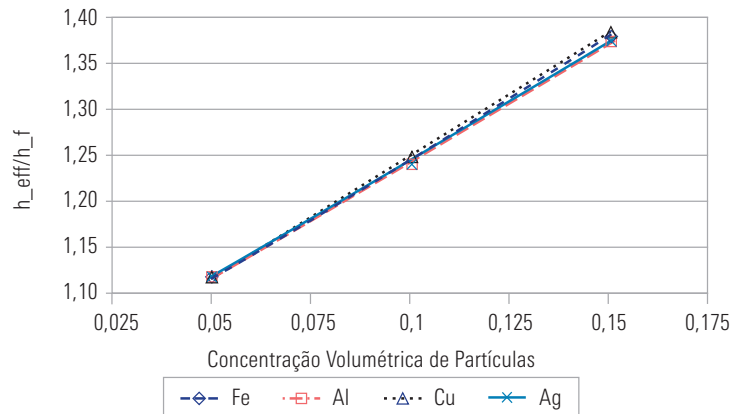


Figure 10 – Behavior of the convective coefficient of heat exchange beside water with particles addition, in an exchanger of the type hoof and coil (Puzaesky and Parise, 2007a and 2007b)

Figure 10 represents the calculation of the convective coefficient of heat transference for the case of the draining of cooled fluid beside of the heat exchanger carcass of the type hoof and coil (Pruzaesky et al., 2001 and 2002). Some considerations and approaches had been applied: constant Reynolds number ($Re = 37$, not affected by the presence of nanoparticles) and cinematic viscosity of the constant suspension and equal to the fluid-base (in the case, water).

It is appreciated in these calculations how the particle concentration has a dominant character in the increase of the heat transference coefficient, since that obtained values really approached to equal particle concentrations of different materials. Still, works had not been found in literature that allows getting a comparison of these results with experimental data.

3 Conclusion

The current demand for refrigeration systems with less environmental impact brought a new focus to the systems of indirect refrigeration that use secondary fluids for the transportation of the cold. In favor of these, it is distinguished significant reduction of the necessary load of cooling. For synthetic fluids, with high GWP, such measure represents immediate palliative for the environmental impact. The case of natural fluids that presents flammability or toxicity, the load reduction is equally

beneficial, in addition to the fact that the secondary circuit will allow the confinement of the compression steam system in security.

If not exceeding its limit of freezing, water is the best option to the secondary fluid. Any other alternative that takes care of the lowest temperatures, will present inferior thermal performance to the water. Unless it leaves for the multi-functional fluid use. Amongst these it was spoken, in the present work, about nanofluids and ice slurry.

Ice slurries, in spite of the biggest cost, in function of the evaporator/generator of folder, represent an efficient way of cold transportation, mainly in systems that make use of the thermal coagulation. For its side, nanofluids present a notable potential of thermal performance, much even so still lack of intense technological development that takes care of to the questions of physical properties, stability and cost.

4 References

- Bedecarrats, J., Strub, F., Peuvrel, C. e Dumas, J. **"Heat transfer and pressure drop of ice slurry in a heat exchanger"**, International Congress of Refrigeration, 2003, Washington, DC, EUA.
- Chein, R. e Huang, G. **"Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids"**. Applied Thermal Engineering, v. 25, pp. 3104–3114, 2005.
- Daungthongsuk, W. e Wongwises, S. **"A critical review of convective heat transfer of nanofluids"**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005.
- Das, S. K., Putra, N. e Roetzel, W. **"Pool boiling characteristics of nano-fluids"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 46 (5), pp. 851-862, 2003a.
- Das, S. K., Putra, N. e Roetzel, W. **"Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes"**. International Journal of Multiphase Flow, v. 29 (8), pp. 1237-1247, 2003b.
- Egolf, P. W. **"Ice slurry, a promising technology. (technical note of the IIR)"**. International Institute of Refrigeration, pp. 1-3, July 2004.
- Egolf, P. W. e Kauffeld, M. **"From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications"**. International Journal of Refrigeration, vol. 28, pp. 4-12, January 2005.
- Fukusako, S., Kozawa, Y., Yamada, M. e Tanino, M. **"Research and development activities on ice slurries on Japan"**. Second Workshop IIR on ice slurries, Yverdon-les Bains, Switzerland, pp. 83-105, 1999.
- Hansen, M. T., Kauffeld, M., Radosevic, M. e Zwiag, T. **"Investigation of ice crystal growth and geometrical characterization in ice slurry (rp-1166)"**. HVAC&R Research, vol. 9, pp. 19-31, 2003.

- Hays, A., Marsh, C. P., Alvarado, J. E Franks, R. **“The Effect of Nanoparticle Agglomeration on Enhanced Nanofluidic Thermal Conductivity”**. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20, 2006
- Hwang, Y. J., Ahn, Y. C., Shin, H. S., Lee, C. G., Kim, G. T., Park, H. S. e Lee, J. K. **“Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids”**. Current Applied Physics, v. 6, pp. 1068–1071, 2006a.
- Hwang, Y. J., Park, H. S., Lee, J. K. e Jung, W. H. **“Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids”**. Current Applied Physics, 6S1, pp. e67–e71, 2006b.
- Jang, S. P. e Choi, S. U. S. **“Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids”**. Applied Thermal Engineering, v. 26, pp. 2457–2463, 2006.
- Kazachki, G. S. e Hinde, D. K. **“Secondary coolant systems for supermarkets”**. ASHRAE Journal. September, pp. 34-46, 2006.
- Kebllinski, P., Eastman, j. A. e Cahill, D. G. **“Nanofluids for thermal transport”**. MaterialsToday, June, 2005.
- Koo, J. e Kleinstreuer, C. **“Laminar nanofluid flow in microheat-sinks”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 2652–2661, 2005
- Lee, J. e Mudawar, I. **“Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, article in press.
- Liu, M. S., Lin, M. C. C., Tsai, C. Y. e Wang, C. C. **“Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 49, pp. 3028–3033, 2006.
- Maïga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G. e Galanis, N. **“Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows”**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 26, pp. 530–546, 2005.
- Meewisse, J. W. **“Fluidized Bed Ice Slurry Generator for Enhanced Secondary Cooling Systems”**. PhD thesis, Delft University, Nederland, 2004.
- Melinder, Å. **“Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, Tables and diagrams for the refrigeration industry”**. International Institute of Refrigeration, France, vol. 1, 1st ed., 1997.
- Orvieto, M. A., Zorn, K. C., Lyon, M. B, Tohurst, S. R., Rapp, D. E., Mikhail, A. A., Oras, J. J., Son, H., Kasza, K. E., Brendler, C. B. e Shalhav, A. L. **“Laparoscopic ice slurry coolant for renal hypothermia”**. International Journal of Urology, vol. 177, pp. 382-385, 2007.

- Palm, B. **"Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant"**. Applied Thermal Engineering, vol. 27 (10), pp. 1693-1701, 2007.
- Pruzaesky, F. C., Braga, S. L. e Parise, J. A. R. **"Determinação do coeficiente de troca de calor no lado da carcaça de um trocador de calor tipo casco-serpentina"**. MERCOFRIO 2002 - Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Florianópolis, Santa Catarina. 20 a 23 de agosto, 2002.
- Pruzaesky, F. C., Braga, S. L. e Parise, J. A. R. **"Um modelo de simulação para os evaporadores casco e serpentina"**. CIAR 2001 – VI Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración. Bs.As., Argentina. 2001.
- Pruzaesky, F. C. e Parise, José Alberto Reis. **"Uso de nanofluidos em aplicações de Refrigeração"**. Artigo submetido ao X CONBRAVA, São Paulo, SP, Brasil. 19 – 21 de setembro, 2007.
- Pruzaesky, F. C. e Parise, José Alberto Reis. **Estudo Preliminar Sobre a Aplicação de Nanofluidos em Processos de Transferência de Calor**. CITARE 2007 – Congresso Ibero-Americano de Inovação Tecnológica e Áreas estratégicas / NanoBio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 11 – 14 de Junho, 2007.
- Ticona, E. M. **"Determinação Experimental das Características de Transferência de Calor de um Gerador de Pasta de Gelo"**. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Brasil, 2007.
- Vassallo, P., Kumar, R. e D'Amico, S. **"Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 47 (2), pp. 407-411, 2004.
- Wen, D. e Ding, Y. **"Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications"**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 26, pp. 855–864, 2005.
- Wang, X. e Mujumdar, A. S. **"Heat transfer characteristics of nanofluids: a review"**. International Journal of Thermal Sciences, article in press.
- Xuan, Y. e Li, Q. **"Heat transfer enhancement of nanofluids"**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 21, pp. 58-64, 2000.
- Yang, Y. Zhang, Z. G., Grulke, E. A., Anderson, W. B. e Wu, G. **"Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 1107–1116, 2005.
- Zhang, X., Gu, H. e Fujii, M. **"Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles"**. Experimental Thermal and Fluid Science, article in press.
- Zhu, H., Linb, Y. e Yin, Y. **"A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids"**. Journal of Colloid and Interface Science, v. 277, pp. 100–103, 2004.

The use of hydrocarbon refrigerant fluids – current state and tendencies

ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO, DR. ENG.

Instituto Mauá de Tecnologia (Mauá Technological Institute)

E-mail: robertopeixoto@maua.br

ABSTRACT

Since the establishment of Montreal Protocol, the refrigeration industry has been searching substitutes to CFCs and HCFCs refrigerants. The adoption of hydrocarbons (HCs) as refrigerants in some refrigeration and air conditioning applications, specially isobutane (HC-600a) in domestic refrigeration, was largely a result of environmental organizations pressure and researches, and the evaluation of alternatives that was leading by enterprises, universities and researches institutes. It is a consequence of the fact that HCs have zero ozone potential of destruction and also minimal global warming potential (GWP), and they are substances that is easily founded in the nature, cooperate to its compatibility with global environment.

Hydrocarbons are technically viable for using in all kinds of systems and can be used in a wide range of evaporation temperature up to the lower limit of $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$, however practical applications are restricted by security codes and national regulations. Hydrocarbons are flammable and appropriate security measures should be used during its manipulation, manufacturing, maintenance and technical assistance, and in the final equipment disposition. Many countries have laws and technical standards about the using limitation and the necessary security aspects.

In this article are presented the current aspects and the main questions related to the use of hydrocarbons refrigerants in international and national cenaries, considering refrigeration and air conditioning applications.

1 Introduction

In the middle of XIX century was developed the refrigeration technology using the thermodynamic vapor compression cycle technology with four basic components (compressor, condenser, evaporator and device expansion) and a working fluid, called refrigerant fluid, or simply refrigerant. In general, refrigeration and air conditioning industry evolved significantly during the XX century, and has been present in many social sectors.

Refrigeration, air conditioning and heat pump applications represent the major consumer of halogenated chemical substances used as refrigerants; it is also one of the most important energy sector users in our society today. It is estimated that, on average, for developed countries, the refrigeration and air conditioning sectors are responsible for 10-20% of electricity consumption.

The economic impact of refrigeration applications is more significant than we can imagine. Estimates indicate 300 millions tonnes of continually refrigerating goods, with huge annual electricity consumption, and about US\$ 100 billions in equipment investments, where the estimated value of the products treated by refrigeration are about four times this sum. It is one of the reasons why economic impacts of the refrigerant chemical substances elimination (as CFCs and HCFCs in a nearly future) were and have been hardly to calculate.

The refrigerant selection process is complex, involving the investigation of huge number parameters, including:

- ∴ thermodynamic and transportation properties;
- ∴ ranges of temperature;
- ∴ pressure and temperature relations;
- ∴ compability with materials and lubricant oil;
- ∴ healthy, security and flammability aspects;
- ∴ environmental parameters as ODP, GWP.

Since the establishment of Montreal Protocol, the refrigeration industry has been searching substitutes to CFCs and HCFCs refrigerants. The adoption of hydrocarbons (HCs) as refrigerants in some refrigeration and air conditioning applications, specially isobutane (HC-600a) in the domestic

refrigeration, was largely a result of environmental organizations pressure and researches, and the evaluation of alternatives that was led by enterprises, universities and researches institutes. It is a consequence of the fact that HCs has zero ozone depletion potential, zero or minimal global warming potential (GWP), and they are substances that are easily founded in the nature, cooperate to their compatibility with global environment.

Hydrocarbons are technically viable for using in all kinds of systems and can be used in a wide range of evaporation temperature up to the lower limit of $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$, however practical applications are restricted by security codes and national regulations. Hydrocarbons are flammable and appropriate security measures should be used during its manipulation, and in the refrigeration equipment manufacturing, maintenance and technical assistance, and in the final equipment disposition. Many countries have laws and technical standards about the using limitation and the necessary security aspects. The table below presents requirements related to maximum charge permissible established in international standards.

Because of their excellent thermodynamic characteristics, hydrocarbon refrigerant fluids cooperate to refrigeration systems having an energetically efficient operation. They are heavier than air, and have an anesthetic and suffocating effect in high concentrations. An important aspect to highlight is that hydrocarbons are available with low cost all over the world.

The utilization of hydrocarbon refrigerants requires that engineers and technicians involved in development, manufacturing, design, operation and technical assistance, have orientation and specific training related to additional procedures and precautions associated to the use of flammable refrigerants.

Many publications report that systems with HCs present a higher efficiency compared to equivalent systems using HFCs. Others claim that this higher efficiency can also be achieved by HFCs systems whether extra costs used to meet the necessary security requirements for HCs systems would be used to improve the efficiency of HFCs systems.

Enterprises as Unilever and Coke are committed to don't use anymore HFCs in its refrigeration equipments and to increase its energy efficiency, and the use of HC refrigerants is one of the alternatives in implementation.

Table 1 – Requirements related to hc refrigerant charge presented by main standards

Standard	Type of Equipment	Maximum Charge Limits for HCs	Others aspects treated in the standard
EN 378	Commercial and industrial	<p>Charge < 150 g: (without security requirements for hermetic systems)</p> <p>Charge > 150g: (requirements related to room ventilation)</p> <p>Charge > 5kg: (requirements related to safety valve, HC detector, mechanic ventilation)</p>	Components, security devices, local installation, maintenance.
ISO 5149	Commercial and industrial	Depends on the application	
IEC 60335-2-24	Small refrigerators and freezers	150 g	Pressure tests
IEC 60335-2-40	Compact equipments of air conditioning and heat pumps	1 kg or 5 kg in external ambient	Pressure tests Maintenance
IEC 60335-2-89	Compact commercial freezers and refrigerators	150 g	Pressure tests

2 Issues related to hfc's use: Kyoto Protocol and natural refrigerants

Hydrofluorcarbon (HFC) refrigerants were developed in eighty's and ninety's as alternatives refrigerants to CFCs and HCFCs. HFCs don't have chlorine, and in this way, don't destroy the ozone layer but contribute for global warming. HFCs are gases that cause greenhouse effect and they are in the group of gases controlled by Kyoto Protocol. These gases are: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitric oxide (N₂O), hydrofluorcarbons (HFCs), perfluorcarbons (PFCs) and hexafluoride of sulphur (SF₆).

According to Kyoto Protocol, individual gases emissions of greenhouse effect would be integrated as equivalents CO₂ emissions utilizing its global warming potential (GWP). Many developed countries should reduce its equivalents CO₂ emissions 5,2% down the levels of 1990 to CO₂, CH₄, N₂O, and levels of 1995 to HFCs, PFCs, SF₆ during the 2008-2012 period.

Hydrocarbons with ammonia, CO₂ and water belong to a group named “natural refrigerants”. All “natural refrigerants” exist in material cycles present in the nature even without human interference. Evolutions and technological innovations have helped in the consideration of “natural refrigerants” as a safe and economic solution for applications in many areas. Because of smaller environmental impacts and for being more appropriated in a sustainable technological development perspective, refrigeration systems with natural refrigerants could have an important role in the future as technical solution in many applications.

The use of “natural refrigerants” is also defended in an economic point of view. “Natural refrigerants” are cheaper, what have a positive effect not only in associated costs related to initial refrigerant charge in an installation, but also considering the operational costs due to reposition need according to leaks. “Natural refrigerants” are further highly efficient, what help to decrease energy consumption in an installation. On the other hand, due to security questions, the investments costs for installations that use “natural refrigerants” are always 10 to 20 percent higher than installations that use synthetic refrigerants, depending on type and system size. These aspects could be compensated for lower operational costs related to lower refrigerant cost for maintenance and reduced energy consumption.

3 International cenary

Current state and main questions related to utilizations of hydrocarbons refrigerants in international cenary considering many refrigeration and air conditioning applications are following presented.

3.1 Refrigeration

3.1.1 Domestic Refrigeration

In global panorama, HC-600a and HFC-134a continue being dominant alternatives for the replacement of CFC-12 in new domestic refrigeration equipment. Others alternatives candidates have regional call, mostly due to availability of specific refrigerants or appropriated compressors. We can point as regional candidate examples: HC-600a and HFC-152a mixture in Russia, HC-600a

and HC-290 mixture in India. It is important to mention that application of HC-600a/HC-290 mixture in Europe during 1990's was a direction pass to a final transition to HC-600a.

3.1.1.1 Questions related to repairs and maintenance in field

Today, the servicing sector of domestic and compact commercial refrigeration equipment have in many countries a new reality, characterized by using of multiplies refrigerants. Currently, there is a need for more cleaning of refrigerant circuit dictated by reducing gaps in high efficient compressors and requirement of refrigerants purity. Sensitivity to polyester oil moisture requires a careful control of moisture levels when we use HFC-134a refrigerant. Flammable nature of hydrocarbons requires, when we use HC-600a refrigerant, a careful control of potential sources of ignition. Presence of multiples refrigerants in service sector increase the probability of errors in system refrigerant charging procedure referred to quantity and refrigerant type.

3.1.1.2 HCs refrigerant uses in some developing countries

Use of hydrocarbon refrigerant fluids in India presents follow characteristics:

- ∴ A domestic refrigeration manufacture is utilizing as refrigerant a HCs mixture (HC-600a e HC-290). This enterprise is responsible for 20% of Indian production, which is currently 3, 5 millions of refrigerators.
- ∴ Some efforts were made to disseminate and promote the use of HC refrigerants in commercial refrigeration products ("stand-alone"), but they haven't been advancing due to the fact that main users were enterprises that preferred HFC-134a. This situation can change according to principles announced by Unilever and Coca Cola.
- ∴ Some efforts are still being made for retrofitting of domestic refrigerators and commercial refrigeration products; it is expected that they show more results after 2007 when the availability of CFCs will decrease.

Studies developed by PNUMA (UNEP) in Indonesia, Costa Rica and Cuba were reported in UNEP, 1999.

In Cuba, since 1994 was developed a refrigerant from GLP (liquefied petroleum gas) constituted by a hydrocarbons ternary mixture (propane, isobutane and n-butane), called LB-12, that have been using as a "drop-in" substitute for CFC-12 refrigerant in domestic refrigerators, and small refrigerators and commercial freezers. 1040 technicians were trained for working in these conversion activities of equipment with CFC-12. Production of domestic refrigerators with isobutane refrigerant have began since 1997, and since 2001, with GTZ and Environmental

Agency of Canada support, a distillation plant was installed to produce propane and isobutane with high purity level. Since 2003 was accounted the conversion of 400.000 domestic refrigerators and 10.000 commercial refrigerators to LB-12; and the production of 40.000 refrigerators with isobutane refrigerant.

3.1.3 Commercial refrigeration

Commercial refrigeration is composed for three kinds of equipments: compact unities (“standalone”), condensing unities and centralized systems.

Some autonomous equipments (“stand-alone”), that have similar technology to domestic refrigerators and use hydrocarbons as refrigerants, are available in europeans countries, with reduced charge refrigerant to obey the European security standards EN 378¹ from 1999. Exhibitors, “vending machines” and small commercial equipments were developed by many companies in many countries using HC-600 a, HC-290 and HC mixtures as refrigerant. Limitations of HC charge refrigerant are specified in security standards (e.g. EN 378, IEC 60335-2-89), where maximum quantities for each circuit depends on application. Despite HC charging tend to be approximately 50% lower than HFCs and HCFCs equivalents, due to low density of HC refrigerant, what decreases the impact of these limits. Recent developments using charge minimization techniques make possible to predict that charges in future systems will be smaller.

In European supermarket refrigeration area, indirect systems have been receiving much more attention to limit charge refrigerants (whatever the kind of refrigerant) or to allow the use of ammonia and hydrocarbons refrigerants.

Systems with ammonia and hydrocarbons as primary refrigerants in indirect systems (including HC 1270, HC 290 and HC 290/170 mixture) have been implanted and been operating in many European countries. Some published results show that indirect systems with ammonia and hydrocarbons present initial cost 10% to 35% higher, and have energy consumption 5% to 20% higher than direct expansion systems (IPCC/TEAP, 2005) due to additional requirements of the system (heat exchangers and pumps for circulation with its costs and penalties of energy consumption). The work to improve the indirect systems continues as goals to decrease energy cost and consumption in these systems.

¹ European norm EN 378 “Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements” refers to security and environmental requirements of refrigeration system and contain four parts: 1: Basic requirements, definitions, classifications and selection criteria; 2: Design, building, test and documentation; 3: Installation and personal protection; 4: Operation, maintenance, repair and collection.

3.1.3 Industrial refrigeration and cold storage

HC refrigerants are used in some industrial refrigeration equipments including HC-290, HC-1270 and HC-290/600a mixtures. All these refrigerants have saturation condition (pressure and temperature) very similar to HCFC-22 and CFC-502. System performance, considering its efficiency, is comparable and, in some cases, superior than halocarbons fluids systems. Beyond specific security aspects, normal refrigeration procedures that are used for HCFCs and CFCs systems could be used without relevant damage for system integrity.

According to preoccupations with flammability, considerations in project as those detailed in relevant security standards should be adopted. Additional security measures should be considered for repairing and maintenance. Many European standards allow HCs use in industrial applications and indicate specific security requirements.

3.1.4 Refrigerated transport

Refrigerated transport sector includes transport of chilled products in refrigerated ships, ships containers, trucks and refrigerated trains.

Refrigerated trucks using HC-290 (propane) refrigerant were developed in Australia, Germany and in others Europeans countries, and they are commercially available. The system demands detector of leaks and special training for drivers to ensure a safe operation.

Technically, this solution could be adopted in world level in refrigeration systems installed in certain kinds of trucks and trains, particularly in compact systems. However systems in use would have to be adapted to consider some regulations that impose special requirements (for example for garages etc). It is possible that changes for hydrocarbons could be limited for refrigerated truck in national level, it means, for transporting inside certain country without cross the boundaries.

The use of hydrocarbons refrigerant in refrigerated transport applications will demand additional security measures, increasing system cost, and in the beginning probably insurance values too. In refrigerated containers, could also demand changes in transporters ships.

3.2 Compacts air conditioning equipment

In some categories of products, equipment with low refrigerant charge, hydrocarbon refrigerants could also be appropriate substitutes for HCFC-22. For these, it is necessary develop international security standards to define specific requirements of project and application (installation, maintenance, etc.).

Detailed information to project the equipments with HCs are provided in ACR, 2000, a document that presents guidelines for projects of refrigeration and air conditioning systems using hydrocarbon refrigerants.

Small air conditioning compact equipment with low charge of hydrocarbon refrigerant (HC-290) are manufactured in some countries in Europe (for example by Italian enterprise DeLonghi).

Factors that are considered as obstacles for extension and application of hydrocarbons refrigerants in air conditioning systems are security problems related to manipulation of significant levels of HC charge, establishment of technical standards for installation procedures and the need training of technicians for service in field. The use of hydrocarbons in equipment with HC refrigerant charge higher than 1 kg has been the focus of development of significant risk analyses activities and security standards.

Many organizations conducted risk evaluation of air conditioning using hydrocarbon refrigerants. Most of these evaluations conclude that the risk of fire or explosion is reasonably low and is proportional to quantity of refrigerant in the system. However, the question more significant that should be analyzed by manufactures when they consider the application of hydrocarbon refrigerants is the determination of a acceptable level of risk and the associated responsibility.

The final decision about hydrocarbon refrigerants in air conditioning equipment seems to be basically founded in financial aspects.

3.3 Chillers

Tough hydrocarbons refrigerants had a long tradition of application in industrial chillers in petrochemical plants, before 1997/98 they haven't been used in chillers for air conditioning applications due to questions related to system security.

Currently, many European manufactures sell chillers with hydrocarbons refrigerants for many capacities and applications. There are chillers in the market (with condensation) refrigerated by air, and water for applications of evaporation temperatures medium and high using HC-1270 (propylene), HC-290 (propane) refrigerants, and a HC-290/HC-170 mixture (propane / ethanol).

Chillers / reversible heat pump using HC-290 as refrigerant are available in capabilities up to 173 KW with maximum charge of propane of 15 kg. The most important markets are office buildings, cooling in industrial process and supermarket where they are used in secondary refrigeration systems. In these cases, chiller is, in general, installed in a machinery room with a fan resistant to explosion (without sparks. An alternative configuration is the outdoor external installation of chiller..

The cost of chillers with HC refrigerants could be higher than HCFCs or HFCs refrigerant due to the fact that chillers with hydrocarbons are still equipment for a niche marketing.

Hydrocarbon refrigerants are used in centrifugal chillers in petrochemical plants where materials very dangerous are daily used and workers are highly qualified in security measures and to emergence situations.

3.4 Heat pumps

In many European countries, hydrocarbons have been considered as a viable option to substitute CFCs and HCFCs in residential heat pumps of low refrigerant charge. The most important hydrocarbons for applications in heat pumps of medium temperature are propane (HC-290) and ethanol/propane mixtures (HC-170/HC-290). Many U. S. manufactures use HC-290 or HC-1270 as refrigerant in small residential and commercial heat pumps, water-water and air-water.

In Brazil, due to climatic characteristics the use of heat pump for residential warming almost don't exist, unless in small scale in south states using reversible equipment of air conditioning (refrigeration in summer and warming in winter). However heat pumps used for swimming pools water heating have presented an increase. Because of its installation conditions (in general outdoors) and low refrigerant charge, they could use hydrocarbon refrigerants (especially propane).

3.5 Mobile Air Conditioning Systems (MAC)

Mobile air conditioning systems include air conditioning systems installed in cars, trucks and bus.

Vehicles built before 1995 used CFC-12 as refrigerant. After Montreal protocol, basically all new vehicles with air conditioning systems were equipped with HFC-134a refrigerant. There is a possibility, according to automotive industry representatives, that an alternative refrigerant could be introduced to compete with or replace HFC-134a.

One of the most promising alternatives that have been quite investigated is the use of CO₂ as refrigerant in a transcritical cycle (cycle which processes happen above the critic temperature of substance). This technology has been developed by many automotive industries in cooperation with suppliers of mobile air conditioning components.

Beyond CO₂ the use of flammable refrigerants (especially HFC-152 HFC-152a and HC-290 – propane) was proposed to substitute HFC-134a. It should be noted that the use of HC refrigerants

or other flammables, in future systems, could or not be made by using systems with the same configurations adopted currently for HFC-134a, it means, direct expansion, due to security question. An alternative for this option could be the adoption of system configuration based on secondary circuit technology.

One aspect that deserves to be mentioned in the use of propane, the best hydrocarbon to be used as refrigerant in vehicle air conditioning system, is its availability. Propane is used universally for warming and cooking. As a result, its safe manipulation is very common all over the world. It could be an advantage in Article 5(1) countries. For direct expansion systems using propane the charge of refrigerant necessary for a medium vehicle would be relatively small, about 300 g. This charge would be much lower for a secondary circuit. Because of the extreme propane flammability, its use could be restricted to secondary circuit systems.

4 National scenario

There is a domestic refrigeration enterprise in Brazil that have been producing and selling in national market, and also to export, domestic refrigerators using HC refrigerant; this is the case of Bosch and its plant in Hortolândia, São Paulo. Another enterprise, Multibras, in its plant in Joinville, Santa Catarina, produces domestic refrigerators with HC but only to export, especially to Europe.

National enterprises of commercial refrigerators and freezers provide equipment for enterprises that established policies to not use HFCs, as the case of Unilever-Kibon that should adopt this determination and start to use HCs in some products still in 2006, in national market..

Considering the international scenario of growing use of HC refrigerants and relevance to disseminate information and discuss main aspects related to use of this technology, the Brazilian Ministry of Environment (MMA in Portuguese) promoted a seminary called: "The Use of Hydrocarbon Fluids Refrigerant: Current Situation and Future Tendencies". The seminary was organized by Ozone Centre of Environmental Quality Directory of MMA with a German Agency to international cooperation – GTZ, and it happened in São Paulo in September 19th and 18th, 2005.

The main goals were:

- ∴ Presents the state of the art of refrigeration technology with hydrocarbon refrigerants and its use in many countries, in new equipment building as well in technical assistance and conversion of equipments that already exist.

- ∴ Discuss technological aspects related to regulation and technical standards in order to help establishing specific policies in business and governmental level.

The seminar had many presentations with national and international lecturers. In the end of first day, the participants answered a questionnaire about hydrocarbon refrigerant technology to help the evaluation about potentialities and perspectives for using these refrigerants in Brazil. In the second day, the final phase of the seminar, participants were organized in groups that discussed hydrocarbon refrigerant technology considering the following aspects: training of refrigeration technicians, security questions, policies and governmental actions, and possibility to retrofit CFCs equipment to eliminate CFCs use.

5 Conclusions and recommendations

Analyses made during the elaboration of this study, contacts with many enterprises, institutions, and industry associations; and questions and suggestions emerged in the seminar about hydrocarbon refrigerants, are the basis for considering the main points, mentioned below, in governmental and enterprise context to forward future actions related to use of HC refrigerants technologies in Brazil.

- ∴ HCs refrigerant technology is consolidated in some refrigeration and air conditioning applications (domestic and commercial refrigeration “stand alone”) and is evolving in others segments (uses as primary refrigerant in secondary refrigeration systems for supermarkets, chillers and heat pumps);
- ∴ Security questions have been internationally discussed and have already had many technical standards that help its resolution;
- ∴ In Brazil, the major part of installed base of domestic and commercial refrigerators and freezers still have CFC-12 as refrigerant due to long life of these equipment, what slows the phaseout of CFC-12 in service operations. This fact creates an opportunity to use drop-in options, including HC mixtures;
- ∴ Some Brazilian manufactures have already used HC refrigerants in export products. In the domestic market already exists one manufacturer that offers domestic refrigerators with HC refrigerant. Others domestic and commercial refrigerator manufacturers that manufacture HC equipment to export, have been evaluating the possibilities to put their products in national market.

- ∴ International market already has some restrictions to HFCs uses in specific RAC applications, this is the case of some countries in European Union. Beyond it, the policy established by some global business groups (Unilever, Coke, MacDonalDs) motivate evaluations to adopt HC refrigerants technologies in Brazil;
- ∴ The use of hydrocarbon refrigerants technology present many advantages: better energy efficiency in some applications, low cost of refrigerant and its import, possibility to national supply, compressors built in Brazil, lower environmental impact;
- ∴ The main negative aspect of hydrocarbon refrigerants technology is the fact that it is flammable and explosive, what worries about security, additional costs and workers training;
- ∴ HC refrigerants use for conversion of CFC-12 domestic and commercial refrigerators should be analyzed considering cost and safety. The option that seems to be more attractive is when conversion doesn't require significant equipment changes;
- ∴ The problem of not having local supply of HC refrigerants could be overcome with plants using GLP. The cost presented by a speaker in the seminar about HCs refrigerants for a plant with 100 ton. annual production capacity is about €330,000;
- ∴ We can note that there is a lack in divulgation about hydrocarbon refrigerants technology in Brazil. MMA could promote a national divulgation with more aggressive marketing;
- ∴ Related to logistic aspect to be considered in the discussion about HC refrigerants distribution, it can be considered that the national network of GLP distribution could be used;
- ∴ It is noted the lack of qualified mechanics to work with HC refrigerants and one of the possible actions to promote the use of these refrigerants should be building a training program to qualify and train these professionals in this technology;
- ∴ National technical standards should be created considering as reference international standards that already exist. Industry and professional associations have an important role in this mobilization;
- ∴ Discussions about specific aspects of HC refrigerants mentioned in the seminar should be encouraged by organizing other meetings with support of industrial associations, universities and technical education institutions.

6 Bibliography

ACR00, “**Guidelines for the Safe Use of Hydrocarbon Refrigerants**”, Air Conditioning and Refrigeration Industry Board, London UK, 2000

ACRIB, Air-conditioning and Refrigeration Industry Board, *Guidelines for the use of Hydrocarbon Refrigerant in Static Refrigeration and Air-conditioning Systems*, Carshalton, UK, 2000.

ASHRAE, Handbook Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, USA, 1997.

Calor Gas Refrigeration Taking Care, *Fact Sheets*, Slough, UK, 1994.

Chol, D. K., Domanski, P.A., Didion, D., Evaluation of Flammable Refrigerants for Use in a Water-to-Water Residential Heat Pump, Applications for Natural Refrigerants, Conference Proc, Aarhus, Denmark, 1996.

Deloitte & Touche, Assessment of the Prospects for Hydrocarbon Technology in the Global Domestic Refrigeration Market, Deloitte & Touche Consulting Group, London, England, 1996.

Elefsen, F. et al, Field test of 75 R404A and R290 ice cream freezers in Australia, 5th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, September 17-20, Guangzhou, China., 2002.

Elefsen, F., Pedersen, P.H., Mogensen, L. Going towards natural refrigerants: experience from Danish industry, Environmental project no. 301, Ministry of Environment and Energy Denmark, 1995.

GTZ, Yearbook 1996, Hydrocarbon Technology II, Eschborn, Germany, 1996.

IPCC/TEAP, Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons, Cambridge University press, 2005.

Kruse, H., The State of the Art of Hydrocarbon Technology in Household Refrigeration, Proc. Of the Int. Conference on Ozone Protection Technologies, Washington D.C., USA, 1996.

PEIXOTO, R. A. Impacto Ambiental de Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado. Revista da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, ventilação e Aquecimento - ABRAVA, 1999.

PEIXOTO, R. A., Fluidos Refrigerantes Hidrocarbonetos – Uso Atual e Perspectivas Futuras, Núcleo de Ozônio da Diretoria de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2006.

UNEP, (United Nations Environment Programme), 2002: Report of the Refrigeration, Air 41 Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (2002 Assessment).

UNEP, Study on the Potential for Hydrocarbon Replacements in Existing Domestic and Small Commercial Refrigeration Appliances, 1999.

Use of hydrocarbon refrigerants in residential application

JOÃO M. D. PIMENTA

University of Brasilia, Department of Mechanical Engineering

Laboratory of Air Conditioning and Refrigeration

pimenta@unb.br – www.laar.unb.br

ABSTRACT

The use of hydrocarbons as a refrigerant in residential air conditioning and refrigeration systems have expanded and consolidated in recent decades. Currently the search for refrigerants that don't cause impacts on environment has focused on the development of natural fluids, among them hydrocarbons, have an important role to play, particularly in residential segment. This paper presents a review of hydrocarbons uses in residential applications, discussing technical aspects related to its energy performance, cost, conditions for safe use and prospects of research.

1 Introduction

Since the advent of vapor compression cycle in 1834, the progress of refrigeration and air conditioning industry in the world has been directly related to the ability to develop refrigerants allowing adequately meet the requirements of each project implementation. Many different alternatives for working fluid have been examined since then, a process that continues up to now.

Until 1930, a first generation of refrigerants has been implemented in different refrigeration and air conditioning systems, with emphasis on industrial sector. This first generation was comprised of refrigerants that were in its majority natural fluids, directly available on nature or obtained from simple production processes. Among fluids were then used, for example, different ethers, carbon dioxide, ammonia, sulphur dioxide, water and hydrocarbons (HC's). Such fluids, however, had limited its application in general due to its flammability, toxicity or technological barriers. Thus, market for residential refrigeration was incipient and barely representative. The advent of hermetic refrigeration systems allowed minimizing the problem of flammability and toxicity, allowing some expansion of refrigeration and air conditioning at homes.

Effective penetration of refrigerators and air conditioners on a day-to-day life was only possible with development of a new generation of refrigerant which eliminated problems of toxicity and flammability, maintaining excellent performance characteristics. This progress resulted from the work *led (não seria melhor usar leaded)* by Thomas Midgley in 1929 that enabled the development of CFC from the synthesis of hydrocarbons such as methane which then passed to dominate the market, marking a second generation committed to safety and performance.

For more than five decades synthetic fluids represented absolutely predominant solution in many different refrigeration and air conditioning applications. First generation of fluids was discarded for the most part, exception ammonia that continued being the primary refrigerant in industrial sector, particularly in food sector. This scenario, however, began to change from 1974, with demonstration of relationship between emissions of CFC and the destruction of stratospheric ozone by Rowland and Molina. Shortly after, researchers from British Halley Bay in Antarctica discover the hole in ozone layer publishing the article in *Nature* magazine in May 1985. These facts, among others, led in September 1987 by signing Montreal Protocol on "Substances That Deplete the Ozone Layer" that imposed targets for the elimination of CFC and HCFC, among other substances. Since then, Montreal Protocol had five revisions: London (1990), Copenhagen (1992), Vienna (1995), Montreal (1997) and Beijing (1999). In response, industry of synthetic refrigerants was very fast in presenting new solutions, free of chlorine, such as HFC and their "blends" that now dominate the market.

The issue of environmental impact caused by refrigeration and air conditioning industry seemed to be solved. However, the discussion about global warming which have had gaining strength in scientific community, taking in 1997 the realization of UN conference in Kyoto, Japan, where it took on targets for reducing greenhouse gases emission (HFC among them) by developed countries at 5.2% of 1990 levels during 2008-2012 period. This was known as “Treaty of Kyoto” which had its origins in the “Earth Summit” (Rio 92), when it was set up to U.N Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) that already defined goals to stabilize greenhouse gases emissions. Kyoto agreement came into force on February 16, 2005, with 140 countries as membership.

Again, industrial and scientific community working in refrigeration and air conditioning industry worldwide was in view of the need to develop a new generation of refrigerants, now also committed to environment preservation. Currently, however, that third generation of refrigerant isn't yet defined, but, judging by the current research developments, natural refrigerants, including hydrocarbons, should represent a long term solutions and there is some consensus that HFC and their “blends” are transitional solutions that will need soon to be banned, which we can see in certain countries (*não poderia ser* as we can already observe in certain countries).

2 Refrigeration and air conditioning in residential applications

Currently world market of residential refrigerators and air conditioners have more than 1 billion units in operation (800 million refrigerators and 345 million air-conditioners). Each year approximately 60 million new refrigerators and 19 million new air conditioners are introduced in the global market (Little, 2002).

Residential sector in Brazil consumes about 23% of all electricity produced, and refrigeration and air conditioning in household applications are responsible for 74% of residential electricity consumption. By comparison, electricity consumed in water heating and lighting represents 26 and 23% of global consumption respectively (Geller et al., 1991).

From the point of consumer view, however, a study conducted in Europe (The Open University, 2007) shows that the selling price is the most important factor for most buyers and the energy consumption is the 4th. In order of importance, environmental impact is taken into account for only 4% of the interviewees (Fig. 1)

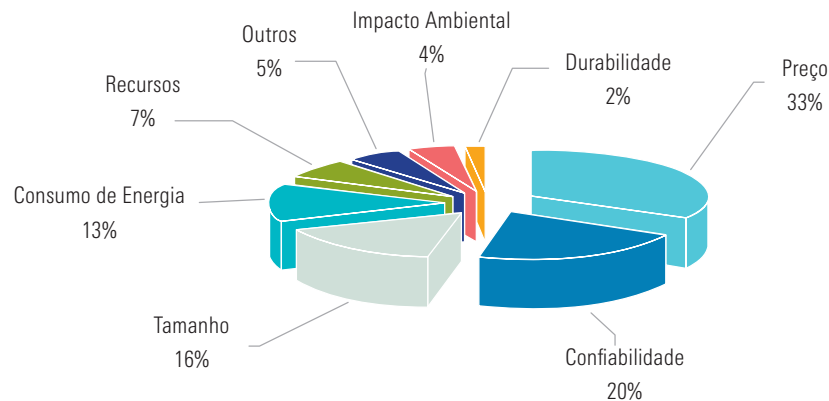


Figure 1 – Factors that influence consumer decision in buying a refrigerator or air conditioning (The Open University, 2007)

While population awareness about environment conservation is growing, it is interesting to note that without policies to encourage products more efficient and with less environmental impact, in short term scenario promises no major results.

3 Environmental impact

Environmental impact of a refrigerant can be assessed based on its effect on ozone layer and on global warming.

Regarding the impact of refrigerant on ozone layer, ODP (Ozone Depletion Potential) parameter is considered. ODP Index reflects the potential of a substance to the depletion of ozone layer. The CFC11 is taken as reference, with greatest potential (ODP = 1). Here hydrocarbons have zero ODP, so perfectly appropriate solutions.

Environmental impact assessment is based on indices such as GWP (Global Warming Potential), TEWI (Total Equivalent Warming Potential), LCCP (Life Cycle Climatic Performance) and LCA (Life Cycle Analysis), are described below:

3.1 GWP (Global Warming Potential)

It measures the impact of a substance as a greenhouse gas, related to effect for global warming of a equivalent mass of carbon dioxide for a specific time period whose value should be

specified. GWP is calculated by the ratio of radioactive temporal effect integrated of instant release of 1 kg of certain substance, regarding release of 1 kg of reference gas - CO₂ (IPCC, 1990):

$$GWP(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r [r(t)] dt}$$

onde,

TH	Time horizon within which calculation is considered.
a_x a_r	Radiant efficiency due to unit growth in atmospheric abundance of the substance in question (in W/m ² .kg).
x(t), r(t)	Transient decline in abundance of instant release of substance, and amounts corresponding to the gas reference in the denominator.

The GWP of a substance expressed the integrated contribution (on a time horizon) from a given mass of substance, related to contribution integrated of the same reference gas mass (typically CO₂) on the same horizon of time.

The GWP of some usual refrigerants is shown in Table 1. As you can see, hydrocarbons have very low values of GWP, compared with synthetic fluids.

Table 1 – Values of GWP for selected refrigerants

Refrigerant		GWP	Life Atmospheric (years)
R290	Propane	< 3	---
R600	Butene	< 3	< 1
R600a	Iso-butane	< 3	< 1
R1270	Propilene	~ 3	< 1
R22	Chlorodifluormetane	1900	11,8
R134a	1,1,1,2 Tetrafluormetane	1600	13,6
R407c	R32/R125/R134a	1980	< 32,6
R410a	R32/R125	2340	< 32,6
R744	Carbon Dioxide	1	> 50
R717	Ammonia	< 1	---

As can be seen from the point of GWP view hydrocarbons refrigerants are perfectly adequate solutions to environment conservation.

3.2 TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

While GWP can only assess the direct impact caused by refrigerant emissions on global warming, the TEWI also includes indirect impact associated to use of refrigerant in a given application of air conditioning and refrigeration. This indirect impact is linked to carbon dioxide emissions in generation of electricity consumed over the life of the equipment. Thus, the portion of refrigerant is converted to equivalent amount of CO₂ (CO_{2, equ, DIRECT}) and then added to equivalent amount of CO₂ emissions due to electricity generation (CO_{2, equ, INDIRECT}),

$$TEWI = CO_{2, equ, DIRECT} + CO_{2, equ, INDIRECT}$$

It should be noted that both direct component and indirect component depend on the system in question, not making sense to present TEWI for a particular refrigerant, therefore, leaks and efficiency of the system are not properties of the refrigerant itself. Moreover, the impact may exceed the life of equipment as soon whether to choose an appropriate basis of time (an integrated time horizon of 100 years is often used.)

The fraction associated with direct impact, is given by,

$$CO_{2, equ, DIRECT} = M_{ref} L_{rate} V_{util} GWP$$

where,

M_{ref}	Refrigerant load in equipment	[kg]
L_{rate}	Annual rate of refrigerant delivered (replacements, leaks)	(%)
V_{util}	Lifetime of equipment	(years)

In turn, fraction associated with indirect effect is calculated as,

$$CO_{2, equ, INDIRECT} = W_{el}^{\&} T_{serv} V_{util} E_{CO_2, G}$$

where,

$W_{el}^{\&}$	Electric Potential of equipment	[W]
T_{serv}	Number of hours in annual operation	[-]
$E_{CO_2, G}$	CO ₂ emission in generation of electricity	[kg CO ₂ /kWh]

Thus, the notion of TEWI introduces a technology-oriented approach to assess the impact on global warming and refrigeration systems for air conditioning.

For example Fig 2 illustrates in simplified form the impact of a household refrigerator. In this example we observe that indirect contribution represents, in fact, the most significant, i.e., the use of refrigerant with high GWP is less important than energy efficiency involved in their use.

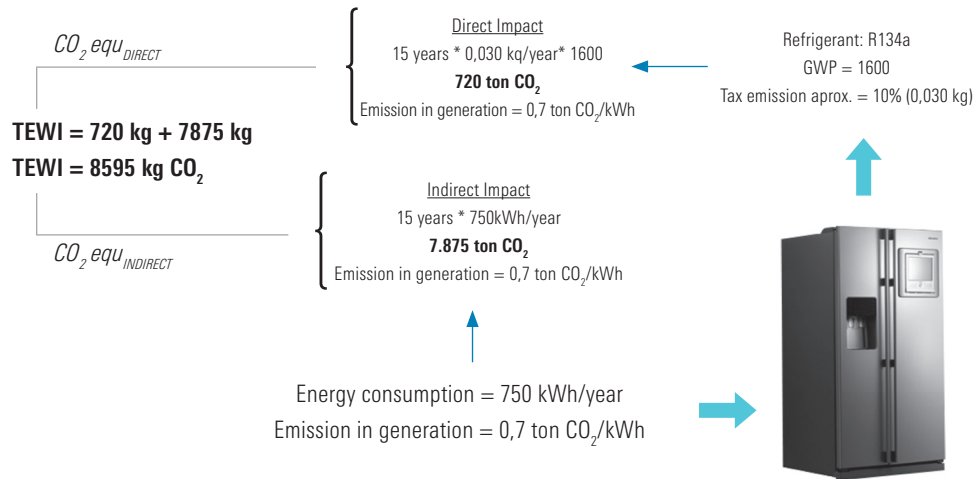


Figure 2 – Illustration of direct and indirect impact by simplified calculation of TEWI

3.3 LCCP (Life Cycle Climatic Performance)

Originated from the concept of TEWI, LCCP estimates the impact over the life due to direct and indirect emissions of greenhouse gases, including unintentional emissions during production of chemicals, energy involved in manufacture of components, energy consumed in operation and emissions in final disposal or recycling.

The concept of LCCP corrects certain “errors” in implementation of specific analyses based on TEWI, such as: i) does not include energy and emission of greenhouse gases associated with refrigerant production, ii) inappropriate use of ITH (Integrated Time Horizon) of 100 years in conjunction with certain greenhouse gases, long life, and iii) no account of losses / emissions associated with fluids of work at the end of life product.

Figure 3 shows results for LCCP for residential air conditioning with 3 TR (36,000 BTU / h) capacity in Atlanta, USA (Goetzler and Dieckmann, 2001). As can be seen, in the same way as in an analysis by TEWI, indirect impact associated with energy consumption is the most important, which is affected by efficiency of the equipment.

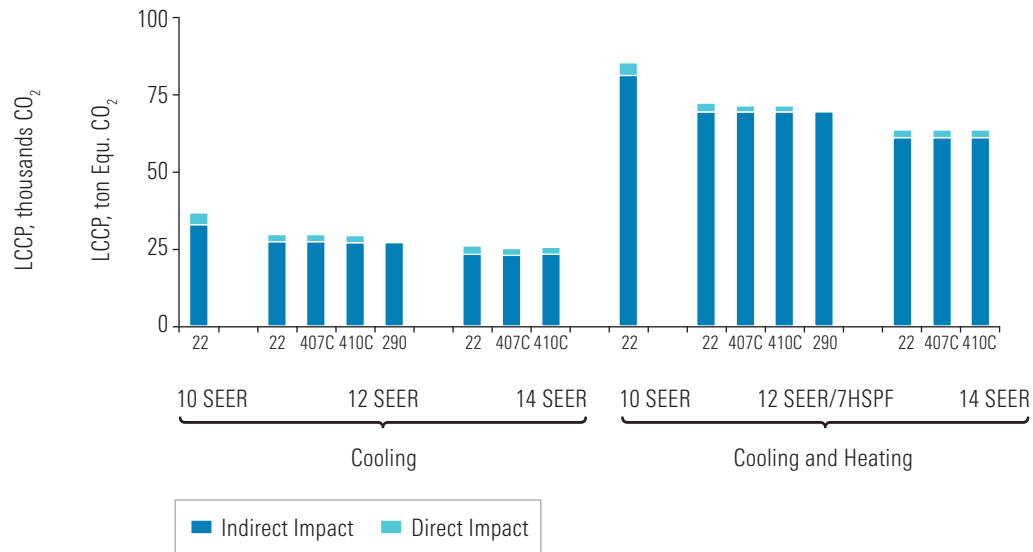


Figure 3 – Values of LCCC for a residential air conditioners (Goetzler and Dieckmann, 2001)

4 Thermal properties

A refrigerant aims the transport of energy in form of heat. For a proper performance is essential, among other factors, that refrigerant thermal properties promotes good heat transfer transfer and does not results in high pressure drops. Charts below show some relevant properties for R600a, R12 and R134a.

Fig 4 illustrates saturation pressures of the selected refrigerants for a wide range of temperatures. As shown the use of R600a results in lower saturation pressure in any condition of temperature. This characteristic allows operate with lower compression rate in favor of a better compressor performance. Moreover, the advantage of R600a is even more relevant to higher temperatures which improves condenser performance.

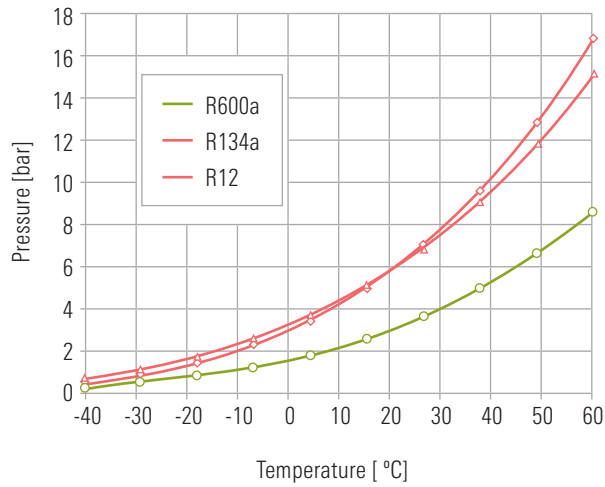
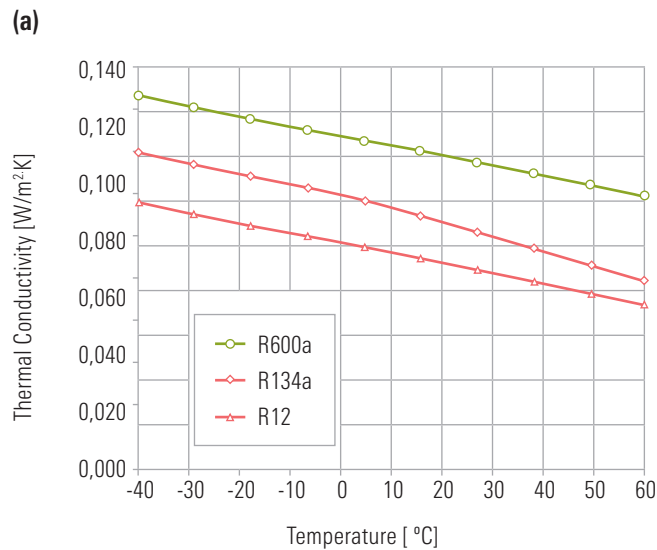


Figure 4 – Pressure of saturation for R600a, R134a and R12 depending on temperature

Figure 5 shows thermal conductivity of liquid and vapor phases for R600a on R12 and R134a. In any condition, R600 has high thermal conductivity, favoring an operation with higher heat transfer coefficients which promote a better energy performance.



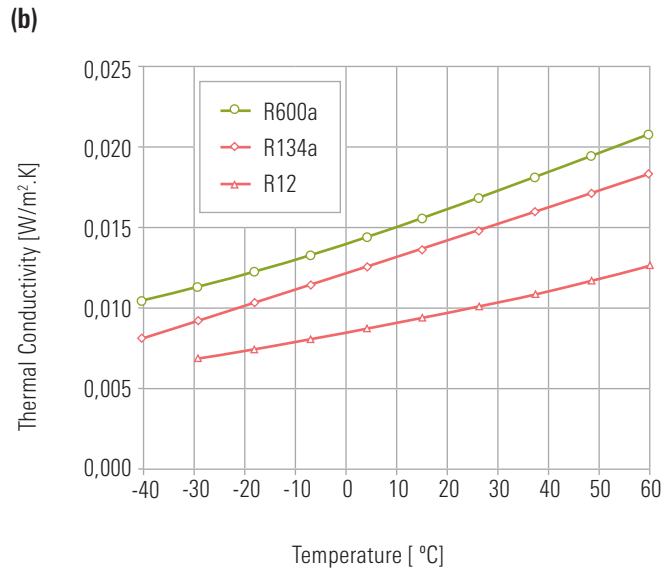
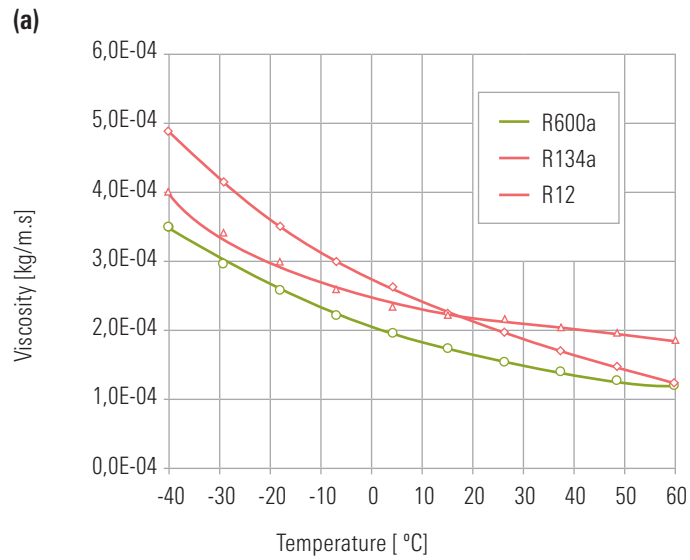


Figure 5 – Thermal conductivity of liquid (a) and vapor (b) for R600a, R134a and R12 depending on the temperature

Regarding viscosity (Fig. 6) R600a presents lower values than R12 and R134a, except related to viscosity of R12 vapor at temperatures below approx. -5 °C. A lower viscosity is also a positive aspect because it results in lower pressure drops.



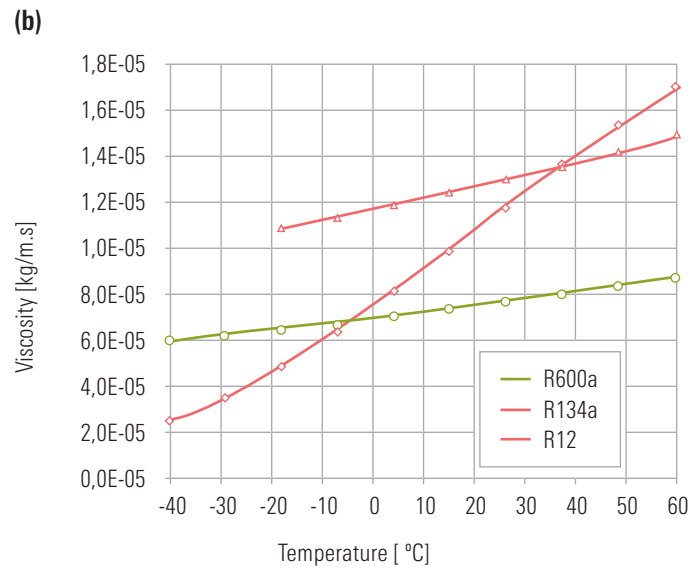
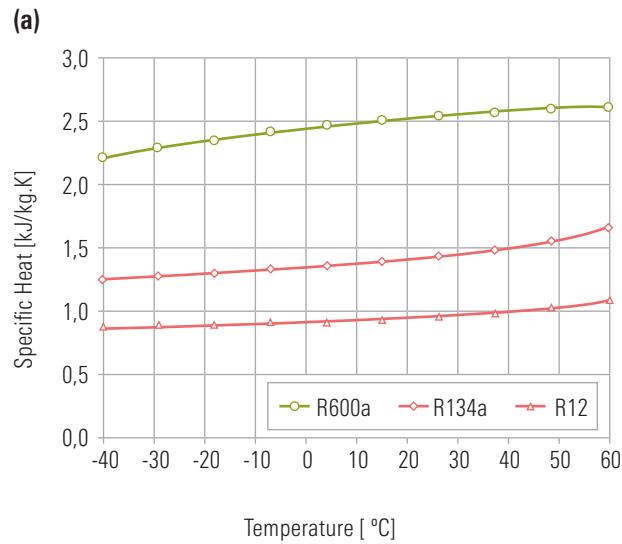


Figure 6 – Viscosity of liquid (a) and vapor (b) for R600a, R134a and R12 depending on temperature

Figure 7 shows specific heat of liquid and vapor phases for R600a related to R12 and R134a. It appears that in any condition R600 has the highest specific heat than R12 or R134a, in favor of higher heat transfer rates.



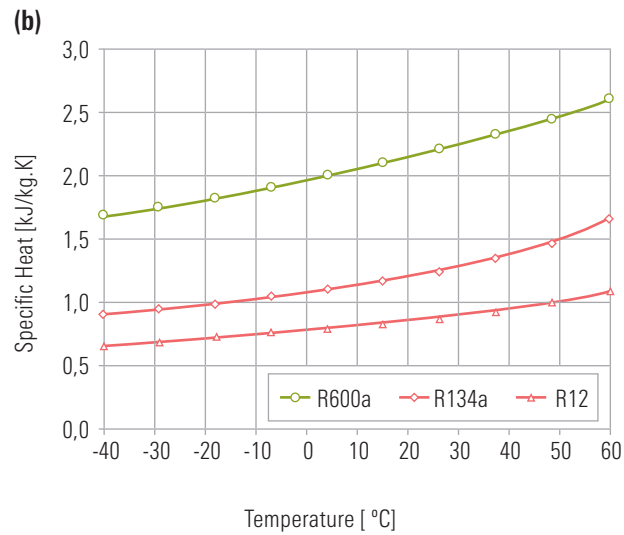
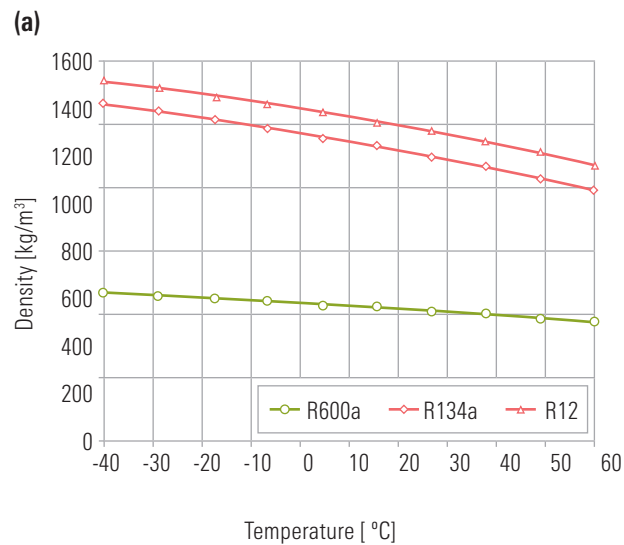


Figure 7 – Specific heat of liquid (a) and vapor (b) for R600a, R134a and R12 depending on temperature

An important aspect in the use of R600a is its low density (Fig. 8) compared to R12 and R134a. This characteristic makes volume capacity with R600a is, roughly, 50% lower compared to R12 and R134a. For this reason, the volume displacement of compressors should be about 2 times larger.



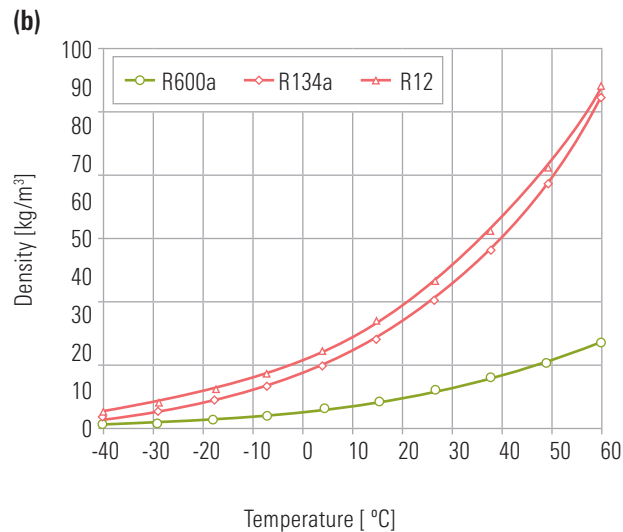


Figure 8 – Density of liquid (a) and vapor (b) for R600a, R134a and R12 depending on temperature

5 Compatibility with lubricants and materials

Hydrocarbons have full chemistry compatibility with almost all of lubricants commonly used in refrigeration. However, additive lubricants with silicone and silicates are not compatible with hydrocarbons (Lommers, 2003).

In general, compatibility with most of materials used in refrigeration systems is appropriate. Virtually all of elastomers and plastics commonly used in refrigeration systems and components, used as “O” rings, valves seats, seals and gaskets are compatible with hydrocarbons refrigerants. Neoprene, Viton, nitrile rubber, HNBR, PTFE and nylon are common examples of compatible materials. Given the compatibility of hydrocarbon with oil the list of compatible materials is similar to CFC12. Examples of non-compatible materials are natural rubber, polyethylene, PVC and EPDM. (Danfoss, 2000; ACRIB, 2001).

6 Aspects related to safety

Assessment of security in implementation of a refrigerant requires that it be considered two factors: i) toxicity and flammability.

The toxicity of a refrigerant is assessed by “levels of exposure” that indicate how much an individual can be exposed to refrigerant, without any adverse effect. A common use index is the TLV-TWA (Threshold Limit Value-Time Weighted Average) defined by “American Conference of Government and Industrial Hygienists’ (ACGIH). The TLV-TWA is a measure of the amount of chemical that an individual can be exposed, 8 hours / day, 40 hours / week, without adverse effects. Maximum permissible (for any substance) is 1,000 ppm, even more refrigerants do not cause any adverse effect, even in values higher than this.

According to ASHRAE standard 34 different refrigerants are divided into two classes of toxicity: Class A) low toxicity - refrigerants whose toxicity is not found in concentrations and ≤ 400 ppm; Class B) high toxicity - refrigerants whose toxicity is not observed at concentrations ≥ 400 ppm.

ASHRAE standard 34 ranks hydrocarbons in Class A, low-toxicity (as the majority of synthetic refrigerants). Table 2 presents some values for toxicity of hydrocarbons and other refrigerants.

Table 2 – Levels of toxicity for refrigerants selected

	Refrigerant	TLV-TWA	Class ASHRAE – Std. 34
R290	Propane	2500 ppm	A
R600	Butene	800 ppm	A
R600a	Iso-butane	800 ppm	A
R1270	Propilene	375 ppm	A
R22	Chlorodifluorometane	1000 ppm	A
R134a	1,1,1,2 Tetrafluorometane	1000 ppm	A
R407c	R32/R125/R134a	1000 ppm	A
R410a	R32/R125	1000 ppm	A
R744	Carbon Dioxide	5000 ppm	A
R717	Ammonia	25 ppm	B
R764	Sulphur dioxide	2 ppm	B

Regarding flammability, a refrigerant is classified according to ASHRAE standard 34 in three classes: Class 1) Without spread of flame, Class 2) Low flammability, and Class 3) High flammability.

Within this classification hydrocarbons are considered as Class 3 which means, a flammable refrigerant with lower limit of flammability less than 0.00625 lb/ft³ and heat of combustion greater than 8174 BTU / lb.

As hydrocarbon fluids are flammable, it is obviously essential and indispensable adopt engineering solutions for minimizing the risk of accident when we use in refrigeration system.

The Fig 9 illustrates the mechanism associated with establishment of a safe condition or accident in the use of a hydrocarbon. First it is important to note that an accident could occur only if there is a leak that leads to a concentration in the air within the limits of flammability (LF) and a source of ignition involves release of energy contained in the mixture, that is, those three factors must occur simultaneously, otherwise there is no possibility of an accident. At the same time is sufficient to control (or prevent) one of those factors for canceling the risk of an accident.

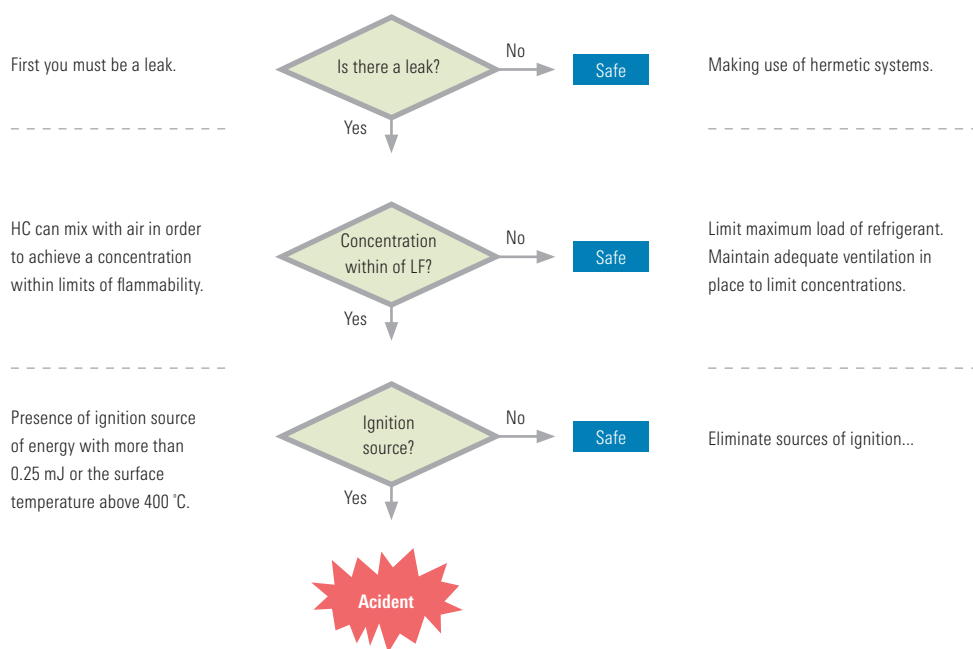


Figure 9 – Systematic analysis of mechanism leading to a safe condition of use

Regarding the occurrence of leaks, you must first note that it is not just answer yes or no to the question posed (if there is a leakage). Small leaks mean in such small releases of HC that concentrations are probably not enough to achieve limits that lead to a flammable condition. Moreover, the air conditioning and refrigeration equipments are typically sealed so that the occurrence of a leak is minimized.

For the LF, to the occurrence of an accident, it is necessary that the concentration of HC in air present value that is within these limits. For HC's, the lower limits of flammability (LIF) are shown in Table 3.

Table 3 – Lower limits for flammability of refrigerants selected.

	Refrigerant	LIF
R290	Propane	2,3 %
R600	Butene	1,9 %
R600a	Iso-butene	1,8 %
R1270	Propilene	2,0 %
R22	Chlorodifluormetane	---
R134a	1,1,1,2 Tetrafluormetane	---
R407c	R32/R125/R134a	---
R410a	R32/R125	---
R744	Carbon Dioxide	---
R717	Ammonia	14,8
R764	Sulphur dioxide	---

About the source of ignition, it must be releasing energy exceeding 0.25 mJ or may be associated with a surface temperature exceeding 440 °C, which requires special care in design of electrical components of refrigeration systems.

For the design of a household refrigerator is approved for commercialization this should be in line (*não seria melhor* in agreement) with requirements of specific technical standards. In European Community, for instance, the standard "IEC Technical Sheet TS 95006" is used since 1994, as well as other regional standards such as EN 378, DIN 7003, BS 4344, SN 253 130 that are differentiated in some respects. In general, the following requirements are placed:

- ∴ Thermostats as electrical components, switches of door for lighting, relays of compressors, keys "on / off," 'timers', etc. are considered as possible sources of ignition and thus require specific solutions;
- ∴ All parties containing refrigerant are considered possible sources of leaks. This includes evaporators, condensers, doors heaters, pipe and compressor.

- ∴ Maximum load of refrigerant allowed of 150 grams. This limitation of loading means to reduce concentration about 25% of LEL (which is approx. 8 g/m³ for a typical kitchen, in the case of R600a), making the risk of ignition very low.

Several available studies in literature report analyses of risk in use of hydrocarbons as refrigerants in refrigeration and air conditioning applications. Such studies are based on different methods of analysis to establish numerical values that represent the statistical probability of risk in different circumstances.

Table 4 gives values for statistical probability of fatal accidents with hydrocarbons in different circumstances and in other activities (Colbourne and Ritter, 1998). How can we conclude from these results, the probability of fatal accidents with hydrocarbons used in refrigeration is, in fact, quite remote (actually, less than many activities of day-to-day). Moreover, it is interesting noted as reference that organs such as “Health and Safety Executive (HSE) of England, consider individual risks of 1.0 x10⁻⁵ as intolerable and risks of 1.0 x 10⁻⁶ as negligible.

Table 4 – Risks associated to accidents involving hydrocarbons refrigerants and other situations (Colbourne and Ritter, 1998)

Condition	Probability
Risk of damage due to the use of HC in automotive air conditioning.	0,3 x 10 ⁻⁷
Risk annual fatal accident with residents in residential heat pump using propane (R290).	1,8 x 10 ⁻⁷
Risk annual fatal accident with mechanical pump using heat residential propane.	3,8 x 10 ⁻⁷
Risk annual fatal accident involving mechanical maintenance for tank of chilled milk using R290.	9,0 x 10 ⁻⁷
Risk of fatal car accident on roads of Europe.	1,0 x 10 ⁻⁴
Risk of death by electric-shock in homes.	1,0 x 10 ⁻⁶
Risk of being struck by lightening.	1,0 x 10 ⁻⁷

Nevertheless, the possibility to develop hydrocarbons with inert flammability was investigated by Dlugogorski et al. (2002) which investigated effect of the use of CF3I and C3HF7 as additives suppressors of flammability of mixtures of natural gas/air and propane-isobutene/air. As experimental apparatus authors adopted, with good results, a “tubular burner” instead of “vessels of explosion” for determining flammability limits of inert hydrocarbons with halogenated agents. Unfortunately results indicate that it is not possible, using CF3I or C3H7, make a mixture that refrigerant with substantial content of hydrocarbon, for example, to make an inert mixture of propane, butane is necessary to employ 87.7% and 94.2% by mass of suppressor CF3I and C3HF7, respectively. Also, no consideration is made by authors about changing of physical properties.

7 Energy performance

When assessing performance of a refrigerant two approaches are possible: i) an analysis solely based on heat balances based on the same reference cycle of operation and, ii) an analysis that takes into account the interaction between refrigerant and system. These two possible approaches, we must note that the first is somewhat limited because interactions require adoption of refrigerant or other changes involving in the operation according to distinct thermodynamic cycles. At the same time, second approach is not always applied in literature as it should be, where the replacement of refrigerant is made with limited adjustment in the system fluid. Thus, the presentation of results of energy performance is generally controversy. However, based on some carefully studies published considerate that hydrocarbons can provide, in general, a top energy performance. There are not sufficient data on tests of reliability of domestic refrigerators converted to use of propane or isobutene (UNEP, 1999).

Several articles in literature have reported results of energy performance of refrigerant and hydrocarbons mixtures, usually through comparisons with synthetic refrigerants such as CFC's, HCFCs, 'HFC's and their "blends". Overall, results of this work point to COP's up to 15% higher with hydrocarbon refrigerants use in relation to HFC's and HCFC's. This higher energy efficiency is justified as follows (Goetzler and Dieckmann, 2001):

- ∴ Favorable properties of transport: as discussed above, lower viscosity and greater thermal conductivity provide higher heat transfer coefficients and lower pressure losses;
- ∴ Better miscibility with lubricant, facilitating transfer of heat in the evaporator;
- ∴ From the point of view only of operating a thermodynamic reference cycle, the properties of hydrocarbons help, in general, its best performance energy.

In a recent study by Park et al. (2007) an analysis of two pure hydrocarbons and seven mixtures of propylene, propane, HFC152a, and dimethyl-ether has been studied as substitutes for HCFC22 in air-conditioners and residential heat pumps. The determination of the optimum compositions was performed by an analysis of the thermodynamic cycle before their test in laboratory with temperatures of evaporation and condensation of 7 and 45 °C, respect. COP's were up 5.7% superiors of HCFC22. While propane showed a decrease of 11.5% in capacity, most of the fluids led to similar capabilities of HCFC22. Moreover, the temperature of compressor discharge was reduced in 11 to 17 °C while for all fluids tested load was reduced by up to 55%, compared with load of HCFC22.

Also recently hydrocarbons performance as refrigerant has been the subject of studies where more than examine results to pure hydrocarbons, are evaluated alternatives mixtures of them.

Sekhar and Lal (2005) investigating mixture of HFC134a/HC performance in a household refrigerator of 165 liter and a freezer of 400 liter. The authors concluded that the mixture known as M09 (HFC134a/HC with 9% by mass of HC) raised its refrigerant effect at 10% and reduced the time of “pull down” at 9.8% resulting in a decrease in daily energy consumption between 4.1 and 7.6%. In general, COP has been increased from 5 to 17% when operation at low temperatures. Authors reported that capillary tubes used in systems with CFC12 can be used for blending but the use of expansion valves requires an appropriate adjustment of degree of overheating.

Jabaraj et al. (2007) reported an experimental study of HFC407C/HC290/HC600a blend as an alternative to replacement of HCFC22 in appliances such as window air conditioners, seeking composition of the optimum blend. Broadly speaking, the best blend found led an increase in the length of condenser, 19% (in order to maintain the pressure of discharge within acceptable limits), increased the power during the “pull down” from 2 to 10% on the HCFC22 but as duration of “pull down” was reduced by 32% the COP was superior between 8 and 11%, reducing energy consumption in 5 to 10.5%.

8 Systems costs based on hydrocarbons

Information about costs of refrigerators and air conditioners using hydrocarbons as refrigerants are scarce in literature.

Regarding the use of synthetic refrigerant, the application of hydrocarbon refrigerant means at the same time reductions and increases in initial costs of product. Among factors favoring a reduction in cost we can highlight:

- ∴ Lower cost of refrigerant;
- ∴ Less load of refrigerant;
- ∴ Compatibility with mineral oil of lower cost;
- ∴ Better transport properties.

Among factors leading to a cost lifting we have,

- ∴ Components with project-oriented to minimize risk;
- ∴ Investment and operating costs of production process;
- ∴ Installation and service costs;
- ∴ Insurance taxes.

Regarding the refrigerant cost, hydrocarbons used as refrigerants must be processed for high degrees of purity. Nevertheless, under normal conditions hydrocarbon refrigerant presents cost considerably less than synthetic refrigerants. On the other hand, the need to import, cost of transportation under special conditions and possible existence of consumer market still incipient, can make that cost of hydrocarbon refrigerant being something equivalent to synthetic refrigerant. However even in such unfavorable conditions, overall cost associated with use of HC will be noticeably lower because smaller loads of refrigerants are required. In any case, it should be noted that cost of refrigerant is in fact a minor component in overall cost of a household refrigerator.

In terms of overall cost, Douglas et al. (1999), presented results based on theoretical model developed to compute various fixed costs in terms of performance. For appliances such as window air conditioners using propane (R290) authors report an overall cost less than 4% in the case of HCFC22. Compared with R407c, overall cost of equipment in varying $\pm 1\%$ (cost 1% higher with the HC against the R410a). Authors conclude that differences in the overall cost are mainly due to heat exchangers (condenser and evaporator) and requirements related to combination refrigerant-oil. In turn, it has been found that the cost due to differences in volumetric displacement of compressor has little influence on overall cost. Considering comparisons between systems optimized for each refrigerant, there was verified that costs varied within 4% compared with R22. However the study did not take into consideration the fact that a project of equipment that employs HC as refrigerant is predominantly oriented by security requirements and this is the most critical factor for raising the overall cost of refrigeration and air conditioning system with hydrocarbons.

9 Trends and needs of research

Although the market for residential refrigeration applications using hydrocarbons as refrigerants are consolidated for many years in several countries, its continued expansion depends on the evolution of scientific and technological research with respect to three main aspects: safety improving, system costs and optimizing of components.

While HC's energy performance continues motivating research oriented to development of new mixtures, studies of optimization systems based on HC's can predict the acquisition of components that derive greater advantage of favorable refrigerants properties. However motivating element of efforts to current researches refers to minimize risk of accidents associated with reducing costs of this need. Accordingly this line of research has been studies that are oriented to reduce the load of hydrocarbon refrigerant.

Also, as pointed out by (Goetzler and Dieckmann, 2001) was observed in some cases reduction in viscosity to the point of compromising compressor lubrication, being necessary to clarify, according to authors, that impact in long term. And also, more specific tests about performance over the life are necessary for HC's mixtures under severe conditions of operation, such as extreme ambient temperatures combined with variation in voltage of electric drive (UNEP, 1999).

Garland and Hadfield (2005) describe the impacts of hydrocarbons refrigerants in hermetic compressors for residential refrigerators based on tribologic tests establishing the mechanism of wear and friction coefficients in critical components. Tribologic performance of R600a was compared to R134a with mineral oil and poly-ol-ester. Thus long term performance was modeled resulting in subsequent environmental costs. Authors conclude that R134a has a reduced performance in relation to R600a, over the time. In this way, indirect environmental impact with R600a is increased over the life of compressor.

10 Conclusions

Although the use of HCs as refrigerants accumulates almost a century of experience, its flammable characteristic limited for a long time its application to industrial systems. More recently, the need for fluids that do not entail impact on ozone layer and global warming, stimulated the application of hydrocarbons as refrigerants, particularly in residential refrigeration and air conditioning systems. Currently the market for residential applications of hydrocarbons is well consolidated but constraints related to security and costs stimulate the development of research that should allow an even greater penetration of hydrocarbons in residential sector and, possibly in commercial segment with specific limitations of refrigerant load.

11 References

ACRIB, 2001, **Guidelines for the use of hydrocarbon refrigerants in static refrigeration and air conditioning systems**. Air Conditioning and refrigeration Industry Board. ISBN 1872719139, www.acrib.org.uk, UK.

Colbourne, D. e Ritter, T. J., 1998. **Quantitative Risk Assessment: Hydrocarbon Refrigerants**. IIF-IIR - Sections B and E - Oslo, Norway -1998.

- Danfoss, 2000, **Practical Application of Refrigerant R 600a Isobutane in Domestic Refrigerator Systems**. November 2000 CN.60.E2.02 Danfoss Compressors GmbH.
- Dlugogorski, B. Z., Hichens R. K. and Kennedy E. M.. **Inert hydrocarbon-based refrigerants**. Fire Safety Journal, Volume 37, Issue 1, February 2002, Pages 53-65.
- Douglas, J.D., Braun, J. E., Groll, E. A. e Tree, D. R. 1999. **A cost-based method for comparing alternative refrigerants applied to R-22 systems**. International Journal of Refrigeration, Volume 22, Issue 2, March 1999, Pages 107-125.
- Garland, N.P., Hadfield, M. 2005, **Environmental implications of hydrocarbon refrigerants applied to the hermetic compressor**. Materials and Design 26 (2005) 578–586.
- Geller, H., Tolmasquim, M., Schaeffer, R., 1991, **O Uso Eficiente da Eletricidade - Uma Estratégia de Desenvolvimento para o Brasil**, Instituto Nacional de Eficiência Energética. PROCEL.
- Goetzler, W., Dieckmann, J, 2001, **Assessment of the Commercial Implications of ASHRAE A3 Flammable Refrigerants in Air Conditioning and Refrigeration Systems**. ARTI-21CR/610-50025-01 Final Report, Air-Conditioning And Refrigeration Technology Institute, September 12, 2001, USA.
- Jabaraj D.B., Narendran A., Lal D. M. e Renganarayanan S. 2007. **Evolving an optimal composition of HFC407C/HC290/HC600a mixture as an alternative to HCFC22 in window air conditioners**. International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 276–283 578–586.
- Little, A. D., 2002. **Global Comparative Analysis of HFC and Alternative Technologies for Refrigeration, Air Conditioning, Foam, Solvent, Aerosol Propellant, and Fire Protection Applications**. Final Report. The Alliance for Responsible Atmospheric Policy. March 21, 2002
- Lommers, C.A., 2003, **Air Conditioning And Refrigeration Industry Refrigerant Selection Guide – 2003**, ISBN 0-949436-41-0, The Australian Institute of Refrigeration Air conditioning and Heating Inc (AIRAH), Seventh Edition – January 2003, www.airah.org.au.
- Park, K.J, Seo, T., Jung, D. 2007. **Performance of alternative refrigerants for residential air-conditioning applications**. Applied Energy 84 (2007) 985–991.
- Sekhar S.J. e Lal, D.M., 2005. **HFC134a/HC600a/HC290 mixture a retrofit for CFC12 systems**. International Journal of Refrigeration 28 (2005) 735–743.
- The Open Universit, 2007. **T172_1 Working with our Environment**: An introduction. The Open University. <http://openlearn.open.ac.uk/file.php/1285/formats/print.htm>.
- UNEP, 1999, **Study on the Potential for Hydrocarbon Replacements in Existing Domestic and Small Commercial Refrigeration Appliances**. United Nations Environment Program - Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol Jan, 1999.

CO₂ applications in automotive sector

PROF. DR. ENIO PEDONE BANDARRA FILHO

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

E-mail: bandararra@mecanica.ufu.br

1 Introduction

The use of carbon dioxide (CO₂) in refrigeration systems is not new, because CO₂ was first proposed as a refrigerant by Alexander Twining apud Bodinus (1999) in 1850. Lowe apud Bodinus (1999) conducted experiments with CO₂ in military balloons and also designed an ice machine using CO₂ in 1867. The same author has developed further, a machine to carry frozen meat on ships.

A quick literature review showed that refrigeration systems, that use CO₂ as refrigerant, have been developed over the years and reached a peak between the years 1920 and 1930. CO₂ was widely used on ships while another natural refrigerant, ammonia (NH₃), was more common in refrigeration systems used on land.

With the arrival of halogenated refrigerants, known commercially, "FREON", mainly CFC-12, applications with the CO₂ was removed. The main reason for this decline was the rapid loss of capacity and increasing pressure to high temperatures. In these conditions, ammonia continued to gain space over the years, dominating the market for refrigerants in a segment called refrigeration industrial or large.

In nineties, discussions about advantages of using CO₂ arise again, due to its ODP (Potential for Destruction of Ozone) and GWP (Global Warming Potential) characteristics. The reason for this resurgence was mainly the removal and restriction of CFC and HCFC refrigerant, and also reducing the inventory of NH₃ (ammonia) in refrigeration systems.

Called natural refrigerants, as CO_2 , ammonia and hydrocarbons such as propane and butane were the most used options, but the latter have their disadvantages such as toxicity (ammonia) and flammability (hydrocarbons). In comparison, CO_2 is not toxic, only in large quantities, and is not flammable, but has a dual role in environment. Carbon dioxide is necessary to life on earth, but also collaborates, to a lesser extent, to greenhouse effect.

Nowadays, there are two lines of research well-defined on CO_2 applications. The first one focuses on transcritical cycles called, single stage, mainly associated with automotive air conditioning. The second focuses on implementation cycles called cascade, which is the combination of two simple stage cycles, where CO_2 is the refrigerant circuit of low temperature (or low pressure), with temperatures ranging from $-50\text{ }^\circ\text{C}$ to $-30\text{ }^\circ\text{C}$ of evaporation and between -30 and $-10\text{ }^\circ\text{C}$ of condensation. This article deal about the state of art of Automotive Air Conditioning systems that use carbon dioxide, CO_2 , as refrigerant.

Currently, main researches on carbon dioxide are concentrated in northern Europe, USA and some Asian countries. Unfortunately, in Brazil, there is no research focused on CO_2 used as refrigerant.

2 Fundamentals and Bibliographic Review

2.1 Transcritical Cycles

Transcritical cycle is characterized by the fact that there is a process during the cycle, where temperature and pressure conditions go beyond the critical point. In CO_2 case, as can be seen in figure 1, critical temperature is $31.1\text{ }^\circ\text{C}$, therefore, the process of Figure 2-4, is characterized by being in the region above critical point. In R-134a case, the processes occurring below the critical point, right side of the figure. In this case, the biggest difference between cycles with R-134a and CO_2 occurs on the line after compression, where in conventional system occurs the change of phase (vapor liquid), known as fluid condensation, while in transcritical cycle highly overheat steam is cold, without change of phase.

Figure 2 illustrates the concept used for air conditioning systems currently using CO_2 . The function of compressor, evaporator and expansion valve is the same as traditional circuit used with fluid halogenated. High temperatures and pressures of fluid is cooled on so-called cooling

gas or, as is commonly known, Gas Cooler. Practically, it is a process similar to what occurs in condenser, however, Gas Cooler (cooling gas), the CO_2 temperature is higher than the critical temperature of itself, 31.1°C . Carbon dioxide remains in steam state and it is important note that condensation does not occur. It is interesting to emphasize that this point is what differs most of the cycle operating with CO_2 and traditional system with R-134a, for example. Another interesting feature of the operating system with the CO_2 is the use of an intermediary heat exchanger, installed before the valve, which aims to cool CO_2 to increase the efficiency of the system. Accumulator is within the range called Accumulator and Exchanger of Internal Heat, in the exit of evaporator. Systems with R-134a, the accumulator is located in the line of high pressure, after condenser. With these changes in CO_2 system, the coefficient of efficiency, COP, is improved.

Figure 3 illustrates in schematic way, automotive air conditioners circuit with CO_2 , installed in a vehicle. As you can see, complete system is smaller than the system installed with R134a commonly found in the market. Even with the addition of material because of high pressures, complete system is lighter than that is used by R134a in 2 kg.

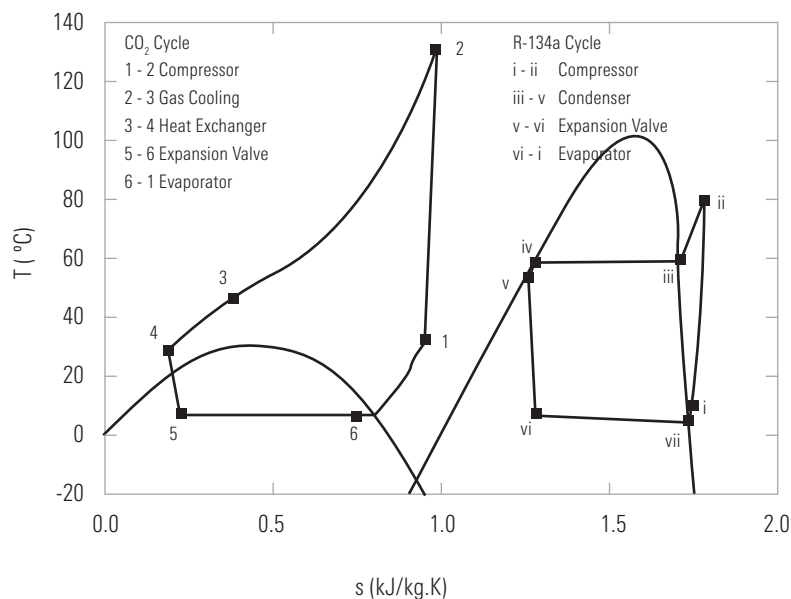


Figure 1 – Diagram Temperature-Entropy for transcritical cycle with CO_2 and the cycle with R-134a

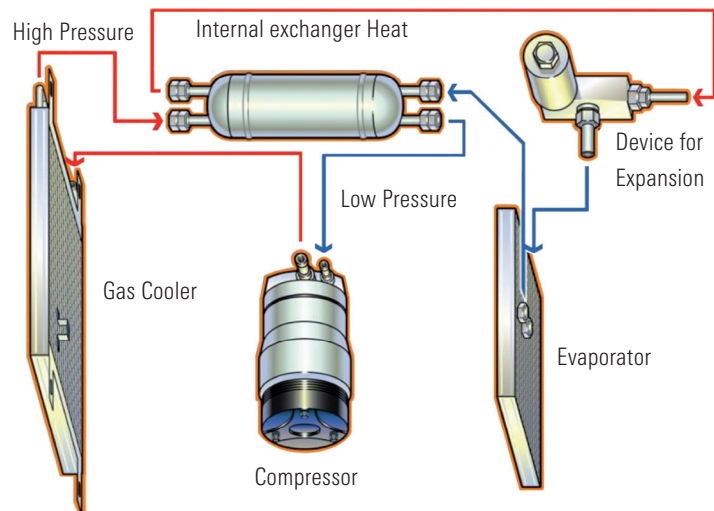


Figure 2 – Schematic diagram an automotive air conditioning circuit using CO₂

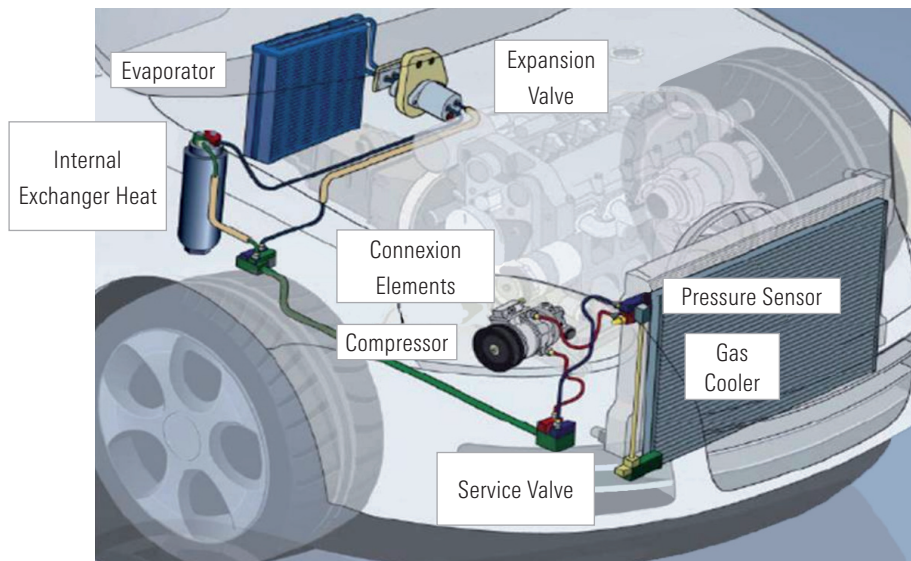


Figure 3 – Figure illustrating in schematic way, the automotive air conditioners circuit with CO₂, installed in a vehicle

3 Results

This section presents briefly some most interesting results obtained in literature using the CO₂ as working fluid. Figure 4 illustrates a comparison of Coefficient of efficiency, COP, depending on the temperature of CO₂ exit of Gas Cooler. It is possible notice that the COP is improved as the temperature of Gas Cooler exit is reduced.

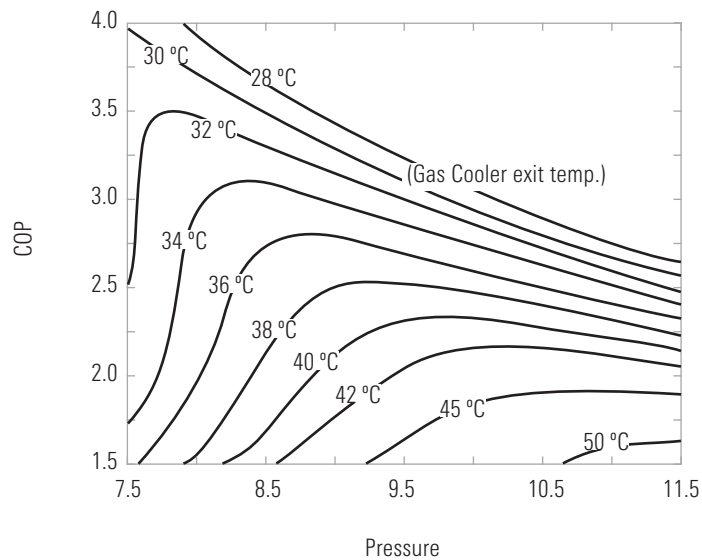


Figure 4 – COP depending on exit temperature of Gas Cooler

Figure 5 shows results of a simulation, comparing the COP and air temperature in Gas Cooler or Condenser for different compressor rotations performed by Brown et al (2002) showing that system with R-134a offers the best COP. Remember that these tests were conducted in 2002, and possibly had problems in modeling Gas Cooler and the compressor, because they were equipments that showed the greatest generation of entropy.

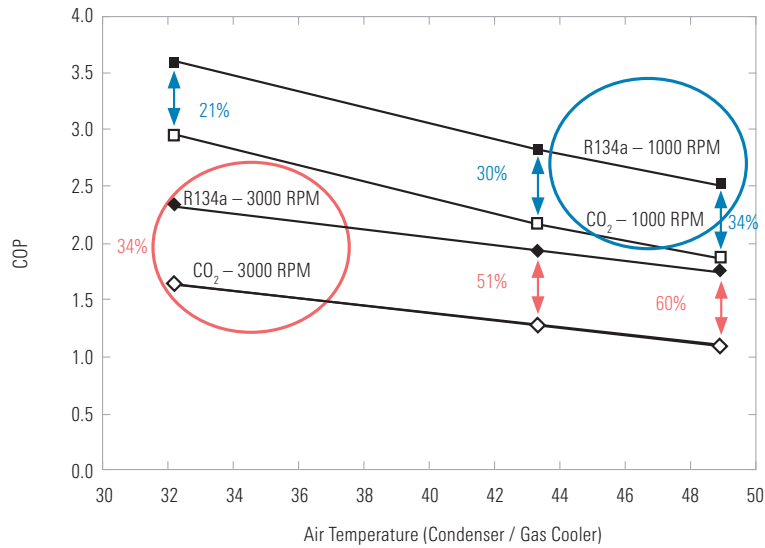


Figure 5 – Comparison of the COP and air temperature in Gas Cooler or condenser to different compressor rotations

Figure 6 illustrates a comparison of a work made in China (Liu et al, 2005), between capacity of refrigeration, the COP and temperature of air entry in Gas Cooler with variation in the face speed of air in evaporator. It is interesting to note that the COP decreases with increasing temperature of air entry in Gas Cooler for two speeds of face tested, 1.4 and 2.5 m / s. Meanwhile, values of the COP for face speed of 2.5 m / s is about 50% higher than that obtained for speed of 1.4 m / s.

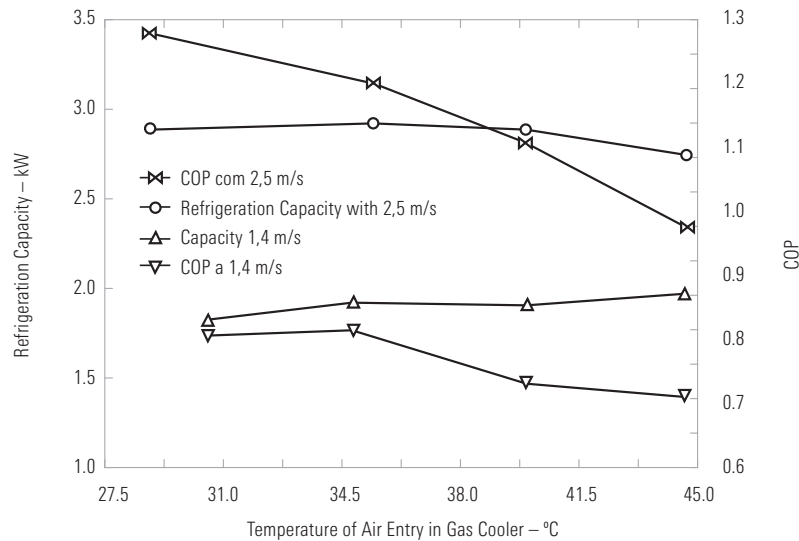


Figure 6 – Comparison between cooling capacity, the COP and temperature of air entry in Gas Cooler with variation of face speed of air in evaporator

Below are given experimental results of researches in vehicles, considered as medium and high power, where comparisons were made between systems installed in vehicles using R-134a and CO₂. Figures 7, 8 and 9 illustrate tests conducted in three different vehicles, BMW 3 series, Audi A4 and Mercedes-Benz “full size”, and the results were similar, showing a reduction in fuel consumption when air conditioning system operated with CO₂. The most interesting results showed that with the use of CO₂, the time of cabin cooling was significantly reduced. It is important to note also that the time to reduce temperature of 60 °C to the temperature of comfort was 17 minutes for CO₂ system and 29 minutes for R134a system, for the BMW car. For the AUDI, that time was 10 minutes for the system with CO₂ and 30 minutes for the system with R134a and in the last case, Mercedes, 12 minutes for the system with CO₂ and 25 minutes for the system with R134a. It is also interesting that in a test with the BMW, Fig 7, while system operating with CO₂ took 58 minutes to reach the required temperature, the system with R134a not reached this condition.

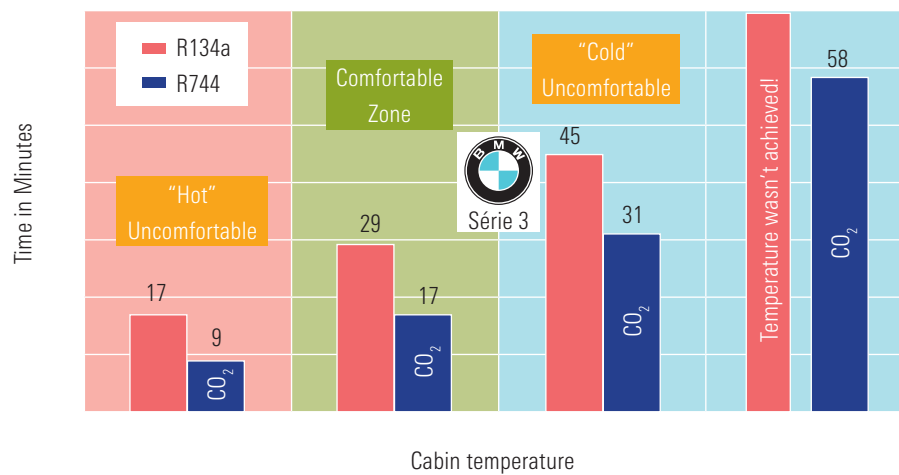


Figure 7 – Comparison between the time of cabin cooling and comfortable zone in a BMW 3 vehicle

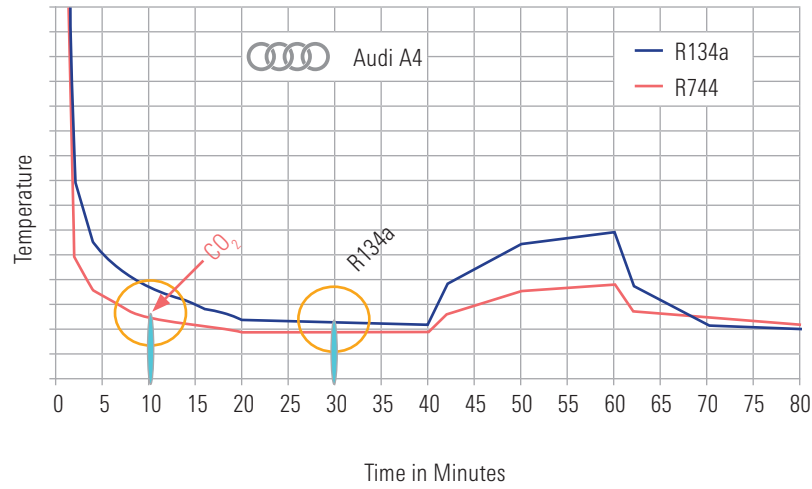


Figure 8 – Comparison of time of cabin cooling in AUDI vehicle

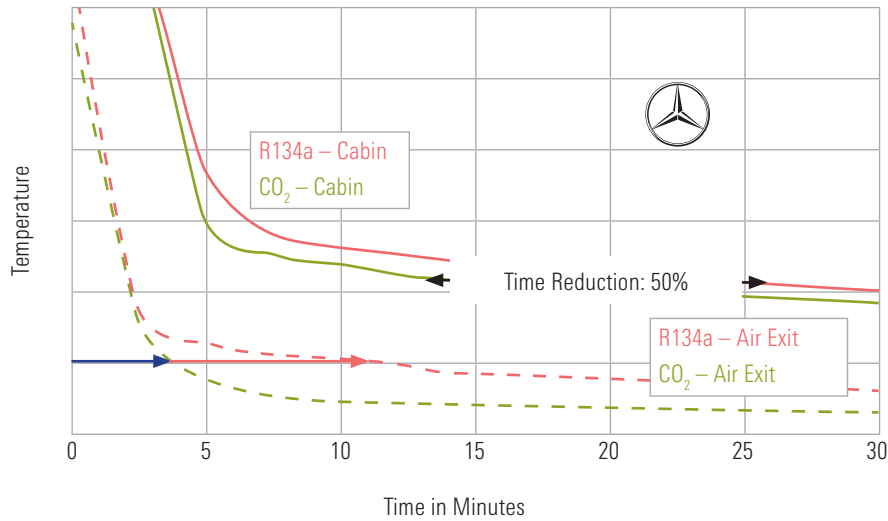


Figure 9 – Comparison of time of cabin cooling and air exit of evaporator in a vehicle Mercedes-Benz "full size"

New tests were performed in a car with small power, called popular cars, as 1.0. Results were quite encouraging, showing that the vehicle containing air conditioning system with CO₂ also had the time of cabin cooling reduced, consumption of fuel was lower, and Effectiveness Coefficient, COP, also proved to be superior to that with R134a system. The tests were performed, even with

different environmental temperature, ranging between 10 and 45 °C and showed a higher fuel consumption of vehicle equipped with R-134a in all temperatures tested, an average of 0.4 liters per 100 km run, as illustrate the Figs 10, 11 and 12.

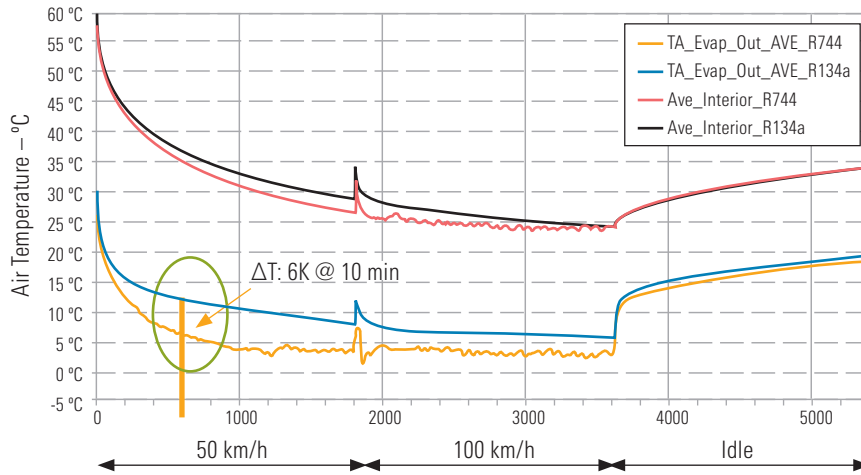


Figure 10 – Comparison of time of cabin cooling and air exit of evaporator in a Toyota vehicle 1.0

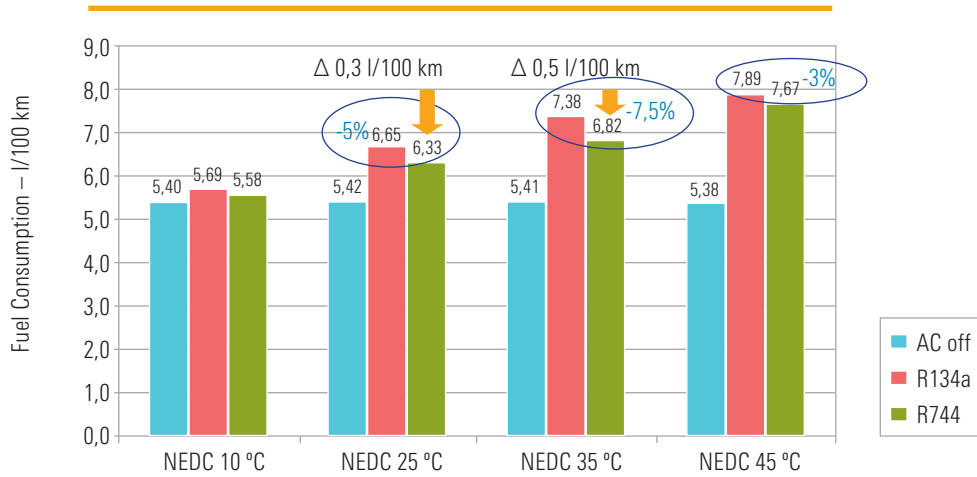


Figure 11 – Comparison of medium fuel consumption in function of environmental temperature in a Toyota 1.0 vehicle

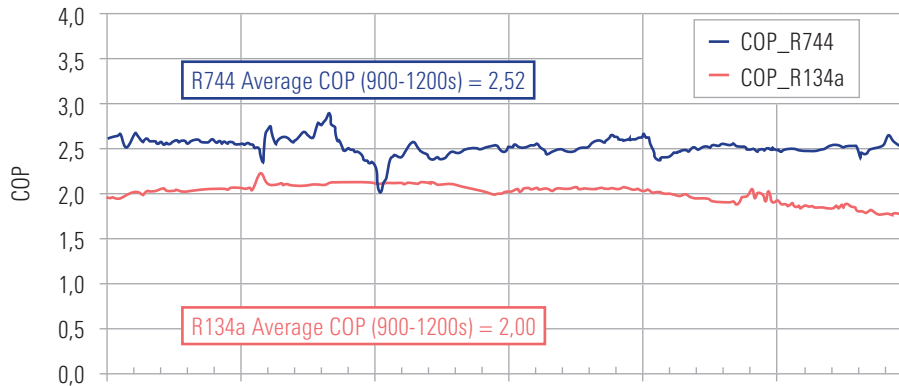


Figure 12 – Comparison of medium COP between CO₂ and R-134a systems in Toyota 1.0 vehicle, for environmental temperature of 45 °C

Finally, it would be interesting comment on analysis and projection made by companies about percentage of vehicles that left and will leave assembly with air conditioning equipment installed, as illustrates Fig 13.

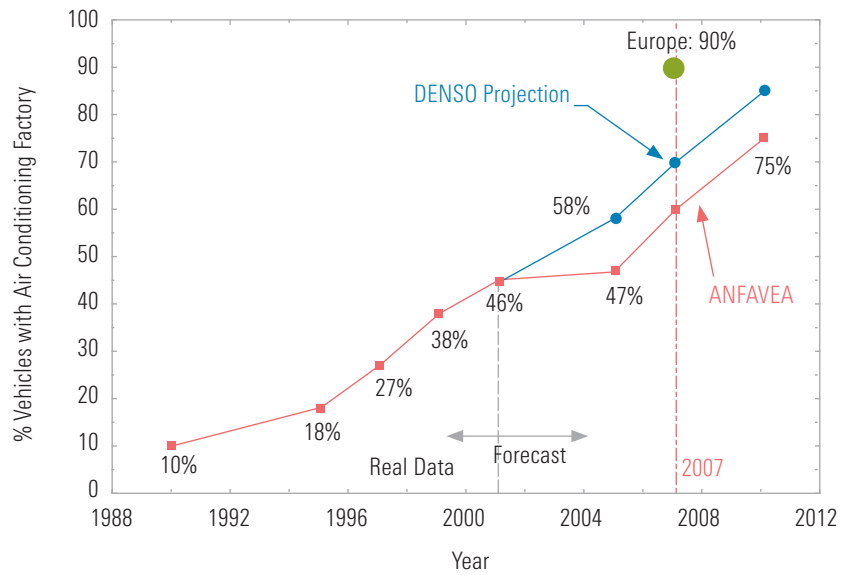


Figure 13 – Data and percentage projection of vehicles leaving automakers with air conditioning equipment installed in Brazil

4 Conclusions

Several researches since the end of nineties already showed the potential for the use of CO₂ as fluid in air systems conditioning and new automotive technologies are being continuously proposals. Such advantages are related to better performance of R134a in respect of the following items:

- ∴ Time of cabin cooling;
- ∴ Better efficiency in more than 90% of driving conditions;
- ∴ Complete systems are smaller and lighter;
- ∴ With its use it would be possible a reduction of 5% of total indirect emissions and 7% of direct emissions;
- ∴ In Europe it is possible to reduce 30 millions tones by 2001 with introduction of 3 million of new units of X/C with CO₂ from 2008;

As final comment, it is important to emphasize that CO₂ already has developed technology for use in automotive air conditioning systems, which leads to conclude that CO₂ will be the refrigerant of next decade in Europe. There is, furthermore, the need to carry out researches in climates such as Brazil, with the objective of getting results of vehicles performance with CO₂ in air conditioning systems, in order to verify the effectiveness of their use.

5 References

- Bodinus, W.S., 1999, **The Rise and Fall of Carbon Dioxide Systems**. ASHRAE Journal, Vol. 41, No. 4, pp. 37–42.
- Brown, J.S., Yana-Motta, S.F., Domanski, P.A., 2002, **Comparitive Analysis of an Automotive Air Conditioning Systems Operating with CO₂ and R134a**. International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 19–32.
- Dang, C., Hihara, E., 2004, **In-tube Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide**. Part 1. Experimental Measurement. International Journal of Refrigeration. In Press.
- Dang, C., Hihara, E., 2004, **In-tube Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide**. Part 2. Comparison of Numerical Calculation with Different Turbulence Models. International Journal of Refrigeration. In Press.

Kauf, F., 1999, **Determination of the Optimum High Pressure for Transcritical CO₂-Refrigeration Cycles**. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 38, pp. 325-330.

Liu, H.; Chen, J.; Chen, Z., 2005, **Experimental Investigation of a CO₂ automotive air conditioner**. International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 1293-1301.

Pearson, A. 2001, **New Developments in Industrial Refrigeration**. Ashrae Journal, Vol. 43, No. 3, pp 54-59.

Thome, J.R.; Hajal, J.E., 2004, **Flow Boiling Heat Transfer to Carbon Dioxide: General Prediction Method**. International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 294-301.

Zhu, M.S.; Shi, L., 2002, **Researches on the CO₂ Transcritical R/AC/HP Systems in China**. IIR/IIF-Commission B1, B2, E1 and E2-Guangzhou, China-2002.

The EU Experience on Natural Refrigerants – Status and Trends

ENG. BERND KALTENBRUNNER EURAMMON

E-mail: b.kaltenbrunner@kw.at

1 Introduction

The refrigeration industry faces several challenges in the European Union. One of the most challenging problems is environment. On the other side energy consumption of the systems plays an important role, on the other side the problems of leakages of the so called F-Gases (HFCs) is discussed not only on the level of the operators and manufacturing companies but also with respect to the Kyoto Protokoll by several governments in the EU.

287

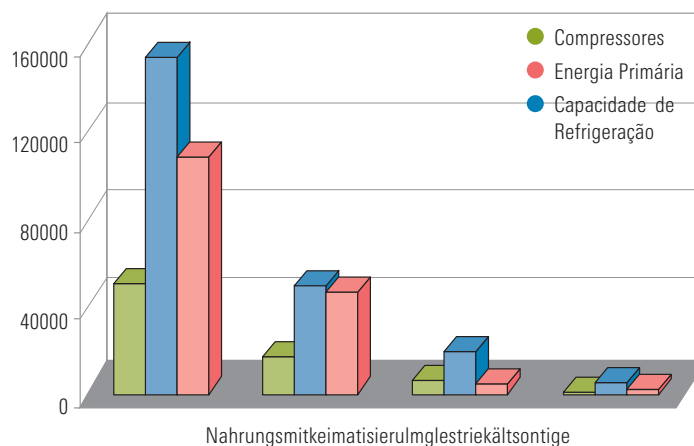


Figure 1

2 Standards and Regulations in the European Union

The European Union tries to reduce the F-Gas Leackages in using some standards an regulations in order to save environment.

One of the most important Standard is the EN 378. Here, environment plays an important role in a very technical way and deals with al technical questions of all refrigerants not only the HFCs.

The EN 378 is international very well known, so the focus of this paper is more on the side of the F-Gas regulation 842/2006.

The primary objective of this Regulation is to reduce the emissions of the fluorinated greenhouse gases (F-gases) covered by the Kyoto Protocol and thus to protect the environment.

The Regulation addresses the containment, use, recovery and destruction of these gases.

2.1 Main measures are:

- ∴ improvement of containment,
- ∴ labelling of products and equipment containing fluorinated greenhouse gases,
- ∴ marketing and use restrictions for certain applications,
- ∴ recovery of F-gases,
- ∴ training and certification of personnel (and companies),
- ∴ reporting obligations.

2.2 Commission regulations include:

- ∴ 1-5. Minimum qualification for personnel (stationary refrigeration, fire protection systems, switchgear...), check for leakage, installation, maintenance or servicing, recovery (some more areas)
- ∴ 6+7. Leak checking requirements (stationary refrigeration & fire protection systems)
- ∴ 8. Labelling requirements
- ∴ 9. Reporting requirements

2.3 Some important points a stated here:

Article 3 “Containment”

1. Operators of stationary refrigeration, air conditioning and heat pump equipment shall prevent leakage as soon as possible repair any detected leakage.
2. Operators shall ensure that the equipment is inspected for leakage by certified personnel according to the following schedule:

Refrigerant Charge	Inspection
3-30kg	once every twelve months
30-300kg	once every six month
300 or more kg	once every three months / install leakage detection systems

3. Operators have to keep records.

Article 4 “Recovery”

1. Operators are responsible for a proper recovery by certified personnel to ensure the recycling, reclamation or destruction:
 - (a) the cooling circuits of refrigeration, air-conditioning and heat pump equipment.

Article 5 “Training and Certification”

1. The Commission shall establish minimum requirements (companies and personnel)
2. Member States shall establish or adapt their own training and certification requirements
3. The operator shall ensure that the relevant personnel have obtained the necessary certification
4. Member States shall ensure that the companies shall only take delivery of fluorinated greenhouse gases where their relevant personnel hold the certificates

Article 10 “Review”

Air conditioning systems, other than in passenger vehicles, shall be reviewed reported by 31 December 2007.

Assessment whether the inclusion of further products and equipment in Annex II is technically feasible and cost-effective report within four years after the entry into force of the Regulation.

Where necessary, the Commission shall present appropriate proposals for revision of the relevant provisions of the Regulation.

3 Experience in new technics

In spring 2007 Germany founded an Expert group in order to proof reduction potentials on HFCs in Supermarkets. The members are:

- .: Ministry of Environment
- .: Federal Environmental Agency
- .: Ecofys Germany
- .: Karlsruhe University of Applied Sciences
- .: Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Environmental Engineering
- .: Supermarket Chains:Rewe, Lidl, Metro, Aldi
- .: Producers of Components:Güntner, Bitzer, Bock, DuPont
- .: Refrigeration Companies:Linde, Epta, Dresdner Kühlanlagenbau
- .: Planning Engineers:Tebeg, KWN
- .: DKV, Eurammon, Öko-Recherche, GTZ

3.1 The Questions discussed were:

- .: What technics are "in the market". What are the experiences of parties involved in the market?
- .: Are there existing technologies to reduce the usage of HFCs in Supermarkets.
- .: Are this technologies competitive?

A lot of refrigeration systems of Supermarkets where discussed by the Karlsruhe University of Applied Sciences, Prof. Kauffeld.

But not only the refrigerants an their systems were discussed but also the energy saving potentials in existing Supermarkts or in using still HFCs.

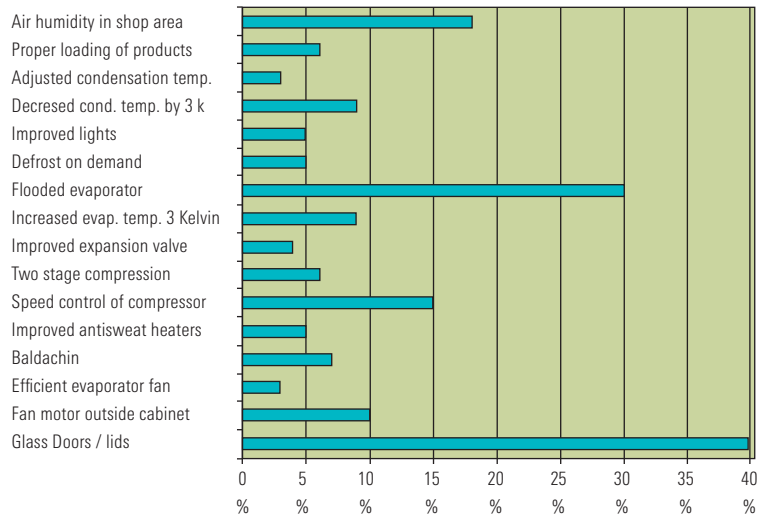


Figura 2 – Energy saving potentials in Supermarkets

The Expert Group and the German Government see a great potential in using CO₂ as a refrigerant in Supermarket applications. This opinion is secured by some manufactures which have first measures and experiences in this technics.

One of this measures shows the figure below:

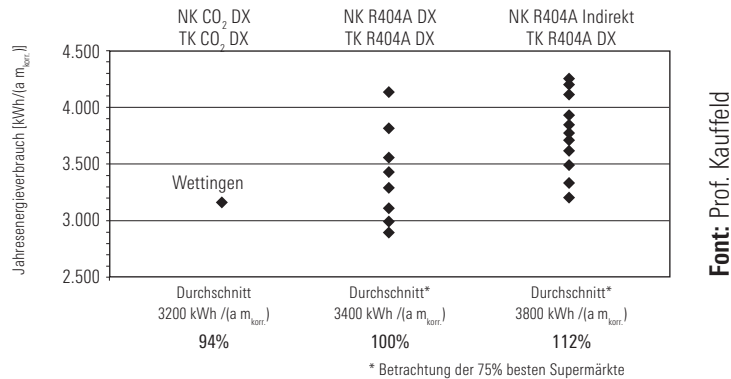


Figure 3 – Energy use per lfm in Swiss Supermarkets Measured by COOP Basel, LKS Schweiz

This chart shows that using CO₂ as a refrigerant is not only interesting because of the GWP (global warming potential) but also very interesting in the very efficient using of energy.

Right now there are about 60 Supermarket installations using CO₂ as a refrigerant CO₂ Supermarket in Europe. This installations are in Italy, Sweden, Norway, Germany, Switzerland, Luxemburg, Great Britain, Sweden, Belgium.

The Cooling Capacity spreads from

MT (Medium Temperature): 17-320kW

LT (Low Temperature): 2-80kW

4 Conclusion

If we discuss the new technics in using natural refrigerants with no GWP (global warming potential) instead of the HFCs, we have always to bear in mind that we talk about "old technics".

This refrigerants which come now in discussion because of their energy efficiency an zero or almost zero GWP are in fact very old refrigerants an go back to the first beginning of refrigeration in the late 19th century.

These refrigerants are Ammonia, CO₂, HCs, ...

Installation of freezing food in supermarkets with ammonia use

ALEXANDRE PRESOTTO JR

CARLOS GUILHERME SÜFFERT

SPM Engineering S/C LTDA Eça de Queiroz Street, 998 – Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

Zip code: 90670.020 – Contact: (55) 51.332.1188 – fax: (55) 51.332.1246

E-mail: carlos.suffert@spm.com.br – website: www.spm.com.br

ABSTRACT

This article describes the operation of freezing food system in supermarkets using ammonia as primary refrigerant and secondary fluids to distribute the cold to expositors and frigorific chambers. We present their technical, economical and environmental advantages and disadvantages, comparing with traditional installations that use direct expansion of R-22.

Based on experience of several installations in operation in Brazil, the article shows a case study comparing many currently available configurations in commercial refrigeration, analyzing aspects as implantation and operation costs, and environmental parameters.

1 Introduction

After Montreal Protocol signature, social pressure to reduce the use of sentenced gases have progressively increased, accelerating elimination of CFCs and HCFCs, and forcing market to adapt as soon as possible to this new reality.

As an alternative to the use of CFCs and HCFCs in freezing food systems in supermarkets, we have developed in Brazil for more than ten years installations that use intermediary fluids. These installations were initially designed in order to decrease refrigerant quantity in installation, in sense that it is restricted only to limits of thermal power plant, and intermediary fluid transports cold from the central to the points of consumption (chambers and expositors). And for complete elimination of halogenated fluids in the system it is used ammonia as primary refrigerant fluid.

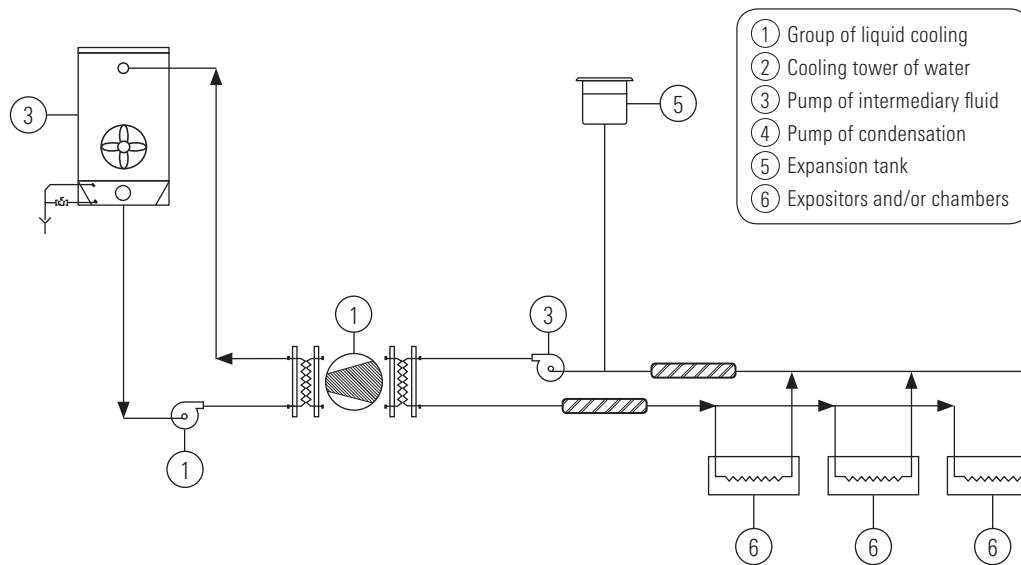
2 Operating of the system

The system, according to *picture 1*, is formed by a cooling group of liquid that cool the solution in anti-freezing water product capable to keep in the liquid state at low temperatures. The solution runs in network distribution through centrifugal pump motor, from the central to the expositors and chambers. The necessary temperature to store products is guaranteed through appropriated balancing between levels of temperature of intermediary fluids and thermal exchanger surface of serpentine coil.

When the distribution of cold is simplified, all operational and control cares, as capacity of modulation in regimes of partial load, control of overheating and leakage of refrigerant, are restricted to the thermal power plant. And in this way they are easily controlled.

The use of ammonia as primary refrigerant fluid n supermarket is only possible due to use of secondary fluids, dry expansion system for chillers to lower the refrigerant load, and adopting follow security procedures:

- ∴ System of permanent ventilation to keep the thermal power plant in constant depression of 2 mmca;
- ∴ Unloading of the system toward cooling towers of water;
- ∴ Unloading of security valves in the basin of cooling towers of water.



Picture 1 – Operating of the system

3 Description of the system

3.1 Refrigerated

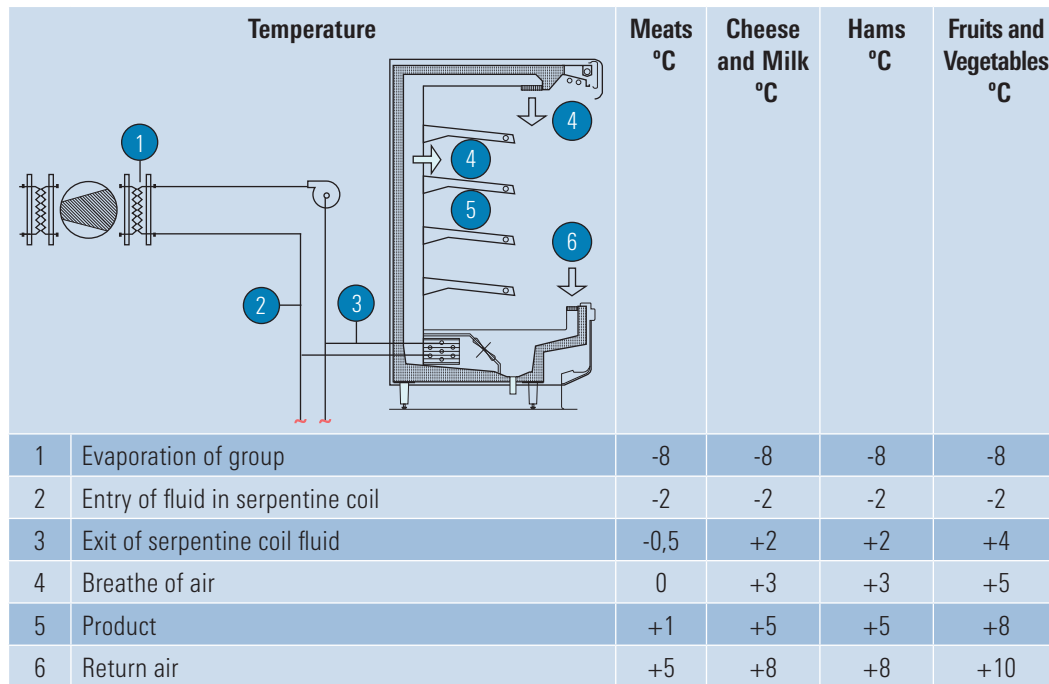
Usually installations of medium temperature for supermarkets use direct expansion of R-22 with an evaporation temperature about $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. It is for this regime that are dimensioned surfaces of transferring of heat from evaporators and are selected the others installation components. The biggest differential between evaporation temperature and temperature of conditioning product cause necessity to inclusion of temperature control for regimes of partial load and for defrost, because formation of ice in the evaporator is inherent to the process.

In installations with intermediary fluids it is normally used a solution in $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. So it is possible keeping serpentine coil with the same area of heat exchange, but maintain the need of control (temperature and defrost), in addition to cause a significant loss in energy performance.

The solution that we developed proposes to operate the installation with a small differential between the temperature of intermediary fluid (about $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) and the temperature of product.

Through appropriate balancing between solution fluid and surface of transferring of heat in serpentine coil, it was possible guaranteed the necessary temperature to good conditioning of products removing control of temperature and defrost in expositors and chambers and also a better global energy performance.

Results related to conservation of products in installations with use of intermediary fluid were equivalents to those achieved in refrigerator installations with conventional system of direct expansion of R-22. These conditions don't change throughout the day because don't occur anymore interruptions in the supply of fluid to serpentine coil. It guarantees perfect conditioning of products within the standards of quality for marketing according to picture 2.



Picture 2 – Results in refrigerated systems

3.2 Frozen

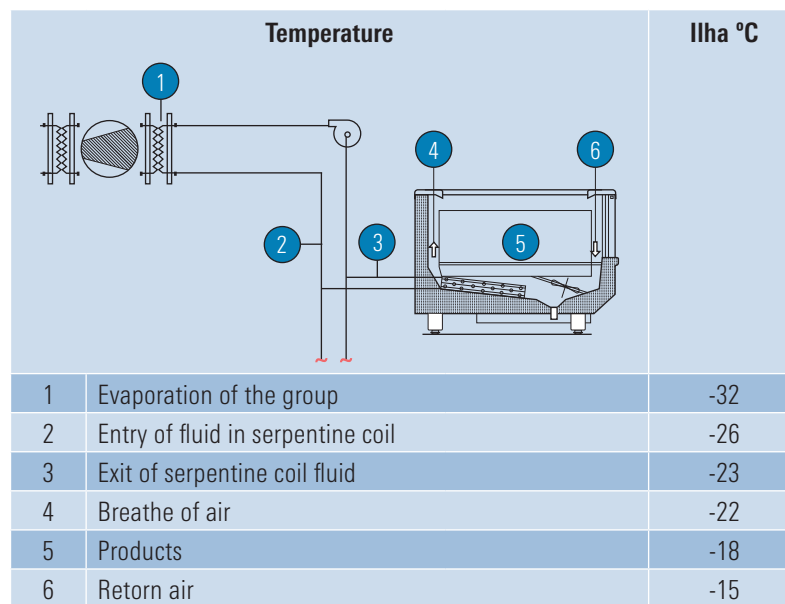
Conventional installations of low temperature with direct expansion of R-22 used to operate with evaporation equal or less than -32°C . So as criteria of scaling for installations with intermediary fluid it was adopted the same evaporation temperature in coolers groups and a exit temperature of

fluid equal to -26°C . In these conditions, using same serpentine coil of conventional installations (with adapted circuit) it is possible to guarantee necessary temperatures in chambers and expositors of frozen products (-20°C on the product).

The gain in bringing together the differential in temperature is achieved according to the following factors:

- ∴ Flow of temperature in perfect counter current;
- ∴ Better performance of changer, in the sense that the distribution of heat exchange in serpentine coil is more efficient and better distribute in liquid systems X air systems than in liquid / steam x air;
- ∴ Optimization of overheating.

The results in installations operating in the way described in previous item guarantee the conditions required for storage and exhibition of frozen products in supermarkets according to *picture 3*. And despite being necessary defrost routine, it was observed that oscillations in temperature of the solution, in periods after defrost, are smaller than variations in evaporation temperature in the same periods in systems with direct evaporation.



Picture 3 – Results in systems of frozen

4 System performance

Analyzing installation performance in two different moments, not only in full load regime, but also in partial load regime when we have the shop closed for public and, consequently, the decline of thermal power load. In these conditions we observe that, on the contrary to what happens in systems of direct evaporation, the evaporation temperature of chiller increases due to decrease of differential of secondary fluid temperature and, as a consequence, the COP of installation increase.

So, due to increase of evaporation temperature in refrigerated circuit, also for frozen during partial load regime period and optimization of overheating, we have gains in COP comparing to systems of direct expansion of R-22, according is indicated in table below:

System	Load regime	Frozen				Refrigerated				COP global
		t. ev. °C	t. cd. °C	s.h °C	s.c. °C	t. ev. °C	t. cd. °C	s.h °C	s.c. °C	
R-22 direct expansion	Total	-32	+35	20	5	-10	+35	10	5	2,97
	Partial	-33	+35	20	5	-11	+35	10	5	
Ammonia as a secondary fluid	Total	-32	+35	5	5	-8	+35	5	5	3,05
	Partial	-31	+35	5	5	-7	+35	5	5	

5 Study case

Comparing proposed system with ammonia as primary refrigerant and secondary fluids with installations actually in use. Analyzing the energy consumption, costs of implantation, operational costs and environmental questions for a medium supermarket with 4.000 m² shop area, in Porto Alegre, Brazil, with thermal load of 260 Mcal/h for refrigerated and of 80 Mcal/h for frozen we have:

System	Cond.	Energy consumption			
		Frozen	Refrigerated	Total	Difference
		kW	kW	kW	%
R22 direct expansion	Air	75,2	119,3	194,5	0,0
R22 direct expansion	Water	52,9	82,9	135,8	-30,2
R507a direct expansion	Air	84,4	138,8	223,2	+14,8
R22 secondary fluid	Air	66,1	94,7	160,8	-17,3
R507a secondary fluid	Air	71,3	106,0	177,3	-8,8
CO ₂ sub critical – R507a	Air	28,6	145,0	173,6	-10,7
CO ₂ transcritical	Air	26,2	229,8	256,0	+31,6
Secondary fluid – ammonia	Water	54,9	77,2	132,1	-32,1

System	Costs of implementation					
	Central	Bal./câm.	Fluid	Instal.	Total	Dif
	mil R\$	mil R\$	mil R\$	mil R\$	mil R\$	%
R22 direct expansion	296	1.250	34	261	1.841	0,0
R507a direct expansion	296	1250	153	261	1.960	+6,5
R22 secondary fluid	421	1.297	35	241	1.994	+8,3
R507a secondary fluid	421	1.297	49	241	2.008	+9,1
CO ₂	sem preço no Brasil					
secondary fluid - ammonia	562	1.297	31	241	2.131	+15,8

System	Costs of operation				
	Energy	Fluids	Maint.	Total	Dif.
	mil R\$/year	mil R\$/year	mil R\$/year	mil R\$/year	%
R22 direct expansion	328,4	6,3	24,0	358,7	0,0
R22 direct expansion	229,3	0,4	12,0	241,7	-32,6
R507a direct expansion	377,4	29,4	24,0	430,8	+20,1
R22 secondary fluid	273,7	0,4	12,0	286,1	-20,2
R507a secondary fluid	302,9	1,5	12,0	316,4	-11,8
CO ₂ sub critical – R507a	295,8	6,0	36,0	337,8	-5,8
CO ₂ transcritical	435,5	2,7	36,0	474,2	+32,2
secondary fluid – ammonia	223,0	0,3	12,0	235,3	-34,4

PS.: Calculation of energy cost was considered according to rate "horo-seasonal green."

System	Environmental issues				
	ODP	GWP	Refrigerant kg	Energy MWh/year	TEWI
R22 direct expansion- air	0,03	1.700	2.000	1.704	17.874.000
R22 direct expansion - water	0,03	1.700	1.900	1.190	14.407.500
R507a direct expansion	0	3.900	1.800	1.955	27.525.000
R22 secondary fluid	0,03	1.700	300	1.409	9.091.500
fluido secundário - R507a	0	3.900	270	1.553	10.634.300
CO ₂ subcritical - R507a	0	3.900	270	1.521	10.449.000
	0	1	3.000		
CO ₂ transcritical	0	1	1.000	2.243	13.461.300
secondary fluid – ammonia	0	0	40	1.157	6.942.000

Obs.: TEWI calculated for 10 years of operation.

6 Conclusion

There are in Brazil installations of commercial refrigeration, installed for more than ten years, using ammonia as primary refrigerant and secondary fluids, operating excellent results comparing to systems of direct expansion of R-22 that have been using, and to several options of available configurations in the market, analyzing technical, economical and environmental aspects. It evidences the viability of this configuration related to elimination of halogenated fluids as was established in Montreal Protocol.

Applications of CO₂ in commercial refrigeration sector for supermarkets

ALESSANDRO DA SILVA

Engenheiro Bitzer Compressores

Bitzer Compressores Ltda – Av. João Paulo Ablas, 777 – Jd da Glória – Cotia – São Paulo

E-mail: aplicacao@bitzer.com.br

ABSTRACT

Due to global awareness related to environmental issues, as Global warming (Greenhouse Effect), CO₂ is being used increasingly as a refrigerant environmentally correct, being one of alternative to conventional synthetic refrigerants (H), CFCs and HFC's currently used in refrigeration systems.

Thanks to its great environmental characteristic, low toxicity, and favorable thermo physics properties in sub critic operation, Carbon Dioxide (R 744) is progressively being considered as preferred refrigerant for application in cascade systems to medium and low evaporation temperature in frigorific supermarket installations.

Comparing to other conventional systems used in this application, the high volumetric capacity of refrigeration of CO₂ allows a significant costs reduction in compressors, tubing and load of refrigerant in frigorific system. Even being applied in bigger solicitations of thermal load, the potential of CO₂ results in using compressors in sizes usually founded in commercial and industrial applications of small, medium and huge size.

On the other hand, its high pressure of working even when equipment is stopped requires that installation project and security measures be made with special criteria. This article is about thermodynamics properties of CO₂, its use as refrigerant, on frigorific components available currently and, in particular, with more attention, about applications of semi hermetic compressors used in sub critic condition with CO₂ in commercial refrigeration for supermarkets.

1 Introduction

After its small relevance in refrigeration sector during many decades, CO₂ return to have its applications rediscovered mostly because an environmental argument. Recently a series of cascade systems with CO₂ in sub critical operation have been applied in commercial installations at supermarkets in Europe and Australia. CO₂ has thermo physics properties favorable for this kind of application, also chemically inert, it is not flammable and it is only harmful to health in high concentration.

2 Thermodynamics properties of CO₂

2.1 Pressures of working

The main characteristic that will constrain the project of an installation with CO₂ are high pressures that refrigeration system operate. Comparing CO₂ to others refrigerant used currently in commercial and industrial sector, we can see that its saturation pressure is much higher of bands of temperature than any refrigerant, specially in condensation ones (Figure 1.1).

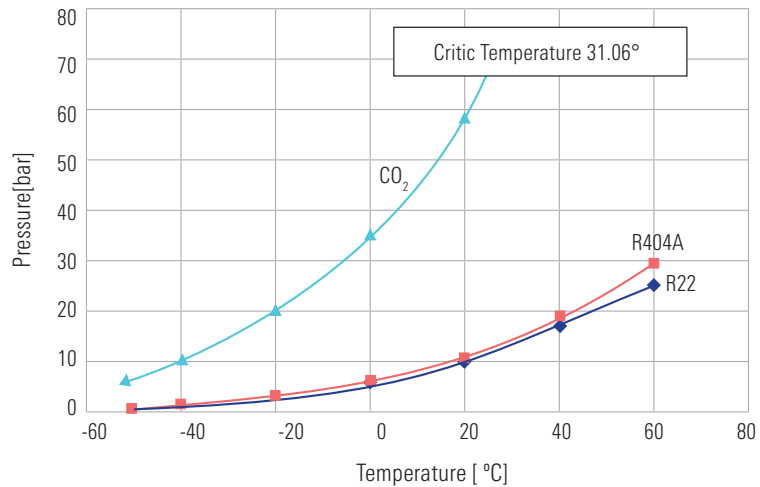


Figure 1.1 – Pressure of saturation in function of temperature of saturation

Why, according to the kind of refrigerant, data obtained are limited to different temperatures of saturation?

It is due to existence of points that limit the process of “condensation and evaporation”. In lower part curves are limited by triple point that marks the limit between liquid/seam balance and solid/steam balance. Evaporation and condensation process are related to changes of estate between liquid and steam. In superior part curves are limited by critic point where we can not distinguish between solid and liquid. For this reason there is not condensation (Figures 1.2 and 1.3).

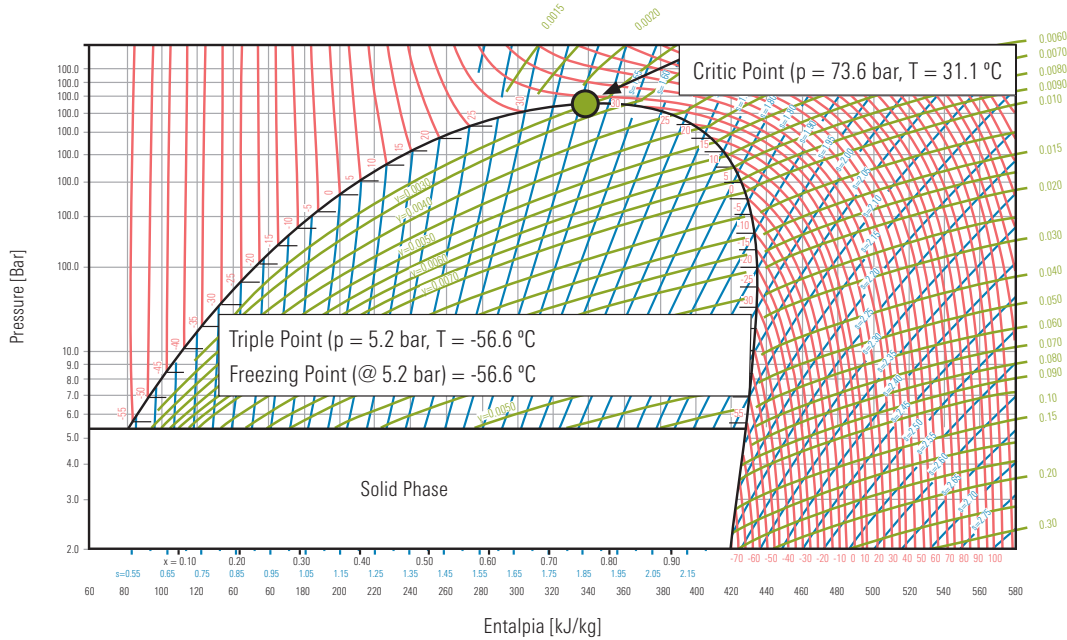


Figure 1.2 – Log P Diagram and CO₂ Enthalpy

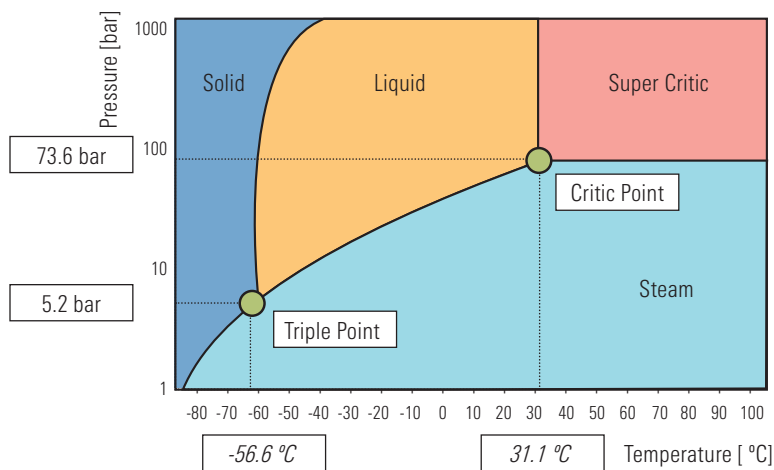


Figure 1.3 – Pressure and Temperature of CO₂ Diagram

1.2 Critic Point

Estate of pressure and temperature that we can not distinguish between liquid and steam. Exactly in this point, density of two phases are equal. In case that pressure and temperature continue increasing, fluid will be in super critic point.

1.3 Triple Point

Limit that coexists three phases. It is important to note high pressure of this CO₂ condition (2,2 bar abs.), founded in the way of any expansion produced up to atmospheric pressure (1 bar abs.) (Figure 1.4).

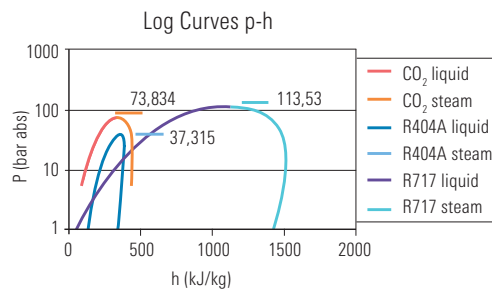


Figure 1.4 – Curves of balance liquid –steam for different refrigerants

Comparing the zones of phase changes for different refrigerants we can note that:

1. The pressure of triple line for CO₂ is much higher compared to R404A or Ammonia.
2. The enthalpy of evaporation for Ammonia in general is much higher.

Particularities in triple line

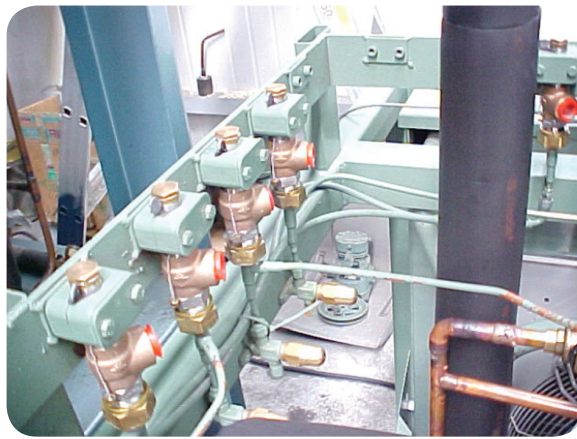
Any leakage of refrigerant to atmosphere represent an expansion up to pressure of 0 bar relative (1 bar abs.). This fact provoke solid phase of CO₂ (known as dry ice), but the same do not occur with Ammonia and R404A.

1.3.1 Leakage in tubing of refrigerant

If it is proven a leakage in a liquid line (through a sphere valve), it can seal itself due to formation of solid in an expansion process of CO₂. It will only occur with a minimum refrigerant escape.

1.3.2 Relieving of CO₂ pressure through security valve

It is recommended installing security valves in sides with low and high pressure in the system, in cascade application it is recommended using valves with pressure of 25 bar in low side and 40 bar in high side. Relieving of CO₂ pressure in environmental in emergence case represents an expansion by below the triple point, resulting in a solid portion. To avoid an obstruction due to ice formation, it is not recommend installing any additional tubing after security valve. Its installation could be inside the rack or outside of machine room, but in this case it would be necessary extend the tubing before the valve to avoid a block due to ice formation (Pictures 1 and 2).



Picture 1 – Security valves installed inside the rack



Picture 2 – Security valves installed in outside of machine room, “without tubing ending to avoid blockade for ice”

1.4 Security

CO₂ is denser than air, for this reason it always flow toward the ground (floor) in a leakage situation. This fact could be very dangerous (specially in small spaces), once the CO₂ is not self alarming (as Ammonia), it can shift oxygen to limits that are harmful to healthy. It needs a special attention to detect leaks and emergency ventilation (exhaustion). It is recommend an exhaustion to renew air in machine room every 10 minutes in CO₂ leakage situation.

1.5 Enthalpy of Evaporation

The values observed in different curves of change phase could be compared to values of evaporation enthalpy in different temperatures (Figure 1.5).

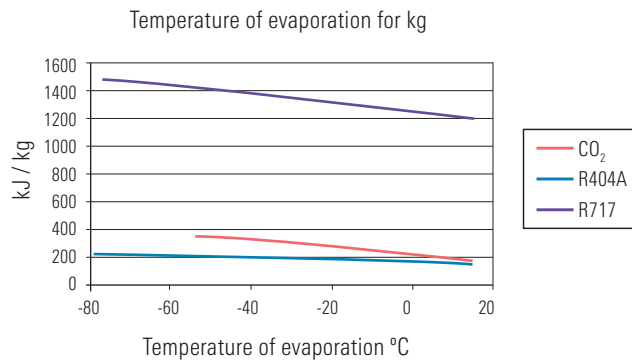


Figure 1.5 – Evaporation enthalpy for different refrigerants

Density of CO₂

The density of CO₂ is much higher compared to other refrigerants, and this reality has different consequences. Due to higher density of steam of CO₂, volume displaced to obtain the same potential of refrigeration is much lower. As advantages we have:

- ∴ Compressors with small sizes (smaller volume displaced),
- ∴ Lower quantity of refrigerant in installation,
- ∴ Small size of container and lines of refrigerant.

Concentrations of CO₂ in air and its effects

% _____ Effects

- 0.04% _____ Concentration in atmospheric air
- 2% _____ 50% of increasing in respiratory rate
- 3% _____ Short times of 10 minutes of duration limit, increasing respiratory rate 100%.
- 5% _____ Increasing of 300% in respiratory rate, after one hour could appear headache and sweat.
- 8% _____ Limit of exposition in short times.
- 8 – 10% _____ Headache after 10 or 15 minutes. Sickness, dizziness, ringing in ear, increased tension, pulse, excitement, vomiting.
- 10-18% _____ After a short exposition appears epileptic attack, loss of consciousness and shock (victims recover quickly with fresh air).
- 18-20% _____ Symptoms similar to a thrombosis.

1.6 Temperature of discharge

Compression of any gas leads an increase above of this saturation temperature. The compression of a CO₂ cycle in a cascade cycle [-50/-5 °C] could lead to temperature of discharge near to 80 °C.

2 Use of CO₂ as refrigerant

2.1 Frigorific project

Higher pressures of CO₂ working as we discussed in item 1, as its critic point in about 31, 1 °C which makes frigorific projects substantially different from conventional refrigeration systems. Fundamentally refrigeration systems are shared in two categories:

1. **Transcritical** circuits: the side of high pressure is above of critic point. In this application CO₂ does not condensate, on the contrary, it des-overheat, which we called "gas cooling".
The pressures in the side of high are between 100 to 120 bar.
2. **Sub-criticals** circuit: the side of high pressure is below of critic point. In this case CO₂ condensates, and this process is called condensation.

The pressures in the side of high are between 30 bar (-5 °C) to 25 bar (-12 °C).

According to what was exposed above, sub-critical circuits are more used nowadays due to technology and knowledge currently available.

2.1.1 Transcritical systems

In picture 3 and 4 respectively, we can see an installation and a Bitzer compressor for transcritical application with CO₂.



Picture 3 – Rack with transcritical application of CO₂



Picture 4 – Bitzer compressor for transcritical application of CO₂

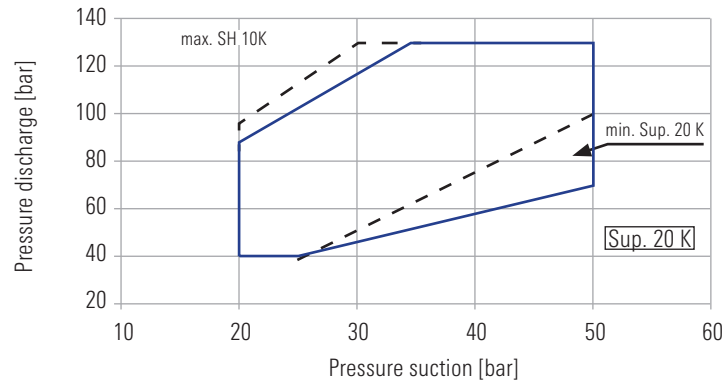


Figure 1.6 – Limits of application of compressor for transcritical operation with CO₂

2.1.2 Sub-critics systems

2.1.2.1 CO₂ as secondary fluid

This kind of system represents the simpler way of CO₂ application with current technology, because in this kind of system CO₂ is used as secondary refrigerant, being pumped and not compressed. A frigorific system (R404A, R717, ...) is responsible to re-condensate CO₂ that evaporate a part in the evaporators, and once condensed, it is stored in accumulation tank of CO₂.

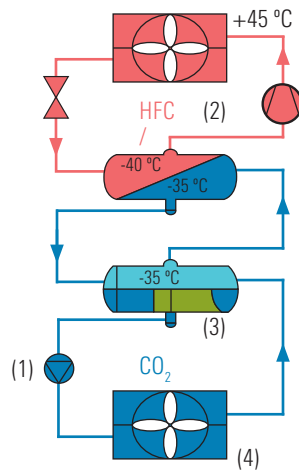


Figure 1.7 – Scheme of installing CO₂ as secondary refrigerant

The system in Figure 1.7 presents followed main elements:

- (1) Pumping station of CO₂.
- (2) Cooling/ Condensation system of CO₂.
- (3) Accumulation tank of CO₂.
- (4) Evaporators of CO₂.

2.1.2.2 Cascade installations

Figure 1.8 shows an example of cascade application for using with Dioxide Carbon (R744) that is used in secondary systems for medium and low evaporation temperature. In primary system used to condensate CO₂, the refrigerant could be natural (R290, R717, etc) or synthetic (HFC's, for example: R134a, R404a, etc), but in low quantity because it will be confined only in the circuit that involves compressor, condenser and evaporator (cascade heat exchanger).

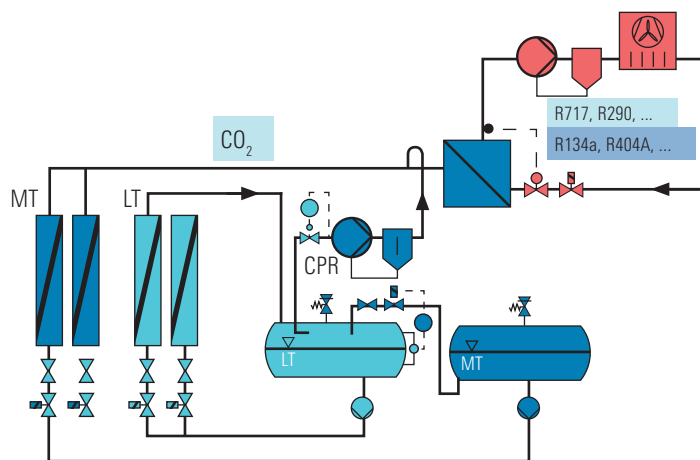


Figure 1.8 – Cascade System with CO₂

According to Figure 1.9, in applications of medium temperature in frigorific supermarket installations, are obtained through a system with recirculation of liquid, in this case evaporator work flood by CO₂ liquid in -10 °C.

System of low temperature is done through a cycle of steam compression using alternatives semi – hermetic compressor, working with direct expansion evaporating in -30 °C, and CO₂ is condensate in about – 10 °C.

System of medium temperature is included in cycle, and CO₂ in liquid state in -10 °C is circulated through evaporators of cooling by a pump specially designed for recirculation this fluid.

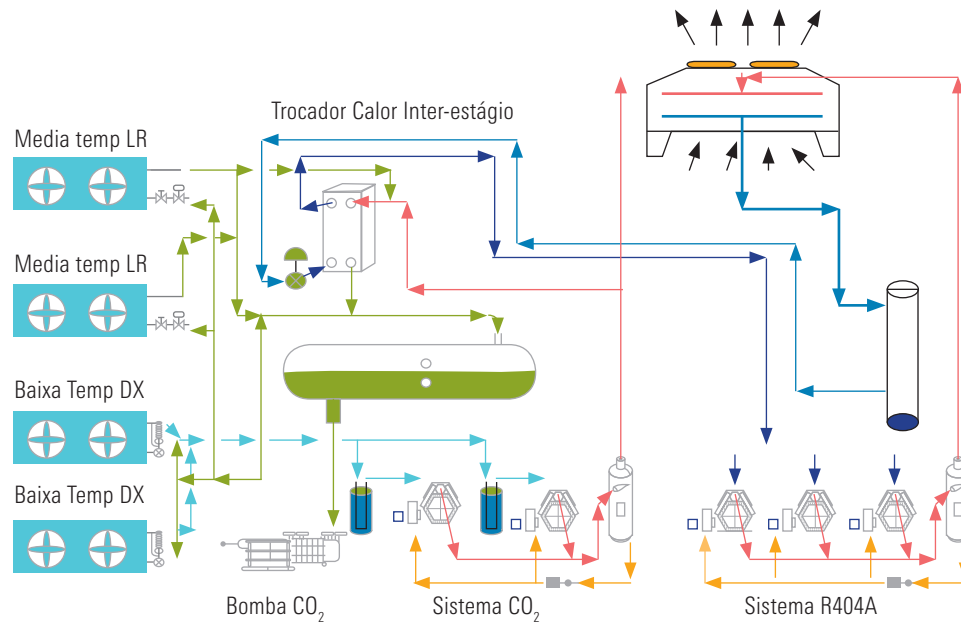


Figure 1.9 – Cascade System with CO₂: Evaporators of low temperature with direct expansion and medium temperature with recirculation of this fluid

To obtain advantage from high efficiency of refrigerant, CO₂ is used in low pressure stage in cascade where it is condensate in - 10 °C (sub-critic condition).

Low pressure stage is connected to a primary refrigeration system (R404A) that transfers the absorbed heat of evaporators of low and medium temperature and dispel to atmosphere through a condenser cooled by air or water.

Due to high density of steam and high volumetric efficiency, compressors applied with CO₂ save much more energy compared to conventional refrigeration systems.

Cascade system has also the advantage to obtain a high level of sub-cooled liquid that results in significant reduction in diameter of lines and refrigerant load too – compared to conventional refrigerant.

Generally, diameter of lines of system with CO₂ could be reduced about 70% to the diameter currently used with R22 or R404A for the same frigorific capacity.

Due to reduced cost of CO₂ compared to synthetic refrigerants currently commercialized, total cost of load refrigerant could be reduced significantly.

Though medium temperature system – that is cooled by liquid recirculation – does not offer a significant reduce of energetic cost, substantial savings could be obtained through reducing refrigerant load and real reduce of refrigerant cost.

Additional advantages are also obtained by evaporators with small heat exchanger areas, also for quick drop in temperature due to high heat transfer produced by flood evaporators.

Circuits of medium and low temperature can be combined in an integrated tubing system, reducing significantly the size of equipment, making it more compact.

In the heart of the systems there is a tank of liquid specially designed that feeds a pump of liquid CO₂. This pump feeds all the system (cooled and freeze) with liquid refrigerant CO₂.

Liquid CO₂ that is being pumped through evaporators of medium temperature evaporate in part and return to tank of liquid as a mixture liquid/steam, maintaining the temperature about -10 °C.

Evaporators of low temperature are also fed by CO₂ pump. Tough in this case refrigerant pass through a valve of expansion that ensures only steam refrigerant overheat return to compressor of low temperature evaporation.

Refrigerant steam that arrives in suction of compressors of low temperature is compressed up to condensation temperature. This compressed gas is so sending to a heat exchanger along with the return of refrigerant from the low temperature evaporators, and both are condensate and accumulated in a tank of “Flash” – with circulation by end siphon in a temperature about -10 °C.



Picture 5 – Racks for sub-critic operation with CO₂



Picture 6 – Rack for sub-critic operation with CO₂ using recirculation pump for evaporators of medium evaporation temperature

2.2 Pressures of project of frigorific installations with CO₂

Pressures of project of frigorific installation with CO₂ depend on the kind of application that is intended to, according to classification mentioned in previous item. However there is a consensus among different manufactures of frigorific components for CO₂ in following pressures of project:

Pressure of Work	Side of high pressure	Side of low pressure
Transcritical system	115 bar	25 bar (50 bar)
Sub-critic system	40 bar (50 bar)	25 bar (50 bar)

Note: between parenthesis in case of defrost by hot gas.

2.3 Tubing for systems with CO₂

CO₂ as inert gas that it is results compatible with all of metals, for this reason the tubing for systems with CO₂ can use:

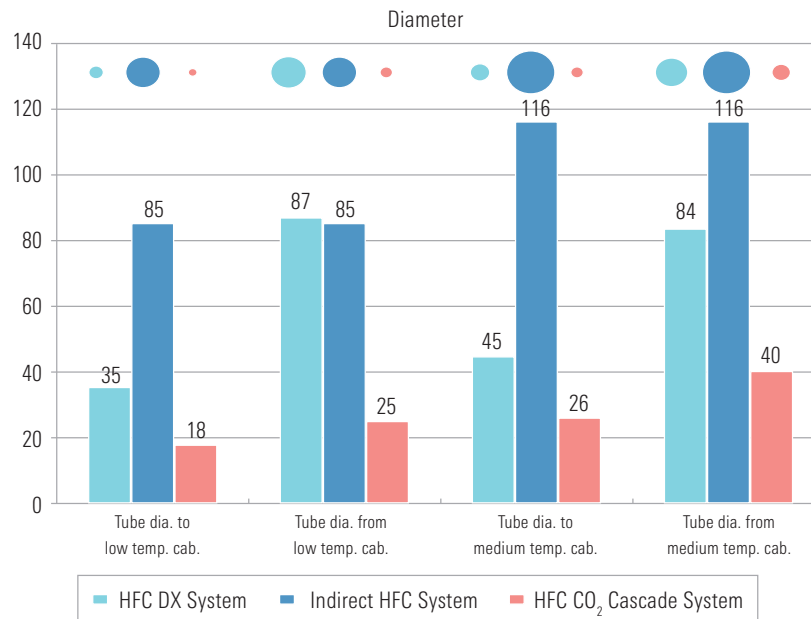
- ∴ Copper
- ∴ Carbon steel
- ∴ Stainless steel

The only condition is that support the pressure of project mentioned in previous item. Following we indicate the pressure of working in function of nominal outside diameter and thickness of the wall. According to values showed in table 1 cylinder in copper can be used with a diameter up to 1 1/8" in installations with pressures of project of 40 bar in side of high pressure.

Table 1 – Diameters, thickness of the wall, pressure of working and pressure of collapse of copper tubes

Copper Tubes (flexible tube)			
Diameters, thickness of the wall, pressure of working and pressure of collapse – Approximate values			
3/8	0.91	7680 kPa	38240 kPa
1/2	0.91	5630 kPa	28660 kPa
5/8	0.91	4440 kPa	22900 kPa
7/8	0.91	3125 kPa	16375 kPa
	1.22	4260 kPa	21950 kPa
1-1/8	1.22	3275 kPa	17080 kPa
	1.63	4010 kPa	20500 kPa
1-3/8	1.22	2660 kPa	13975 kPa
	1.63	3630 kPa	18670 kPa
1-5/8	1.22	1860 kPa	11825 kPa
	1.63	3050 kPa	15800 kPa
2-1	1.63	2315 kPa	12080 kPa

Table 2 – Comparison of diameters of tubing with DX HFC system
X indirect HFC system X CO₂/ HFC cascade system



Note: values of pressure of working of table 1 should not be confused with pressure of collapse of copper tube that is located well above of tabulated values.

2.4 Test of leakage in systems with CO₂

Test of leakage should be done with a pressure of Nitrogen about 40 bar in high side and 25 bar in side of low pressure of frigorific system. It is also recommend consult manufactures of evaporators and inter heat exchangers to know which pressure test recommended should be used in these components to avoid damage of collapse.

2.5 Evacuation in systems with CO₂

After certifying that the system is not leak the evacuation should be done with high vacuum pump (two stages) in sides of high and low pressure of frigorific system included in evaporators and inter heat exchangers. It is also recommended break the vacuum with dry nitrogen when the system reaches a pressure of 500 micron of mercury, repeat this operation twice because nitrogen will help to remove the humidity from the system quickly.

It is very important arrive in a small level of vacuum that is possible (minimum recommended: 250 micron of mercury) because the presence of water in system of CO₂ is undesirable and could provoke formation of carbonic acid that damage steel. The action of carbonic acid in copper is very slow and could be considered despicable. Stainless steel, on the contrary, does not suffer action by acid.

2.6 Refrigerant load in CO₂ systems

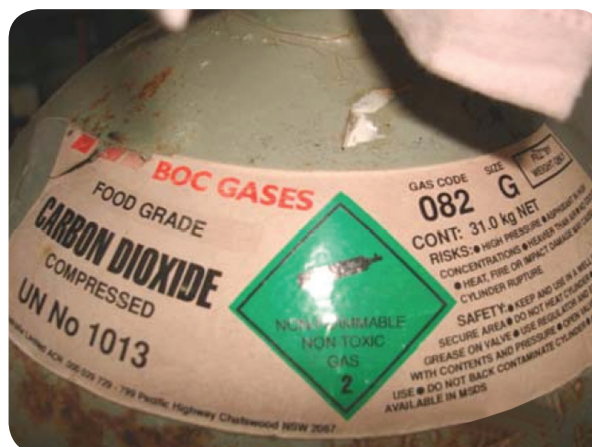
Load of CO₂ in refrigeration system is one of the most important points and we should have been very careful in this operation. The special attention, as we mentioned in item 1, should be done in CO₂ triple point that occurs in a pressure of 5.2 bar. So, in case of liquid phase of CO₂ in a system that is in vacuum, a "carbonic snow" in solid stage will immediately appear inside the system that will block the operation. For this reason we should provide an initial load in the system with CO₂ in gas phase only to overcome the triple point (5,2 bar abs.) Subsequent it could continue with load in liquid phase directly in liquid container. Due to high pressure that cylinders have, we always have done the load through a regulator pressure valve to avoid accidents (Picture 7). Otherwise it will provoke a high evaporation of refrigerant liquid in the end of cylinder. For this reason, we recommend cooling CO₂ cylinder during the load with liquid. This way we will have:

- ∴ Lower evaporation of CO₂ liquid.
- ∴ Lower increase of pressure in the system.

To avoid a quick increase of internal pressure in the system we recommend put primary frigorific system in operation to do the CO₂ condensation. The type of Carbon dioxide recommended for using in refrigeration is **Food Grade** that contains 5 ppm of humidity. CO₂ cylinders are very similar to Nitrogen cylinders, and they are commercialized in cylinders between 25 to 45 KG. We also recommend consult manufactures as BOC, White Martins, etc.



Picture 7 – Detail of regulator pressure valve installed in CO₂ cylinder



Picture 8 – Detail of CO₂ level recommended for refrigeration Food Grade

2.7 Miscibility of oil with CO₂

Lubricating oil used in CO₂ systems is Polioléster (POE): BSE60K for sub-critic operation and BSE80K for transcritic (source Bitzer). They are miscible with CO₂ benefiting return to compressor. However the high solubility (capacity to mixture with gas phase) presented by CO₂ require special cares, such as:

- ∴ It is required the use of resistance in the crankcase of compressors
- ∴ Minimum temperature of oil 40 °C (crankcase)

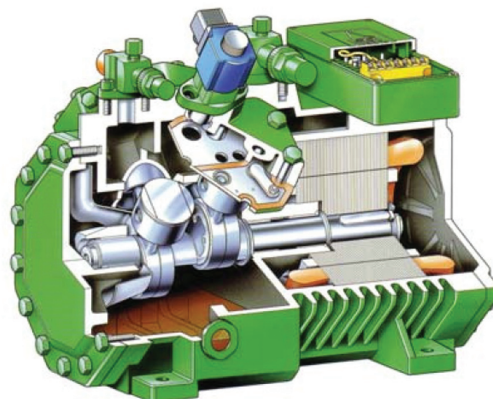
The POE used with CO₂ is a hygroscopic oil therefore it is necessary take the same precautions with POE oils used for HFC's.

3 Frigorific components for cascade installation with CO₂

In this item we will analyze the different frigorific components that are necessary to do a cascade installation with CO₂.

3.1 Compressor

3.1.1 Range of compressors Bitzer Serie K



Picture 9 – Detail of compressor semi-hermetic alternative Bitzer Serie K for sub-critic applications with CO₂

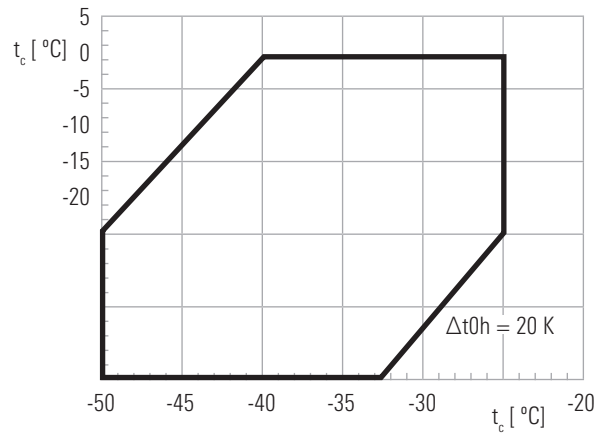


Figure 2 – Limits of application of semi-hermetic compressors alternative Bitzer Serie K for sub-critic applications with CO₂

Compressor characteristics for sub-critic applications with CO₂

Currently the range of compressors Bitzer Serie K for sub-critic application with CO₂ cover 16 models of compressor from 2,71 to 46,9 m³/ h of displacement. Refrigeric potential goes from 4,8 kW to 86,5 kW in – 35/ -5 °C. The main characteristics of these compressors are:

- ∴ Centrifugal lubrication system by dynamic disk.
- ∴ Buffer of pulsations integrated in the head to reduce noise and vibration.
- ∴ Slabs of valve specially designed for CO₂.
- ∴ System of resistant transmission with dowels wear coated with PTFE (Teflon).
- ∴ Specific load of POE oil (BSE60K).
- ∴ Carcass of high resistance to pressure without basic cover for service pressure of maximum 40 bar (high pressure).

3.2 Heat Inter Exchangers

3.2.1 Evaporators

There are some manufactures that offers a range of evaporators prepared to CO₂.

For example, Güntner and Buffalo Trident.

Güntner offers two series of evaporators:

- a)** Serie CXGHN: pressure of working up to 28 bar.
 - ∴ Construction: copper and aluminium.
 - ∴ Defrost: electric (it is possible reinforce up to $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$).
 - ∴ Coefficient K: 33 kW / m²K at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - ∴ Range of 1 to 3 fans with shovels from 400 to 800mm.

- b)** Serie CPGNH: pressure of working up to 50 bar.
 - ∴ Construction: stainless steel and aluminium
 - ∴ Defrost: electric, water and possible hot gas.
 - ∴ Coefficient K: 28 kW / m²K at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - ∴ Range of 1 to 3 fans with shovels from 400 to 800mm.

Buffalo trident offers three series of evaporators:

- c)** Serie BRLC and BBLC: for low temperature of evaporation between $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - ∴ Construction: copper and aluminium.
 - ∴ Defrost: electric.
 - ∴ Range of 1 to 5 fans with shovels from 300 to 500mm.
- d)** Serie BRCLR: for medium evaporation temperature with recirculation of liquid.
 - ∴ Construction: copper and aluminium.
 - ∴ Defrost: natural
 - ∴ Range of 1 to 5 fans with shovels from 300 to 500mm.

3.2.2 Condenser

As we mentioned in item 2, in cascade systems with CO₂ the condenser of CO₂ is the evaporator of primary frigorific system that works with R404A, R717, etc. For this reason condensers of CO₂ in these systems are:

- ∴ Multi tubular
- ∴ By plates
- ∴ Tube in tube for small potentials.

In condensers by plates or tube in tube beyond pressures of working needed it is important take into account the pressure of collapse of tubes in case CO₂ move outside them.

3.2.3 Heat Inter Exchangers

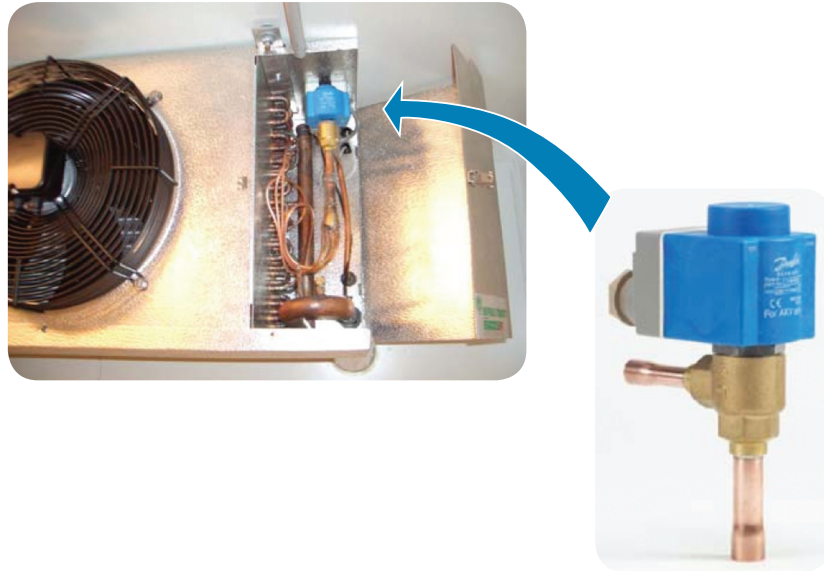
In cascade installations with CO₂ it is very important include a heat inter exchanger between line of liquid (primary system) and suction one (secondary system). The reasons are:

- ∴ Due to negative temperature that we have included in the side of medium temperature of CO₂ circuit heat entries in line of liquid could provoke flash-gas. The inter exchanger give a additional sub-cooling that avoid this phenomena.
- ∴ Because of high solubility of CO₂ refrigerant in lubricating oil it is necessary guarantee a minimum overheat of 20 K to avoid that oil being much diluted and loses this lubricating properties.

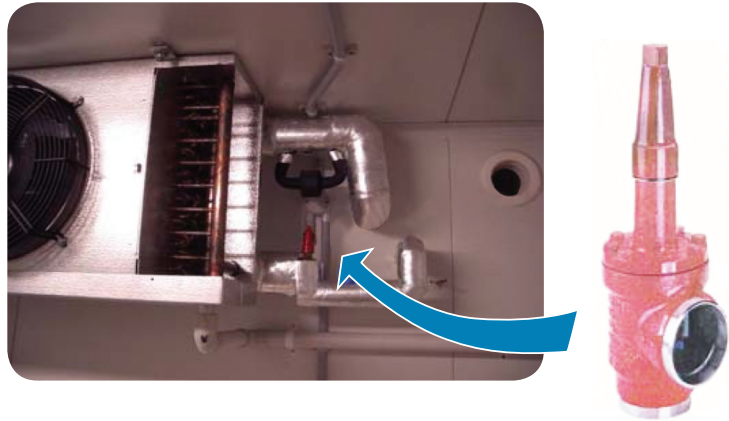
The kind of inter exchanger preferably be used is by plate.

3.3 Expansion Valves

320



Picture 10 – Detail of electronic expansion valve used in evaporators of low temperature (freeze system), with dry expansion



Picture 11 – Detail of manual expansion valve used in evaporators of medium temperatures (cooled systems) that work with recirculation of liquid CO₂

Due to particular thermodynamics properties of CO₂, considered as cryogenic fluid, it requires an answer time very quick during its expansion in evaporators of low evaporation temperature, and only electronic expansion valves meet this requirement. Manufactures as Danfoss, Siemens and Carel have this kind of valves prepared specially to be used with CO₂. Cooling systems (medium temperature), as it woks with recirculation of liquid CO₂, is simpler and, for this reason, require manual valves to control refrigerant flow and it is also recommend solenoids valves for blocking the flow of refrigerant according to command.

3.4 Containers of liquid

Containers of liquid of CO₂ systems are smaller compared to Ammonia and HFC systems, and this fact is due to lower volumetric flow that is require for the same frigorific capacity. Containers of liquid should be designed to necessary pressures of working. It is recommend to install in container of liquid an “outside” serpentine coil that should be connect to a condenser unity that could be driven by a generator in emergence situation, to avoid the increase of pressure of CO₂ system in event of electrical failure. Another possibility is to install the container of liquid inside one of the chambers of frigorific installation keeping CO₂ liquid in low temperatures for some days (aprox. 3 to 5 days) without a considered increase of pressure.



Picture 12 – An example of a serpentine coil application used to keep CO₂ cold in case of electrical failure. It should be connect to a condenser unity driven by generator



Picture 13 – Detail of tank of liquid mounted in a rack thermally isolated

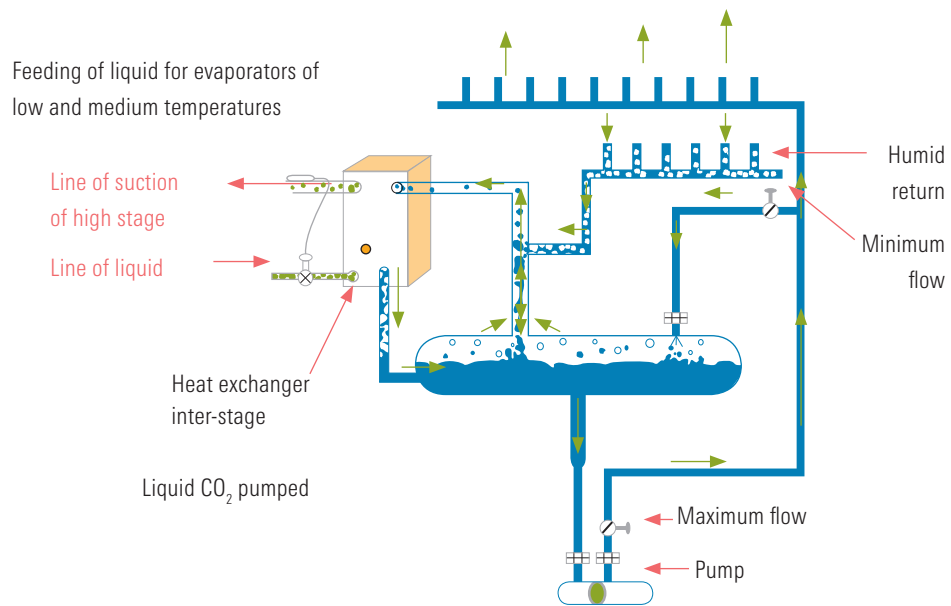


Figure 2.1 – Detail of pumping system of liquid CO₂



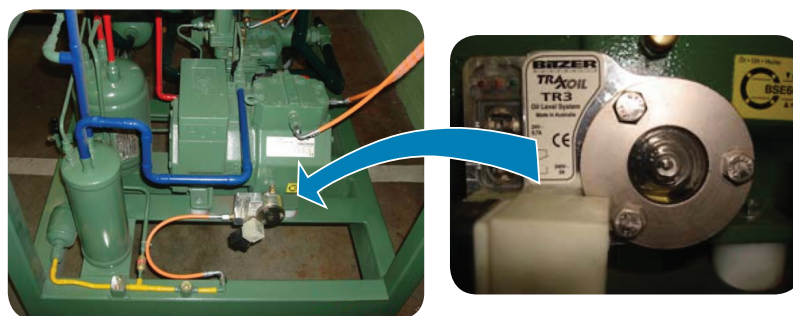
Picture 14 – Detail of rack with pumping system of liquid CO₂

3.5 System of oil control

The system of oil control of a CO₂ central cascade is very similar to systems of oil of a compressor central of conventional pistons. Elements are:

- ∴ Tab oil (centrifugal) + integrated oil lung (HP system)
- ∴ Electronic regulators of oil level (buoy).

Due to high solubility of CO₂ in oil, it is recommend install centrifugal tab oil and lung of high pressure both in one peace. Electronic regulators of oil level contribute to security of compressor operation, beyond to control the oil level of work in crankcase it also control minimum and maximum alarm level (avoiding an eventual flood with excess of oil in compressor).



Picture 15 –Detail of electronic regulator of oil level

3.6 Valves and components of line

Currently there are in market several valves and components of line adapted to work with CO₂. In this sense, available valves with HFC's and/or Ammonia are also valid to use in systems with pressure of project at 40 bar.

Related to components of line:

- ∴ Filters of liquid.
- ∴ Viewers
- ∴ Solenoids.
- ∴ Ball valves

It is important to verify with manufacturers its compatibility with CO₂. It is specially important the function of filter drier that should be large dimension to ensure a good dehydration of circuit, on the contrary, could provoke formation of ice crystals and after carbonic acid.

3.7 Detector of CO₂ leakage

CO₂ is a colorless and odorless gas, being suffocating by displacement of oxygen. It is denser than air and because of it we should have a special care in closed environments and guarantee sufficient ventilation. For this reason it is also important have detectors of CO₂ strategically placed in points where it could be accumulated such as: lower parts of machine room near the floor, false teats where the tubes of CO₂ passes, etc.



Picture 16 – Example of a detector of CO₂ leakage

4 Conclusion

Cascade applications of CO₂ in commercial refrigeration for supermarkets done in Europe and Australia have shown that current technology of alternative semi-hermetic compressors is very favorable, even with standards compressors in use.

The basic project of compressor and necessary security measures result in pressure of permissible operation. Further with optimized adaptation of compressors components in specific series outweigh special needs related to mechanic load, power and cooling of engine.

Polioéster oils (POE) specifically formulated present favorable properties for a circulation through the system having good lubricating characteristic with compressors. However practical tests are continued being done to obtain of better lubricants that meet even more special requirements in application with Dioxide Carbon (CO₂).

Due to high volumetric refrigeration capacity and good CO₂ performance – resulting in compact projects and low cost – there are a good perspective in the future to diversify its application and being economically favorable in transcritical systems. Its application is already in practice in some European countries and it started do be used in Australia.

It is important that intensive tests being done in several applications for collecting necessary information about the behavior of compressors and others components in the system over the time.

5 References

- 1 – Catálogos e manuais técnicos CO₂ – Bitzer - Brasil, Alemanha e Austrália
- 2 – Catálogos e boletins técnicos CO₂ – Danfoss - Dinamarca
- 3 – Catálogos e boletins técnicos CO₂ – Buffalo Trident – Austrália
- 4 – Manual técnico CO₂ instituto Tafe – Austrália
- 5 – Papers CO₂ – Pecomark – Espanha
- 6 – Catálogos técnicos CO₂ - BOC – Austrália
- 7 – Boletim técnico CO₂ – Linde Alemanha
- 8 – Catálogo técnico CO₂ – Güntner - Alemanha



Research and development for the use of natural refrigerants¹

P. HRNJAK

Res. Professor, Co-Director ACRC, President CTS
Department of Mechanical Science and Engineering
University of Illinois at Urbana-Champaign
1206 W. Green St., Urbana, IL 61801, USA
pega@uiuc.edu

ABSTRACT

This paper presents the state of the art, overview of the recent research and development with a list of issues for main natural refrigerants. It also provides author's view to the most important issues and prospective. The paper also discusses ways to improve performance and addresses issues arising from transitioning systems with natural refrigerants from alternative to mainstream option. The focus is on CO₂ and ammonia to the greatest extent, while hydrocarbons, is mentioned briefly.

327

¹ Invited Closing Lecture at the meeting: Using natural refrigerants in refrigeration and air conditioning systems, Sao Paolo, Brazil, Nov. 21-22, 2007

1 Introduction

We are witnesses of recent significant activities and achievements in the development of systems based on natural refrigerants. Here is the list of some:

- ∴ Carbon dioxide:
 - a. Heat pumps and water heaters
 - b. Mobile air conditioning
 - c. Small and supermarket commercial systems: transcritical, cascade, secondary loops
 - d. Industrial refrigeration: transcritical and cascade
 - e. Secondary coolant applications
 - f. Expanders and ejectors
 - g. Other CO₂ systems
- ∴ Ammonia:
 - a. Industrial and commercial NH₃/CO₂ cascades
 - b. Absorption systems
 - c. Low charge - low leak systems
- ∴ Indirect systems (typically ammonia)
 - i. Single phase
 - ii. Ice slurry
 - iii. Carbon dioxide
- ∴ Hydrocarbons:
 - Low charge - low leak
 - Cascades
 - Secondary systems
 - Air
 - Water

2 Fluids

2.1 Status of carbon dioxide

2.1.1 Heat pump applications:

Currently the most attractive applications are water heaters, heat pumps, automotive air conditioning systems, and small commercial applications (bottle and beverage coolers, restaurant equipment etc...) to mention just a few. Some others are quietly pushing their way in. Even though the automotive air conditioning applications probably are of the greatest importance due to the potential numbers of units, water heaters are currently leading the way in sales at the moment with a forecast by the Japanese Government that the cumulative number of installed units will reach 5.2 million in 2010. (A remarkable increase in sales of CO₂ water heaters over the past five years is shown in the figure below with forecast for 2006).

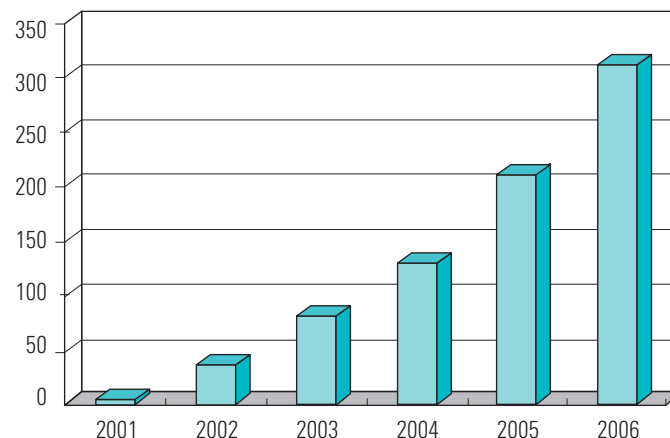


Figure 1 – CO₂ heat pump water heater market in Japan (data from JARN, Special Edition Feb. 25, 2006)

Strongly supported by government and electrical utilities several manufacturers have designed different but overall similar designs (see Fig.2) of the system and various compressor types (nevertheless all rotary and hermetic). Strong market penetration pushes continuously development of new, improved components. Even COPs could be still significantly increased (currently close to 4). It is worth mentioning that the first commercialization of the ejector was in this application (Denso) and even stronger research and development work was noted in automotive applications.



Figure 2 – Some CO₂ heat pump water heaters (K. Hashimoto, IEA v.24.3.2006)

Commercialization started also in Europe but had less successful initial outcomes. Commercial (larger) sizes are developed in USA (Figure 3) but market penetration is still limited. At this point Chinese market seems to be even more promising.



Figure 3 – Industrial 60kW CO₂ heat pump water heater (T. Seinel, IEA v.24.3.2006)

2.1.2 Mobile air conditioning applications

The future looks bright for water heaters but the topic that is holding the industry's attention is the future of mobile air conditioning applications.

One of the major decisions that may affect the future of CO₂ as a mainstream application seems to be made: VDA (German Association of Automobile Industry) has announced their selection of transcritical CO₂ option as a solution for meeting the EU requirement that the refrigerant have GWP less than 150. At this point it is to be implemented in Europe only. What remains to be seen is their option for the same models of cars sold outside EU and what will be the choice of other OEMs for sales in Europe. This is an extremely bold decision. Introduction of that level of technological change requires not only good and acceptably priced components and systems, but high reliability of both components and systems. In addition to changes in car design, assembly lines must be modified, personnel educated, but even more service technicians should be trained along with assembly people. Service stations must be equipped with appropriate procedures and tools. In a word, numerous changes must be made and most likely some initial problems are likely to happen.

It is reasonable to expect that applications of transcritical CO₂ systems in automotive air conditioning will have the most profound impact on the future of carbon dioxide as refrigerant for various reasons. The most important is that with mass production, much greater than in any other application, reliability of the systems, compactness of the components, and simplicity of designs will be dramatically improved. Even more important: the costs should go down. In addition, the increasingly important desire of major OEMs for unification of the systems globally should expose that technology to numerous decision makers in engineering and regulatory sectors of industry and professional societies. Similarities to the scenario seen when MAC industry led R12 replacement by R134a are striking to many. That resemblance alone can generate an additional psychological effect in favor of R744 (carbon dioxide).

Nevertheless, all said above could be confronted with several historical (and current) situations in refrigerant arena. For instance, Isobutane (R290) had demonstrated excellent performance, low costs and absence of flammability incidents in residential refrigerator-freezer applications but we still do not see significant penetration of that refrigerant in some other important markets. Could that slow development happen to carbon dioxide? The truth is that automotive industry is much more globalized and pressure for system unification will be significantly stronger.

In addition, many good new fluid candidates with an extremely low GWP (first announced by DuPont, then by Honeywell, INEOS, and afterwards by several other manufacturers) may show viability and be preferential choice to many manufacturers for various reasons.

We remember ten or fifteen years ago most engineering circles were echoing skeptical comments about CO₂ related to its poor thermodynamic cycle efficiency when used in contemporary

systems. Since then, several demonstration projects have led to broader acceptance of the fact that its superior thermophysical properties can be exploited to improve component and system efficiencies. In many cases, prototype components have enabled transcritical carbon dioxide systems to exceed the efficiency of baseline conventional ones. We can make a quick perusal of the state of the art in CO₂ components as compared to their R134a counterparts.

Most CO₂ compressors are 5 to 10 percentage points more efficient than currently used R134a compressors. Nevertheless, recent compressor development directions were different in the CO₂ and R134a arena with switched objectives compared to ten years ago. Carbon dioxide compressors have been aimed at reliability while recent R134a compressor development has emphasized isentropic efficiency. The result has been improved efficiency in R134a compressors that presents a challenge to CO₂ systems. On the one hand, this situation creates parity between CO₂ and R134a compressors, but it is also an incentive for the next step: efficiency improvement of CO₂ compressors.

When well designed, gas coolers with the same core volume, fin enhancements and air flow rate as conventional condensers achieve approach temperature differences of 1-2°C. This fact was unexpected and it offers great opportunities for further size and cost reduction, when properly exploited

Evaporators for air cooling can not take full advantage of the good heat transfer offered by CO₂ due to the dominance of air-side resistance, but for liquid cooling there is a clear advantage. The accepted existence of an internal heat exchanger in CO₂ systems has a positive effect on reducing the consequences of imperfect refrigerant distribution but the recent appearance of results and designs for an internal heat exchanger for R134a systems may take advantage of that as well. Reduction of refrigerant side pressure drop in heat exchangers will provide more benefit for R134a systems than CO₂ systems. However, extruded tubes with reduced port sizes offer advantages on the air side and CO₂ requires smaller ports than for R134a. In other words, there is a need for new and creative approaches in CO₂ evaporator design that will take in account thermophysical properties of CO₂. In addition, new designs of air side enhancements that will allow for better condensate drainage will result in decrease of air side resistance that will consequently benefit CO₂ with its better refrigerant side heat transfer characteristics. Even though the current designs of evaporators and gas coolers for CO₂ are almost identical in size and weight to their R134a counterparts – and thus asymptotically cost the same for similar production volumes – further efforts are needed to generate designs with reduced cost.

A major problem for CO₂ systems that use the conventional reversed Rankine cycles is expansion losses. Significant design and even research activity is currently focused on these and related issues to improve operation in that area. One of the options is recovering expansion work

using either mechanical expanders of various designs or ejectors. The results of these activities might prove to be crucial in determining new ways of improving CO₂ systems. Some issues in expanders are:

1. Choice between an expander integrated with compressor in a single unit or separate expander that boosts existing conventional compressor that controls capacity
2. If integrated, find a way to effectively control the optimal operating parameters of the system
3. Efficient and simple design for the expander in expander-compressor

The issues in ejector design are similar: good geometry and efficient control. The ejector seems to potentially offer lower cost and easier control but at this stage of ejector design, its efficiency is lower than that of a mechanical expander. An ejector can compensate for that shortfall and even can outperform an expander in the same system due to positive secondary effects in the system. An ejector also provides most of the advantages of flash gas bypass: reduced pressure drop in the evaporator, better refrigerant distribution and even a slightly overfed evaporator.

Unfortunately both an expander and an ejector (and some other potential improvement options) compete for the same potential which the internal heat exchanger already uses at lower complexity and cost. For that reason any analysis that addresses either expanders or ejectors must include an internal heat exchanger as a part of the system.

Multistage expansion offers other additional opportunities for cycle efficiency improvements, but that option requires either multistage compressors or designs that allow economizer ports.

In order to achieve further cost reduction when compared to conventional R134a systems, special attention should be focused on the simplifications of the system: better location of the components, reduced oversizing of components and safety, better flexible piping etc. Research on control options are expanding beyond ideal high side pressure control to investigate simple orifice tubes with improved characteristics, which offer significantly lower cost.

To give a credit to CO₂ system designers, they are working within the physical space currently occupied by R134a components for various reasons. One of the significant limitations for CO₂ systems in mobile air conditioning applications is the need to replicate current systems in every way. If or when CO₂ is accepted as the standard, the systems will be able to be different from the systems we know today in many respects, allowing further optimization of CO₂ systems in the future.

It appears that performance of CO₂ in heat pumping applications is universally unchallenged, regardless of the application. Nevertheless, these advantages seem not to be sufficient to break the ground for mass production neither in mobile air conditioning systems as add on benefit nor for residential applications at this moment. Regardless of that situation, the author is fully convinced that the heat pump advantage will become more important both for mobile applications (when either more efficient engines or electric motors will be used) and for residential applications.

At high outdoor ambient temperatures, energy efficiency remains a weak point in the argument for CO₂. In mobile air conditioning systems an ambient temperature of 35°C is currently seen as the break even point for COP, beyond which it is difficult for CO₂ to compete with R134a. Seasonal efficiency calculations that integrate efficiency over wide range of operating parameters helps to promote CO₂ because of its superior efficiency at lower heat rejection temperatures. With the same system external volume and air flow rates, CO₂ systems offer more refrigeration capacity. The same holds for the compressor –typical displacement is 5 to 7 times smaller. Nevertheless the overall size and weight is greater for CO₂ compressors in most cases. Some recent prototype CO₂ compressors have been made smaller and lighter than their R134a counterparts; this trend should be sustained in order to increase attractiveness of the systems.

To ensure a stronger presence in the market for refrigerating and air conditioning systems, it will be helpful to try to improve the efficiency of CO₂ systems at higher ambient conditions (even the author does not see that as the major issue because of small number of operating hours in most climates), while improving control strategies that do not significantly penalize efficiency when reducing capacity at lower ambient conditions. In other words, control strategies that exchange the excess capacity of CO₂ systems at lower ambient temperatures for efficiency benefits could have great impact on CO₂ system development.

2.1.3 Commercial applications

The major boost to realize and improve small transcritical systems for commercial applications came after the Coca Cola Company's announcement at the meeting in Brussels together with Unilever and McDonalds that they have chosen transcritical CO₂ system as the environmentally friendly replacement for R134a systems instead of R290 or Stirling cycle. This decision had triggered significant push in small hermetic compressor design so almost all major manufacturers have their products ready: Danfoss, Embraco, Sanyo, ... Sanyo announced

recently installation of 5000 new bottle cooler units to be placed at Beijing Olympics (Fig. 4) in addition to other manufacturers.

All CO₂ systems developed in that process have outperformed their R134a counterparts in both capacity and efficiency. The author does not see any technical issue that is holding the realization of the concept and application.

Transcritical systems for supermarkets started to gain momentum on the market, after first secondary loops using CO₂ as a volatile coolant and later cascade systems have paved the road for CO₂. The most important element is existence of fine operating compressors of appropriate size and good engineering practice. The data available from the first few years of operation are very favorable to CO₂.

Cascade systems continue to attract attention in both supermarkets and industrial applications. The balance between their slightly higher efficiency compared to transcritical approach vs. simpler and probably less costly CO₂-only systems will determine the winner.

Secondary loops with CO₂ as a coolant are very good solution and are still going strong for both commercial and industrial, mostly for low temperature applications. Significant new data on heat transfer are becoming available but most important is the progress in CO₂ liquid pumps and pumping and cascade heat exchangers.

2.1.4 Industrial refrigeration applications

Introduction of CO₂ in industrial refrigeration is happening at vastly different ambient compared to automotive and commercial. Engineers used to dealing with ammonia see CO₂ as a reasonable approach, the equipment is similar, and they are used to working with different systems, mostly custom designed. In other words, unlike the significant confrontation facing CO₂ in other circles, there is a cooperative atmosphere between NH₃ and CO₂ among industrial refrigeration professionals. One of the significant differences is also the fact that the lower first cost of CO₂ systems is more clear in that segment than in mobile and commercial application. Another difference is that the main customer supports the change for operational, safety and also public relation reasons (among them is the environmental element).

Cascade systems are definitely the most dominant solution at this point. Secondary loops are not so commonly used as in the commercial sector. It is important to notice a definite trend towards CO₂ only systems (which are transcritical for a small period of annual operation) even though not so many new installations are reported at this time.

2.2 Status of ammonia

Ammonia is probably the only naturally occurring fluid that maintained acceptance as a refrigerant almost exclusively in the industrial refrigeration segment because of its excellent properties, ease of achieving high efficiencies, and low cost. That application is pretty safe for ammonia but there is a potential for expansion into other areas. Everyone is likely to agree that the only option for using ammonia in any other refrigeration application requires the existence of some other fluid, in either secondary loop options or with cascade design that will minimize risk to the general public. Good applications for ammonia are those that already use chillers, like supermarkets or air conditioning of commercial buildings.

For each these applications it is crucial to have a system with:

- a) extremely low charge
- b) very low leak rate

To achieve very low charge either plate or microchannel heat exchangers are required. The current lowest charge at small capacity level (around 50kW) for both water and air cooled systems are approximately 20 g/kW refrigeration capacity. Issues with a water cooled condenser are the need for another secondary loop that reduces efficiency and increases cost, while air cooled systems (with microchannels) means higher discharge temperatures.

Many engineers identified the need for a semihermetic compressor to reduce leak problems. That idea is associated with material compatibility issues. Typically copper windings and insulating materials are incompatible with ammonia, specifically at higher temperatures and with water content. Aluminum windings have been tried but without good success so far. Currently available semihermetic compressors for ammonia use a canned rotor approach that reduces the efficiency of the motor. None of current designs are very successful and further breakthroughs are needed to realize good semihermetic ammonia compressor.

Serious discussions were generated to find better oil approach: miscible (PAG) and immiscible (PAO, AB, mineral, ...). Unfortunately there is still no consensus in professional circles.

2.3 Status of hydrocarbons

Propane and isobutane are probably the most frequently used HCs for refrigeration (excluding the chemical industry). Propylene was also tried with success in some cases but did not generate significant follow-up projects. Isobutane is very well accepted in small, household refrigerators. These systems have only a small amount of refrigerant and are factory sealed thus reducing potential flammability

concerns. To author's best knowledge, there is no any alarming safety record for hydrocarbon system in household refrigerators. Hydrocarbons are excellent refrigerants (thermodynamic and thermophysical properties are good) and their material compatibilities are superb which with low cost for them and their lubricants provides a basis for inexpensive but unfortunately flammable systems. This solution is definitely appropriate wherever compatible with safety requirements.

Charge minimization is essential for reasonable acceptance. Current lowest specific charge for 1-1.5 kW systems is 8g/kW in evaporator, 22 g/kW in condenser, while compressors typically store (good part in oil) more than 30 g at small capacities about 1-1.5 kW.

3 Contribution of natural refrigerants to the field of refrigeration and condensation

Natural refrigerants are very often referred as "alternative", implying those that probably will never become the mainstream option. Whether this assessment will stay a reality is a function of various factors and circumstances. Nevertheless, regardless of the outcome natural refrigerants, and CO₂ in particular, have already made a great impact on the development of refrigeration area.

Typically, every new application for carbon dioxide has introduced a new design feature for improving efficiency, compactness or aesthetics. Very often these improvements have gained acceptance and were applied to other refrigerants and systems as well. An excellent example is the application of microchannel heat exchangers as evaporators (MCHEs for condensers was already being done). That is one of the reasons why successful CO₂ systems and components designs are rightfully challenged on the basis of cost parity. Some CO₂ refrigeration designs were several times smaller for the same capacity and still more efficient than conventional systems, because they represented significant technological advances.

Competition between R134a systems vs. transcritical CO₂ systems in automotive sector generated great improvements in efficiencies for both systems. Originally, R134a systems were not designed for efficiency but had been optimized for lightweight components and systems, quick pull-down and more than anything else cost. In an evolutionary way over last ten years we have witnessed – and to great extent participated in – various improvements in system efficiency and overall performance. These exceptional improvements in efficiency result in an demonstrated potential (of which a good portion is realized) of greater savings in only one year than the entire research expenditures for all CO₂ systems.

4 From alternative to mainstream solution

With the exception of ammonia in industrial refrigeration, none of the natural fluid options have risen to the level of mainstream application so far. It appears that CO₂ might be on the way to become the first fluid to reach that level, at least in some applications. The heat pump water heater is a mature application that has found its acceptance, at least in Japan where market rose to almost a million units per year (see Fig. 1). Other heat pump options, even excellent applications where CO₂ has a comparative advantage, are far from this level of realization.

Expected commercialization in the light commercial market (bottle coolers) has not materialized so far even though the units are technically well developed and a reasonable competition among manufacturers is present.

Acceptance of any CO₂ solution for mobile air conditioning applications is extremely important for development because of: a) required technical level of components and the system and b) the market potential. Potential numbers of units for mass production would dramatically change manufacturing costs and improve quality, thus opening new possibilities.

None of the systems or solutions will be implemented on the significant scale without rational analysis and compelling reasons. That includes but is not limited on the cost, reliability, weight and size of the components and systems. Reasons for change usually fall into one of two categories: mandated change or compelling economic benefits (for either first or recurring cost). The greatest push for natural working fluids is coming from academia where knowledge and appreciation of these considerations is almost non-existent. Academia is more interested in efficiency, and to a lesser extent to compactness or weight. These metrics are easy to quantify. The race for more elegant, more compact, more reliable and lower cost is attractive for enthusiasts, and success in these realms is not as easy to demonstrate or quantify. To make components and systems more reliable and extremely low cost that are able to compete on the market with existing systems requires significant effort, knowledge and investment, but it is the next step. Crucial to this step are the engineers at companies interested in acquiring new markets and developing creative new technologies. Ideas and sometimes solutions should move from interesting academic laboratory exploration into the laboratories of those that will be able to make a business case for them.

Natural working fluids are going through the same process as any new idea: mild support of those that might benefit from that approach in the future and fierce opposition of those that may lose if it is realized.

Even if the first prototypes and maybe even some production numbers are realized on the market, these products will not survive unless they have real advantages over their competitive technologies. Perhaps in some places that element is overlooked and too much help from legislation is expected (e.g. by tax breaks or by banning competing technologies), but this is a bad way to expect success. Only by realizing systems with clear economical and operational advantages will natural refrigerants be accepted. Unless the full costs of environmental risks are internalized into refrigerant prices, environmental benefits of natural refrigerants (zero ODP and GWP) should be treated as additional reason and attractiveness but not the only reason why we should expect someone to buy the product.

5 Conclusions

This analytic overview, so generic in title as to cover all natural refrigerants, was mostly focused on CO₂ and NH₃ systems being the most active recently and closer to commercialization at this point.

We are witnessing great progress in improvements of the systems with natural refrigerants lately. Public interest is steadily increasing. Some applications (heat pump water heaters in particular) are entering in mature production phase. Legislative support (mostly in Europe) is getting stronger. Nevertheless we are witnessing slow penetration of carbon dioxide technologies in some areas, while technological pipelines are full and filling even more. There is a clear need for more work on real production and marketing issues by those that see market opportunities.

The introduction of new fluid(s) with very low GWP that have good drop-in performance could slow the process, or accelerate it by presenting challenges for further improvements in efficiency, simplification of the components and systems and consequently a reduction of cost.

The logical question to ask is how to transform great enthusiasm of thousands of supporters of the natural working fluid approach, bright ideas and innovative solutions of numerous creative engineers into a real impact on the economy and mankind? Is there anything missing besides time for the idea and public awareness to spread? Could an overly extensive incubation period for natural working fluids become too long so that enthusiasm will slow down? There is always the possibility of becoming the “perpetual alternative”. Stirling machines are a good example with more than 100 year long history of mostly unsuccessful attempts.

