# Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar condicionado

## Artigos Técnicos

# Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar condicionado

## Artigos Técnicos

**República Federativa do Brasil**
Dilma Rousseff

**Ministério do Meio Ambiente**
Izabella Teixeira

**Secretaria Executiva do Ministério do Meio Ambiente**
Francisco Gaetani

**Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental**
Eduardo Delgado Assad

**Coordenação de Proteção da Camada de Ozônio**
Magna Luduvice

Ministério do Meio Ambiente
Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental
Departamento de Mudanças Climáticas
Coordenação de Proteção da Camada de Ozônio

# Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado

## Artigos Técnicos

Brasília - DF
2011

**Edição**

**Ministério do Meio Ambiente – MMA**
Esplanada dos Ministérios, Bloco B, 8º andar, sala 845, Brasília-DF, CEP:70068-900
**Tel.:** +55 61 2028-1934 | **Fax:** 61 2028-1217 | **e-mail:** ozonio@mma.gov.br

Centro de Informação e Documentação Luís Eduardo Magalhães – CID Ambiental
SEPN 505 - Bloco B - Edifício Marie Prendi Cruz - Térreo - Asa Norte
Brasília/DF - CEP : 70730-542
**Tel.:** +55 61 2028-2184 | **Fax:** +55 61 2028-1980 | **e-mail:** cid@mma.gov.br

**Equipe da Coordenação de Proteção da Camada de Ozônio**
Alex Marques da Silva
Euler Martins Lage
Frank Amorim
Magna Luduvice
Tatiana Zanette

**Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD**
**Coordenador da Unidade de Meio Ambiente e Desenvolvimento**
Carlos Castro

**Equipe do Protocolo de Montreal/PNUD**
Ana Cristina Ferrão
Anderson Alves
Ludmila Silva
Marina Ribeiro

**Revisão**
Euler Martins Lage
Frank Amorim

**Projeto gráfico, diagramação e capa**
Marco Lúcius Freitas
Marcos Barros
Bárbara Carvalho

Catalogação na Fonte
Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

U84 Uso de fluidos naturais em sistemas de refrigeração e ar condicionado: artigos técnicos / Euler Martins Lage, Frank Amorim, Tatiana Zanette; organizadores. – Brasília: MMA, 2011.
170 p. : il. color. ; 29 cm.

ISBN 978-85-7738-158-6

1. Sistema de refrigeração. 2. Ar condicionado. 3. Protocolo de Montreal. 4. Qualidade ambiental. I. Lage, Euler Martins. II. Amorim, Frank. III. Zanette, Tatiana. IV. Ministério do Meio Ambiente. V. Departamento de Mudanças Climáticas. VI. Coordenação de Proteção da Camada de Ozônio. VII. Título.
CDU(2.ed.)621.6.02

Impresso no Brasil
*Printed in Brazil*

# Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado

## Artigos Técnicos

Os temas aqui abordados foram apresentados durante os Seminários "Difusão do Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado" realizados em: Recife-PE, em 28/05/2009; Porto Alegre-RS, em 14/09/2009; e Manaus-AM, em 24/09/2010. Tanto os Seminários quanto esta publicação estão inseridos no Plano Nacional de Eliminação de CFCs, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD.

# Sumário


13 | **Aplicação dos Fluidos Naturais na Refrigeração para Supermercados: Sistemas Cascata com $CO_2/NH_3$**
ALESSANDRO DA SILVA

35 | **Novas Tendências na Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração**
ENG. ALEXANDRE PRESOTTO JR. E ENG. CARLOS GUILHERME SÜFFERT

45 | **Uso de Refrigerantes Alternativos em Refrigeração Doméstica e em Equipamentos Compactos de Refrigeração Comercial**
CLÁUDIO MELO, PH.D.

57 | **Avaliação das Emissões de HCFC-22 dos Sistemas de Refrigeração Comercial em Supermercados**
EDUARDO LINZMAYER

71 | **Tendências do Uso de Fluidos Refrigerantes Alternativos em Sistemas de Ar Condicionado Automotivo**
DR. ENIO PEDONE BANDARRA FILHO

91 | **Novas tecnologias em trocadores de calor para a redução de carga de fluido refrigerante**
Dr. GHERHARDT RIBATSKI

109 | **Novas Tendências da Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar**
Dr. JOSÉ ALBERTO R. PARISE

121 | **Medidas para a Redução da Carga de Refrigerante em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar**
Dr. JOSÉ ALBERTO R. PARISE

135 | **Segurança em Sistemas de Refrigeração**
MAURÍCIO ANTÔNIO DA COSTA

155 | **Substituição dos HCFC e os fluidos refrigerantes naturais: Cenário atual e tendências**
DR. ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO

# Prefácio

O ano de 2007 representou mais um marco para os Países Parte do Protocolo de Montreal. Ao comemorar vinte anos de atuação deste instrumento, considerado pela comunidade internacional como o mais bem sucedido de todos os protocolos ambientais internacionais, as Partes reuniram-se para avaliar os resultados obtidos, as lições aprendidas e o que é preciso continuar fazendo para que a camada de ozônio retorne aos patamares existentes nos anos oitenta e continue a fornecer a proteção adequada ao planeta.

Considerando o bem sucedido processo de eliminação dos Clorofluorcarbonos – CFCs, e a proximidade de cumprimento da meta estipulada, em 2010, as Partes optaram por adotar o mesmo procedimento para a eliminação dos Hidroclorofluorcarbonos – HCFCs, ou seja, um cronograma escalonado, com a eliminação completa dessas substâncias em 2040, tendo como linha de base, o consumo médio entre 2009 e 2010, o congelamento do consumo em 2013 nos patamares da linha de base; redução de 10% em 2015; redução de 35% em 2020; redução de 67,5% em 2025; redução de 97,5 em 2030 e a eliminação de 100% em 2040.

A Decisão XIX/6 da Reunião das Partes do Protocolo de Montreal, ao aprovar a antecipação do cronograma de eliminação dos HCFCs, orientou os países e o Comitê Executivo do Fundo Multilateral para Implementação do Protocolo de Montreal, que no âmbito dos programas e projetos, priorizem a eliminação dos HCFCs com alto potencial de destruição da camada de ozônio e que ao introduzir substâncias e tecnologias alternativas, levem em consideração outros impactos ao meio ambiente, tais como: o potencial de aquecimento global, consumo de energia, saúde, segurança e viabilidade econômica das alternativas.

Diante deste panorama é que o Ministério do Meio Ambiente, ao coordenar a elaboração do Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs, cuja meta é a redução do consumo de 4.153 t de HCFCs, equivalente à não emissão de 7.400.702 t de $CO_2$, no período 2013-2015, promoveu, em parceria com o Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento – PNUD, os seminários "Difusão do Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar condicionado" nas cinco regiões do País e viabilizou a publicação dos artigos técnicos apresentados durante estes eventos. O volume 1 contempla os artigos apresentados no seminário da região sudeste, ocorrido em 2007, e o volume 2 os artigos complementares apresentados nos seminários das regiões sul, nordeste, norte e centro-oeste.

**Eduardo Delgado Assad**
**Secretário de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental**
**Ministério do Meio Ambiente**

# Aplicação dos Fluidos Naturais na Refrigeração para Supermercados: Sistemas Cascata com $CO_2/NH_3$

**ALESSANDRO DA SILVA**
Engenheiro de Aplicação Bitzer Compressores Ltda
alessandro.silva@bitzer.com.br



## RESUMO

Muitas discussões envolvem os possíveis candidatos a substituir o R22 na refrigeração comercial de supermercados. Diante das novas instalações que surgem a cada ano e da necessidade de se repor a carga de refrigerante, devido aos vazamentos nas instalações existentes (100% da carga de refrigerante/ano/loja), o Brasil vem consumindo em média aproximadamente 5.000 toneladas de R22 por ano, somente para suprir as necessidades dessas instalações de supermercados. De acordo com a Associação Brasileira de Supermercados (ABRAS), existem mais de 180 mil lojas de supermercados em todo território nacional, sendo que a maioria utiliza o R22 como refrigerante nos sistemas de refrigeração e ar condicionado.

Para as indústrias químicas que fabricam os fluidos refrigerantes, isso representa uma grande oportunidade para introduzir os HFCs, que têm potencial zero de destruição da Camada de Ozônio (PDO=0). Porém, é preciso dizer que a maioria dos HFCs possui alto Potencial de Aquecimento Global (GWP - Efeito Estufa), superior ao próprio R22, além de serem mais caros e possuírem temperatura "Glide" (em caso de vazamento parcial, a recomposição final da carga não ficará com as mesmas características originais e, consequentemente, haverá perda de rendimento do equipamento frigorífico).

De um modo geral, todos os agentes refrigerantes alternativos ao R22, sejam eles sintéticos ou naturais, possuem vantagens e desvantagem. Neste artigo vamos discutir somente a aplicação do $CO_2$ e da amônia utilizados em sistemas cascata para instalações de refrigeração para supermercados. Trataremos dos projetos mais comuns que estão sendo aplicados nos países Europeus, entre eles Alemanha, Dinamarca, Suécia, Holanda, Luxemburgo, etc. Também merece destaque a Austrália, que possui uma indústria de supermercados bem avançada na aplicação dos fluidos naturais, principalmente do dióxido de carbono.

# 1 Introdução

Os regulamentos do Protocolo de Montreal sobre as Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio levou a eliminação do consumo de Clorofluorcarbonos (CFCs) como refrigerantes nos países industrializados. Além disso, os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) são apenas uma solução interina, com eliminação total em 2040.

Outra preocupação ambiental relativa a esses refrigerantes é o seu acentuado Potencial de Aquecimento Global (GWP), conhecido como "Efeito Estufa", e isto também se aplica aos substitutos dos CFCs e HCFCs, os chamados hidrofluorcarbonos (HFCs). Por essa razão, são incluídos na lista das substâncias alvejadas pelo Protocolo de Quioto.

Tal situação levou ao aumento da utilização de "antigos refrigerantes", os refrigerantes naturais, entre eles o dióxido de carbono ($CO_2$), amônia ($NH_3$) e hidrocarbonetos (R600a, R290, R1270, etc.). Ultimamente foram desenvolvidas novas tecnologias e aplicações nos vários setores da refrigeração para tornar viável o uso desses refrigerantes.



Como refrigerantes naturais, eles não afetam a Camada de Ozônio (PDO=0) e também possuem Potencial de Aquecimento Global quase nulo, quando comparados aos refrigerantes sintéticos. Estes se apresentam como uma alternativa promissora no setor de refrigeração comercial para supermercados, principalmente o dióxido de carbono e amônia quando aplicados em sistemas cascata. Além de minimizarem os impactos no meio ambiente, também geram menor consumo de energia e outros fatores relevantes quando comparados aos refrigerantes sintéticos. A tabela 01 aponta as principais características dos refrigerantes sintéticos e naturais ($CO_2$ / $NH_3$), tomando por base de comparação o R22.

# 2 Breve história dos refrigerantes

Com instalações relativamente simples e a possibilidade de se usar compressores herméticos e semi-herméticos, além de pequenas exigências quanto à segurança, os refrigerantes sintéticos (CFCs e HCFCs) têm ocupado uma posição de liderança nas últimas décadas em aplicações de refrigeração comercial para supermercados.

Entretanto, com o aumento das discussões referentes ao meio ambiente sobre a redução da Camada de Ozônio e o aumento do efeito estufa, o dióxido de carbono ($CO_2$) e a amônia ($NH_3$) passam a ocupar uma posição de destaque nesse cenário. A figura 1 mostra uma breve história

dos refrigerantes ao longo dos anos, apontando principalmente o ressurgimento dos refrigerantes naturais nos dias atuais.

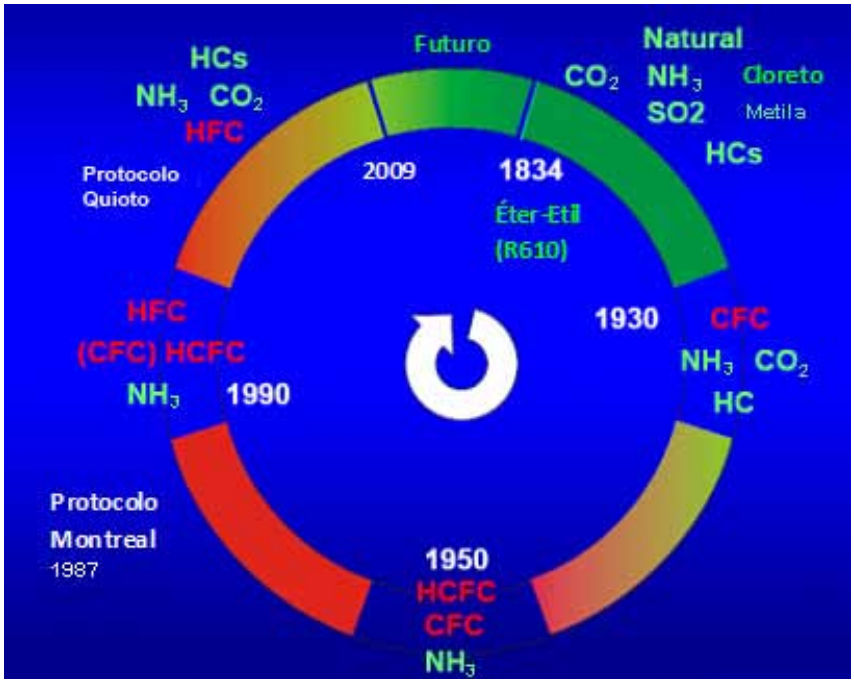



**Figura 1** – Breve história dos refrigerantes ao longo dos anos.

## 2.1 O Dióxido de Carbono - R744 ($CO_2$) e a Amônia – R717 ($NH_3$)

A aplicação do dióxido de carbono - R744 ($CO_2$) em sistemas de refrigeração não é nova. O dióxido de carbono foi inicialmente proposto e usado no final do século XIX. Ele foi usado em máquinas de fabricar gelo e nas embarcações para alimentos congelados. Seu uso nos sistemas de refrigeração cresceu na metade do século XX. O R744 ($CO_2$) era geralmente a escolha preferida para as embarcações, enquanto o R717 (amônia - $NH_3$) era preferido para plantas estacionárias, até o surgimento do "Freon", fabricado pelas indústrias DuPont, baseado nos "refrigerantes seguros", inicialmente com o R12 e mais tarde com o R22 e R502 para aplicações comerciais. Embora as aplicações que utilizavam o R744 tenham diminuído, o R717 permaneceu, sendo a escolha preferida para sistemas industriais. A principal razão para seu declínio foi a rápida perda de capacidade e o

aumento da pressão em altas temperaturas. A amônia continuou sendo o refrigerante dominante para aplicações industriais durante anos. Para operações subcríticas com o R744, no ciclo normal de refrigeração, não há diferença em relação aos outros refrigerantes, a não ser que as pressões de operação do sistema sejam elevadas.

O $CO_2$ é um refrigerante puro, portanto possui uma relação normal de pressão / temperatura e, consequentemente, não está sujeito à temperatura "Glide". A seguir vamos apontar as vantagens e desvantagens do $CO_2$ e $NH_3$.

No caso do sistema cascata com $CO_2$, as temperaturas de evaporação no lado de baixa variam de -55 ºC a -30 ºC (o ponto triplo do $CO_2$ ocorre a -56.6 ºC e, acima de -30 ºC, o sistema se torna ineficiente quando comparado com sistemas convencionais) e as temperaturas de condensação variam desde -18 ºC (para sistemas com temperatura de evaporação em torno de -55 ºC) até 0 ºC (para temperaturas de evaporação em torno de -30 ºC), com temperatura de condensação limite de operação em torno de +5 ºC (em função da pressão de projeto de 40 bar para os compressores de $CO_2$ disponíveis no mercado). De fato, com temperaturas de condensação acima de -5 ºC para o $CO_2$, o sistema se mostra cada vez mais ineficiente, quando comparado com sistemas convencionais.



Como mencionado, uma das maiores vantagens da utilização de $CO_2$ 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 $CO_2$ apresente um nível de eficência energética (COP) igual ou melhor que um sistema convencional para a mesma aplicação.

# 3 Características Positivas do Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono é um refrigerante 100% natural, sua concentração na atmosfera é de aproximadamente 0,04% em volume, é uma fonte disponível na atmosfera , com baixo custo de aquisição. Seu Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (PDO) é zero e seu Potencial de Aquecimento Global é de apenas um (GWP=1, ele é referência para os outros refrigerantes). O R744 é um refrigerante de classe A1 (não inflamável e atóxico), contudo pode causar sufocamento em altas concentrações.

O R744 tem alta capacidade volumétrica de refrigeração, comparada aos refrigerantes sintéticos, e, dependendo das condições de aplicação, chega a ser de 5 a 8 vezes maior que o R22. Isso

significa trabalhar com compressores, componentes e tubulações de tamanhos reduzidos. Possui também ótimas características para transferência de calor, além de ser estável química e termodinamicamente. Possui uma excelente miscibilidade com os óleos lubrificantes, o que facilita sua separação e diminui o arraste para o sistema, aumentando consequentemente a transferência de calor nos evaporadores e condensadores.

Na aplicação subcrítica (cascata), leva muita vantagem em relação aos sistemas de simples estágio, pois sua alta densidade do vapor de sucção resulta numa troca de calor eficiente entre a linha de sucção do $CO_2$ e a linha de líquido do estágio de alta pressão, além de aumentar o rendimento do sistema de alta pressão garante também um controle estável do superaquecimento do vapor de sucção do compressor de $CO_2$, evitando a diluição do refrigerante no óleo. No ciclo transcrítico, a pressão do resfriador gasoso (gás cooler) e a temperatura não são interligadas como na região subcrítica de duas fases. A elevada pressão de vapor resulta não apenas numa baixa relação de pressão, mas também em altos coeficientes de troca de calor e perdas de pressão relativamente baixas. A figura 2 mostra os ciclos subcríticos e transcríticos do $CO_2$ no diagrama de pressão e entalpia.

Como se trata de um refrigerante natural o $CO_2$ não tem a necessidade de ser recuperado, tratado ou reciclado, pois tais medidas são obrigatórias para os sintéticos, tornando-o muito atrativo para determinadas aplicações em que a infraestrutura é deficiente, como é o caso de muitos supermercados.



# 4 Características Negativas do Dióxido de Carbono

A principal desvantagem do $CO_2$ é a sua intrínseca alta pressão de trabalho, que é muito mais elevada que a dos demais refrigerantes naturais ou sintéticos, impondo maiores exigências à segurança do sistema e dos componentes, principalmente quanto à necessidade de utilização de válvulas de segurança ao redor do sistema. Normalmente, para a aplicação subcrítica, as pressões deverão ser limitadas em 25 bar no lado de baixa pressão e 40 bar na alta pressão. A figura 3 mostra a comparação dos níveis de pressão entre o $CO_2$ versus R22 e R404A.

Em caso de vazamento, o $CO_2$ pode se tornar perigoso em determinados ambientes, por ser inodoro e possuir maior densidade que o ar. Nesses casos é recomendada a instalação de sensores para controle e monitoramento de vazamento. É preciso um cuidado especial em relação ao ponto

triplo, pois poderá ocorrer a formação de $CO_2$ sólido (gelo seco), com pressões abaixo de 5,2 bar abs (-56,6 ºC). Demanda também um pessoal técnico e bem treinado para lidar com sua aplicação.

# 5 Características Positivas da Amônia

A amônia, por ser uma substância 100% natural e de reduzido tempo de vida (menos de 14 dias), não interage com a Camada de Ozônio (PDO=0), tampouco contribui com o efeito estufa (GWP=0). Seu custo de aquisição é baixo e também possui baixa densidade do vapor, o que possibilita a utilização de vasos de pressão, trocadores de calor e tubulações de menores dimensões. Por utilizar tubulações de menores diâmetros, a perda de carga é menor em instalações de R717, tornando menor o custo de bombeamento em sistemas inundados.

Devido às suas melhores propriedades termodinâmicas, o R717 apresenta um melhor coeficiente de performance (COP) comparado aos refrigerantes sintéticos, entre eles o R22. Outrossim, possui uma ótima transferência de calor, o que possibilita operar com maiores temperaturas de evaporação ou menores temperaturas de condensação.



Graças ao seu odor característico, torna-se fácil notar o surgimento de vazamentos. A amônia possui grande tolerância à umidade, a água forma uma solução com a Amônia e não congela, porém acima de 300 ppm ocorre oxidação do aço.

# 6 Características Negativas da Amônia

A amônia não é totalmente miscível com o óleo lubrificante, consequentemente recomenda-se instalar separadores de óleo, bem como posicionar drenos nos pontos mais baixos da instalação, locais onde com certeza o óleo se depositará. Tal comportamento demandará pessoal treinado e maior manutenção.

O R717 é compatível com aço, ferro e alumínio, contudo não poderá ser utilizado com cobre, zinco e suas ligas, bem como borracha e plástico. Além dessa menor gama de opções em relação a materiais, o R717 exige uma técnica de soldagem mais refinada. A alta temperatura de descarga da amônia obriga que parte da área de troca do condensador seja usada como dessuperaquecedor. Para sistemas de amônia que usam degelo por meio de gás quente, deve-se providenciar plena

liberdade de dilatação térmica. Compressores de pistão devem ser providos de cabeçotes resfriados à água para evitar a deterioração do óleo, bem como para facilitar a separação dele; já os compressores de parafuso devem dispor de resfriador de óleo específico para os mesmos fins.

A amônia também poderá se tornar explosiva dentro de teores de concentração de 15 a 30% em volume. Possui ainda uma alta toxicidade (25 ppm), que deverá ser levada em consideração.

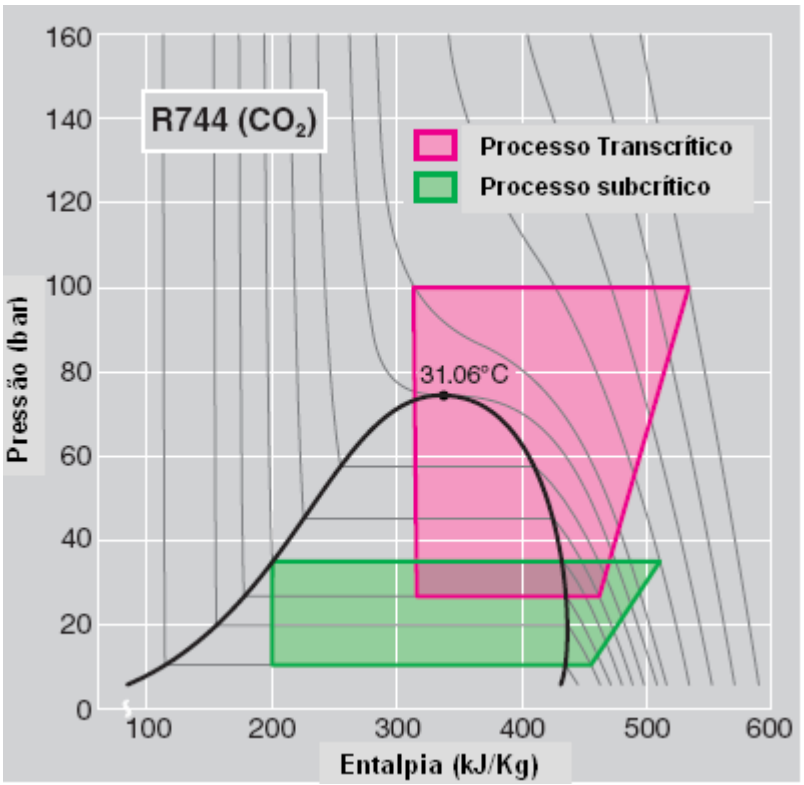



**Figura 2:** Diagrama P e H do $CO_2$ com ênfase nos processos: subcrítico e transcrítico.

**Tabela 1.** Características dos refrigerantes sintéticos e naturais, com destaque ao R717 e R744.

| Refrigerantes | R22 | R404A | R507A | R134a | R410A | R407C | R422D | R427A | R717 | R744 | R290 | R1270 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Substância Natural | não | não | não | não | não | não | não | não | sim | sim | sim | sim |
| Nome Comercial | - | - | - | - | - | - | Isceon MO29 | FX100 | Amônia | Dióxido Carbono | Propano | Propileno |
| Fabricante | vários | vários | vários | vários | vários | vários | DuPont | Arkema | vários | vários | vários | vários |
| Composição química | $CH F_2Cl$ | R143a/R125/ R134a | R143a /R125 | $CF_3CH_2F$ | R32 / R125 | R32 / R125 / R134a | R125 / R134a / R600a | R32 / R125 / R143a / R134a | $NH_3$ | $CO_2$ | $C_3H_8$ | $C_3H_6$ |
| Destruição Camada Ozônio (ODP)* | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potencial Aquecimento Global (GWP)** | 1500 | 3260 | 3300 | 1300 | 1725 | 1525 | 2230 | 1830 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| Temperatura Glide (K) | 0 | 0,7 | 0 | 0 | 0,2 | 7,4 | 4,5 | 7,1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ponto de Ebulição (ºC) | -40,86 | -47,0 | -47,0 | -26,07 | -51,0 | -40,0 | -45,0 | -43,0 | -33,0 | -57,0 (sublim.) | -42,0 | -47,7 |
| Temperatura Crítica (ºC) | 96,15 | 73,0 | 71,0 | 101,15 | 72,0 | 86,0 | 81,0 | 87,0 | 133,0 | 31,0 | 96,7 | 92,4 |
| Pressão Crítica (bar) | 50,54 | 37,8 | 37,9 | 40,67 | 49,5 | 46,5 | 39,08 | 44,0 | 113,5 | 73,8 | 42,48 | 46,65 |
| Inflamabilidade | não | não | não | não | não | não | não | não | baixa | não | alta | alta |
| Toxidade | baixa | baixa | baixa | baixa | baixa | baixa | baixa | baixa | alta | baixa | baixa | baixa |
| Tipo de óleo lubrificante*** | MO/AB/ MO+AB | POE | POE | POE | POE | POE | MO/AB/POE | MO/AB/POE | MO/PAO | POE | MO/ PAO/POE | MO/ PAO/POE |
| Tipo de aplicação**** | HT / MT / LT | MT / LT | MT / LT | HT | HT | HT | HT / MT / LT | HT / MT / LT | HT / MT / LT (Sist. Indiretos) | MT e LT | HT / MT / LT (Sist. Indiretos) | MT / LT (Sist. Indiretos) |
| Custo Relativo Refrigerante / Kg | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 3 | 8 | 10 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Eficiência Energética Relativa Média (%) | 100 | 99 | 102 | 97 | 95 | 100 | 95 | 95 | 105 | 120 (operação subcrítica) | 102 | 101 |
| Equipamentos (Retrofit) | ---------- | Novos | Novos | Novos | Novos | Novos | Existentes | Existentes | Novos | Novos | Novos | Novos |

* Destruição da Camada de Ozônio (ODP-Ozone Depletion Potencial) – é um índice baseado na referência do R11 (100%), por exemplo, o R22 possui um ODP = 0,05, ou seja , tem um potencial de destruição do ozônio de 5% comparado ao R11.

** Potencial de Aquecimento Global (GWP-Global Warming Potencial) - é um índice que compara o efeito do aquecimento produzido pelos gases na atmosfera ao longo do tempo (normalmente 100 anos), em relação a quantidades semelhantes de CO2 (em peso). Por exemplo, 1 kg de R404A liberado na atmosfera produz o mesmo efeito de aquecimento global equivalente a 3260 Kg de CO2, é o mesmo valor que um carro popular levaria para contaminar a atmosfera circulando durante 2 anos na cidade de São Paulo.

*** Tipo de Aplicação: HT= Alta temp. evaporação (ar condicionado), MT = Média temp. evaporação (sistema de resfriados), LT = Baixa temp. evaporação (sistema de congelados)

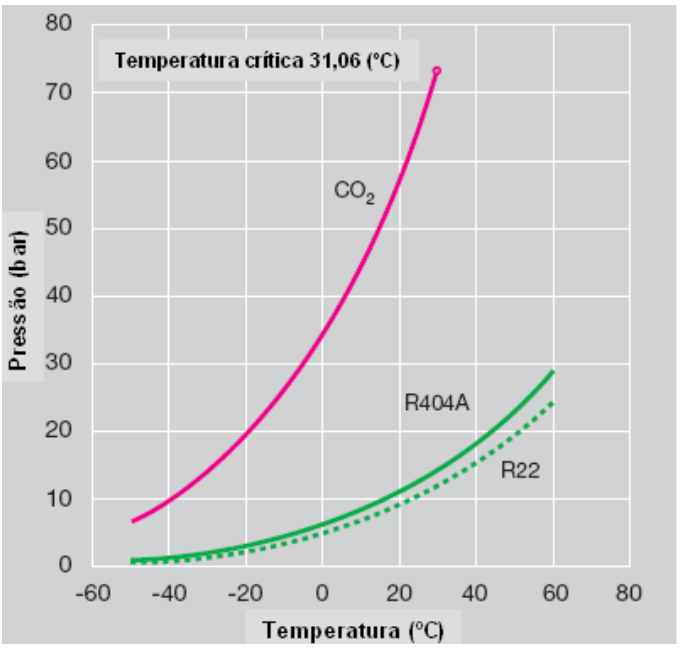



**Figura 3:** Comparação dos níveis de pressão entre $CO_2$ vs. R22 e R404A



# 7 Sistema cascata com $CO_2$ / $NH_3$

Atualmente os sistemas cascata estão ressurgindo com mais frequência. O motivo é devido ao grande interesse pelos refrigerantes naturais como o R744 (Dióxido de Carbono) e R717 (Amônia). O princípio básico de operação dos sistemas cascata é que cada refrigerante tem uma faixa de operação na pressão e na temperatura em que são adequados idealmente. Se o refrigerante puder ser aplicado dentro dessa faixa de operação, o sistema poderá operar com mais eficiência. Como nenhum refrigerante tem uma faixa de operação ideal, que se estenda desde baixa temperatura de evaporação até a temperatura de condensação com ar ambiente, aplicando-se dois refrigerantes diferentes, permite-se que estes sejam utilizados na melhor faixa de aplicação, o que, por sua vez, melhora a eficiência do sistema combinado. Os refrigerantes escolhidos tipicamente para o circuito de alta temperatura são: R717, R507, R404A, R134a ou outro apropriado. Em nosso estudo vamos escolher o R717 por se tratar de um refrigerante ecológico.

Um refrigerante que tenha uma densidade elevada, uma pressão de sucção elevada e uma taxa de fluxo de massa elevada, será o mais indicado ao estágio de baixa temperatura de evaporação, quando exigirá compressores com menor deslocamento volumétrico, com motores sobredimen-

sionados, mas não será apropriado para ser usado nas temperaturas elevadas, porque a pressão será demasiadamente elevada e o calor gerado no processo da compressão também será muito elevado. O dióxido de carbono é um bom exemplo desse tipo de refrigerante e também outros como o R13, R503, R23 e R170. Durante muitos anos, o R13 e posteriormente o R503 (uma mistura azeotrópica do R13 e do R23) eram os mais utilizados, mas eles não estão mais disponíveis uma vez que o R13 é um clorofluorcarbono que destrói a Camada de Ozônio. Devido às preocupações ambientais no mundo, o R744 tem sido o refrigerante alternativo mais utilizado em face das suas boas características ambientais e elevada eficácia comparada aos outros refrigerantes alternativos utilizados no circuito de baixa temperatura.

Em uma temperatura de 25° C, a pressão do R744, no estágio de baixa, excederia 6300 kPa (63 bar = 913,74 psig), caso fosse permitido que o líquido alcançasse referida temperatura. Todo o sistema de baixa temperatura deverá ser projetado para que possa acomodar tal pressão, por isso, para limitar esse problema, o estágio de baixa deverá possuir algum sistema de segurança para manter suas pressões dentro dos limites seguros. O sistema de segurança poderia ser um vaso de pressão auxiliar que permitisse evaporar toda a carga refrigerante (impróprio para os grandes sistemas porque o vaso teria de ser também muito grande fisicamente e muito oneroso); ou um sistema de alívio automático para atmosfera que operasse quando ocorresse uma falha elétrica e as pressões subissem acima dos set-points de segurança; ou uma unidade de emergência que operasse com um gerador elétrico, que entrasse em funcionamento quando ocorresse falha de energia , aumento da pressão acima do valor ajustado e mantivesse o tanque de líquido com uma pressão segura.

O sistema de alívio automático para atmosfera durante a falta de energia, em conjunto com um controle automático do sistema do estágio de alta durante os períodos de parada, é o método aceitável para os sistemas cascata com $CO_2$, pois se trata de um refrigerante ambientalmente correto e de baixo custo. As questões de segurança deverão ser levadas em consideração, principalmente quando houver alívio de pressão. Devemos evitar os riscos de acidentes ao público e ao pessoal que trabalha na área onde o sistema de alívio estiver instalado. Um sistema cascata simples com $CO_2$ e $NH_3$ é ilustrado abaixo na figura 4.

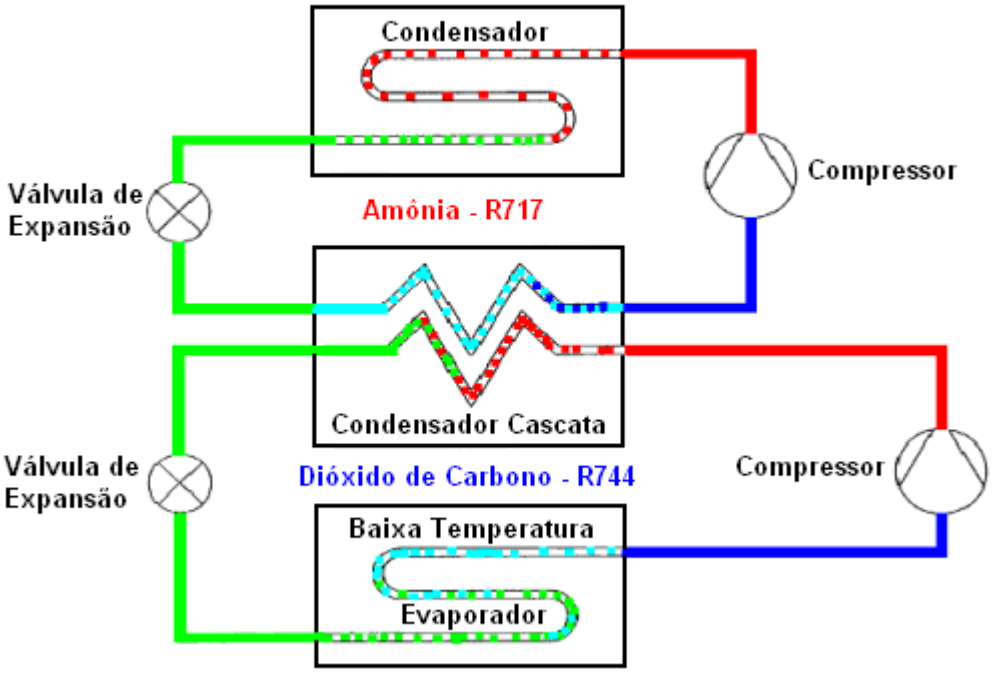



**Figura 4:** Exemplo simplificado de sistema cascata

Nas aplicações comerciais para supermercados, o $CO_2$ normalmente trabalha com temperatura de condensação variando de –5 a –15 ºC, enquanto que sua evaporação varia de –25 a –40 ºC, atendendo assim à maioria dos sistemas de congelados. Por outro lado, a Amônia evapora no trocador cascata numa faixa que varia de –10 a –20 ºC, e sua temperatura de condensação ocorre entre 30 a 40 ºC.

A figura 5 mostra o diagrama de pressão e entalpia dos dois sistemas, onde é possível ver que todo o calor absorvido pelo evaporador do estágio de baixa (A-B) com $CO_2$ é rejeitado no seu condensador (E-D), sendo esse calor absorvido pelo evaporador do estágio de alta com $NH_3$ (A1-B1) e rejeitado no seu condensador (E1-D1). Existe sempre uma temperatura ótima de operação do condensador cascata na qual exigirá uma menor potência consumida.

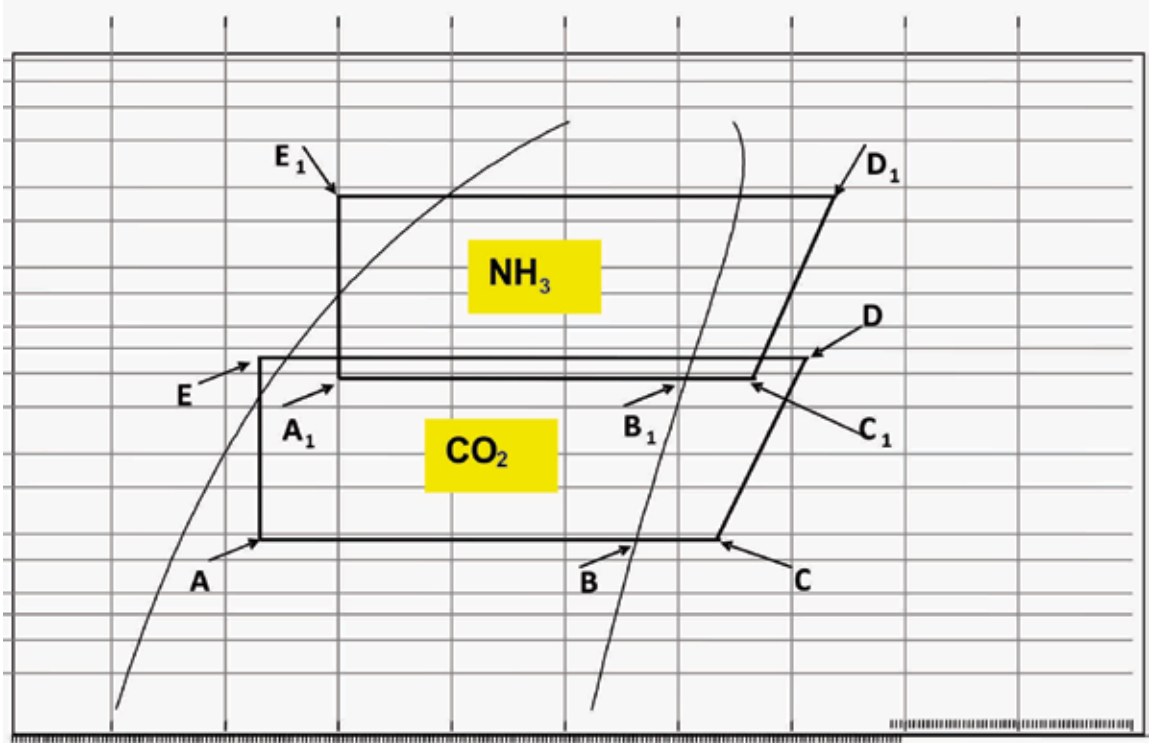



**Figura 5:** Diagrama P - H do Sistema Cascata

# 8 Opções de configuração de sistemas cascata com $CO_2/NH_3$ utilizados em supermercados

Os sistemas cascata com $CO_2$ / $NH_3$ utilizados para supermercados podem ter diferentes configurações, algumas são preferidas por parte dos projetistas, enquanto que outras não o são em virtude das suas complexidades de projeto e tipo de controle requerido. A seguir vamos abordar alguns exemplos que são utilizados nos supermercados dos países da Europa e Austrália.

## 8.1 Estágio de Baixa Pressão com R744 evaporando a -35°C DX, com Glicol recirculado em média temperatura a - 10 °C e Estágio de Alta com R717

De acordo com a figura 6, este sistema pode ser considerado "completamente verde". O estágio de alta utiliza o sistema com R717, que pode ser instalado em um "rack house" no estacionamento do supermercado, trabalha com condensador resfriado à água que, por sua vez, utiliza uma torre de resfriamento instalada no teto do rack house. No caso de um possível vazamento com a amônia, a carga de gás do sistema será descarregada na bacia da torre e, posteriormente, essa mistura água / amônia será removida por intermédio do dreno da torre.

Nesse caso, o $CO_2$ é utilizado somente para atender aos evaporadores de congelados, mediante expansão seca (DX), evaporando a –35 ºC, enquanto o Glicol, que está sendo refrigerado pelo estágio de alta com o $NH_3$, é recirculado pelas bombas a uma temperatura de –10 ºC nos evaporadores de resfriados e também realiza a troca de calor no condensador cascata para condensar o $CO_2$ a –5 ºC.



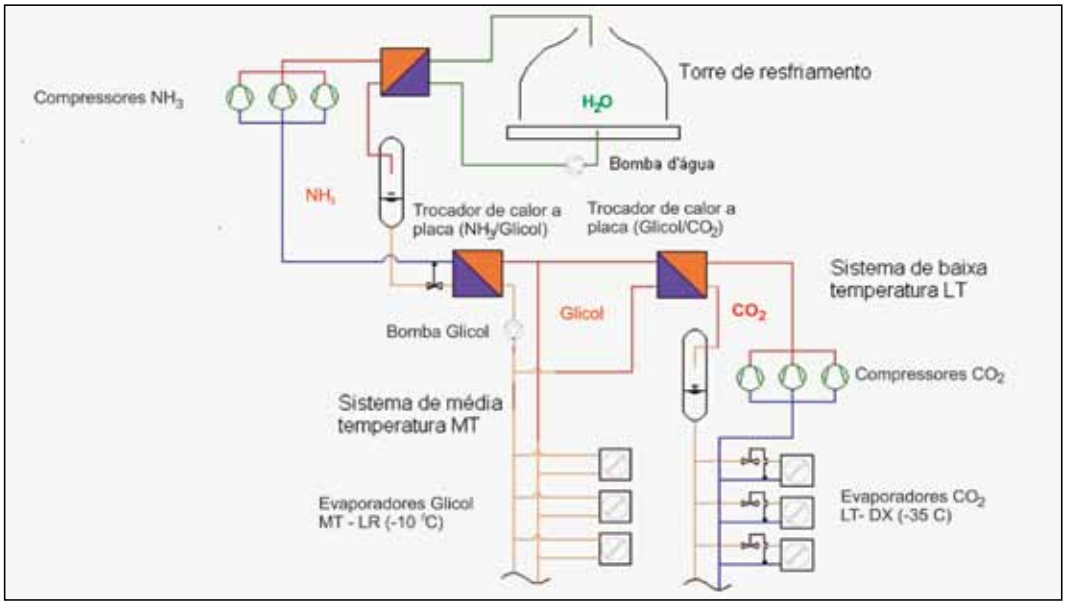



**Figura 6:** Exemplo simplificado de sistema cascata utilizando o $CO_2$ no estágio de baixa pressão com expansão seca a –35 ºC, Glicol recirculado a –10 ºC para resfriar o condensador cascata ($CO_2$/Glicol) e os evaporadores de média temperatura. O $NH_3$ é utilizado no estágio de alta pressão.

## 8.2 Estágio de Baixa com R744 a -35 °C DX, com R744 recirculado em média temperatura a - 10 °C resfriado pelo Glicol. Estágio de Alta com R717

De acordo com a figura 7, o sistema de alta pressão com o R717 refrigera o Glicol que, por sua vez, refrigera o estágio de baixa pressão, que utiliza o $CO_2$. Este por sua vez é utilizado como expansão seca para atender aos evaporadores de congelados a –35 ºC, e como líquido recirculado, atende também aos evaporadores de resfriados a –10 ºC. A amônia utiliza um condensador evaporativo.

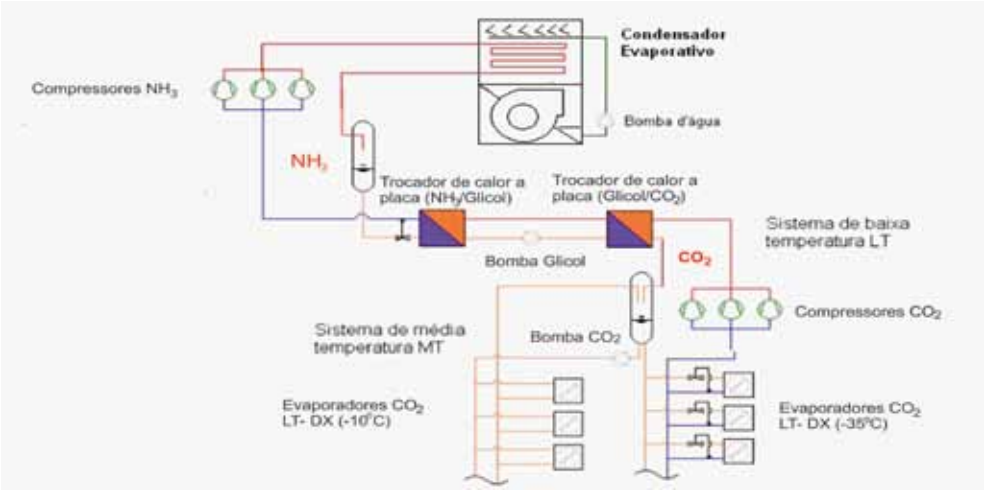



**Figura 7:** Exemplo simplificado de sistema cascata utilizando o $CO_2$ no estágio de baixa pressão com expansão seca a –35 ºC para atender aos evaporadores de congelados e também como líquido recirculado para atender aos evaporadores de resfriados a –10 ºC. O Glicol somente refrigera o condensador cascata ($CO_2$/Glicol). O $NH_3$ é utilizado no estágio de alta pressão.

A vantagem deste sistema é que o volume de Glicol e o seu custo de bombeamento é bastante reduzido em comparação ao exemplo anterior. Esse tipo de sistema também elimina a possibilidade da mistura do $CO_2$ com a amônia, o que resultaria na formação do carbonato de amônia. Esse tipo de evento poderia acontecer se estivesse instalado um trocador de calor diretamente entre a amônia e $CO_2$ e o mesmo apresentasse algum vazamento. Um trocador de calor usado diretamente entre o R744 e o R717 também exigiria que o sistema de amônia estivesse próximo do sistema com $CO_2$, o que não seria apropriado em local onde o público em geral tivesse acesso.

## 8.3 Estágio de Baixa com R744 a -30 °C DX, com R744 recirculado em média temperatura a - 10 °C e Estágio de Alta com R717

De acordo com a figura 8, o sistema de alta pressão com o R717 refrigera diretamente o $CO_2$ utilizado no estágio de baixa pressão que, por sua vez, é utilizado como expansão seca para atender aos evaporadores de congelados a –30 ºC, e como líquido recirculado a –10 ºC para atender também aos evaporadores de resfriados. A amônia utiliza um condensador à água em circuito fechado com Dry –Cooler.

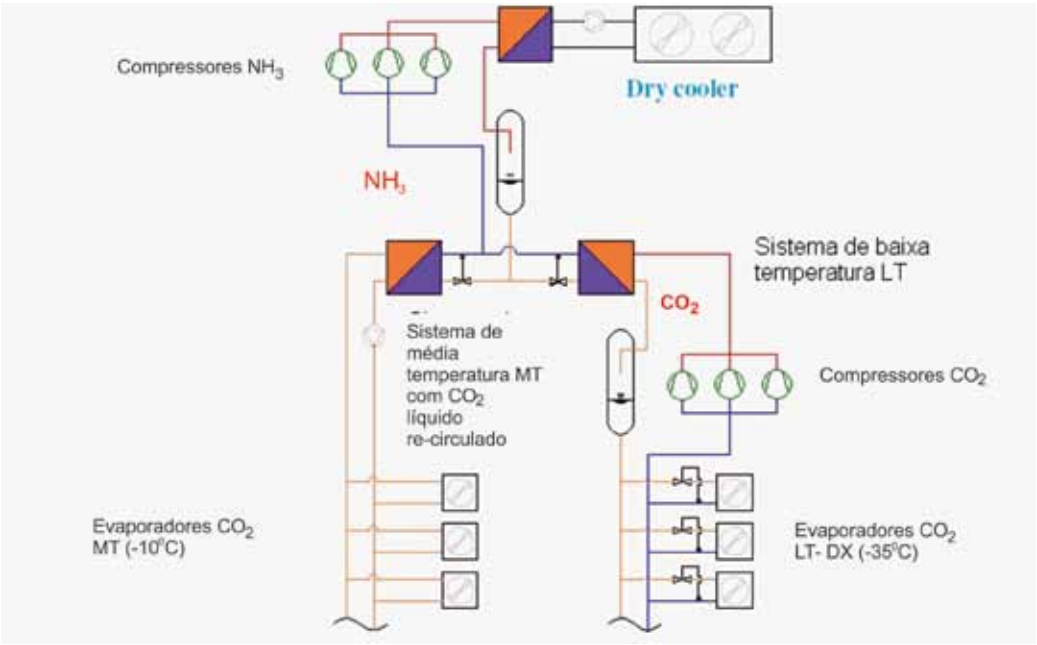



**Figura 8:** Exemplo simplificado de sistema cascata utilizando o $CO_2$ no estágio de baixa pressão com expansão seca a –30 ºC para atender aos evaporadores de congelados e também como líquido recirculado para atender aos evaporadores de resfriados a –10 ºC. O $NH_3$ é utilizado no estágio de alta pressão.

Este tipo de sistema é um dos mais utilizados, pois elimina o Glicol e, como resultado, trabalha com maior temperatura de evaporação no estágio de alta pressão com a amônia, aumentando assim a eficiência do sistema.

# 9 Racks com compressores em paralelo de $CO_2$ e $NH_3$

Os racks de $CO_2$ utilizam compressores semi-herméticos. Estes possuem placas de válvulas projetadas para assegurar elevadas taxas de fluxo de massa, as buchas são de Nylon impregnado (PTFE) para garantir a retenção do óleo nas superfícies de contato e melhor lubrificação sob pressões elevadas de operação com $CO_2$. Os motores instalados nesses compressores semi-herméticos com $CO_2$ são relativamente maiores devido à sua elevada capacidade de refrigeração, que é superior a do R22, R404A ou R507 - aproximadamente de 5 a 8 vezes. Os compressores de $CO_2$ são fisicamente bem menores quando comparados com os de R22, R404A ou R507. A figura 9 mostra um compressor em corte utilizado para $CO_2$.



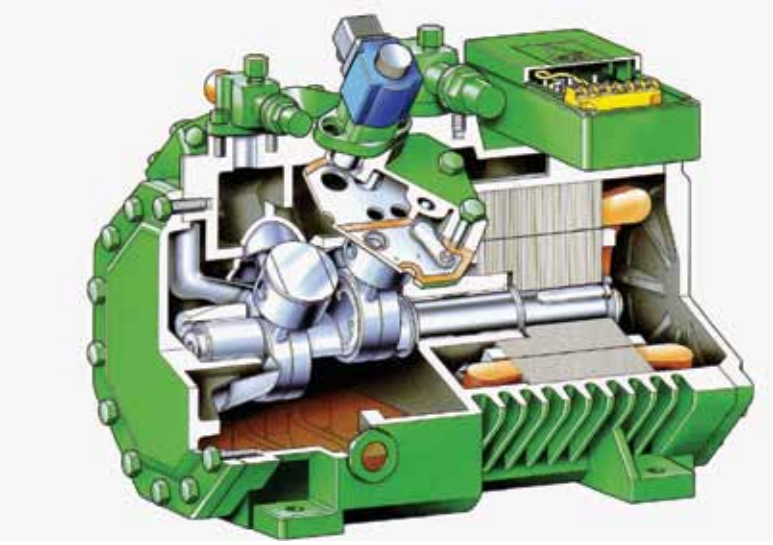


**Figura 9:** Compressor Bitzer semi-hermético série K para $CO_2$.

Para controlar o nível de óleo dos compressores aplicados com $CO_2$ são utilizados separador + pulmão de óleo (sistema de alta pressão) em conjunto com reguladores de nível de óleo eletrônico Traxoil, que foram desenvolvidos exclusivamente para o uso com sistemas de $CO_2$ e podem ser instalados diretamente no visor de óleo do compressor. As figuras 10 e 11 mostram um exemplo simplificado do sistema de equalização de óleo utilizando reguladores de nível eletrônicos para os compressores com $CO_2$ . Esse sistema é muito parecido com os sistemas utilizados com halogenados.

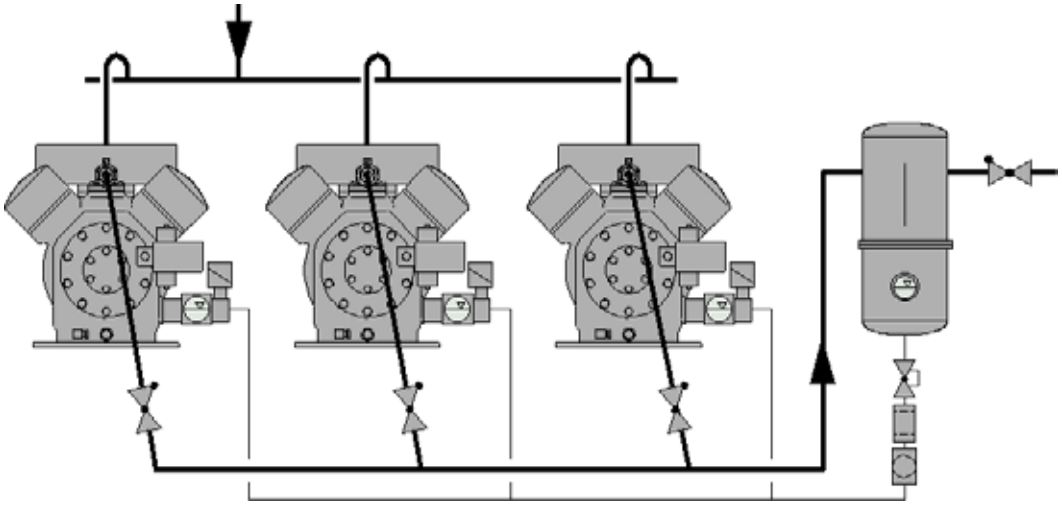


**Figura 10:** Exemplo simplificado de equalização de óleo para compressores de $CO^2$.

**Figura** 11: Detalhe do regulador de nível de óleo eletrônico.

**Os racks** com amônia utilizam somente compressores do tipo aberto, livres de cobre e suas ligas, pois devido à incompatibilidade desse refrigerante com o cobre utilizado no motor elétrico, torna-se inviável a utilização de compressores semi-herméticos. Normalmente, para pequenas capacidades, são utilizados os compressores de pistão (alternativos) e, para cargas elevadas, são aplicados os compressores parafuso. As figuras 12 e 13 mostram exemplos de compressores abertos de pistão e parafuso utilizados com $NH_3$.

| | |
|---|---|
| **Figura 12:** Compressor Bitzer semi-hermético série K para $CO_2$ | **Figura 13:** Compressor Bitzer aberto parafuso para $NH_3$ |



Para controlar o nível de óleo dos compressores abertos alternativos com Amônia, normalmente é utilizado um separador individual em conjunto com a equalização de óleo e gás, conforme aparece na figura 14.

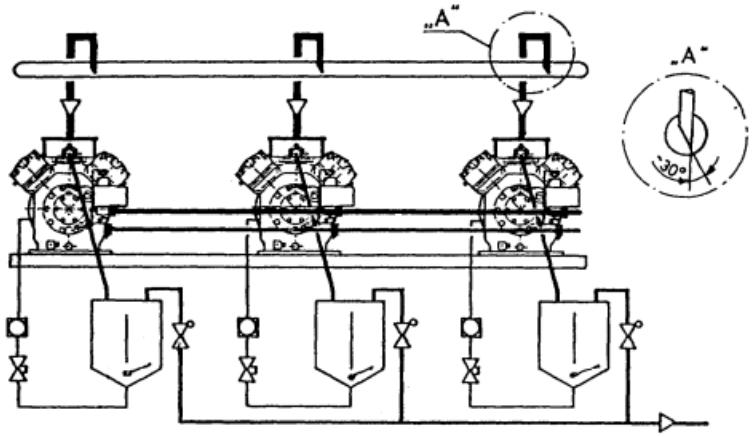



**Figura 14:** Exemplo simplificado do sistema de equalização de óleo para compressores abertos alternativos para $NH_3$.

Quando a carga térmica do estágio de alta pressão com a Amônia é elevada, recomenda-se a aplicação dos compressores abertos parafuso. Esses compressores são os mais apropriados para esse tipo de aplicação, porquanto utilizam separadores de óleo primário e secundário (sistema inundado), também empregam resfriadores de óleo e sistema "Economizer" para aumentar a capacidade frigorífica. A figura 15 mostra um exemplo simplificado de um compressor parafuso com separador de óleo primário e secundário e resfriador de óleo. A figura 16 mostra um exemplo simplificado de rack com compressores parafuso montados em paralelo com $NH_3$.

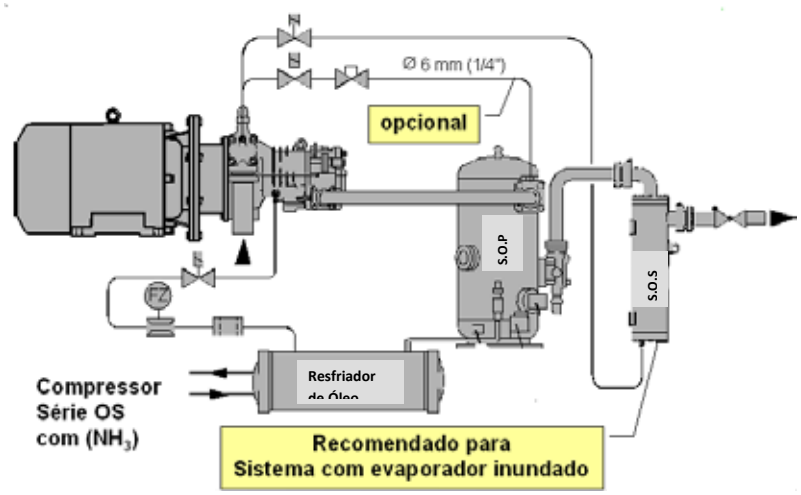



**Figura 15:** Exemplo simplificado de um compressor Bitzer parafuso com separador de óleo primário e secundário e resfriador de óleo

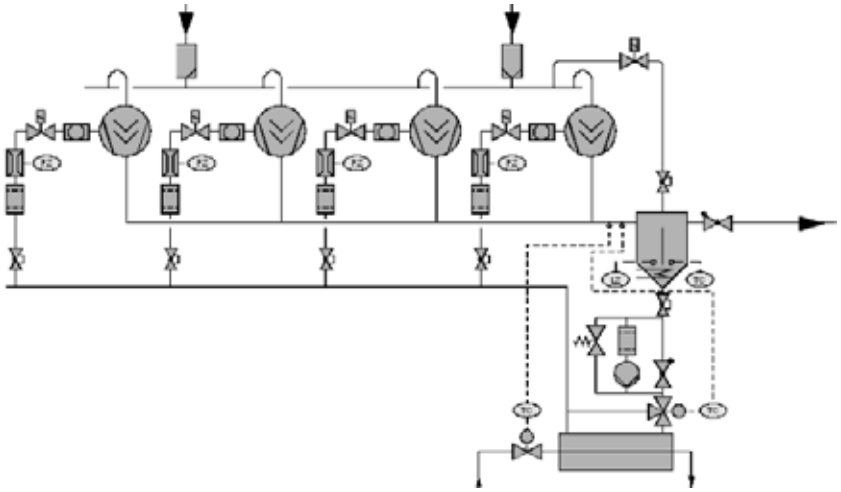


**Figura 16:** Exemplo simplificado de rack com compressores parafuso montados em paralelo com $NH_3$.

A seguir, são mostradas algumas fotos de instalações de racks com $CO_2$/$NH_3$ para supermercados:

**Figura 17:** Exemplo de rack com compressores parafuso para $NH_3$.

**Figura 18:** Exemplo de instalação em cascata com $CO_2$/$NH_3$ aplicado em supermercado.

# 10 Conclusão

O objetivo deste artigo foi o de apresentar as possibilidades da aplicação dos sistemas de refrigeração mais utilizados para supermercados usando o dióxido de carbono ($CO_2$) e a amônia ($NH_3$) em cascata.

Não importa o caminho que será adotado no futuro para a escolha dos refrigerantes nas instalações de refrigeração para supermercados, o mais importante é saber que atualmente os fabricantes de compressores e componentes já possuem tecnologias avançadas e desenvolvidas para trabalharem com todos os refrigerantes disponíveis no mercado, sejam eles sintéticos ou naturais.

Entretanto, para que a aplicação desses fluidos seja viável, é preciso treinar todos os envolvidos com o projeto, instalação, manutenção e operação desses equipamentos. Além disso, é preciso seguir todas as normas de segurança e recomendações dos fabricantes para que o sistema possa ser projetado, instalado e operado de maneira segura e confiável com a satisfação de todos.



# 11 Referências Bibliográficas

## Literatura:

Bitzer, **Refrigerant Report,** 15º Edição, 2008.

Catálogos de compressores semi-herméticos e abertos da Bitzer para o R744 e R717.

Normas técnicas: Em 378-1; Ashrae 34-92.

Manual Alfa Lava trocadores de calor, 4ªed. 2001.

Ciconkov, Risto. **Ammonia Technologies and its Applications** - UNEP, ECA Meeting, 2008.

Manual de Boas Práticas em Supermercados para Sistemas de Refrigeração e Ar-Condicionado - **Fluidos Refrigerantes Alternativos** - Ministério do Meio Ambiente, ABRAS e ABRAVA, pág. 15 –19.

Silva, Alessandro. **Dióxido de Carbono – $CO_2$ (R744), Utilizado como Fluido Refrigerante em Sistemas de Refrigeração Comercial e Industrial**, Editora Nova Técnica – vol 01, pág. 39 – 76, 2009.

Silva, Alessandro. **Aplicações do $CO_2$ no setor de Refrigeração Comercial para Supermercados** – Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar -Condicionado – Ministério do Meio Ambiente – MMA, Publicação Técnica, pág. 129 – 153, 2008.

Girotto, Sergio. **Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration** – Technical Presentation, May, 2007.

# Novas Tendências na Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração

**ENG. ALEXANDRE PRESOTTO JR. E ENG. CARLOS GUILHERME SÜFFERT**

SPM Engenharia S/C Ltda.

carlos.suffert@spm.com.br



## RESUMO

O artigo compara o funcionamento de sistemas de frio alimentar para supermercados utilizando fluidos secundários e combinações com diversos tipos de fluidos refrigerantes primários como R22 (HCFC), R-507A (HFC), R290 (HC) e também uma combinação de $CO_2$ em regime subcrítico com R507A. As diferentes configurações foram analisadas segundo aspectos de desempenho energético, impacto ambiental e parametrizados com as instalações atualmente utilizadas com sistema de expansão direta de R22.

# 1 Introdução

A partir do "Protocolo de Montreal" e posteriormente o "Protocolo de Quioto" foram desenvolvidas diversas alternativas para a diminuição do impacto ambiental, gerado a partir de instalações de refrigeração de maneira direta e indireta.

O Brasil, seguindo o exemplo dos países Europeus e cumprindo as metas do "Protocolo de Montreal" ingressará, a partir do ano de 2013, em seu período de eliminação gradual dos gases tipos HCFCs, nocivos à camada de ozônio. Entretanto, a efetividade dessa resolução não poderá ferir os preceitos do "Protocolo de Quioto", simplesmente substituindo gases agressivos à camada de ozônio por gases com alto potencial para o "efeito estufa" e com desempenho energético inferior.

Nesse contexto, foram avaliados o desempenho energético e o impacto ambiental, analisando as variações decorrentes com as oscilações climáticas e diferentes atividades durante a operação normal do supermercado.

A análise compara a mesma instalação com diversas configurações de sistemas utilizando fluidos secundários e combinando com refrigerantes primários diversos, conforme quadro abaixo:



| Fluido | Tipo | ODP | GWP | Temperatura Crítica | Segurança |
|---|---|---|---|---|---|
| R22 | HCFC | 0,05 | 1500 | 96 °C | A1 |
| R507A | HFC | 0 | 3.300 | 71 °C | A1 |
| R290 | HC | 0 | 3 | 97 °C | A3 |
| R744 | inorgânico | 0 | 1 ~10000 | 31 °C | A1 |

# 2 Descrição dos Sistemas

Usualmente as instalações de média temperatura para supermercados empregam a expansão direta de R22. Esse tipo de sistema opera com grandes volumes de gás refrigerante e normalmente com regimes de projeto de –10/+45 °C para o circuito de média temperatura e –32/+45 °C para congelados. Entretanto, verifica-se que a temperatura de evaporação diminui para –11 °C e –33 °C, quando há queda na carga térmica requerida ou aumento no desempenho do compressor pela queda na temperatura de condensação. Assim, nesses períodos temos diminuição do coeficiente

de performance (COP) da instalação. Outro fator limitante é a utilização de válvulas de expansão termostáticas, pois não admitem grandes variações na temperatura de condensação, portanto a malha de controle dos condensadores atua mantendo a temperatura de condensação estável entre 40 e 45 °C.

Quando são utilizados sistemas indiretos com fluidos secundários, o regime nominal de operação é semelhante para o circuito de baixa temperatura, –32/+45 °C, com temperatura de alimentação do fluido secundário de -26 °C.Todavia, para o circuito de permite regime de operação nominal de -8/+45 °C. Desse modo, obtemos diminuição do consumo de energia mesmo considerando a potência utilizada pela bomba de fluido secundário. Também temos uma diminuição da carga de fluido refrigerante primário, que favorece a aplicação das restrições impostas pelo "Protocolo de Montreal" e inclusive viabiliza o uso de refrigerantes alternativos ou naturais. Verifica-se ainda que, em períodos de diminuição da carga térmica requerida ou diminuição da pressão de condensação, temos, ao contrário das instalações de expansão direta, uma elevação da temperatura de evaporação e com isso aumento do COP do sistema.

O sistema também viabiliza a utilização de válvulas de expansão eletrônicas e com isso possibilita a diminuição da temperatura de condensação para aproximadamente 25 °C, além de permitir maior controle do superaquecimento de sucção.

Atualmente existem vários tipos de produtos utilizados como anticongelantes em soluções de fluidos secundários para instalações de refrigeração, contudo nos deteremos em analisar as soluções mais utilizadas em instalações comerciais no Brasil, como acetato de potássio para congelados e propileno glicol para refrigerados, também analisaremos sistemas com utilização de $CO_2$ em regime subcrítico.

Quanto aos refrigerantes primários, analisaremos a utilização de vários tipos de gases:

» R22 – refrigerante tipo HCFC atualmente muito utilizado em instalações comerciais, mas com restrições ao uso pelo "Protocolo de Montreal" e com cronograma de eliminação iniciado pelo Ministério do Meio Ambiente Brasileiro a partir de 2013.

» R507A – refrigerante tipo HFC azeotrópico com ODP=0, que o torna aprovado pelo "Protocolo de Montreal", mas com GWP=3300 e por isso com restrições pelo "Protocolo de Quioto".

» R290 (propano) – refrigerante tipo HC, natural, azeotrópico, ODP=0, GWP=3, porém inflamável.

Abaixo fluxograma esquemático com indicação das variações no regime de operação dos sistemas comparados:

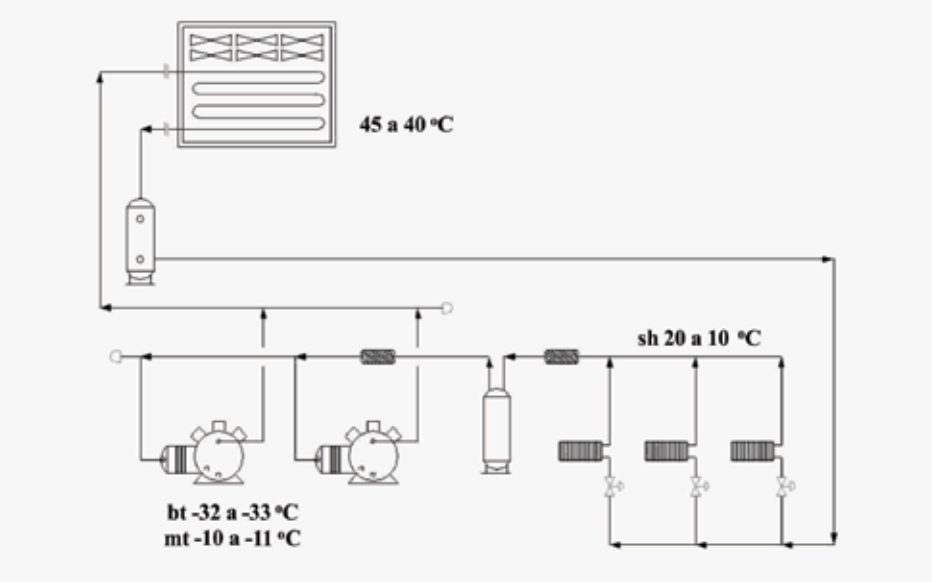



**Figura 1:** Sistema de expansão direta.

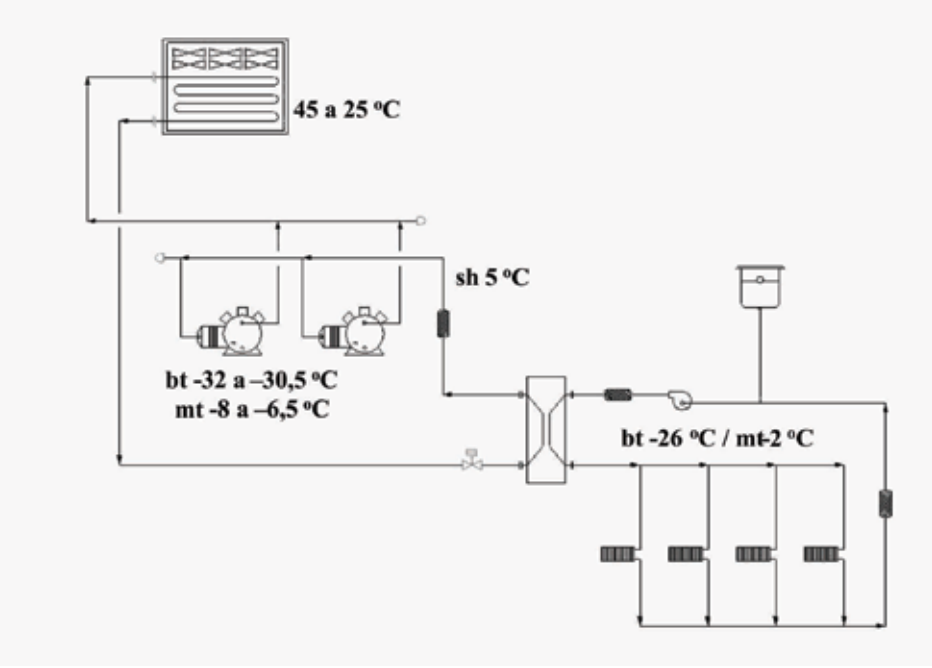



**Figura 2:** Sistema com utilização de fluidos secundários.

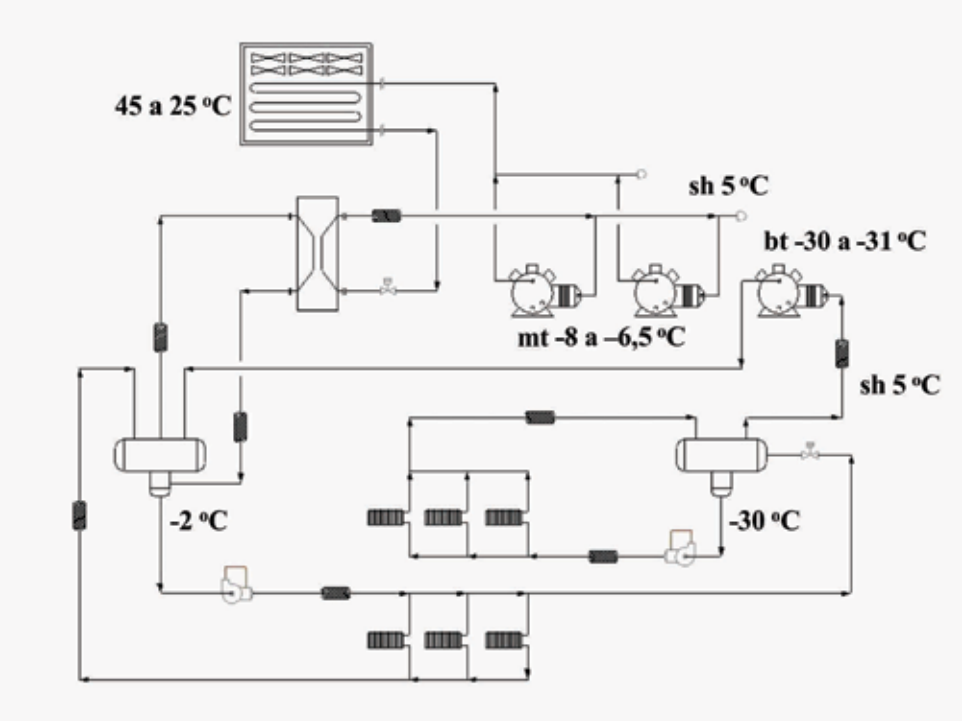



**Figura 3:** Sistema com utilização de $CO_2$ em regime subcrítico.



# 3 Premissas Básicas

As instalações foram comparadas tecnicamente, considerando uma instalação comercial hipotética dentro da cidade de São Paulo, admitindo-se em ambiente condicionado e considerando os reflexos das variações de carga térmica no decorrer do dia e das variações climáticas ao longo do dia e ano.

Carga térmica:

- Congelados = 50.000 kcal/h
- Refrigerados = 120.000 kcal/h
- Áreas de preparos = 12.500 kcal/h

As variações climáticas ao longo do ano e no decorrer do dia, segundo as temperaturas médias para a cidade de São Paulo, estão apresentadas no quadro abaixo:

| Temperatura externa | Acima de 30 °C | Entre 25 e 30 °C | Entre 20 e 25 °C | Entre 15 e 20 °C | Abaixo de 15 °C |
|---|---|---|---|---|---|
| Diurna | 101 h/ano | 813 h/ano | 2.576 h/ano | 2.212 h/ano | - |
| Noturna | - | - | - | 1.303 h/ano | 1.617 h/ano |
| Feriados | 6 h/ano | 20 h/ano | 64 h/ano | 48 h/ano | - |

Obs.: Dados obtidos conforme arquivo climático TRY

Foi considerado um período de abertura ao público de 16 horas/dia, o que significa que, durante 8 horas/dia, com a loja fechada, temos câmaras frigoríficas fechadas e baixa movimentação de produtos nos expositores em geral. Isso significa que, durante o horário noturno, admite-se uma diminuição da carga térmica.

Foram considerados, ainda, para o cálculo de desempenho energético, compressores tipo semi-herméticos e condensadores a ar, para degelo dos expositores e câmaras de congelados, sistema por resistências elétricas e, quando necessário, degelo para equipamentos de média temperatura foi considerado sistema de degelo natural.



# 4 Consumo de Energia

É importante observar que as instalações de refrigeração são normalmente projetadas para trabalhar em condições extremas, ou seja, carga térmica máxima e temperatura de condensação segundo a média das temperaturas máximas de verão. Entretanto, se considerarmos as variações de carga térmica e das condições climáticas ao longo do dia e das estações do ano, perceberemos que essa situação ocorre durante um período relativamente pequeno para a cidade de São Paulo. Aproximadamente apenas em 107 horas/ano, a temperatura externa ultrapassa os 30 °C, isto é, 1,2% do tempo de operação anual.

Logo, é importante que o sistema tenha capacidade para atender à carga térmica requerida nas condições de projeto, como também é fundamental que a instalação seja analisada em seu funcionamento não apenas nessas condições, mas principalmente em regimes de carga parcial que apresentam frequência muito superior e, portanto, contribuem de maneira mais significativa para o consumo de energia ao longo do ano.

Por conseguinte, nos quadros abaixo estão indicadas as variações do coeficiente de performance (COP) global dos sistemas, incluindo a energia dos compressores, condensadores e bombas, em função das variações nas condições de operação:

| Circuito de baixa temperatura | | | |
|---|---|---|---|
| **Sistema** | **Diurno** | **Noturno** | **Feriado** |
| Expansão direta R22 | 1,50 a 1,59 | 1,59 | 1,45 a 1,59 |
| Fluidos Secundários com R22 | 1,57 a 2,03 | 2,11 a 2,29 | 1,62 a 2,11 |
| Fluidos Secundários c/ R507A | 1,73 a 2,13 | 2,20 a 2,39 | 1,77 a 2,20 |
| Fluidos Secundários com R290 | 1,97 a 2,31 | 2,48 a 2,69 | 2,01 a 2,48 |
| $CO_2$ subcrítico com R507A | 4,18 a 3,98 | 3,98 | 3,98 |

| Circuito de média temperatura | | | |
|---|---|---|---|
| **Sistema** | **Diurno** | **Noturno** | **Feriado** |
| Expansão direta R22 | 2,17 a 2,41 | 2,41 | 2,11 a 2,41 |
| Fluidos Secundários com R22 | 2,41 a 3,61 | 3,75 a 4,38 | 2,45 a 3,75 |
| Fluidos Secundários c/ R507A | 1,88 a 3,11 | 3,32 a 3,89 | 1,91 a 3,23 |
| Fluidos Secundários com R290 | 2,62 a 3,95 | 4,12 a 4,86 | 2,67 a 4,12 |
| $CO_2$ subcrítico com R507A | 1,88 a 3,11 | 3,23 a 3,89 | 1,91 a 3,23 |

Portanto, considerando as variações de COP com os diferentes períodos de operação do sistema, temos o seguinte quadro de consumo de energia:

| **Sistema** | MWh / ano | **Noturno** | **%** |
|---|---|---|---|
| Expansão direta R22 | 860,5 | 2,41 | - |
| Fluidos Secundários com R22 | 772,6 | 3,75 a 4,38 | -10,2 |
| Fluidos Secundários c/ R507A | 834,9 | 3,32 a 3,89 | -3,0 |
| Fluidos Secundários com R290 | 696,4 | 4,12 a 4,86 | -19,1 |
| $CO_2$ subcrítico com R507A | 845,7 | 3,23 a 3,89 | -1,7 |

E considerando o custo médio de R$ 0,35/kWh:

| Sistema | R$ / ano | Noturno | % |
|---|---|---|---|
| Expansão direta R22 | 301.175,00 | 2,41 | 0,00 |
| Fluidos Secundários com R22 | 270.410,00 | 3,75 a 4,38 | -30.765,00 |
| Fluidos Secundários c/ R507A | 292.215,00 | 3,32 a 3,89 | -9.500,00 |
| Fluidos Secundários com R290 | 243.740,00 | 4,12 a 4,86 | -57.435,00 |
| $CO_2$ subcrítico com R507A | 295.995,00 | 3,23 a 3,89 | -5.180,00 |

# 5 Impacto Ambiental

Para análise de impacto ambiental do sistema de refrigeração, não é suficiente analisar os coeficientes de potencial de destruição da camada de ozônio (PDO) ou de efeito estufa (GWP), pois esses índices são características físicas das substâncias utilizadas e não consideram aspectos da instalação. Assim, utilizamos o índice TEWI (total equivalent warming impact) que é a soma das emissões diretas e indiretas por meio das perdas de gás refrigerante e do consumo de energia. Esse índice considera o GWP dos gases utilizados, a carga de refrigerante, a quantidade de vazamentos, o consumo de energia, a fonte geradora de energia e o tempo de operação do sistema. O quadro abaixo compara o TEWI dos sistemas analisados, calculados para um sistema durante cinco anos de operação:



| Sistema | ODP | GWP | refrig. kg | energia MWh/a | TEWI |
|---|---|---|---|---|---|
| Expansão direta R22 | 0,05 | 1.500 | 1.080 | 860,5 | 2.025.688 |
| Fluidos Secundários com R22 | 0,05 | 1.500 | 160 | 772,6 | 300.618 |
| Fluidos Secundários c/ R507A | 0 | 3.300 | 135 | 834,9 | 557.543 |
| Fluidos Secundários com R290 | 0 | 3 | 66 | 696,4 | 805 |
| $CO_2$ subcrítico com R507A | 0<br>0 | 3.300<br>1 | 88<br>1.480 | 845,7 | 365.527 |

# 6 Conclusão

Com base nos dados demonstrados acima, verificamos que os sistemas com utilização de fluidos secundários apresentam performance superior aos sistemas atuais, com expansão direta de R22, principalmente quando em operação durante regimes de carga parcial, proporcionando diminuição do consumo de energia, independente do fluido refrigerante primário utilizado.

Quando comparamos o impacto ambiental entre os sistemas com fluidos secundários e instalações com expansão direta de R22, também percebemos vantagens no sistema indireto devido à diminuição da carga de refrigerante, de vazamentos de refrigerante e diminuição do consumo de energia. Dessa maneira, os sistemas com utilização de fluidos secundários proporcionam diminuição dos índices TEWI, independente do refrigerante primário utilizado.

Podemos verificar, outrossim, que os sistemas combinados de fluidos secundários com R290 (propano) apresentaram os melhores resultados, tanto na questão do desempenho energético quanto no impacto ambiental. O propano apresenta desempenho termodinâmico semelhante ao R22, mas com PDO = 0 e GWP = 3. A desvantagem desse refrigerante é a questão de segurança, índice A3 na classificação Ashrae, por conta de sua característica inflamável.

Portanto, concluímos que atualmente se inicia no Brasil o período de controle para utilização dos gases HCFCs, com o objetivo de eliminar gradualmente essas substâncias, devido à agressão à camada de ozônio. Os sistemas com utilização de fluidos secundários, já em operação no país há mais de 15 anos, demonstram ser uma alternativa confiável tecnicamente , com redução no consumo de energia e no impacto ambiental das instalações de refrigeração, viabilizando inclusive a utilização de fluidos refrigerantes naturais.

# Uso de Refrigerantes Alternativos em Refrigeração Doméstica e em Equipamentos Compactos de Refrigeração Comercial

**CLÁUDIO MELO, PH.D.**
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
melo@polo.ufsc.br



## RESUMO

O presente trabalho procura analisar o impacto da substituição dos fluidos alternativos, sob a ótica dos protocolos de Montreal e Quioto, especificamente nos setores de refrigeração doméstica e comercial leve. Percebe-se uma tendência clara de abandono dos fluidos refrigerantes sintéticos em favor dos fluidos refrigerantes naturais. Na fabricação dos isolamentos térmicos, o ciclopentano tende a se tornar o fluido dominante. Nos refrigeradores domésticos, a tendência é pelo predomínio mundial do isobutano. No setor comercial leve, aparece o propano e o dióxido de carbono. O primeiro com limitações na carga total de refrigerante e o segundo com limitações de eficiência energética. A introdução de novos fluidos refrigerantes é eminente, com vários dos fluidos atuais e considerados alternativos, tornando-se obsoletos num curto espaço de tempo.

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

# 1 Primórdios da refrigeração

Antes de analisar o futuro da área de refrigeração, convém voltar um pouco ao passado. Antigamente o frio era produzido principalmente a partir da utilização de gelo ou neve, transportados de regiões mais frias. Outra possibilidade consistia no armazenamento de gelo obtido no inverno para uso no verão. Em alguns locais, era também possível obter gelo durante noites frias para uso durante o dia (Gosney, 1982). A Figura 1, por exemplo, mostra um vaso grego do século VI a.c. utilizado para resfriamento de vinho, encontrado na cidade de Vulci - Itália. Pode-se perceber que existem dois compartimentos, o interior onde era colocado o vinho e o exterior onde era colocado gelo ou neve.

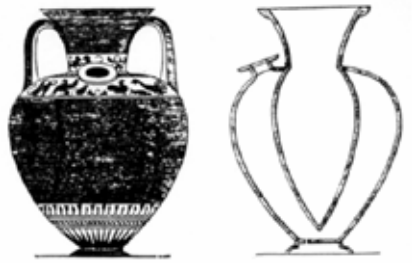


**Figura 1:** Vaso grego para resfriamento de vinho.

Dentre muitos registros interessantes, cabe mencionar um ocorrido em 1667 quando o comandante da cidade de Lille - França, cercada pelo exército do rei Luis XIV, enviou ao rei uma pequena porção de gelo com uma mensagem informando que o cerco iria durar muitos meses e que ele não gostaria que o rei passasse por aquela situação sem o conforto proporcionado pelo gelo. O registro anterior é apenas um dentre muitos outros existentes na literatura, que mostra que o gelo foi utilizado como meio de resfriamento durante séculos, principalmente por todos aqueles com algum grau de poder e recursos.

A comercialização de gelo em escala comercial deve-se a Frederic Tudor que, em 1806, iniciou a venda de gelo extraído do rio Hudson, nos Estados Unidos (Figura 2). Um dos principais problemas daquela época era a inexistência de isolantes térmicos de qualidade o que gerava perdas consideráveis e exigia que os depósitos fossem construídos com paredes de espessura da ordem de um metro. O comércio de gelo natural se expandiu rapidamente. Em 1879 havia trinta e cinco operações comerciais nos Estados Unidos, duzentas uma década mais tarde e duas mil em 1909. Por volta de 1890, o uso de gelo natural começou a declinar devido à poluição das fontes de água. Isso facilitou a penetração no mercado de gelo produzido artificialmente. Entretanto, deve-se registrar que, no início do século XX, as

10 maiores empresas da bolsa de valores de Nova Iorque exploravam o gelo natural. O comércio de gelo natural ainda persistiu por um longo tempo após a introdução da refrigeração mecânica. A Inglaterra, por exemplo, só interrompeu a importação de gelo da Noruega por volta de 1930 (Gosney, 1982).

**Figura 2:** Colheita de gelo.



# 2 Primeira Geração: Qualquer Fluido (1830-1930)

Durante os séculos XVIII e XIX, muitas pesquisas na área de refrigeração foram realizadas na Europa, especialmente na França e na Inglaterra. Naquela época a contribuição dos Estados Unidos não foi significativa, devido à abundância de gelo natural. Em 1755, Willian Cullen (1710-1790), professor da Universidade de Edimburgo, obteve gelo a partir da evaporação do éter. O processo de produção de frio era, entretanto, descontínuo e não foi usado para qualquer propósito prático. A primeira descrição completa de um equipamento de refrigeração, operando de maneira cíclica e utilizando éter como fluido refrigerante, foi feita por Jacob Perkins (1766-1849), em 1834. O trabalho de Perkins despertou pouco interesse e permaneceu esquecido por aproximadamente 50 anos, até que Bramwell o descreveu num artigo publicado no Journal of the Royal Society of Arts.

O principal responsável por tornar o princípio de refrigeração por compressão mecânica em um equipamento real foi James Harrison (1816-1893). Não se sabe se Harrison conhecia ou o não o trabalho de Perkins, mas em 1856 e em 1857 ele obteve, respectivamente, as patentes britânicas

747 e 2362. Em 1862, durante uma exibição internacional em Londres, o equipamento de Harrison, fabricado por Daniel Siebe e utilizando éter como fluido refrigerante, foi apresentado à sociedade da época.

No início do século XX, os refrigeradores domésticos consistiam essencialmente de uma caixa, construída de madeira e isolada termicamente, onde eram colocados blocos de gelo (Figura 3). Tal sistema apresentava as seguintes desvantagens: i) necessidade de reposição do gelo, ii) necessidade de drenagem e iii) taxa de resfriamento variável. A disponibilidade de unidades seladas de refrigeração logo se tornou uma realidade. Entretanto, todos os refrigerantes conhecidos, por volta de 1928, eram tóxicos, inflamáveis ou ambos. Devido ao elevado número de acidentes, alguns até fatais, jornais, como o The New York Times, faziam campanha para eliminar os refrigeradores domésticos que até então utilizavam o dióxido de enxofre ($SO_2$) como fluido refrigerante. Nessa época 85% das famílias americanas que dispunham de eletricidade não possuíam refrigeradores domésticos.

**Figura 3:** Geladeira doméstica.

# 3 Segunda Geração: Segurança e Durabilidade (1931-1990)

Em 1928, a Frigidaire encarregou um grupo de cientistas, liderados por Thomas Midgley, a identificar um refrigerante que não fosse tóxico nem inflamável. Em menos de duas semanas, a família dos hidrocarbonetos halogenados, ou Cloro Flúor Carbonos (CFCs), forneceu a solução para o problema. Tais substâncias já eram conhecidas como compostos químicos desde o século XIX, mas o seu uso como fluido refrigerante foi explorado primeiramente por Thomas Midgley. A descoberta

não foi anunciada ao público devido à histeria contra refrigeradores, existente na época. Após dois anos de testes, os CFCs foram apresentados ao público num encontro da Sociedade Americana de Química (Midgley and Henne, 1930). A produção comercial de CFC-12 ($CCl_2F_2$) iniciou em 1931 e a do CFC-11 ($CCl_3F$) em 1932. A introdução dos CFC's permitiu a disseminação dos refrigeradores domésticos, os quais deixaram de ser um luxo e passaram a ser uma necessidade.

Durante aproximadamente 70 anos, o CFC-12, como refrigerante, e o CFC-11, como agente expansor de espuma, reinaram absolutos nos segmentos de refrigeração doméstica e comercial leve. O reinado desses fluidos começou a declinar em 1974, quando o Prof. Sherwood Rowland e o Dr. Mario Molina, associaram os CFCs à redução da camada de ozônio da estratosfera (Molina and Rowland, 1974). A teoria de Rowland e Molina foi comprovada em 1985, com a descoberta de um buraco na camada de ozônio sobre a Antártida (Figura 4) e contemplada com o prêmio Nobel de química em 1995.

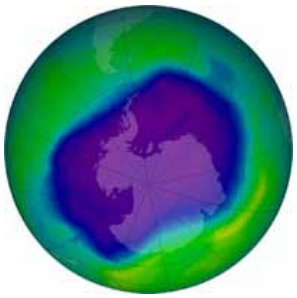


**Figura 1:** Buraco na camada de ozônio sobre a Antártida (09/2006)



# 4 Terceira Geração: Camada de Ozônio (1990-2010)

Como consequência do Protocolo de Montreal (1987), a maioria das aplicações domésticas e comerciais leves (MBP - Medium Back Pressure) passou a adotar o HFC-134a como refrigerante e o HCFC-141b como agente expansor de espuma. As aplicações comerciais leves (LBP - Low Back Pressure), que até então utilizavam o HCFC22 ou o R502, passaram a fazer uso do R404a, uma mistura zeotrópica dos seguintes refrigerantes: (44% HCFC-125 + 52% HCFC-143a + 4% HFC-134a).

Além de boas propriedades químicas e termodinâmicas, os HFCs não são tóxicos ou inflamáveis. Tais substâncias são, entretanto, pouco compatíveis com os materiais do sistema, especialmente com óleos minerais, o que exige a utilização de óleos ésteres (POE - Poliolester e PAG - Polialquileno Glicol). Além do mais, tais fluidos são susceptíveis à presença de contaminantes no sistema. Mesmo com tais limitações o HFC-134a recebeu uma grande aceitação do mercado.

O reinado absoluto do HFC-134a/HFC-141b foi relativamente curto, pois logo se percebeu que tais substâncias, apesar de terem um efeito mínimo sobre a camada de ozônio, possuem um efeito marcante sobre o efeito estufa. A pressão pela utilização de fluidos refrigerantes naturais foi imediata. O HFC-134a passou a ser substituído pelo isobutano (HC-600a) no setor de refrigeração doméstica e pelo propano (HC-290) e dióxido de carbono ($CO_2$/R744) no setor de refrigeração comercial leve. O HFC-141b foi rapidamente substituído pelo ciclopentano, na maioria das aplicações domésticas e comerciais leves.

Os hidrocarbonetos são compatíveis com a maioria dos materiais de construção do sistema, como ligas metálicas e polímeros. São também compatíveis com óleos minerais e sintéticos e não exigem modificações substanciais no sistema ou no projeto dos componentes. O desempenho obtido é também bastante similar ao obtido com CFCs, HCFCs ou HFCs. A baixa pressão de vapor do HC-600a origina menores níveis de ruído, o que o torna atraente para refrigeradores domésticos. Além disso, devido ao seu baixo efeito refrigerante volúmico (capacidade volumétrica), o HC-600a exige compressores de maior deslocamento volumétrico para uma mesma capacidade de refrigeração, os quais são geralmente mais eficientes. A desvantagem do uso de HCs é hoje a mesma de 80 anos atrás pois, embora sejam pouco tóxicos, tais fluidos são inflamáveis e explosivos. É essencial, portanto, que a carga de refrigerante seja reduzida para minimizar os riscos envolvidos (Palm, 2008).

Em algumas situações pode-se considerar o uso de misturas de refrigerantes, notadamente de HC's. As misturas são desenvolvidas para gerar as condições características do fluido que ela se propõe a substituir e visam à utilização em abordagens do tipo retrofit, quando são feitas modificações no óleo e nos materiais do sistema, ou do tipo drop-in, quando o refrigerante antigo é simplesmente substituído pelo novo. As misturas podem ser azeotrópicas, com comportamento similar ao de uma substância simples ou zeotrópicas, com variação de temperatura (glide) durante o processo de mudança de fase a pressão constante. As misturas zeotrópicas permitem a redução das irreversibilidades termodinâmicas nos trocadores de calor de sistemas de refrigeração de expansão direta. No entanto, os coeficientes de transferência de calor no interior dos trocadores diminuem e isso inibe as vantagens termodinâmicas associadas com o glide de temperatura.

O dióxido de carbono ($CO_2$/R744) possui uma boa compatibilidade química com os materiais de construção do sistema e com um grande número de óleos lubrificantes. Não é inflamável e é tóxico em

concentrações moderadas (acima de 5% em volume de mistura com o ar). Não apresenta problemas ambientais, tanto em relação à camada de ozônio quanto ao efeito estufa. Tal substância possui um baixo ponto de ebulição e uma baixa temperatura crítica, o que significa que as pressões envolvidas são relativamente altas e que os ciclos são geralmente transcríticos. O ciclo transcrítico é menos eficiente do que o ciclo convencional porque as perdas termodinâmicas são maiores. Por outro lado as excelentes propriedades termofísicas do dióxido de carbono maximizam o desempenho dos trocadores de calor e do compressor, malgrado não sejam geralmente suficientes para compensar as perdas com a operação transcrítica (Pearson, 2005).

# 5 Quarta Geração: Efeito Estufa (2010 - )

Os países desenvolvidos eliminaram os CFCs em 1996, enquanto os países em desenvolvimento (consumo < 300g/ano/pessoa) devem eliminá-los até 2010. A eliminação dos HCFCs está em andamento, com um phase-out gradual até 2020 e 2040, respectivamente para os países desenvolvidos e em desenvolvimento. Alguns países criaram legislações próprias para acelerar o phase-out dos HCFCs. Na união europeia, por exemplo, os HCFCs estão proibidos em todos os novos sistemas desde o início de 2004, e os compostos químicos à base de flúor (F-Gases), entre os quais os HFCs, com GWPs100 superiores a 150, estão proibidos para uso em sistemas de ar-condicionado automotivos a partir de 2011 (Calm, 2008).

Atendendo às restrições impostas pelo Protocolo de Quioto (1997), o Japão se comprometeu a reduzir a emissão dos Greenhouse Gases (GHGs) em 25% até 2020, com base nos valores de 1990. Na união europeia a proposta é de uma redução de 20% a 30% até 2020, também com base nos valores de 1990. A Noruega se propõe a reduzir as suas emissões em 30% até 2020, também em relação a 1990. A Nova Zelândia e a Rússia se propõem, respectivamente, a reduzir as suas emissões entre 10% a 20% e 10% a 15%, também em relação a 1990. No Canadá a proposta é de uma redução de 20%, mas em relação ao ano de 2006. Nos Estados Unidos um projeto aprovado pela Câmara dos deputados e que aguarda aprovação pelo Senado, propõe uma redução de 27% até 2020, com base nos valores de 2005.

Como os HFC's fazem parte das substâncias controladas pelo Protocolo de Quioto é de se esperar que tais refrigerantes desapareçam gradualmente do mercado, abrindo oportunidades para outros fluidos. Dentro desse contexto abrem-se os seguintes cenários para os setores de refrigeração doméstica e comercial leve.

## 5.1 Refrigeração doméstica

Atualmente o HC-600a domina o mercado de refrigeradores domésticos na Europa e em grande parte da Ásia, embora não seja empregado nos Estados Unidos. Em vários países da Europa, 95% dos refrigeradores domésticos operam com HC-600a e a tendência é que essa fração aumente ainda mais. A Embraco, por exemplo, produziu e vendeu, em diversos países do mundo, 25 milhões de compressores no ano de 2008, dos quais 34% com HC-600a. Nos Estados Unidos a comercialização é impedida pelo receio dos fabricantes contra processos que associariam os HCs com incêndios domésticos. Todavia, deve-se ressaltar que, desde 1993, mais de 200 milhões de refrigeradores e freezers com HC-600a foram comercializados e, até o momento, nenhum acidente em operação normal foi reportado, não obstante tenham ocorridos acidentes nas operações de manufatura e de serviços. Numa ação mais recente, ocorrida no final de 2008, a GE (General Electric) solicitou autorização do EPA (Environmental Protection Agency) para introduzir o HC-600a em uma nova linha de refrigeradores, a ser comercializada a partir do início de 2010, o que indica para uma tendência de introdução do isobutano no mercado norte -americano.

Os refrigeradores com HC-600a são mais silenciosos e também levemente mais eficientes do que os refrigeradores com HFC-134a. A diferença de TEWI (Total Equivalent Warming Impact) decorrente da utilização de HC-600a ou HFC-134a, ao longo da vida útil do refrigerador, é de apenas 1%. Nos Estados Unidos o consenso é reduzir o TEWI por meio da redução do consumo de energia do produto. Em alguns países europeus, a ênfase é colocada na redução da emissão direta do refrigerante. A decisão sobre o uso de um ou outro refrigerante não pode se prender apenas a aspectos ambientais, desde que os sistemas tenham a mesma eficiência. Outros fatores devem ser considerados: nível de ruído, custo, etc. As preocupações com segurança também não são procedentes já que a carga de refrigerante é geralmente inferior a 120g (Palm, 2008).



## 5.2 Refrigeração comercial leve

A refrigeração comercial leve compreende sistemas do tipo vending machines, freezers para sorvetes e expositores de bebidas. Tais sistemas usam atualmente o HFC-134a e o R404A, respectivamente para aplicações MBP e LBP. Em 2007 um grupo de grandes empresas internacionais lançou um programa denominado "Refrigerants Naturally", com a seguinte proposta: "The goal of the initiative is to promote a shift in the point-of-sale cooling technology in the food and drink, food service and retail sectors towards alternative HFC-free refrigeration technologies…". Tal iniciativa estimulou a utilização de HC-290, $CO_2$/R744 e, numa menor escala, de HC-600a.

Nesse setor a abordagem geralmente adotada consiste na identificação de um fluido com características de operação semelhantes ao fluido a ser substituído, para evitar mudanças significativas no sistema. A substituição pode ocorrer por intermédio do desenvolvimento de um produto novo, de retrofit, ou de drop-in. A Unilever, por exemplo, introduziu, recentemente, freezers para sorvetes com HC-290 utilizando uma estratégia retrofit. Duas mil unidades, com uma carga de refrigerante de 90g, foram colocadas em operação na Europa, quando se observou que não houve aumento no número de falhas e que a eficiência aumentou 9% em relação ao modelo correspondente com R404A. Na mesma linha, a Embraco e a Nestlé desenvolveram, em 2006, freezers para sorvetes, substituindo o refrigerante R404A pelo $CO_2$/R744. A estratégia adotada foi também do tipo retrofit, com modificações no capilar e com a substituição do compressor. No momento algumas unidades estão em operação na Europa. A Embraco também desenvolveu cassetes de refrigeração (Figura 5), com dióxido de carbono, para aplicação em expositores de bebidas. Embora esse produto seja inovador e utilize um refrigerante natural, o seu TEWI é superior ao obtido com um sistema semelhante com HFC-134a.

Os produtos desenvolvidos para utilização com $CO_2$ são invariavelmente comparados com produtos semelhantes disponíveis no mercado, os quais geralmente não primam pela eficiência. A EPA (Environmental Protection Agency) anunciou recentemente um novo programa Energy Star, que vai se tornar efetivo a partir de janeiro de 2010, com o intuito de tornar os expositores de bebidas e os freezers para sorvetes 33% mais eficientes do que os produtos atuais. No Brasil discussões já estão sendo realizadas a respeito desse mesmo assunto. Com o aumento da eficiência dos produtos disponíveis no mercado ,os sistemas com $CO_2$ vão deixar de ser atraentes, a menos que se promovam alterações substanciais no sistema.



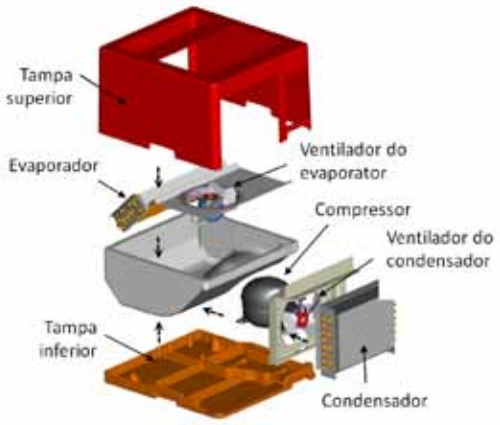



**Figura 5:** Casse de refrigeração com $CO_2$

## 5.3 Novos fluidos

Uma nova família de refrigerantes, os Hidro Fluor Oleofinas, está sendo desenvolvida pelas empresas Dupont e Honeywell (Minor and Spatz, 2007). No momento dois fluidos merecem atenção, o HFO-1234yf e o HFO-1234ze. O primeiro possui um GWP100 igual a 4 e um tempo de residência na atmosfera de apenas 11 dias. O segundo possui um GWP100 igual a 6 e um tempo de residência na atmosfera de 18 dias. O HFO-1234yf possui propriedades termodinâmicas similares ao HFC-134a, é estável e compatível com a maioria dos materiais, embora seja mais caro do que o HFO-1234ze. Esses fluidos são menos inflamáveis do que os HCs, mas continuam sendo inflamáveis. Testes de toxidez, conquanto ainda não completos, são promissores. Testes do tipo drop-in, realizados com um expositor de bebidas com capacidade para 640 latas de refrigerante, indicaram uma queda de desempenho de 4% e de 13%, em relação ao HFC-134a, respectivamente para os refrigerantes HFO-1234yf e HFO-1234ze. Mediante modificações nos trocadores de calor, a queda de desempenho do sistema com HFO-1234ze passou a ser de apenas 3%, quando comparado com a mesma referência (Fleischer, 2009). No momento a aplicação de tais fluidos nos segmentos de refrigeração doméstica e comercial leve é apenas especulativa. A passagem da especulação para a prática, dentre outros fatores, exige o desenvolvimento de compressores específicos para essa família de fluidos.



# 6 Conclusões

Existe uma variedade de fatores que afetam a escolha de um refrigerante para uma dada aplicação. Devem ser considerados aspectos termodinâmicos, químicos, segurança e meio ambiente, além de custo e disponibilidade. Um ponto importante para os fabricantes de sistemas de refrigeração reside nas modificações necessárias nos processos de construção e produção de componentes, todos com impactos no custo final do produto.

Os novos refrigerantes são geralmente menos eficientes do que os anteriores. O ganho de eficiência com os novos fluidos deve-se mais a melhoramentos introduzidos no projeto dos equipamentos do que às propriedades dos novos fluidos. Nenhum dos refrigerantes atuais e dos candidatos a substitutos são ideais e a descoberta de um fluido ideal não é esperada.

Uma quarta geração de refrigerantes é eminente, com novas introduções a partir de 2010. Em adição aos requisitos de segurança e compatibilidade com materiais, os novos fluidos devem atender aos requisitos de GWP100 < 150. Além disso, tais refrigerantes devem ter um tempo de residência

na atmosfera relativamente curto para evitar eventuais novos problemas ambientais. Os novos fluidos devem ainda oferecer alta eficiência para diminuir e não aumentar as emissões de GHGs. No momento as pressões estão colocadas sobre a indústria automobilística, mas é praticamente certo de que no futuro isso se estenderá às demais aplicações. Muitos refrigerantes considerados atualmente como novos refrigerantes, incluindo vários HFCs, logo se tornarão obsoletos (Calm, 2008).

# 7 Referências Bibliográficas


Calm, J, 2008, **The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook, International Journal of Refrigeration**, 7, pp. 1123-1133.

Fleischer, F., 2009, **Advances in environmentally sustainable refrigerants and blowing agents, EEDAL'09 – Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting,** 16-18 June, Berlin.

Gosney W. C, 1982, **Principles of Refrigeration,** Cambridge University Press, Cambridge, UK

**Quioto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**, 1997, United Nations, New York, NY.

Midgley Jr., T., Henne, A. L., 1930, **Organic fluorides as refrigerants, Industrial and Engineering Chemistry**, 22, pp. 542-545.

Minor, B. H., Spatz, M.W., 2007, HFO-1234yf – **A low GWO refrigerant for MAC, 2nd European Workshop on Mobile Air Conditioning and Auxiliaries**, 29-30 November, Torino.

Molina, M. J., Rowland, F. S., 1974, **Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone,** Nature, 249, pp. 810-812.

**Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**, 1987, United Nations, New York, NY.

Palm, B., 2008, **Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems** – A review, International Journal of Refrigeration, 31, pp. 552-563.

Pearson, A., 2005, **Carbon dioxide – New uses for an old refrigerant, International Journal of Refrigeration**, 28, pp. 1140-1148.

# Avaliação das Emissões de HCFC-22 dos Sistemas de Refrigeração Comercial em Supermercados

**EDUARDO LINZMAYER**
Engenheiro de Produção
Escola de Engenharia Mauá - Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia
elinz@terra.com.br



## RESUMO

O artigo tem como principal objetivo apresentar os estudos realizados sobre os vazamentos dos fluidos halogenados em sistemas de refrigeração comercial de supermercados, bem como sua relação e efeitos na camada de ozônio e no clima. Com base na pesquisa realizada, foram identificadas as causas prováveis, conseqüências, efeitos provocados e recomendadas ações corretivas e preventivas. Dentro deste foco de trabalho são apresentados os tipos de sistemas e fluidos refrigerantes mais utilizados no segmento de refrigeração comercial de supermercados; identificados os principais pontos de vazamentos dos fluidos halogenados e quantificada a recarga anual de refrigerantes. Outro aspecto abordado no artigo é a quantificação das perdas decorrentes da diminuição da capacidade de refrigeração, baixa eficiência energética e acréscimo dos custos operacionais e de manutenção envolvidos nos processos.

# 1 Introdução

A necessidade de adoção de medidas voltadas à proteção do meio ambiente é um consenso universal e crescente. Entre as ameaças à estabilidade de nosso planeta, destacam-se duas, a saber: a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global, que motivaram acordos internacionais para controlar e estabilizar estes fenômenos em curso.

Os gases utilizados no dia a dia para a refrigeração e para a climatização, no caso do ar condicionado, são vilões nestes dois fenômenos relacionados ao meio ambiente. Uma boa manutenção dos equipamentos de refrigeração e de climatização é uma atitude que traz reflexos na eficiência energética e no desempenho dos equipamentos e instalações de refrigeração. Com a ocorrência de vazamentos de gases refrigerantes, ocorrem sensíveis aumentos no consumo de energia elétrica, implicando em constantes reposições, que prejudicam a empresa no aspecto técnico, econômico e financeiro.

O Brasil, assim como outros 195 países, é Parte do Protocolo de Montreal, um acordo internacional que visa à eliminação da produção e consumo das substâncias que destroem a Camada de Ozônio. Atualmente, os sistemas de refrigeração do segmento comercial, envolvendo supermercados, hotéis, hospitais, açougues, restaurantes e outros estabelecimentos são os grandes responsáveis pela utilização de substâncias que destroem a Camada de Ozônio (SDOs), os clorofluorcarbonos (CFCs), usados pelo setor comercial, especialmente na década de 1970, e os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), mais conhecidos comercialmente como R22 na refrigeração comercial. Para avaliar estes danos, de acordo com o Manual de Boas Práticas em Supermercados para Sistemas de Refrigeração de Ar Condicionado publicado pelo Ministério do Meio Ambiente juntamente com a ABRAS (Associação Brasileira de Supermercados) e com a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) uma única molécula de CFC pode destruir 1.000 moléculas da Camada de Ozônio. Além disso, a ação do R22 liberado no meio ambiente colabora em até 1.780 vezes mais para o aquecimento global do que gases naturais.

Em função dos riscos e danos que podem causar à Camada de Ozônio, que protege a Terra, estes gases estão aos poucos sendo eliminados. O Protocolo de Montreal eliminou completamente os CFCs, os quais são utilizados atualmente somente em equipamentos mais antigos. Outro passo deste Protocolo é a eliminação dos HCFCs, principais substitutos dos CFCs, que devem ser reduzidos até a eliminação a partir de 2015, com o congelamento em 2013. Em meio a esse contexto, o gás refrigerante mais utilizado pelo segmento comercial, o R22, terá seu nível de consumo congelado no prazo de dois anos e começará a ser eliminado em quatro anos.

Na recente conferência da ONU para o clima, a COP-16, realizada em Cancún, no México, que terminou em 11 de dezembro de 2010, foram firmadas duas decisões relevantes ao tema, a saber: a criação do Fundo Verde e a extensão do Protocolo de Quioto além de 2012, quando expiraria o

tratado. Destaca-se que o Protocolo de Quioto é o único instrumento jurídico internacional que impõe aos países ricos reduções obrigatórias de suas emissões de gases de efeito estufa. Ele impõe, aos 36 países industrializados que o ratificaram, reduções em suas emissões das seis principais substâncias responsáveis pelo aquecimento global, sejam elas, o dióxido de carbono ($CO_2$), o metano ($CH_4$), o óxido nitroso ($N_2O$) e os três gases flúor (HFC, PFC, $SF_6$).

Diante disso, será necessário um planejamento para a troca dos equipamentos, além da utilização de critérios mais rigorosos e precisos para a seleção de alternativas, já que existe no mercado brasileiro mais de uma opção de troca, com vantagens e desvantagens, além do inconveniente dos altos custos envolvidos neste processo.

Para apoiar estas iniciativas de cunho internacional e nacional, a pesquisa que visa à avaliação das emissões de HCFCs em sistemas de refrigeração comercial, com foco nos supermercados, tem grande relevância técnica e científica, colaborando no efetivo conhecimento da atual situação do segmento e comprovando, através de registros documentados e quantificados, todas as não conformidades relacionadas ao tema em estudo.



# 2 Objetivos

O principal objetivo deste artigo é apresentar um estudo dos vazamentos dos fluidos halogenados em sistemas de refrigeração comercial, no segmento de supermercados, bem como sua relação com o efeito estufa e os efeitos na camada de ozônio. Com base na pesquisa realizada em 214 supermercados, durante 40 meses, foram identificadas as causas prováveis, as consequências, os efeitos provocados e recomendadas ações corretivas e preventivas. Esta pesquisa foi realizada, inicialmente, pelo Engenheiro Donato Neves Di Giacomo, no período de 2004 e 2005, e está sendo atualizada em 2010 e 2011 pelo Engenheiro Eduardo Linzmayer, juntamente com um especialista em projetos de refrigeração comercial. Ambos possuem experiência comprovada em projetos de uso, operação, manutenção e melhorias tecnológicas em sistemas de refrigeração instalados em supermercados e hipermercados brasileiros. O objetivo primário do trabalho, apresentado neste artigo, é analisar os tipos de sistemas e fluidos refrigerantes mais utilizados no segmento de refrigeração comercial de supermercados, incluindo a identificação dos principais pontos de vazamentos dos fluidos halogenados, bem como a quantificação da recarga anual destes refrigerantes.

O segundo objetivo é destacar as perdas decorrentes da diminuição da capacidade de refrigeração, a baixa eficiência energética e o acréscimo dos custos operacionais e de manutenção envolvidos neste processo.

O trabalho apresentado neste artigo será desenvolvido de forma acadêmica em dissertação de mestrado pelo autor, de forma alinhada às atuais diretrizes emanadas dos seguintes órgãos envolvidos no tema: Departamento de Mudanças Climáticas da Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente; Coordenadoria da Unidade de Meio Ambiente do Pnud Brasil (Programa das Nações Unidades para o Desenvolvimento); ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento); CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental da Secretaria de Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo); ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); e ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers).

# 3 Caracterização do problema



Em setembro de 2007, as partes do Protocolo de Montreal decidiram, por meio da Decisão XIX/6, antecipar os prazos de eliminação dos hidroclorofluorcarbonos (HCFCs). De acordo com esta Decisão, todos os países comprometem-se a cumprir um novo cronograma de eliminação dos HCFCs. No caso dos países sob amparo do Artigo 5 do Protocolo de Montreal, o que inclui o Brasil, os prazos para eliminação dos HCFCs ficaram assim definidos: congelamento do consumo e produção dos HCFCs em 2013, com base no consumo médio de 2009 a 2010; redução de 10% do consumo em 2015; 35% em 2020; 67,5% em 2025; 97,5% em 2030 e eliminação completa do consumo em 2040 (Ministério do Meio Ambiente MMA: Cronograma de Eliminação dos SDOs para o Brasil).

Em 05 de maio de 2009, o Governo Federal realizou o lançamento da elaboração do Programa Brasileiro de Eliminação de HCFC (PBH), que terá como o objetivo principal eliminar o consumo deste gás no País. Os HCFCs são utilizados principalmente como fluido refrigerante em refrigeradores e equipamentos de ar condicionado, e possuem potencial de destruição da camada de ozônio e de aquecimento global.

O documento contendo a proposta do PBH foi disponibilizado para consulta pública nacional, no período de 29 de novembro de 2010 a 15 de janeiro de 2011, no sítio http://www.mma.gov.br/ozonio, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente (MMA); apoio do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama); e demais Ministérios integrantes do Comitê Interministerial para a Proteção da Camada de Ozônio (PROZON). A implementação do PBH, após aprovação junto ao Fundo Multilateral para Implementação do Protocolo de Montreal, caberá ao Pnud, como agência líder a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ).

Assim, com a adoção  do cronograma citado contendo as novas metas de eliminação da produção e do consumo dos HCFCs, o Governo Brasileiro vem incentivando a adoção de fluidos refrigerantes que não destroem a Camada de Ozônio e que tenham pouco efeito sobre o aquecimento do planeta, tais como, a amônia, os hidrocarbonos e o gás carbônico; estimulando, também, as boas práticas de instalação e manutenção e, caso necessário, a troca e ou renovação tecnológica (retrofits) dos equipamentos que ainda funcionam à base de CFCs e HCFCs.

O segmento do comércio varejista no Brasil, em 2008, corresponde a 80% das empresas comerciais existentes, com 39,6% de receita total do comércio – equivalente a R$ 576,8 bilhões (IBGE, 2007).

Segundo a ABRAS (Associação Brasileira de Supermercados), o segmento alimentício dentro do varejo representou, em 2006, o total de 5,3% do PIB (Produto Interno Bruto) e registrou R$ 124,1 bilhões de receitas brutas. Em 2010, as vendas acumularam 6,73% em relação a fevereiro de 2009.

A falta de indicadores de desempenho dos sistemas de refrigeração comercial demonstra que os gestores não têm conhecimento de sua lucratividade, o que implica em desperdícios, falta de organização, ausência de padronização de suas instalações técnicas, altos custos de energia elétrica, além dos malefícios ambientais causados. Com esse cenário, fica evidente a oportunidade de aperfeiçoar o segmento produtivo do mercado varejista, atuando através de uma pesquisa que registre os vazamentos e as perdas de seus sistemas de refrigeração, destacando-se a emissão de HCFC-22, foco deste estudo.

O principal problema a ser investigado é o excesso de vazamentos de fluidos refrigerantes halogenados dos sistemas de refrigeração comercial, com destaque para os supermercados, provocando sérios danos ambientais e perdas produtivas representadas pela baixa eficiência energética, com gastos excessivos de energia elétrica e os altos custos operacionais e de manutenção dos equipamentos e instalações.

Os resultados desta pesquisa, atualizada com os dados de 2010 e 2011, contribuirá para o estudo dos impactos ocasionados pelos vazamentos de fluidos refrigerantes em instalações de refrigeração comerciais de supermercados, considerando os aspectos ambientais, energéticos e de custos; incluindo a análise de alternativas para a eliminação ou diminuição desses impactos. O trabalho proporá soluções para diminuir os custos com manutenção e reparo, com base na descrição das observações da pesquisa de campo nos estabelecimentos comerciais. Será estabelecida uma base de dados que permitirá registrar e quantificar, utilizando a pesquisa de campo efetuada em estabelecimentos comerciais, todas as perdas diretas e indiretas, econômicas e ambientais, bem como a formulação de uma proposição das medidas mitigadoras e viáveis para sua implementação.

Outra contribuição deste trabalho é a apresentação da economia que pode ser feita na utilização de equipamentos mais modernos no curto, médio e longo prazo, criando-se diretrizes técnicas a serem recomendadas para as empresas do comércio varejista. Estes equipamentos novos terão como referência máquinas que apresentem um valor zero (0) de Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (PDO) e baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP).

Segundo DOSSAT (2004), os vazamentos em um sistema de refrigeração podem ser tanto internos como externos, conforme a pressão do sistema no ponto de vazamento seja superior ou inferior à pressão atmosférica. Quando a pressão no sistema é superior à pressão atmosférica no ponto de vazamento, o refrigerante vazará do sistema para fora. Caso contrário, quando a pressão do sistema é inferior à atmosférica, não há vazamento de refrigerante para fora, mas o ar e a umidade são arrastados para dentro do sistema. Em quaisquer destas situações, o sistema tornar-se-á inoperativo em curto espaço de tempo. Como regra geral, os vazamentos externos são menos sérios que os internos, requerendo em geral, somente que a falha seja encontrada e reparada e que o sistema seja recarregado com a quantidade apropriada do fluido refrigerante. No caso de vazamentos internos, o ar e a umidade arrastados para o interior do sistema aumentam a pressão e temperatura de descarga e aceleram a taxa de corrosão. A presença de umidade pode causar congelamento no controle de refrigerante. Além disso, depois do vazamento ter sido localizado e restaurado, o sistema deve ser completamente esvaziado e desidratado, antes de ser colocado novamente em operação. Torna-se necessária a instalação de um secador de refrigerante no circuito do sistema.

A necessidade de manter o sistema de refrigeração isento de vazamentos requer alguns meios convenientes para experimentar um novo sistema quanto a vazamentos. Para novos sistemas recomenda-se submetê-los aos testes de vácuo e de pressão durante seu comissionamento.



# 4 Análise dos Resultados da Pesquisa

## 4.1 Resumo da Análise e Resultados

No período de 2004 e 2005, foram pesquisados 214 supermercados, com levantamentos efetuados em todas as lojas, incluindo registros fotográficos dos sistemas de refrigeração pesquisados e suas não conformidades relacionadas aos vazamentos e às causas das emissões de fluidos

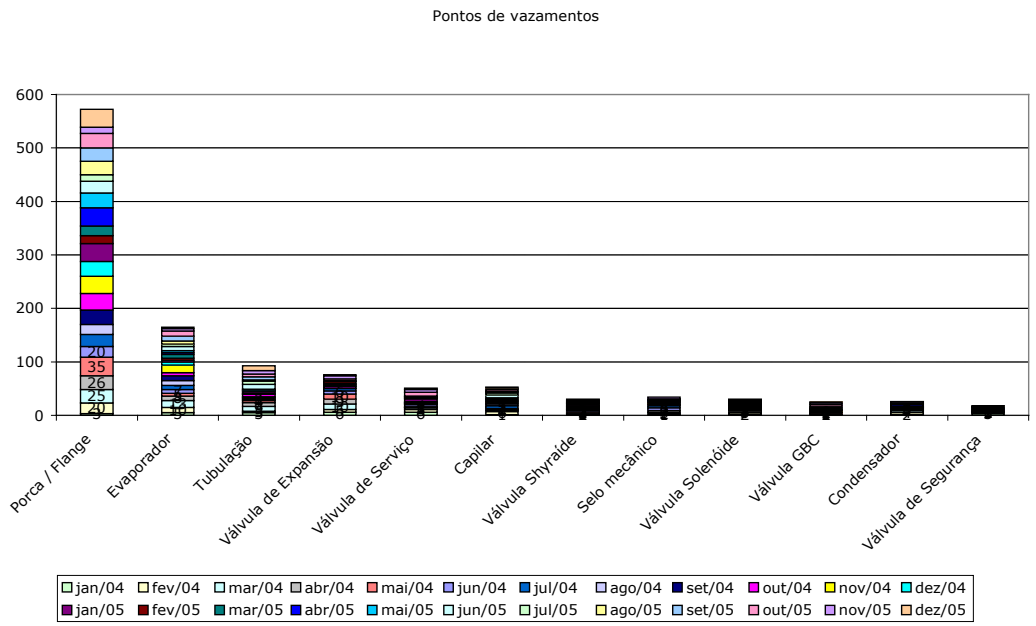
halogenados. Foram avaliados os tipos de sistemas frigoríficos existentes e predominantes, e suas respectivas cargas térmicas, encontrando-se basicamente três tipos de configuração, a saber:

- Sistemas com compressores abertos, em lojas com mais de dez anos;
- Sistemas com várias unidades condensadoras, com compressores semi-herméticos, em lojas de pequeno porte;
- Sistemas de refrigeração montados em "racks", com compressores semi-herméticos, dispostos em paralelo, em lojas com menos de sete anos.

De acordo com estes levantamentos, efetuados nos supermercados pesquisados, as 22 piores unidades pesquisadas, que representaram 10% do total, apresentaram recarga anual média de 137% dos fluidos refrigerantes halogenados. As 22 melhores unidades pesquisadas apresentaram recarga anual média de 4% de refrigerantes. Excluindo-se as piores e melhores unidades pesquisadas, a recarga anual média de fluidos refrigerantes halogenados ficou em torno de 39%.

É conveniente destacar que, de acordo com o capítulo 11 do "Relatório do Comitê de Opções Técnicas em refrigeração e ar condicionado" do Pnud, os países desenvolvidos possuem uma recarga anual média, para instalações de refrigeração e ar condicionado com mais de 10 anos, de 15% e, para instalações com menos de dez anos, uma média na faixa de 3% a 5%, demonstrando queda em relação aos dados anteriores.

O histograma a seguir apresenta a tabulação dos dados obtidos na pesquisa realizada, no período de 2004 a 2005, identificando os pontos de vazamentos de fluidos refrigerantes halogenados.



Como resultados conclusivos desta pesquisa, pode-se afirmar que os piores resultados foram constatados em sistemas de refrigeração com compressores abertos, encontrados em instalações antigas, acima de dez anos de vida. Registrou-se, também, que a maior parte dos vazamentos de fluidos refrigerantes foi causada por problemas nos selos mecânicos dos compressores, provocados pela falta de alinhamento entre polias e as folgas incidentes correias. Os melhores resultados da pesquisa foram obtidos com os sistemas de refrigeração instalados em "racks" com compressores semi-herméticos dispostos em paralelo.

Concluiu-se, nesta pesquisa, que os maiores pontos de vazamentos de fluidos refrigerantes encontram-se nas porcas, flanges e evaporadores, porém, em termos absolutos, não representam as maiores cargas de perdas dos fluidos refrigerantes, pois se encontram instalados nas linhas de baixa pressão. Exceção ocorre em sistemas de pequeno porte em unidades condensadoras, nas quais qualquer vazamento compromete toda a carga de fluido refrigerante do sistema. As maiores recargas de fluidos refrigerantes ocorrem com a incidência de vazamentos no condensador, por estarem alocados na linha de alta pressão e provocarem a transformação do fluido do estado de vapor para o estado líquido.



Nestes 214 supermercados envolvidos nos levantamentos, constatou-se que, nos últimos três anos, foram gastas 202 toneladas de fluidos refrigerantes halogenados, equivalentes a R$ 1.500.000,00. Do total de 214 supermercados, 45 estabelecimentos (21%) representaram 50% destes gastos com reposição de fluidos refrigerantes. Com base nesta constatação, estimou-se que o investimento necessário para regularização técnica destas 45 lojas de supermercados, que representam 50% dos gastos totais, envolve o montante financeiro de R$ 24.000.000,00; representando um retorno deste investimento "payback" de 90 meses, dificultando a aprovação dos investidores e proprietários destes estabelecimentos comerciais.

Isto posto, a alternativa proposta que torna-se viável do ponto de vista técnico e financeiro é a adoção de medidas para imediata redução e ou eliminação dos vazamentos de fluidos refrigerantes halogenados, nos supermercados, criando-se uma "poupança" ou "leasing" aplicados aos sistemas de refrigeração e ar condicionado estruturados com base nas economias proporcionadas pela eliminação e redução destes vazamentos. Além disso, os responsáveis técnicos e financeiros pelos sistemas de refrigeração e de ar condicionado deverão implementar ações efetivas com base nas Boas Práticas de Refrigeração e de Manutenção Preventiva de seus equipamentos e instalações técnicas.

## 4.2 Pontos de atenção identificados

Na realização da pesquisa, foram identificados e registrados diversos aspectos que provocam os vazamentos e emissões indevidas dos fluidos refrigerantes. Apresentam-se, a seguir, os principais pontos de atenção registrados nos levantamentos e pesquisas de campos realizados.

### 4.2.1 Elementos de Fixação das Instalações

Normalmente, utilizam-se porcas metálicas para a fixação dos acessórios de segurança e seus controles. Estes pontos de fixação geram vazamentos e o operador ou responsável pela manutenção, com o objetivo de sanar o problema, aplica maior torque para aperto da conexão. Como o material é feito de cobre, tem fragilidade e flexibilidade, e a força aplicada neste aperto provoca rachaduras na porca e nos elementos de fixação, provocando vazamento do fluido refrigerante. A solução para este problema seria a utilização de torquímetro e maior controle no aperto e fixação das instalações frigoríficas.



### 4.2.2 Utilização de Flanges nas Instalações

Os flanges são elementos necessários para unificar os acessórios de segurança e, normalmente, estão dispostos nas linhas de refrigeração através de conexões com roscas. O vazamento do fluido refrigerante ocorre por má confecção do flange ou pela utilização de tubulações com espessura de parede muito finas, fator que compromete sua resistência.

### 4.2.3 Aplicação das Válvulas Tipo “Schrader”

Estas válvulas, do tipo “Schrader”, são utilizadas nas linhas de alta e de baixa pressão, com a finalidade da medição da pressão do sistema de refrigeração e das perdas de carga na linha. Os vazamentos de fluidos refrigerantes acontecem devido ao desgaste do elemento de vedação de borracha disposto na parte interna da válvula. A solução para evitar este tipo de vazamento é a instalação de um tampão em todas as válvulas, além de uma inspeção preventiva periódica do estado físico e operação das válvulas.

### 4.2.4 Curvas nas Tubulações do Evaporador

Devido à ação da umidade no sistema, ocorre seu congelamento dentro do evaporador, transformando-a em uma pedra de gelo. Com a ação da força da sucção do compressor, essa pedra comporta-se como se ocorresse um alto impacto, tal como um "tiro" de revólver, na curva da tubulação do evaporador. Este fenômeno provoca a perfuração da tubulação, ocasionando o vazamento do fluido refrigerante. Uma forma de conter esta não conformidade é a realização do correto vácuo no sistema, antes de sua partida, eliminando qualquer ação da umidade ou outras contaminações internas.

### 4.2.5 Fixações Incorretas das Linhas de Refrigeração

A fixação das linhas do sistema de refrigeração é um ponto de atenção muito importante. Com o tempo de uso e operação, e a ocorrência de vibração das máquinas e equipamentos, as tubulações entram em contato, provocando atrito com o suporte, com cortes e fissuras nas tubulações. A solução para este problema é fixar a tubulação no suporte, instalando uma proteção mecânica flexível em volta desta tubulação, eliminando a superfície de contato e a ocorrência das fissuras e dos cortes que provocam vazamentos.



### 4.2.6 Pontos de Soldas das Tubulações

Os pontos de soldas das tubulações, normalmente geram micro vazamentos devido a incorreções no processo de soldagem, com aplicação de baixa caloria metálica em que os materiais envolvidos no processo não se fundem. O excesso de caloria da soldagem também é motivo de incidência de micro vazamentos na superfície metálica, tornando a tubulação mais frágil, com sensível redução de sua resistência mecânica.

### 4.2.7 Vazamentos nos Flexíveis

Os vazamentos de fluidos refrigerantes nos flexíveis, normalmente, ocorrem devido ao tempo de utilização (desgaste de vida útil), ou em função da alta temperatura de descarga. Para evitar esta não conformidade, é recomendada a adoção de uma troca preventiva dos flexíveis, após 12 a 18 meses de utilização e o monitoramento contínuo da temperatura de descarga.

### 4.2.8 Vazamentos na Região dos Capilares dos Pressostatos

Os capilares dos pressostatos são constituídos por materiais frágeis que exigem proteções e cuidados especiais. A solução proposta é a substituição dos capilares convencionais fabricados em tubos de cobre por mangueiras flexíveis.

### 4.2.9 Instalação do Tanque de Líquido

A correta instalação do tanque de líquido é fundamental para evitar-se a perda de fluidos refrigerantes da instalação, principalmente quando ocorrerem os serviços de manutenção corretiva ou preventiva do sistema.

### 4.2.10 Instalações das Válvulas de Segurança ou de Alívio

As instalações das válvulas de segurança ou de alívio promovem a expurga do fluido refrigerante visando à diminuição da pressão para evitar acidentes e explosões. A devida e constante manutenção destas válvulas de segurança garante seu correto funcionamento e acionamento somente em casos de real necessidade.



### 4.2.11 Incidência de Vibrações nas Instalações

A principal fonte de vibração das instalações vem dos compressores, sua incidência provoca solturas e danos nos elementos de fixação e proteção, incorrendo em fontes de vazamentos de fluidos refrigerantes. É fundamental a instalação de um vibra-choque ou "vibrasptop" adequado nas instalações de flexíveis, principalmente nos pontos de descarga e sucção.

### 4.2.12 Operações de Degelo do Sistema

Podem ser aplicadas duas formas de degelo do sistema de refrigeração, sendo elas o degelo elétrico e o degelo através de gás quente. No caso do degelo elétrico, ocorre uma não conformidade com a queima das resistências elétricas, provocando a formação de blocos de gelo entre as aletas do evaporador. Com essa expansão, ocorre uma movimentação dos tubos aletados, provocando cortes e fissuras nas tubulações das linhas, ou no caso de uma das resistências entrar em curto circuito ocorrendo a perfuração da tubulação.

No degelo com gás quente, normalmente, as instalações não utilizam uma linha especial nos evaporadores e sua tubulação convencional não tem a resistência mecânica suficiente para resistir às diferenças bruscas de temperatura, provocando fissuras e vazamentos de fluidos refrigerantes.

### 4.2.13 Não Conformidades nas Válvulas Solenóides

Outro componente sujeito a falhas e causador de vazamentos de fluidos refrigerantes são as válvulas solenóides do sistema de refrigeração. As duas principais não conformidades que ocorrem na válvula solenóide são o curto-circuito da bobina da válvula e o desgaste da junta do corpo da válvula. Ambas originam vazamentos de fluidos refrigerantes.

### 4.2.14 Condensadores Evaporativos e Tipo “Shell & Tube”



Estes equipamentos são pressurizados na fábrica e os vazamentos de fluidos refrigerantes ocorrem com o tempo, a partir de cinco anos de uso. Inicialmente, a causa é a falta de uma manutenção preventiva, sendo necessário um tratamento de choque nestes elementos, pois o sistema que está com alta pressão provoca sua fadiga, normalmente após dez anos de operação.

### 4.2.15 Vazamentos na Válvula de Serviço

Normalmente, o mecânico de refrigeração, ao executar um serviço corretivo ou preventivo no sistema de refrigeração, solta a gaxeta do corpo da válvula. Esta operação facilita a abertura e fechamento da válvula, porém causa uma fonte de vazamento de fluido refrigerante.

### 4.2.16 Vazamentos no Separador de Óleo

A incidência de vazamento neste elemento do sistema de refrigeração ocorre sempre pela junta do separador de óleo, provocada pela alta pressão e temperatura do circuito.

### 4.2.17 Vazamentos nos Selos Mecânicos

Trata-se de um dos pontos de atenção do sistema de refrigeração com maior incidência de vazamentos de fluidos refrigerantes. São sempre originados pela falta de alinhamento das correias, acúmulo de limalhas de cobre sobre o selo mecânico e falta de equalização e estabilidade das pressões de alta e baixa do circuito de refrigeração.

### 4.2.18 Vazamentos na Região do Filtro Secador

Os vazamentos incidentes na região do filtro secador, normalmente, são provenientes da oxidação de sua carcaça metálica, a qual é muito mais acentuada quando estão instalados na parte interna do expositor frigorífico. É conveniente uma constante inspeção e manutenção preventiva da área do filtro secador.

# 5 Conclusões e ações propostas



A principal conclusão obtida com esta pesquisa é a de que um sistema de refrigeração de supermercado efetuada com instalações e equipamentos inadequados, com ausência de um planejamento e projeto físico considerando sua carga térmica e seus efeitos ambientais, gera altas despesas para os proprietários e contratantes. Estas despesas assumidas pelos contratantes, e que são transferidas pelo instalador, são dos seguintes tipos: necessidade de maiores gastos com mão de obra interna e externa para assistência técnica e manutenções corretivas; aumento das despesas com materiais e peças de reposição; aumento crescente das despesas com reposição de fluidos refrigerantes; despesas com quebras e reparos dos compressores dos sistemas de refrigeração; constantes desequilíbrios do sistema de refrigeração com oscilação e alta pressão de trabalho, perda de carga térmica na linha e arraste de óleo; e, por fim, os altos custos com energia elétrica decorrentes dos problemas e não conformidades descritas.

Outro sério problema em relação ao perfil dos proprietários e donos de supermercados é a sua postura em relação à manutenção preventiva e às boas práticas de refrigeração. Dificilmente, encontram-se empreendimentos com um sistema organizado de manutenção preventiva e adoção padronizada das boas práticas nas lojas. Na pesquisa pôde-se constatar, em termos estimativos, que o custo direto de manutenção corretiva, considerando materiais, peças, gases refrigerantes e mão de obra especializada representa o incremento de 80% sobre o custo direto de manutenção preventiva, ou seja:

**Custo Direto de Manutenção Corretiva = 1,8 Custo Direto de Manutenção Preventiva**

Esta constatação empírica não considera, na fórmula, os demais custos indiretos incorridos no sistema de refrigeração, a saber, o custo com o incremento de energia elétrica; o custo incorrido com a perda de eficiência do sistema; os custos com as perdas de alimentos e produtos refrigerados; e os custos advindos de multas e autuações decorrentes do descumprimento de normas e da legislação em vigor.

# 6 Referências


ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13971: **Sistemas de Refrigeração, Condicionamento de Ar, Ventilação – Manutenção Programada**, 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Comissão Brasileira CB-55: Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento.**

ASHRAE HANDBOOK: **Fundamentals, HVAC Systems and Equipement Refrigeration**, HVAC Applications.

Dossat, Roy J. **Princípios de Refrigeração.** Hemus Livraria, Distribuidora e Editora, São Paulo, 2004.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Anual de Comércio 2008** Volume 20. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/comercioeservico/pac/2008/pac2008.pdf>. Acesso em: 14. Dez. 2010.

Miller Rex, Miller Mark. R.. **Refrigeração e Ar Condicionado.** LTC Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A. Rio de Janeiro, 2008

Panesi, A.R.Q. **Eficiência Energética em Supermercados.** São Paulo, 2008.

# Tendências do Uso de Fluidos Refrigerantes Alternativos em Sistemas de Ar Condicionado Automotivo

**DR. ENIO PEDONE BANDARRA FILHO.**
Engenheiro Mecânico
Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – MG



## RESUMO

O presente artigo apresenta uma revisão geral sobre o estado da arte de fluidos refrigerantes alternativos utilizados como fluido refrigerante em sistemas de ar condicionado automotivo. Um levantamento bibliográfico abrangente permitiu verificar as principais tendências de utilização de fluidos como o HFC-152a, HFO-1234yf e o $CO_2$, todos com potencial de aquecimento global (GWP) inferior a 150, em substituição ao fluido refrigerante HFC-134a. Entretanto, os dois primeiros são inflamáveis, ao passo que o último não é inflamável, porém suas pressões de operação são elevadíssimas. Resultados em veículos de desempenho do sistema, considerados de potência média e elevada são apresentados, evidenciando comparações entre sistemas instalados em veículos utilizando HFC-134a, HFO-1234yf e $CO_2$, além de mostrar uma redução no consumo de combustível quando o sistema de ar condicionado operava com $CO_2$. Os resultados mais interessantes demonstraram que, com a utilização do $CO_2$ como fluido refrigerante, o tempo de resfriamento da cabine do veículo foi reduzido significativamente. Os resultados mais recentes foram realizados em automóvel de pequena potência, denominados de carros populares tipo 1.0 e também aqueles de motor de 1.4. Tais resultados foram bastante encorajadores, demonstrando que o veículo que continha o sistema com $CO_2$ também apresentou o tempo de resfriamento da cabine reduzido, o consumo de combustível foi menor e o Coeficiente de Eficácia, COP, também mostrou-se superior àquele com o sistema utilizando o refrigerante R134a. Em relação ao HFO-1234yf, seu desempenho térmico foi inferior ao R134a para a faixa de velocidades ensaiadas, apresentando como vantagem o aproveitamento dos componentes existentes no circuito com R134a.

**Palavras-chave:** Automotivo, $CO_2$, Ar condicionado, Dióxido de Carbono, HFO-1234yf, R52a.

# 1 Introdução

Devido às novas normas impostas pela União Europeia que, a partir de 2011, não permitirá que nenhum veículo automotor deixe a fábrica com sistema de ar condicionado contendo fluido refrigerante com Potencial de Aquecimento Global (GWP – Global Warming Potential) superior a 150, a indústria e academia realizaram uma corrida contra o tempo para o desenvolvimento e avaliação de novos compostos químicos e também da utilização de fluidos refrigerantes naturais.

Historicamente, no setor automotivo, os refrigerantes CFC-12 e o HCFC-22 eram os fluidos de trabalho nos sistemas de ar condicionado veicular até o início dos anos 90 quando, a partir das imposições do Protocolo de Montreal de proibição dos fluidos que continham cloro em sua compo-sição, o fluido refrigerante HFC-134a dominou praticamente a totalidade dos sistemas de ar condicionado automotivo. Entretanto, devido ao elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP) do R134a, de 1430 em 20 anos e 3830 em 100 anos, a União Europeia, a partir de 2011, decidiu proibir a introdução de sistemas de ar condicionado automotivo que contenham fluido refrigerante com GWP superior a 150 em novos modelos de automóveis e, em 2017, essa normativa será estendida aos demais veículos.



Assim, a indústria automotiva está trabalhando, basicamente, com três hipóteses: (1) a utilização do fluido R152a com sistema secundário, que possui um GWP de 124; (2) um novo fluido desenvolvido pelas indústrias químicas, denominado de HFO-1234yf, que possui um GWP de 4; (3) o $CO_2$ (R744), que é a referência com GWP de 1. Cada um dos fluidos citados tem suas particularidades que estão sendo levadas em consideração para a decisão final de utilização por parte da indústria automotiva, porém, até o presente momento, ainda não há uma definição clara por parte dos fabricantes.

A seguir far-se-á uma breve introdução aos fluidos mencionados anteriormente.

- **HFC-152a**

A utilização do HFC-152a, como fluido refrigerante em sistemas de ar condicionado automotivo, pode ser considerado uma medida paliativa, uma vez que esse fluido já existe comercialmente. Todavia, para seu uso, é necessária a composição de um ciclo combinado com o refrigerante R152a no circuito de baixa pressão e água no circuito de alta. Alguns autores demonstraram o desempenho superior do R152a em comparação ao R-134a.

Kim et al. (2008) realizaram um estudo experimental, comparando o R134a e R152a em sistemas de simples estágio. Os resultados demonstraram que o R152a apresentou melhor desempenho que o R134a, para uma mesma velocidade de rotação do compressor, o COP foi superior de 30 a 42% e a capacidade de refrigeração obtida para o R152a apresentou valores de 20 a 41% maiores que aqueles obtidos para o R134a.

Ghoudbane e Fernqvist (2003) estudaram experimentalmente o R152a, operando num ciclo combinado de um sistema de ar- condicionado instalado num veículo utilitário, com o fluido refrigerante no circuito de baixa e água no circuito de alta temperatura. Utilizaram, para efeito de comparação, um sistema com 1,3 kg de R134a e 0,59 kg de R152a. Os resultados mostraram que o sistema operando com o R152a apresentou, praticamente, o mesmo desempenho obtido com o sistema operando com R134a. Em termos de energia, o primeiro sistema consumiu cerca de 10% a mais, sendo que a desvantagem levantada se refere ao maior peso do sistema com R152a.

Resumidamente, o fluido refrigerante HFC-152a está sendo considerado como um possível substituto ao R134a, porém sua maior restrição está relacionada à inflamabilidade, uma vez que esse refrigerante é altamente inflamável. Um exemplo da aplicação desse fluido em sistema secundário é apresentado na Fig. 1, contemplando um sistema completo com resfriamento independente na parte dianteira e traseira.



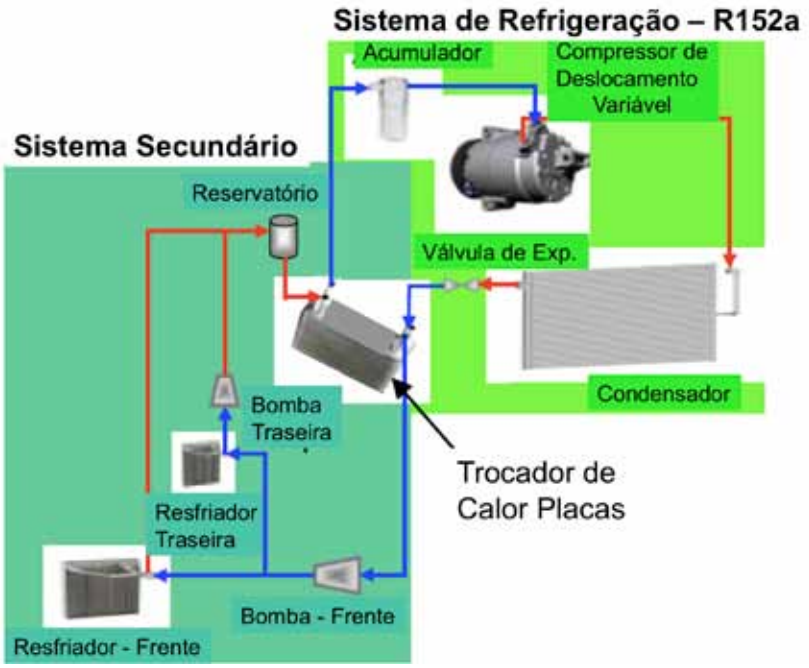



**Figura 1:** Representação esquemática de um circuito utilizando o R-152a como num circuito secundário.

- **HFO-1234yf**

Uma das grandes apostas da indústria química foi o desenvolvimento de um novo composto químico, denominado de tetrafluorpropeno, ou simplesmente HFO-1234yf, como é conhecido comercialmente. Esse composto químico é um HFC, contudo, por questões de estratégia de mercado, o nome foi alterado para HFO, com a justificativa de que, com a possível retirada do mercado dos HFCs com elevado potencial de aquecimento global, o HFO estaria preservado. Esse fluido possui um Potencial de Aquecimento Global (100 anos) de 4 e apresenta como característica favorável o curto tempo de vida na atmosfera, de cerca de 11 dias, quando comparado ao R-152a (1,5 anos) e o R134a (14,6 anos). Todavia, esse novo composto é considerado inflamável e essa característica desfavorável pode comprometer sua aceitação por parte dos fabricantes de veículos. Além disso, o mesmo fluido HFO-1234yf, em contato com a água, forma um ácido altamente tóxico (hidrofluorídrico) e, em baixas concentrações, esse ácido é extremamente tóxico. Como curiosidade, um quilograma desse novo composto pode gerar 700 gramas de ácido hidrofluorídrico.



Grande parte dos fabricantes de automóveis estão aguardando a confirmação do fluido HFO-1234yf como substituto do R134a, uma vez que, basicamente, os mesmos componentes do sistema de ar condicionado poderão ser utilizados, evitando alterações no projeto do automóvel para acomodação do circuito de ar condicionado. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, os problemas de inflamabilidade desse fluido podem comprometer sua introdução. A Fig. 2 apresenta os limites de inflamabilidade de diversos fluidos e, como pode ser observado, o HFC-152a necessita de 3,9% em volume para o início da chama, ao passo que o HFO-1234yf apresenta valor superior ao HFC-152a, de 6,5% em volume.

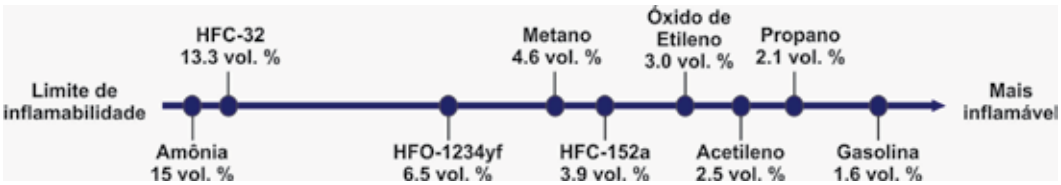



**Figura 2:** Detalhe dos limites de flamabilidade de diversos fluidos. Minor (2008).

A Tabela 1 ilustra os valores de diversas propriedades dos fluidos refrigerantes HFC134a e HFO-1234yf. Como pode ser constatado, segundo o fabricante, as propriedades do HFO-1234yf são bastante próximas daquelas obtidas para o R134a, apresentando, ainda, um valor de GWP bastante reduzido, de 4, comparado ao R134a, que possui o valor de 1430, para um horizonte de 100 anos.

A Figura 3 mostra uma comparação das pressões de saturação do R134a e HFO-1234yf, para faixa de temperaturas variando de -30 a 90 °C, Koban (2009).

**Tabela 1.** Valores de algumas propriedades dos fluidos HFO-1234yf e HFC-134a.

| Propriedade | HFC-134a | HFO-1234yf |
|---|---|---|
| Temperatura de Ebulição | -26 °C | -29 °C |
| Temperatura do Ponto Crítico | 102 °C | 95 °C |
| Pressão de Saturação (25 °C) | 665 kPa | 677 kPa |
| Pressão de Saturação (80 °C) | 2630 kPa | 2440 kPa |
| Potencial de Aquecimento Global (100 anos) – GWP | 1430 | 4 |
| Potencial de Destruição do Ozônio – ODP | 0 | 0 |
| Tempo de vida na Atmosfera | 14,5 anos | 11 dias |

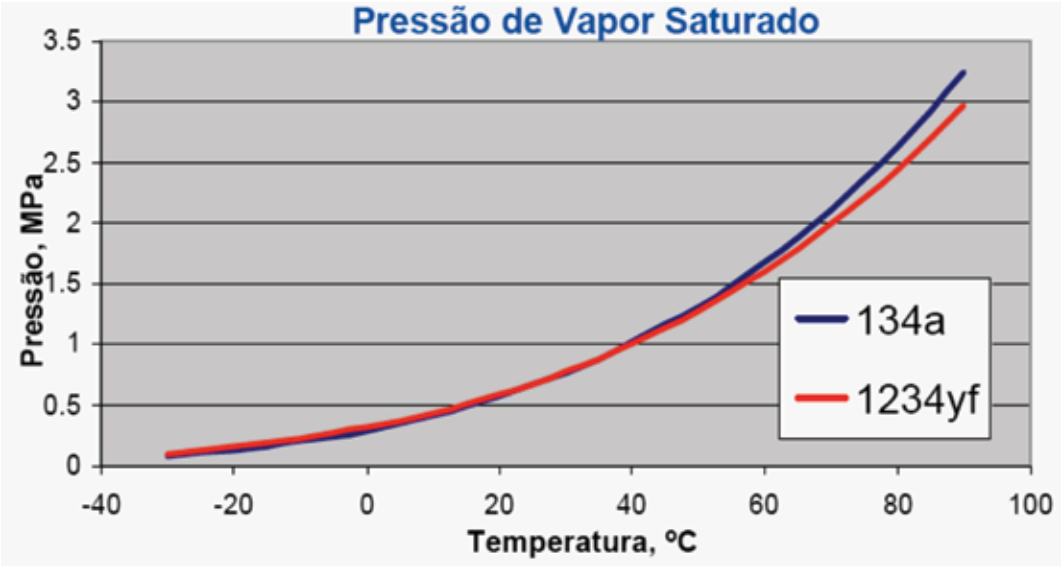



**Figura 3:** Comparação entre as pressões de saturação do R134a e HFO-1234yf, para faixa de tem-peraturas variando de -30 a 90 °C. Koban (2009).

- **$CO_2$ – R744**

O uso do R744 em sistemas de refrigeração foi inicialmente proposto como um fluido refrigerante por Alexander Twining em 1850, reportado no trabalho de Bodinus (1999). Bodinus (1999) relatou, ainda, em seu trabalho que o pesquisador Thaddeus Lowe realizou experiências com o $CO_2$ em balões militares em 1860, reconhecendo a possibilidade de utilizá-lo como refrigerante e também projetando uma máquina de gelo usando o $CO_2$ em 1867. O mesmo autor desenvolveu, ainda, uma máquina para transportar carne congelada em navios. Apenas, a título de curiosidade, a Fig. 4 ilustra um anúncio de uma empresa no início do século XX, que comercializava máquinas para a produção de gelo, utilizando o R744 como fluido de trabalho, destacando que o sistema era bastante seguro, conforme observado no anúncio publicitário. Uma rápida análise da literatura mostrou que sistemas de refrigeração, que utilizam o $CO_2$ como fluido refrigerante, foram desenvolvidos durante os anos seguintes e atingiram um pico entre os anos de 1920 e 1930. O $CO_2$ foi muito utilizado em navios enquanto outro refrigerante natural, amônia ($NH_3$), era mais comum em sistemas frigoríficos usados em terra.

**Figura 4:** Anúncio publicitário de uma empresa que comercializava máquinas de fabricar gelo, utilizando o R744 como fluido de trabalho no início do século XX.

Com o surgimento dos refrigerantes halogenados, denominados comercialmente de "FREON", principalmente o CFC-12, as aplicações com o $CO_2$ foram sendo suprimidas, uma vez que esse

fluido apresentava, como característica principal, excelente estabilidade química. 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, impulsionadas pelas pesquisas do Prof. Gustav Lorentzen, ressurgiram as discussões sobre as vantagens de se utilizar o $CO_2$, em virtude de suas características favoráveis de PDO (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 da redução do inventário de refrigerante $NH_3$ (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 para o efeito estufa.

Atualmente, existem duas linhas de pesquisas bem definidas sobre aplicações com o $CO_2$. A primeira delas se concentra nos denominados ciclos transcríticos, de único estágio, principalmente associados ao ar-condicionado automotivo e algumas aplicações na refrigeração comercial de pequeno porte, além de algumas instalações em supermercados, principalmente na Europa. 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. Vale destacar, outrossim, que as principais pesquisas sobre o dióxido de carbono se concentram no norte da Europa, Estados Unidos da América, Austrália e alguns países da Ásia. Infelizmente, no Brasil, ainda são incipientes e muito reduzidas as pesquisas voltadas ao $CO_2$, utilizado como fluido refrigerante.

## 1.1 Ciclo Transcrítico

O ciclo transcrítico é caracterizado pelo fato de existir um processo durante o ciclo, quando as condições de pressão e temperatura superam o ponto crítico, caracterizado termodinamicamente como o ponto em que não há distinção entre as fases líquida e vapor de uma substância. Para o caso do $CO_2$, como pode ser observado na Fig. 5, 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 R134a, os processos ocorrem abaixo do ponto crítico, lado direito da figura. Nesse caso, a maior diferença entre os ciclos com $CO_2$ e o R134a 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 transcrítico, o vapor altamente superaquecido é resfriado, sem mudança de fase, conhecido como resfriamento de gás ou Gas Cooler, termo comumente encontrado na literatura internacional.

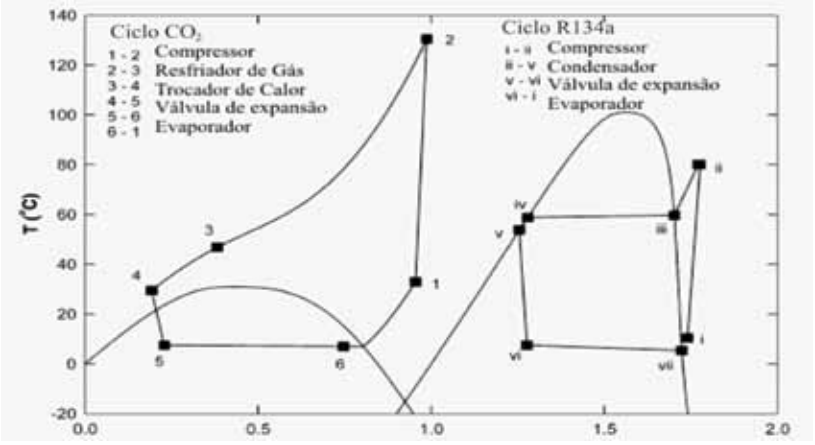



**Figura 5:** Diagrama Temperatura – Entropia para o ciclo transcrítico com o $CO_2$ e o ciclo com R134a.

A Fig. 6 ilustra o conceito utilizado para sistemas de ar condicionado que, atualmente, usam o $CO_2$ como fluido refrigerante. A função do compressor, evaporador e válvula de expansão é a mesma do circuito tradicional utilizado com fluido halogenado, na maioria dos casos, o R134a. As elevadas temperaturas e pressões do fluido são diminuídas no denominado resfriador de gás. Praticamente, é um processo similar ao que ocorre no condensador, no entanto no Gas Cooler (resfriador de gás), a temperatura do $CO_2$ é mais elevada que a temperatura crítica dele, 31,1 °C. O dióxido de carbono permanece sempre no estado de vapor e vale lembrar que não ocorre a mudança da fase vapor para líquida. É interessante ressaltar que esse ponto é o que mais difere do ciclo operando com $CO_2$ em comparação ao sistema tradicional com R134a, por exemplo. Outra característica interessante do sistema operando com o $CO_2$ é a utilização de um trocador de calor intermediário,

instalado antes da válvula, que tem por objetivo resfriar o $CO_2$ para elevar a eficiência do sistema. Em alguns casos, a eficiência foi aumentada em cerca de 30% com a utilização desse sistema. O acumulador se encontra no interior do conjunto denominado Acumulador e Trocador de Calor Interno, na saída do evaporador. Com tais alterações no sistema com $CO_2$, o coeficiente de eficácia, COP, do sistema foi, significativamente, melhorado.

A Figura 7 ilustra de forma esquemática, o circuito de ar-condicionado automotivo com $CO_2$, instalado num veículo. Conforme é possível notar, o sistema completo é menor que o sistema instalado com R134a comumente encontrado no mercado. Mesmo utilizando tubulações com paredes mais espessas, por causa das elevadas pressões, intrínsecas ao sistema com $CO_2$, o sistema completo otimizado é mais leve que o utilizado pelo R134a, aproximadamente, de 2 a 4 kg. É importante ressaltar que os componentes do sistema de ar condicionado automotivo que utilizam o $CO_2$ têm passado por uma fase de desenvolvimento intensa e isso tem colaborado para a melhoria do desempenho do sistema como um todo. Vale lembrar, ainda, que esse fluido refrigerante requer tubulações com diâmetros menores que os refrigerantes halogenados, uma vez que o volume específico do $CO_2$ é mais elevado em comparação com outros fluidos refrigerantes e, consequentemente, devido à maior densidade da fase vapor do $CO_2$, o volume deslocado pelo compressor, para obter a mesma capacidade de refrigeração, é muito menor. Nessas condições, os compressores são de menor tamanho (menor volume deslocado) e também o sistema completo possui menor quantidade de fluido refrigerante na instalação.



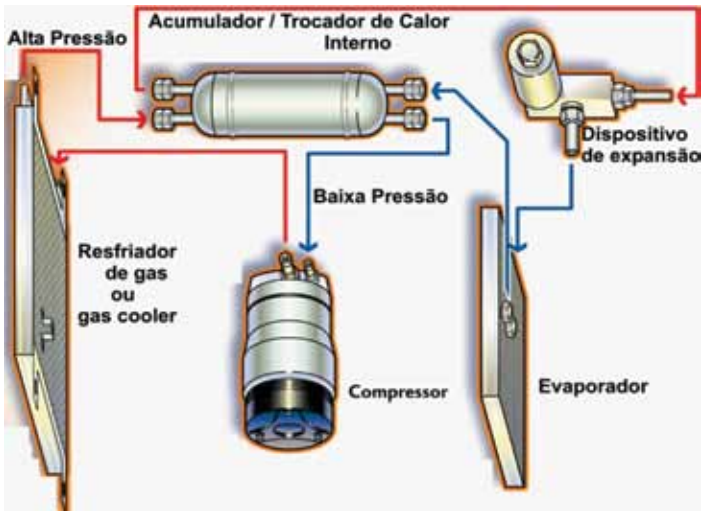



**Figura 6:** Diagrama esquemático de um circuito de ar- condicionado automotivo utilizando o $CO_2$.

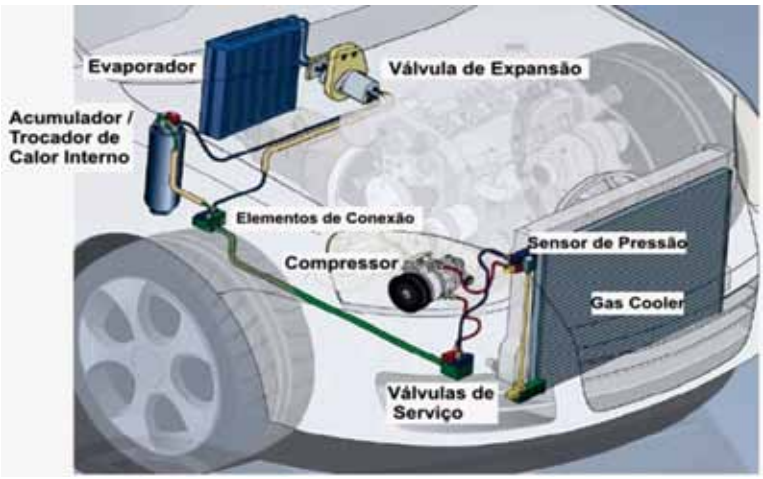



**Figura 7:** Figura ilustrando ,de forma esquemática, o circuito de ar-condicionado automotivo com $CO_2$, instalado num veículo.



## 1.2 Resultados

Essa seção apresenta de maneira sucinta alguns resultados mais interessantes obtidos na literatura aberta, utilizando o $CO_2$, R152a e o HFO-1234yf como fluido de trabalho. A Figura 8 ilustra uma comparação do Coeficiente de eficácia, COP, em função da temperatura de saída do $CO_2$ do Gás Cooler. É possível notar que o COP é melhorado à medida que a temperatura de saída do Gás Cooler é reduzida, como seria de esperar, e isso está diretamente relacionado com a temperatura do ar ambiente, em outras palavras, quanto maior a temperatura ambiente menor o COP do sistema.

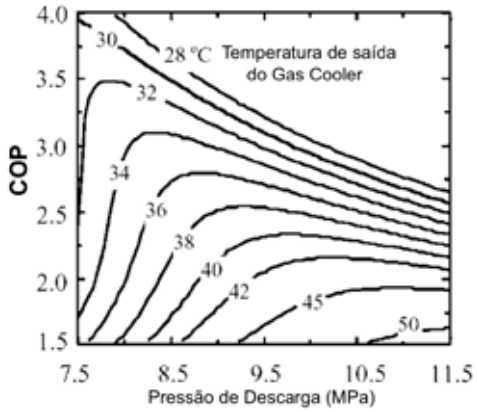



**Figura 8:** COP em função da temperatura de saída do Gás Cooler, CHINA (2005).

A Figura 9 mostra os resultados de uma simulação numérica, comparando o COP e temperatura do ar no Gás Cooler ($CO_2$) ou Condensador (R134a) para distintas rotações do compressor realizadas por Brown et al. (2002) mostrando que o sistema com R134a apresenta o melhor COP. Vale ressaltar que tais ensaios foram realizados em 2002 e, possivelmente, havia problemas na modelagem do Gás Cooler e o compressor, visto que foram os equipamentos que apresentaram a maior geração de entropia, em outras palavras, menores eficiências.

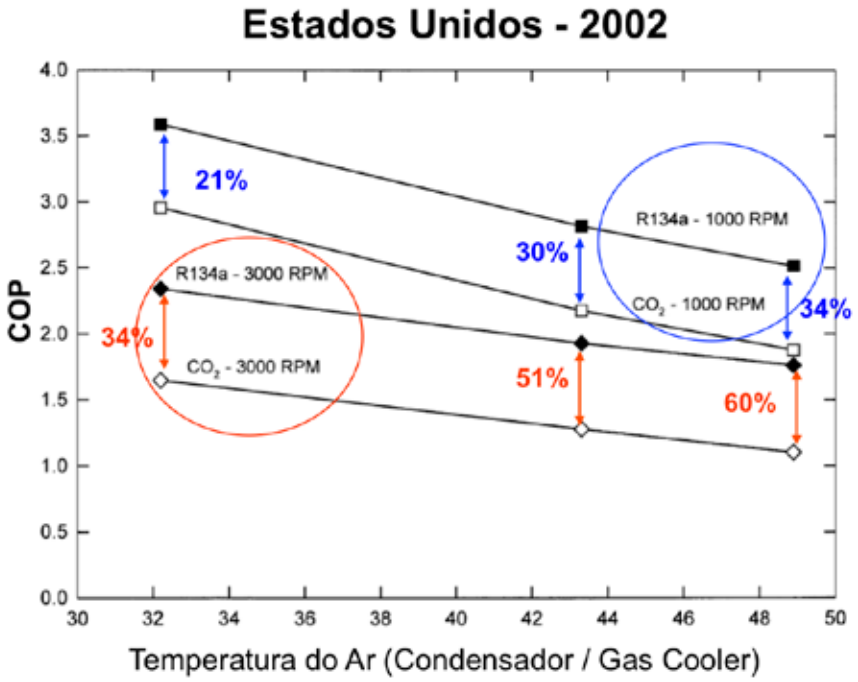



**Figura 9:** Comparação do COP e temperatura do ar no Gás Cooler ou condensador para distintas rotações do compressor, Brown et al. (2002).

A Figura 10 ilustra uma comparação de um trabalho realizado por pesquisadores chineses, Liu et al, 2005, entre a capacidade de refrigeração, o COP e a temperatura de entrada de ar no Gás Cooler com a variação da velocidade de face do ar no evaporador. Como seria de se esperar, o COP diminui com o aumento da temperatura de entrada do ar no Gás 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.

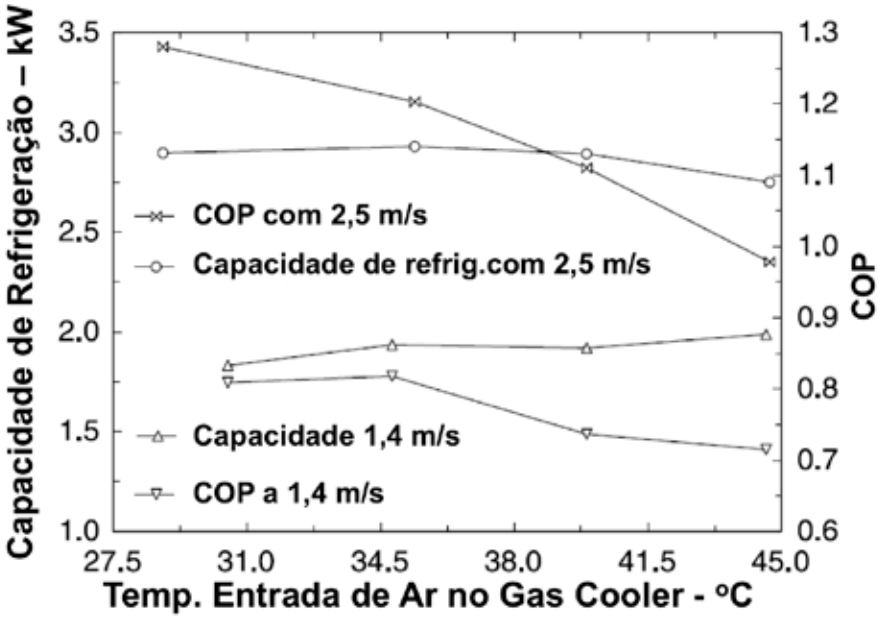





**Figura 10:** Comparação entre a capacidade de refrigeração, o COP e a temperatura de entrada de ar no Gás Cooler com a variação da velocidade do ar no evaporador, Liu et al. (2005).

## Resultados Experimentais em Veículos

A seguir são apresentados os resultados experimentais resultantes de pesquisas em veículos considerados de potência elevada, onde foram realizadas comparações entre sistemas instalados em veículos utilizando R134a e $CO_2$. As Figuras 11, 12 e 13 ilustram os testes realizados em três veículos distintos, BMW série 3; Audi A4 e Mercedes-Benz ''full size'', sendo que os ensaios apresentaram resultados similares, mostrando uma redução no consumo de combustível quando o sistema de ar condicionado operava com $CO_2$. Os resultados mais interessantes demonstraram que, com a utilização do $CO_2$, o tempo de resfriamento da cabine foi reduzido significativamente. Vale destacar que o tempo para reduzir a temperatura de 75 °C para a temperatura de conforto foi de 17 minutos para o sistema com $CO_2$ 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 $CO_2$ e de 30 minutos para o sistema com R134a e, no último caso, Mercedes, de 12 minutos para o sistema com $CO_2$ e de 25 minutos para o sistema com R134a. É interessante destacar, ainda, que em um dos testes com a BMW, Fig. 11, enquanto o sistema operando com $CO_2$ demorou 58 minutos para atingir a temperatura estipulada, o sistema com R134a não alcançou tal condição.

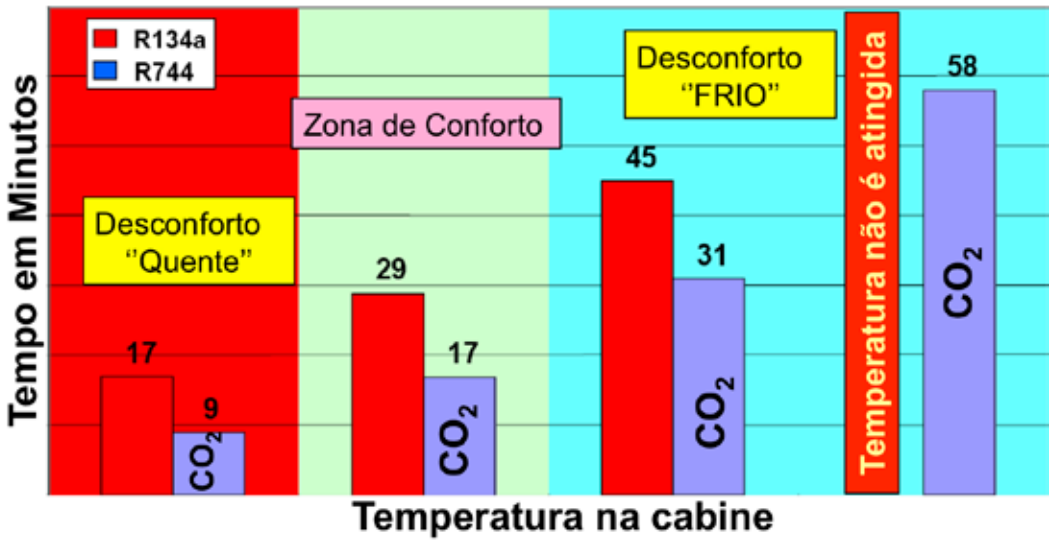



**Figura 11:** Comparação do tempo de resfriamento da cabine e da zona de conforto em um veículo BMW série 3.

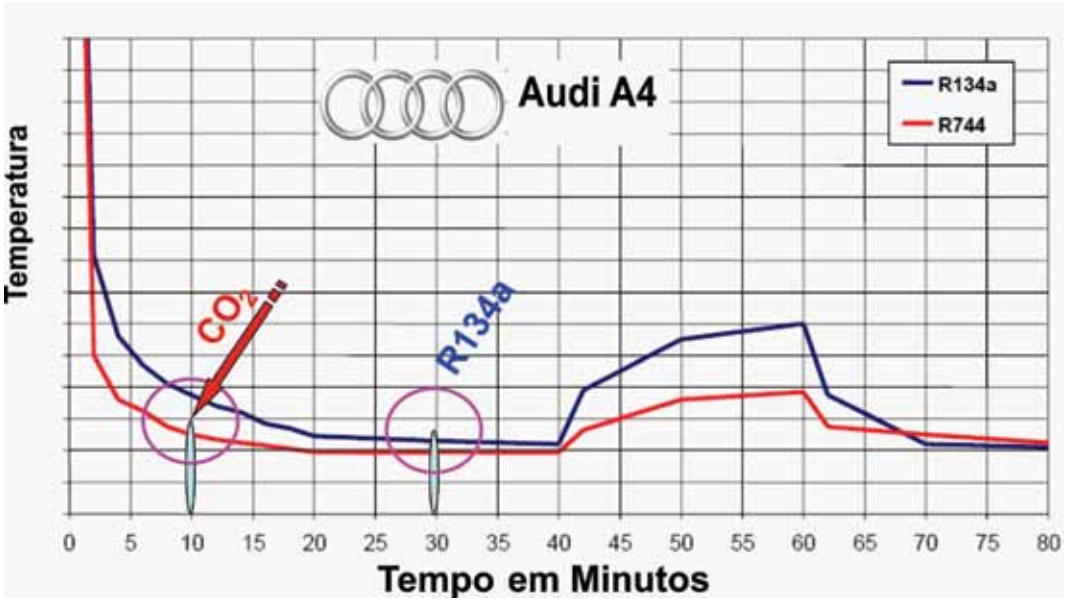



**Figura 12:** Comparação do tempo de resfriamento da cabine num veículo AUDI A4.

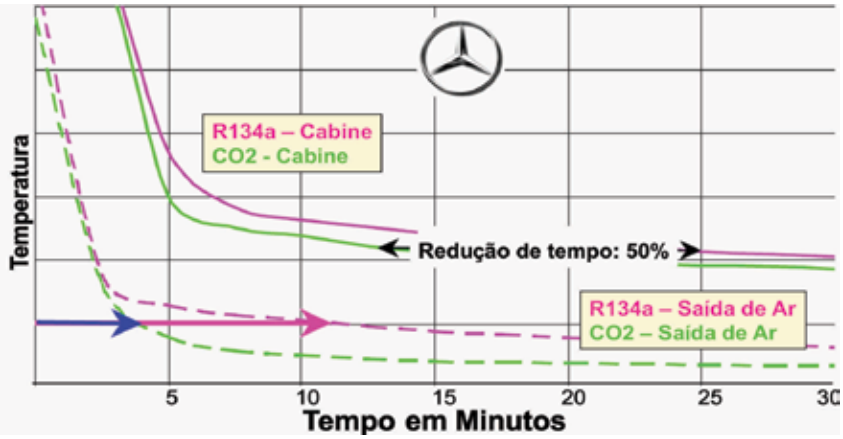



**Figura 13:** Comparação do tempo de resfriamento da cabine e da saída de ar do evaporador em um veículo Mercedes-Benz "full size".



Novos ensaios foram realizados em um automóvel de pequena potência, denominado de car-ro popular, com motorização de 1000 $cm^3$, tipo 1.0 Os resultados foram bastante encorajadores, demonstrando que o veículo que continha o sistema de ar condicionado com $CO_2$ também obteve o tempo de resfriamento da cabine reduzido. Na Fig. 14, o consumo de combustível foi menor e o Coeficiente de Eficácia, COP, também mostrou-se superior àquele com o sistema com R134a, Fig. 16. Os ensaios foram realizados, ainda, com temperatura ambiente distinta, variando entre 10 e 45 $^oC$, evidenciando um maior consumo de combustível do veículo equipado com R134a em todas as temperaturas ensaiadas, numa média de 0,4 litros para cada 100 km rodados, conforme ilustra a Fig. 15.

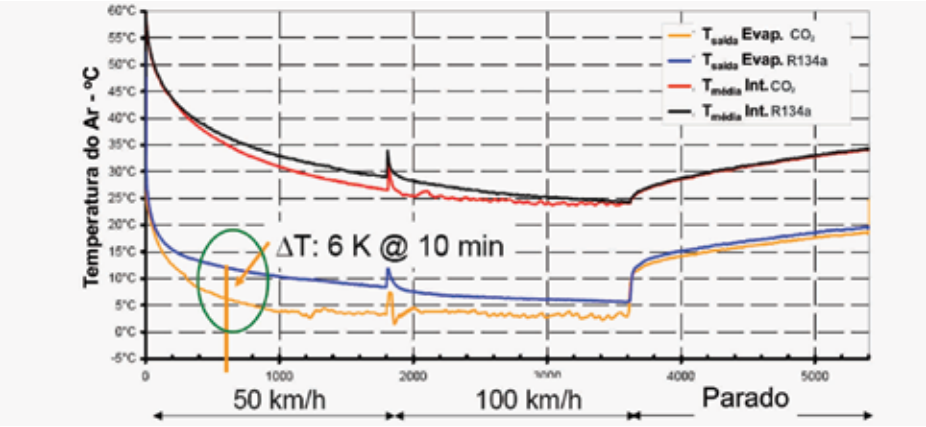



**Figura 14:** Comparação do tempo de resfriamento da cabine e a saída de ar do evaporador num veículo Toyota 1.0.

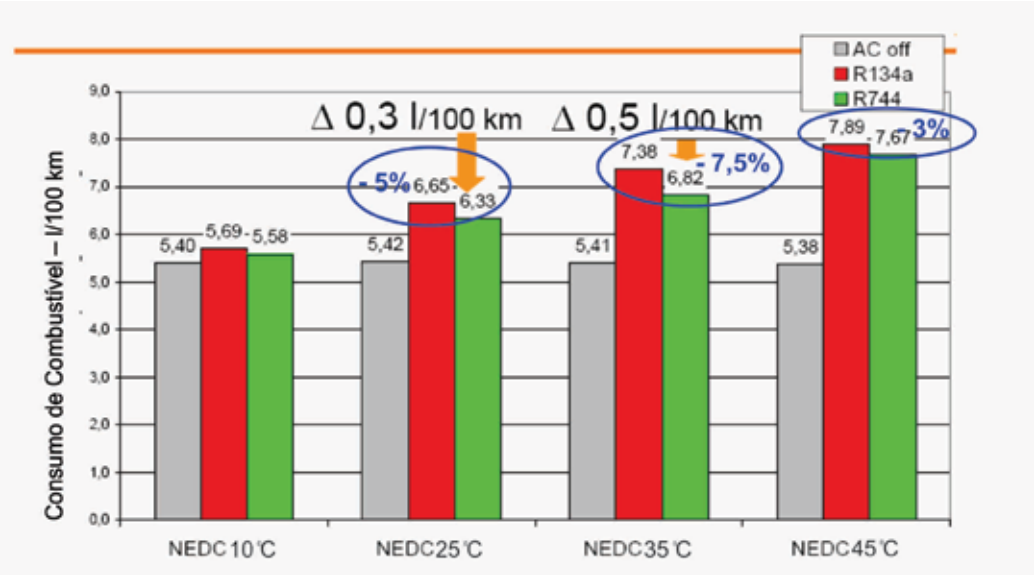



**Figura 15:** Comparação do consumo médio de combustível em função da temperatura ambiente num veículo Toyota 1.0.



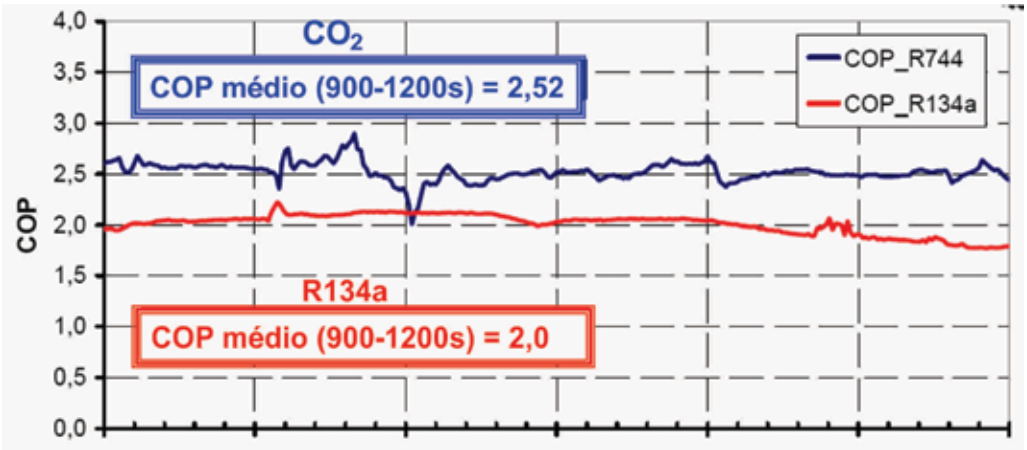



**Figura 16:** Comparação do COP médio entre os sistemas com $CO_2$ e R134a num veículo Toyota 1.0, para temperatura ambiente de 45°C.

Em relação à durabilidade dos sistemas que contêm $CO_2$, principalmente devido às operações com elevada pressão, os resultados apresentados na Fig. 17 retratam os ensaios realizados em um veículo utilitário, circulando em Dubai, com temperaturas ambientes entre 38 e 53 °C. O sistema operando com $CO_2$ mostrou ser confiável em relação a falhas, bem como vazamentos, apresentando as mesmas características após ter circulado mais de 100.000 quilômetros rodados.

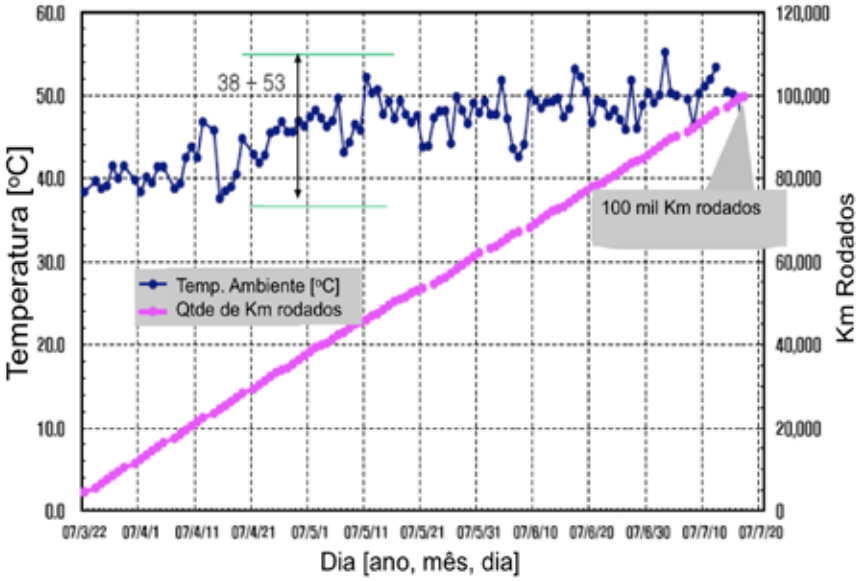



**Figura** 17: Ensaio realizado em Dubai de um veículo utilitário com sistema de ar -condicionado utilizando o $CO_2$ como fluido refrigerante, com temperaturas ambientes variando entre 38 e 53 ºC.



Os resultados relativos aos testes envolvendo o R152a, operando com sistema secundário, são apresentados na Fig. 18, onde o R152a escoa no circuito de baixa temperatura, isolado da cabine e, no de alta temperatura, o fluido utilizado era a água. É interessante observar que o sistema tido como referência, o R134a, apresenta o tempo de resfriamento inicial mais rápido, cerca de 5 minu-tos, em comparação àquele operando com R152a. Já em relação à eficiência do sistema operando com R152a comparado ao R134a, é possível afirmar que aquele conseguiu acompanhar a referência (R134a) em toda a faixa de velocidade ensaiada.

Um dos únicos ensaios encontrados na literatura aberta, relativos à utilização do fluido HFO-1234yf, foi o de Benouali et al. (2008). Os testes foram realizados com temperatura ambiente de 45 ºC e 40% de umidade relativa e com o sistema de recirculação de ar acionado, conforme ilustra a Fig. 19. Em termos comparativos, o veículo que continha o sistema com R134a apresentou melhor eficiência que o sistema contendo o fluido HFO-1234yf, em toda a faixa de aplicação, parado, 40 km/h e 90 km/h. Vale ressaltar que o modelo utilizado continha um motor de 1,4 litros operando com gasolina. A temperatura medida na saída do difusor de ar para o sistema com R134a atingiu 6,7 ºC, ao passo que o sistema operando com HFO-1234yf obteve 8,3 ºC para velocidade de 40 km/h. É importante observar que, para essa velocidade, os sistemas demoraram cerca de 30 minutos para atingirem os valores mencionados. A eficiência do sistema só foi a mesma quando a velocidade do veículo foi de 90 km/h.

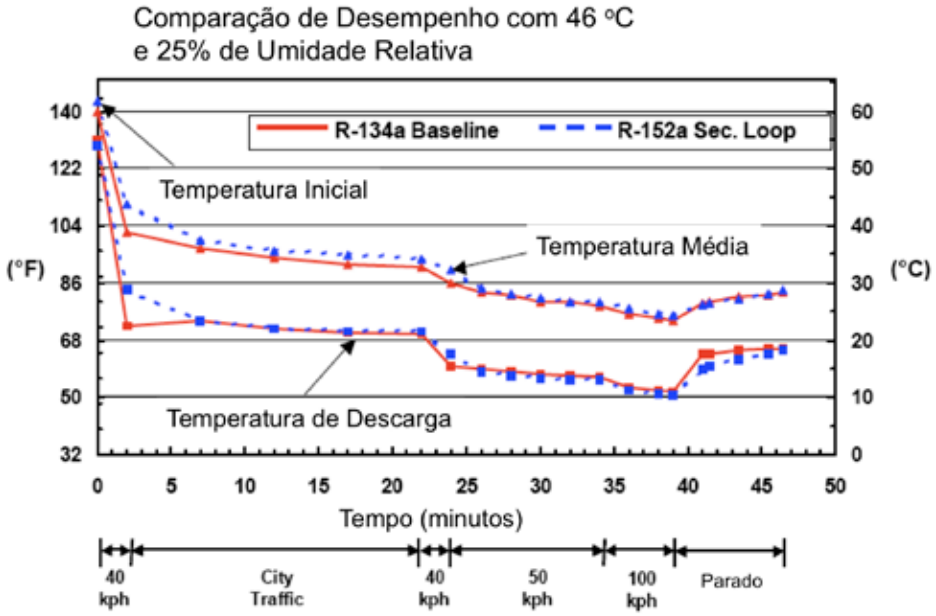



**Figura 18:** Comparação entre os sistemas operando com R134a e R152a, operando em sistema secundário como fluido refrigerante, variando as velocidades de ensaio.

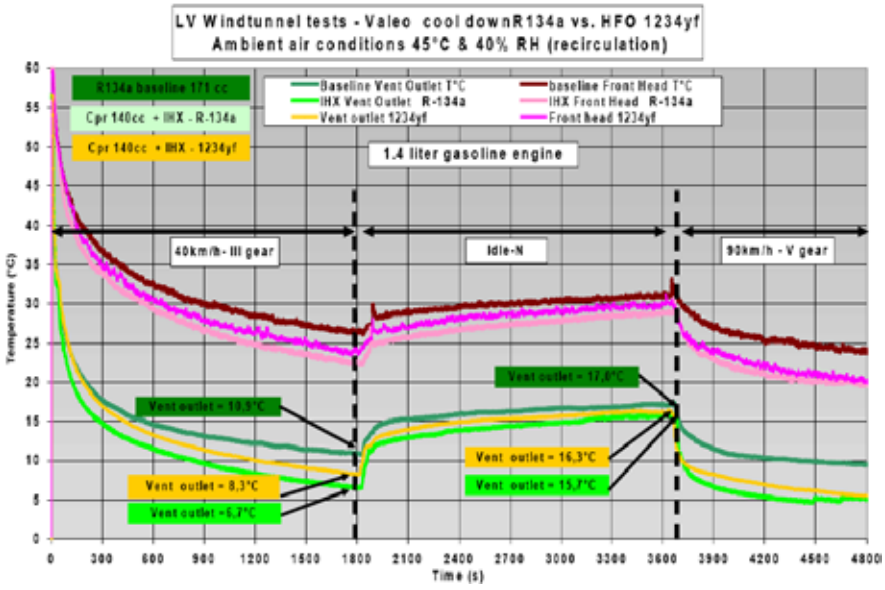



**Figura 19:** Comparação entre os fluidos refrigerantes R134a e o HFO-1234yf, em sistema instalado um veículo 1.4 litros a gasolina, com temperatura ambiente de 45 °C. Benouali et al. (2008)

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. 20. Como é possível observar, houve um crescimento significativo ao longo dos anos dos veículos com ar condicionado de fábrica. Em 2007, enquanto na Europa 90% dos veículos produzidos saíram de fábrica com ar condicionado instalado, no Brasil esse número não chegou a 60%. No entanto, a tendência é de crescimento já que o consumidor está exigente e prezando pela segurança.

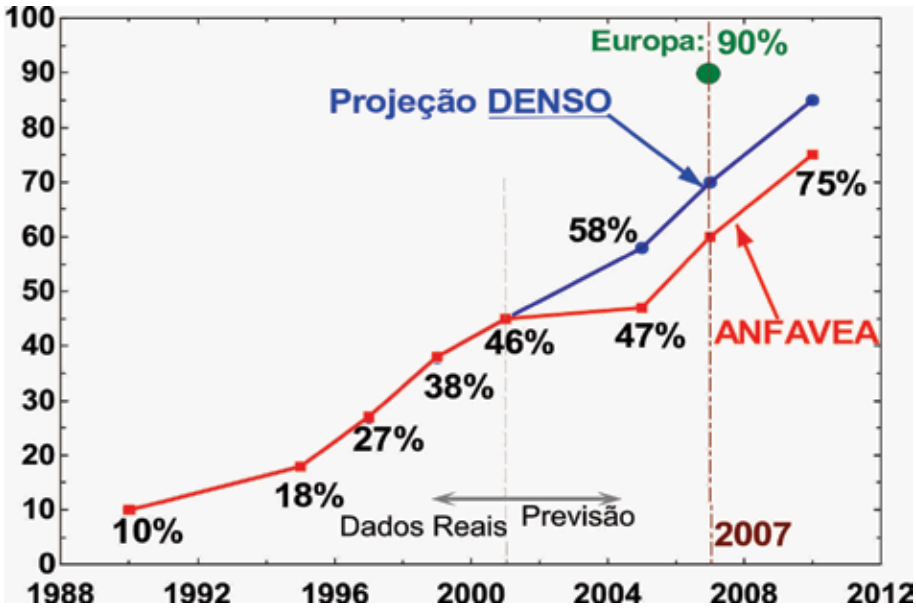



**Figura 20:** Dados e projeção da porcentagem de veículos que deixam as montadoras com o apare-lho de ar- condicionado instalado no Brasil.

# 2 Conclusões

O presente artigo mostrou as diversas possibilidades para a substituição do HFC-134a em sistemas de ar condicionado automotivo, como o HFC-152a, HFO-1234yf e o $CO_2$. Em relação ao R152a somente poderá ser utilizado em sistemas secundários, todavia possui desvantagem no que se refere ao maior peso do equipamento instalado, além de ser altamente inflamável. Já o HFO-1234yf

é a grande aposta da indústria química para não perder esse enorme mercado. A vantagem desse novo fluido é a compatibilidade com a tecnologia atual utilizada nos sistemas de ar condicionado automotivo, que proporcionaria uma rápida substituição, além, é claro, de possuir um potencial de aquecimento global, GWP da ordem de 4 e possuir um tempo de vida na atmosfera de 11 dias. A desvantagem desse novo composto, conforme apresentado, é que ele é inflamável, colocando em situação de alto risco os ocupantes do veículo, seja numa ocorrência de vazamento ou colisão.

As potencialidades para a utilização do $CO_2$ 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, no que diz respeito aos seguintes itens: menor tempo de resfriamento da cabine; menor consumo de combustível com o veículo em movimento; melhor eficiência em mais de 90% de condições de dirigibilidade; os sistemas completos são menores e mais leves; em climas frios, o desempenho do sistema com $CO_2$ é muito superior; proporciona maior segurança ao motorista, uma vez que não permite que o vidro embace no modo inverso (quente). Com sua utilização poderá haver uma redução de 5% do total das emissões indiretas e até 10% das emissões diretas; na Europa, há a possibilidade de se reduzir as emissões de $CO_2$ em cerca de 30 milhões de toneladas até 2011 com a introdução de 3 milhões de novas unidades de A/C utilizando $CO_2$ como refrigerante a partir de 2008. As principais desvantagens são o custo inicial do equipamento elevado, uma vez que o $CO_2$ trabalha com pressões elevadas e novos projetos da indústria automobilística para a introdução desses sistemas nos automóveis.

Como comentário final, é importante destacar que o $CO_2$ já dispõe de tecnologia desenvolvida para otimização e utilização em sistemas de ar condicionado automotivo, o que leva a concluir que o $CO_2$ deverá ser o fluido refrigerante da próxima década na Europa e, posteriormente, nos outros continentes. Entretanto, em face dos custos elevados (estima-se que o sistema com $CO_2$ seja cerca de USD 300,00 mais caro que o sistema com R134a). Muitas montadoras estão aguardando os ensaios com novos fluidos potenciais, para avaliar a melhor possibilidade, principalmente em relação ao custo/benefício. Verifica-se, outrossim, a necessidade de se realizar pesquisas em climas como o Brasil, com o objetivo de se levantar resultados de desempenho de veículos com o $CO_2$ e o HFO-1234yf nos sistemas de ar condicionado automotivo, para que seja possível verificar a eficácia de sua utilização.

# 3 Referências bibliográficas


Benouali, J.; Karl, S.; Petitjean, C. 2008, A/C **System Control Strategies for Major Refrigerant Options.** 2008 SAE Alternate Refrigerant Systems Symposium, Phoenix – Arizona – USA.

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.





Ghodbane, M.; Fernqvist, H. 2003, **Secondary Loop R-152a Mobile A/C System. 2003 SAE Alternate Refrigerant Systems Symposium**, Scottsdale – Arizona – USA.

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

Koban, M. 2009, HFO-1234yf **Low GWP Refrigerant LCCP Analysis.** SAE World Congress.

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

Minor, B. 2008, HFO-1234yf, **a Low GWP Refrigerant For MAC, VDA Alternative Refrigerant Winter Meeting 2008,** Saalfelden, Austria.

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.

# Novas tecnologias em trocadores de calor para a redução de carga de fluido refrigerante

**Dr. GHERHARDT RIBATSKI**
Engenheiro Mecânico
Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
ribatski@sc.usp.br



## RESUMO

O presente estudo demonstra o fato de, independente dos refrigerantes que venham a ser adotados, cuidados são necessários tanto agora como no futuro, objetivando o confinamento do refrigerante ao sistema, minimizando vazamentos e consequentemente reduzindo o impacto ambiental. Ressalta-se que embora vazamentos possam ser minimizados eles são inevitáveis. Resultados levantados na literatura indicaram em sua maioria que a taxa anual de vazamentos eleva-se com o incremento da carga de refrigerante. O estudo conclui que geralmente o refrigerante concentra-se nos trocadores de calor e assim aponta como lógica a importância do desenvolvimento de tecnologias que permitam reduzir seus tamanhos. São também indicadas vantagen adicionais de inventários reduzidos provenientes da redução de custos iniciais do sistema e a expansão das aplicações daqueles baseados em fluidos tóxicos ou inflamáveis. Assim, baseado na discussão mencionada, este artigo também apresenta duas tecnologias que permitem drásticas reduções do inventário de refrigerante. Elas são as tecnologias de trocadores de calor baseada em microcanais (diâmetros hidráulicos inferiores a 3 mm) e a evaporação em película descencente em banco de tubos horizontais.

Palavras-chaves: inventário de refrigerante; vazamentos; microcanais; película descendente; trocadores de calor; aquecimento global; efeito estufa.

# 1 Introdução

Desde a ratificação do Protocolo de Montreal, as indústrias de refrigeração, condicionamento de ar e de bombas de calor, assim como seus usuários, têm enfrentado o desafio de desenvolver novos equipamentos e adaptar os sistemas em operação aos novos refrigerantes. O Protocolo de Montreal trata das substâncias danosas à camada de ozônio e estabelece programas que gerenciam a eliminação do uso dos clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs). Vale ressaltar que o protocolo de Montreal é aclamado como o acordo de cooperação internacional de maior sucesso da história devido a sua rápida adoção e implementação por diversos países.

Posteriormente, em 1997, foi ratificado o Protocolo de Quioto, segundo o qual os países desenvolvidos se comprometeram coletivamente a reduzir em 5,2%, entre o período de 2008 a 2012, a emissão de gases causadores do efeito estufa em relação às emissões do ano de 1990. Assim, como consequência do Protocolo de Quioto, a atenção foi dirigida para os HFCs, gases que, desde o início dos programas de eliminação dos CFCs, foram adotados como alternativas aos CFCs e HCFCs devido as suas propriedades termodinâmicas e reduzidas flamabilidade e toxidade. Os HFCs, embora inertes à camada de ozônio, pois não contêm cloro, são potenciamente fortes causadores de efeito estufa. Dentro desse contexto, ONGs ambientalistas como o Greenpeace e parte substancial da comunidade acadêmica têm indicado os refrigerantes naturais como substitutos dos HFCs. Segundo Larkin e Daves (2009), em um relatório preparado para o Greenpeace, refrigerantes naturais são aqueles que ocorrem naturalmente, isto é, substâncias não sintéticas que podem ser utilizadas como fluidos de trabalho em sistemas de refrigeração, condicionamento de ar e bombas de calor. Tais substâncias, referidas como "The Gentle Five", incluem hidrocarbonos (propane, butano e ciclopentano), dióxido de carbono, amônia, água e ar. Segundo Palm (2007), iniciativas governamentais visando à eliminação dos HFCs e substituição por refrigerantes naturais, já foram implementadas em países como a Dinamarca e Áustria.

Este artigo tem como objetivo inicial demonstrar o fato de, independente dos refrigerantes que venham a ser adotados, cuidados são necessários tanto agora quanto no futuro, objetivando o confinamento do refrigerante ao sistema, minimizando vazamentos e consequentemente reduzindo o impacto ambiental, ressaltando que, embora vazamentos possam ser minimizados, eles são inevitáveis. Resultados indicam em sua maioria que a taxa anual de vazamentos eleva-se com o incremento da carga de refrigerante. Desse modo, considerando que geralmente o inventário de refrigerante concentra-se nos trocadores de calor, torna-se lógico concluir a importância do desenvolvimento de tecnologias que permitam reduzir seus tamanhos e, assim, a carga de refrigerante. Vantagens adicionais de inventários reduzidos provêm da redução de custos iniciais

do sistema e da expansão das aplicações daqueles baseados em fluidos tóxicos ou inflamáveis. Portanto, baseado na discussão mencionada, este artigo também apresenta duas tecnologias que permitem drásticas reduções do inventário de refrigerante. Elas são as tecnologias de trocadores de calor baseadas em microcanais (diâmetros hidráulicos inferiores a 3 mm) e a evaporação em película descencente em banco de tubos horizontais.

# 2 Uma breve discussão sobre vazamentos de refrigerantes

## Condicionamento de ar automotivo

Nos Estados Unidos, o setor de condicionamento de ar automotivo tem sido indicado como o maior responsável pelas emissões do HFC R134a para a atmosfera. Sistemas de condicionamento de ar automotivo, anteriormente um fenômeno Americano, vêm se popularizando também na Europa, Ásia e recentemente também no Brasil, tornando a emissão de R134a, a partir de veículos automotivos, um fato mundial. Schwarz e Harnisch (2003) distribuíram o total de emissões de um veículo, durante o ciclo de sua vida, da seguinte forma: (i) emissões durante a manufatura, (ii) durante o período de uso, (iii) ao final da vida (quando o veiculo é desmanchado). As emissões, durante o período de uso, são compostas por "emissões irregulares", caracterizadas por vazamentos esporádicos, devido a falhas no sistema e "emissões regulares", que ocorrem gradualmente a partir de sistemas não danificados. As elevadas taxas de vazamento de sistemas de ar-condicionado automotivo, em carros de passeio, estão relacionados ao uso de compressores abertos e, dessa forma, à necessidade de selos de vedação para estancar o sistema. Adicionalmente, conexões mecânicas (O-rings e juntas) e tubos flexíveis são usados para conectar os principais componentes do sistema, sendo ambos constantemente submetidos a choques e vibrações.

Figura 1 publicada inicialmente por Schwarz e Harnisch (2003) é o resultado de um estudo realizado na União Europeia envolvendo vazamentos de R134a em carros de passeio com até 7 anos de idade. Esse estudo envolve 300 veículos e foi realizado entre novembro de 2002 e janeiro de 2003 em 19 garagens distribuídas na Alemanha, Portugal e Suécia com objetivo de investigar também o efeito das condições climáticas. Segundo a Fig. 1, ocorre uma larga diferença entre as taxas anuais de vazamento entre fabricantes com os valores variando de 28,8 gramas/ano

até 81,9 gramas/ano. Por intermédio desse estudo, foi observada uma perda regular absoluta média de 52,4 gramas/ano significando uma perda relativa à carga normal de refrigerante de 6,9%. Observou-se também que sistemas com inventários elevados de refrigerante apresentam vazamentos superiores, não apenas em termos de valores absolutos, mas também relativos. Palm (2007), baseado em uma investigação similar realizada pelo governo da Califórnia, mencionou perdas totais de refrigerantes de 80 gramas/ano, incluindo emissões durante a fabricação, vida útil e reciclagem ao final da vida útil. Resultados de estudos similares foram também mencionados em um estudo abrangente elaborado por A. D. Little Inc. (2002). Baseado em pesquisas realizadas nos Estados Unidos, neste relatório foram mencionadas perdas referidas ao tempo total de vida do veículo de 73 gramas/ano, quando recolhimento e reciclagem do refrigerante são praticados, e de 222,7 gramas/ano quando o refrigerante é eliminado para a atmosfera, o que é ilegal neste país.



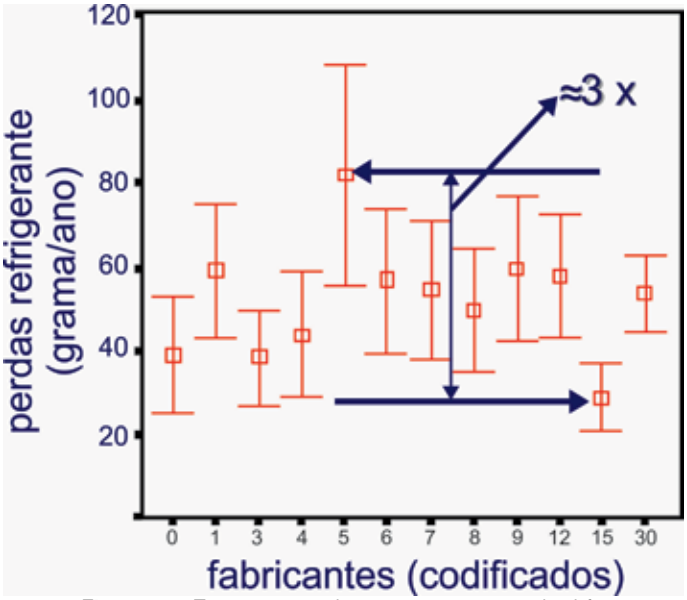



**Figura 1** – Taxas anuais de vazamento segundo diferentes fabricantes (codificados), Schwarz e Harnisch (2003).

## Refrigeração Comercial

Na refrigeração comercial, cenários distintos, em relação a vazamentos, são verificados segundo a categoria do equipamento. Em supermercados geralmente se verificam sistemas de expansão direta, contendo racks de compressores localizados em uma sala de máquinas e vários

balcões expositores refrigerados distribuídos pela loja. Tais equipamentos são conectados por linhas longas de líquido e vapor, as quais, devido ao elevado número de conexões e fontes de vibração inerentes ao sistema, favorecem a ocorrência de vazamentos regulares. Segundo Little (2002), nos Estados Unidos, instalações com sistemas de expansão direta, operadas e construídas segundo práticas atuais, apresentam taxas anuais de vazamento de 30%. Já, para instalações otimizadas, essa taxa se reduz a 15%. Figura 2, elaborada por Palm (2007), apresenta resultados, para a taxa anual de vazamento, de uma grande rede de supermercados localizada na Suécia. Ela ilustra resultados para distintos refrigerantes apresentados pois, durante o período mencionado, verificou-se nesse país a substituição do R12, R502 e R22 e, atualmente, a maioria dos sistemas opera com R404A. Segundo essa figura, não existe indicação clara de que taxas de vazamento inferiores a 10% possam ser garantidas em um curto espaço de tempo. Deve ser mencionado que, apesar da não existência de um estudo sistemático em supermercados brasileiros, taxas anuais de vazamentos regulares de até 200% têm sido mencionadas por especialistas do setor.

No caso de unidades compactas tipo self-contained, que incluem congeladores expositores, refrigeradores de bebidas, vending machines, além de várias outras configurações especializadas, taxas anuais regulares de vazamento inferiores a 5% são indicadas no relatório elaborado por Little (2002). Embora a taxa de vazamento seja reduzida, aspectos de eficiência energética devem ser considerados em relação à adoção de tal solução, pois calor é rejeitado diretamente ao ambiente da loja. Referido calor deverá ser removido posteriormente, mediante um sistema de condicionamento de ar, tendo como fluido de resfriamento o ar, fluido este caracterizado por uma eficiência extremamente reduzida.

Um forma de reduzir drasticamente o inventário de refrigerante e também das perdas regulares que podem atingir valores até inferiores a 2% ao ano do inventário total, segundo Little (2002), é por meio do uso de fluidos secundários. Considerando aspectos de eficiência térmica, sistemas de resfriamento indireto podem apresentar desempenhos superiores a sistemas de expansão direta conforme demonstrado por Bellas e Tassou (2005). Nos sistemas indiretos, o circuito secundário opera normalmente com base em um escoamento monofásico de água e glicol ou outra solução anticongelante. Sistemas baseados em circuitos secundários utilizando $CO_2$ como fluido de trabalho foram recentemente instalados nos Estados Unidos e Canadá (ver Hinde et al. (2009) para detalhes adicionais). Essa tecnologia somada à do uso de pasta de gelo têm sido indicadas como promissoras. Palm (2007) indicou reduções de inventário de 583 kg para 22 kg pelo uso de resfriamento indireto. O uso de fluidos secundários pela redução do inventário e da possibilidade da construção de um sistema central em local apropriado, permitem a especulação

de uso de amônia e hidrocarbonetos em aplicações comerciais. Detalhes adicionais desse relevante tema encontram-se em artigo neste volume elaborado pelo Professor Parise.

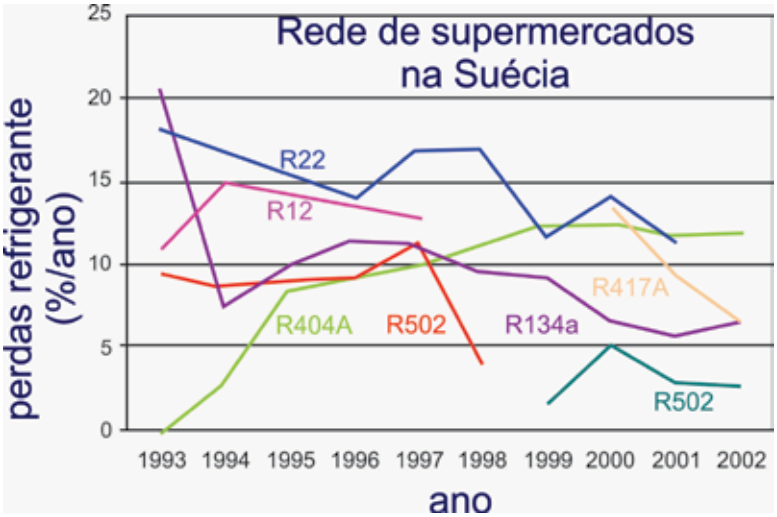



**Figura 2** – Taxas de vazamento anuais (em %) apresentadas por uma rede de supermercados Sueca (Palm (2007)).



## Refrigeração Residencial

Refrigeradores modernos são altamente confiáveis. Nos Estados Unidos, segundo Little (2002), apenas 1,5% dos refrigeradores requerem manutenção em seus sistemas herméticos durante toda sua vida útil. Nesse mercado, refrigeradores são indisponibilizados após 15 a 20 anos de uso antes da ocorrência de alguma falha. Após isso, o refrigerante é recolhido e reciclado ou apropriadamente tratado. No mesmo relatório, Little (2002) mencionou que a emissão total de um refrigerador típico é de apenas 10% de sua carga ou algo em torno de 14 gramas.

Em geral, um cenário distinto se verifica em países em desenvolvimento, nos quais condições de reduzida voltagem favorecem a danificação prematura do compressor. Como resultado, significativa parcela dos refrigeradores passam por manutenção diversas vezes durante suas vidas úteis. Durante a manutenção, devido a legislações e controles menos restritivos, o sistema hermético tem seu refrigerante eliminado para a atmosfera, resultando em emissões totais drasticamente superiores às verificadas em países desenvolvidos.

### Chillers

Chillers são equipamentos utilizados para resfriar água ou salmouras aplicados a processos de resfriamento na indústria, e condicionamento de ar em edifícios comerciais e industriais. Tais equipamentos são caracterizados por índices de emissão reduzidos pois são localizados em uma sala de máquinas que são compostas por linhas não extensas, com um número reduzido de conexões. Segundo Little (2002), perdas médias anuais, inferiores a 1% do inventário de refrigerante, são observadas em Chillers modernos. Vale ressaltar que esse número inclui vazamentos regulares, perdas no desmanche do sistema ao final de sua vida útil e acidentes em campo.

# 3 Minimizando o inventário de refrigerante em trocadores de calor



Em geral, como demonstrado anteriormente, por meio da redução do inventário de refrigerante, não apenas a taxa de vazamentos absoluta é reduzida, mas também seus valores relativos, dados em porcentagem do inventário total inicial. Em grande parcela dos sistemas, parcela relevante do refrigerante encontra-se nos trocadores de calor. As tecnologias de microcanais e da evaporação em película descendente em banco de tubos horizontais permitem reduções significativas do inventário de refrigerante e, consequentemente, de todo o sistema. A seguir uma descrição de ambas as tecnologias, destacando suas principais vantagens e limitações.

## 3.1 Evaporadores horizontais do tipo película descendente

Evaporadores horizontais do tipo película descendente (ou evaporadores tipo spray), esquematicamente ilustrados na Fig. 3, têm sido utilizados nas indústrias de refrigeração, química, petrolífera e de dessalinização. Embora, segundo Lyle (1947), a primeira patente desses evaporadores tenha sido registrada em 1988, apenas um número reduzido de pesquisadores desenvolveram estudos nessa área anteriormente a 1970. A partir de então, essa tecnologia tem sido tema de estudo de diversos pesquisadores, tanto na indústria como na academia. O foco, durante a década de 1970, esteve primeiramente no uso de evaporadores tipo película descendente na conversão de energia térmica oceânica (ocean thermal energy conversion, OTEC, systems), com o interesse, no

início dos anos 80, ter se intensificado devido à segunda crise do petróleo. Em face do interesse em sistemas OTEC, a maioria dos estudos realizados nesse período utilizou água e amônia como fluidos de trabalho e concentrou-se em parâmetros operacionais e fluxos de calor típicos dessas aplicações.

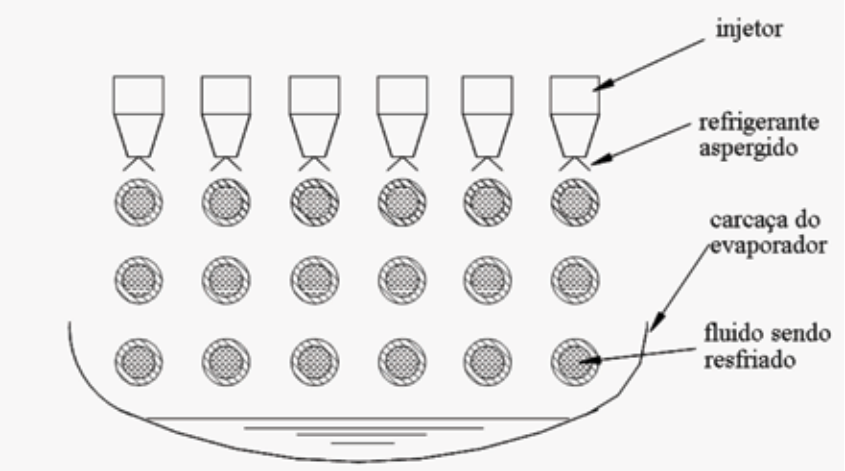



**Figura 3** Diagrama esquemático de um evaporador horizontal tipo película descendente, Saiz-Jabardo (1996).



Durante a década de 90, a implementação dos programas de eliminação dos CFCs, com a consequente necessidade de exploração de novas tecnologias, motivou a expansão do uso desses trocadores. Evaporadores horizontais tipo película descendente possuem coeficientes de transferência de calor superior aos inundados. Tal fato permite o incremento da temperatura de saturação e o incremento da eficiência do ciclo. O tamanho do evaporador também pode ser minimizado resultando no decréscimo do espaço necessário à instalação do sistema e redução da carga de refrigerante, com ambos impactando positivamente nos custos iniciais. Adicionalmente, um inventário de refrigerante inferior proporciona economias relativas à reposição de refrigerante ao sistema, pois, nessa condição, taxas de vazamento de refrigerante absolutas e relativas inferiores são observadas. Riscos associados a vazamentos são também reduzidos, tornando possíveis novas aplicações de sistemas usando refrigerantes tóxicos e/ ou inflamáveis como é o caso da amônia.

O potencial de redução do inventário de refrigerante de evaporadores horizontais tipo película descendente encontra-se ilustrado na Tabela 1. Esta apresenta uma comparação realizada por Ayub (2008) entre um evaporador tipo película descendente, com capacidade de 3168 kW (900 TR), localizado em uma indústria química e um evaporador inundado convencional com capacidade equivalente. O evaporador tipo película descendente utiliza tubos com superfícies intensificadoras interna e externamente, enquanto o evaporador inundado possui superfícies lisas.

Nessa comparação, considerou-se ambos operando com amônia. Na Fig. 3 elaborada por Gonzalez-Garcia et al. (1992), verifica-se cenário similar ao evaporador tipo película descendente, operando com um inventário de refrigerante, em cerca de uma ordem de grandeza inferior ao inundado para capacidades de refrigeração similares.

**Tabela 01** – Comparação entre evaporadores tipo película descendente e inundado, Ayub (2008).

| Características | Tipo Película descendente | Tipo inundado |
|---|---|---|
| Diâmetro do casco, mm | 1219 | 1524 |
| Comprimento do tubo, mm | 5182 | 7315 |
| Diâmetro externo do tubo, mm | 19 | 32 |
| Número de passes | 2 | 8 |
| Perda de carga, kPa | 52 | 76 |
| Inventário de amônia, g/kW | 64 | 1290 |



Quando comparado com trocadores a placas, evaporadores tipo película descendente apresentam coeficientes de transferência de calor superiores e perdas de carga inferiores. Contudo, trocadores a placas também operam com inventários de refrigerante inferiores aos evaporadores inundados e, devido às suas características construtivas, são mais compactos que os evaporadores tipo película descendente. Em trocadores a placa não abrasados, a única configuração disponível até o início da década de 90, cada placa ou cada cassete - duas placas adjacentes unidas por solda – e vedadas por meio de juntas compostas de elastômeros. Devido a isso, existe certa resistência da indústria de condicionamento de ar e refrigeração quanto ao uso desses trocadores, em face da possibilidade de vazamentos, cujas razões de ocorrência estão principalmente relacionadas a garantir a integridade das juntas. Nesses trocadores a integridade do material e a espessura das placas limitam respectivamente a temperatura e a pressão operacionais. Atualmente trocadores a placas brasados encontram-se disponíveis no mercado. Eles apresentam restrições inferiores quanto a vazamentos, entretanto não apresentam a possibilidade de limpeza mecânica, sendo assim indicados a situações nas quais possibilidades de incrustações são reduzidas.

Figuras 4 e 5 apresentam fotografias elaboradas por Ribatski e Thome (2005), ilustrando o mecanismo de ebulição e o comportamento do filme líquido durante a evaporação em película descendente respectivamente em tubos lisos e tubos comerciais, cuja superfície foi recoberta de

forma a se estabelecer uma camada porosa. Em tais figuras h é o coeficiente de transferência de calor e, em suas legendas, Tsat é a temperatura de saturação, $\Gamma$ é vazão no filme por metro de comprimento de tubo e q é o fluxo de calor.

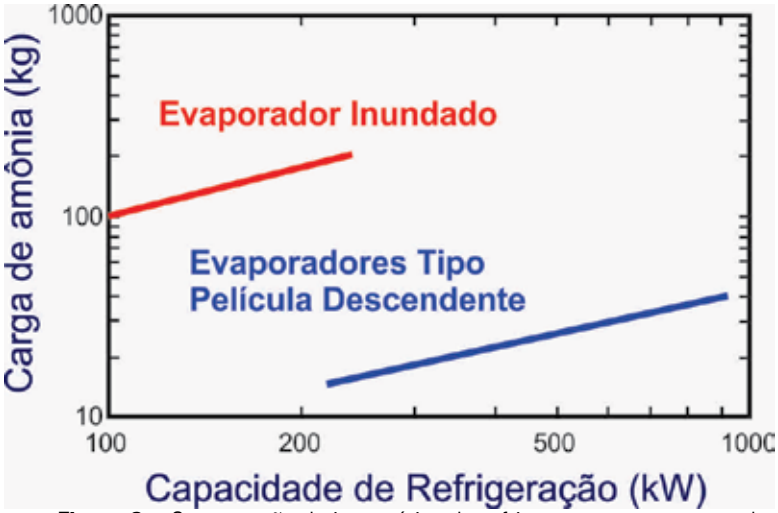
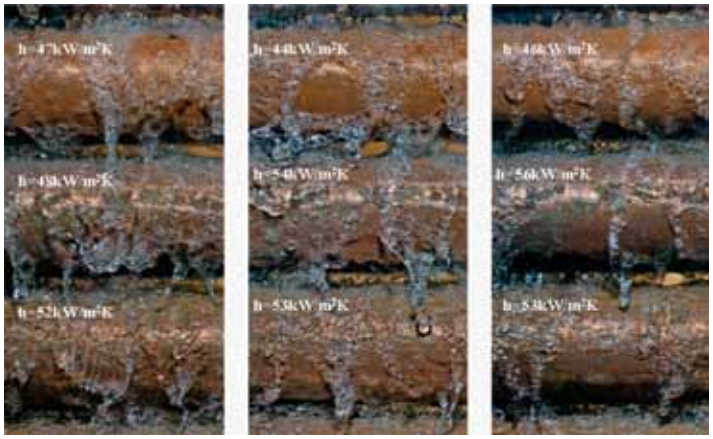



**Figura 3** – Comparação de inventários de refrigerante entre evaporadores inundados e tipo película descendente, Gonzalez-Garcia et al. (2002).

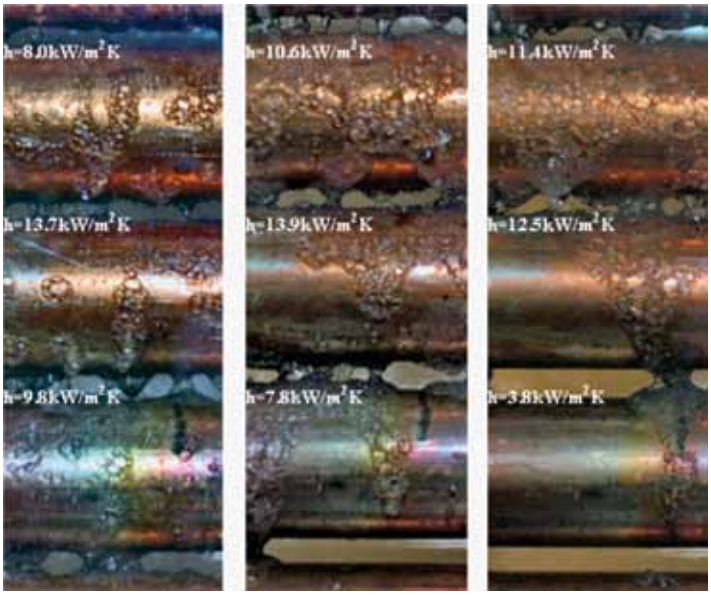


a) b) c)

**Figura 4** – Ilustração da distribuição de líquido e comportamento da ebulição com a variação do fluxo de calor. Superfície High-Flux da Hitachi, R134a, Tsat=5 °C and $\Gamma$ =250 g/ms (na região superior do primeiro tubo), a) q=60kW/m$^2$, b) q=40kW/m$^2$, c) q=20kW/m$^2$ (Ribatski e Thome (2005)).

Na Fig. 4, destacam-se os elevados valores para o coeficiente de transferência de calor atingidos, valores cerca de 10 vezes superiores aos observados durante a ebulição convectiva (evaporação em condições de convecção forçada) no interior de tubos. Entretanto, vale destacar que, em condições de deficiência no fornecimento de líquido , (conforme ilustrado na Fig. 5) ou sua má distribuição ao longo da fileira de tubos, a secagem prematura da superfície é verificada, resultando num drástico decréscimo do coeficiente de transferência de calor com uma consequente redução do desempenho do trocador. Por outro lado, a sobrealimentação de líquido deve ser evitada, pois pode causar a inundação do evaporador ou o desperdício de energia, relacionado ao retorno ao distribuidor do líquido não evaporado via do seu bombeamento. Assim, a taxa mínima de alimentação de refrigerante líquido, necessária para manter as superfícies molhadas dos tubos, deve ser a operacional porque permite minimizar ou até mesmo eliminar a re-circulação de líquido. Nesse contexto, conforme indicado por Ribatski (2009), o distribuidor de líquido também pode afetar drasticamente o desempenho do evaporador. Além disso, tubos e distribuidor desalinhados favorecem a má distribuição de líquido no banco de tubos e, desse modo, reduzem a área efetiva de transferência de calor (molhada) incrementando o consumo de energia relacionado à recirculação de líquido.






a) b) c)

**Figura 5** – Ilustração da distribuição de líquido e comportamento da ebulição com a variação da vazão. Tubo liso, R134a, Tsat=5 °C e $\Gamma$ =60 g/ms. a) q=20kW/m², b) q =40kW/m², c) q =60kW/m² (na região superior do primeiro tubo).

Com base nessa breve análise, é possível concluir que evaporadores tipo película descendente apresentam as características requisitadas pelas indústrias de refrigeração e condicionamento de ar. Seu desempenho é excelente, termicamente superior aos trocadores inundados e competitivos com os trocadores a placas. Evaporadores tipo película descendente não estão sujeitos a restrições quanto a vazamentos e podem operar quando otimizados com inventários de refrigerante inferiores aos trocadores a placas. Em parte, reticências à adoção dessa tecnologia resultam nas dificuldades relacionadas à distribuição de líquido que, caso não alcançada, afeta a uniformidade do escoamento , promovendo uma secagem de parede prematura principalmente em banco de tubos com várias fileiras.

## 3.2 Microcanais

Trocadores de calor compactos baseados em microcanais (denominação arbitrária adotada para canais com diâmetro hidráulico inferior a 3mm) possuem vantagens claras em relação aos baseados em macrocanais, também denominados canais convencionais. Figura 6 ilustra alguns dos microcanais, cujos desempenhos térmicos estão sendo investigados no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP. Nesta figura,  Dint refere-se ao diâmetro interno do tubo.



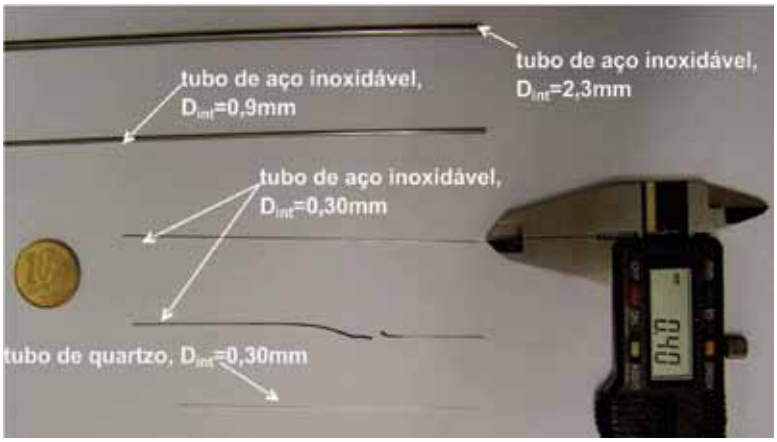



**Figura 6** – Microcanais cujos desempenhos estão sendo investigados no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP.

Trocadores baseados em microcanais proporcionam áreas de contato com o fluido por unidade de volume superiores aos baseados em macrocanais. Adicionalmente, devido às características estruturais do trocador, a utilização de microcanais permite a operação em pressões superiores.

Microcanais também se distinguem por apresentarem, em condições similares, coeficientes de transferência de calor superiores a canais convencionais, permitindo, segundo estudos preliminares, a remoção de fluxos de calor superiores a 10 MW/m$^2$. Essas características permitem ainda minimizar o tamanho do trocador e a quantidade de material utilizado em sua manufatura. Adicionalmente, reduções substanciais do inventário de refrigerante são possíveis. Para uma bomba de calor doméstica, Palm (2007), utilizando trocadores de calor baseados em microcanais, alcançou uma redução do inventário de refrigerante de forma que a parcela de refrigerante no compressor fosse comparável à dos trocadores. Todos esses aspectos apontados apresentam impacto, não apenas em custos, mas também ambientais.

Atualmente trocadores de calor compactos, baseados em microcanais, são encontrados em um número extenso de aplicações como sistemas de condicionamento de ar automotivo, resfriamento de componentes eletrônicos (ver Ribatski et al. (2007) para detalhes adicionais), células de combustível, microrreatores químicos e aplicações *offshore*. Adicionalmente, eles possuem elevado potencial de aplicação em outras áreas, como painéis radiadores de veículos espaciais e controle térmico de sua carga interna, sistemas residenciais de condicionamento de ar e resfriamento do elemento combustível em reatores nucleares. Além do mais, a possibilidade de elevada compactação destes trocadores faz com que novas aplicações sejam visualizadas conforme trocadores de calor de diâmetros inferiores tornam-se viáveis.



A Fig. 7 foi elaborada com o objetivo de ilustrar o impacto do decréscimo do diâmetro do tubo no tamanho do trocador de calor e do inventário de fluido refrigerante utilizado, mantendo-se a perda de carga e a diferença média logarítmica de temperatura para valores fixos de vazão mássica e a quantidade total de calor trocada. Na elaboração da análise ilustrada na Fig. 7, assumiu-se escoamento laminar totalmente desenvolvido para a obtenção das razões entre comprimentos de canais L2/L1, número de canais, n2/n1, e o volume interno total, V2/V1.

Segundo a Fig. 7, para condições similares de perda de carga e diferença média logarítmica de temperatura, reduzindo-se o diâmetro do canal, a metade de seu comprimento, o volume interno do trocador e, consequentemente, o inventário de refrigerante são reduzidos a ¼ de seus valores iniciais enquanto o número de canais é multiplicado por 4. Cenário semelhante ocorre no caso de escoamento turbulento monofásico, condensação e evaporação no interior de tubos, uma vez que o coeficiente de transferência de calor também se eleva em tais condições com o decréscimo do do diâmetro do tubo, conforme ilustrado na Fig. 8 , para a evaporação no interior de tubos. Nela são comparados resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor em um tubo de 2,3 mm obtidos por Tibiriçá e Ribatski (2009) e resultados para um tubo de diâmetro de 10mm levantados a partir da correlação de Liu e Winterton (1991).

Na Fig. 8, G é a velocidade mássica dada pela razão entre a vazão mássica e a área da seção transversal do tubo.

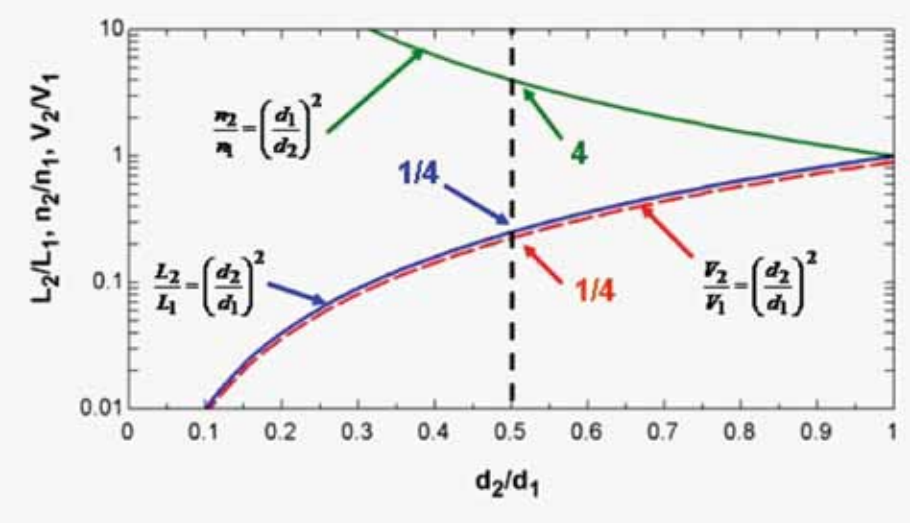



**Figura 7** – Variação do comprimento do tubo, número de tubos e volume interno do trocador com o decréscimo do diâmetro do tubo para escoamento monofásico laminar e condições fixas de quantidade de calor trocada, vazão mássica, perda de carga e diferença média logarítmica de temperaturas.



# 4 Conclusões

A partir da discussão apresentada neste artigo, é possível formular as seguintes conclusões:

i. Vazamentos de refrigerante são inevitáveis. Desta forma, projetistas e usuários não podem confiar na capacidade de construção de sistemas completamente estanques.

ii. Reduções de vazamentos em termos absolutos e relativos, neste caso, dadas em porcentagem do inventário total de refrigerante, são obtidas por intermédio da utilização de sistemas com inventário reduzido de refrigerante.

iii. O uso de sistemas com resfriamento secundário (ou indireto) permite reduções drásticas do inventário de refrigerante.

iv. Na maioria dos sistemas, o inventário de refrigerante concentra-se nos trocadores de calor e, assim, estes são os equipamentos principais a ser "engenhados" com o objetivo de redução do inventário de refrigerante.

v. Cargas de refrigerante reduzidas permitem reduzir o custo inicial e operacional da planta de refrigeração, além de reduzir riscos associados a vazamentos, impactando positivamente também custos com pessoal de manutenção. Tal redução de riscos permite ainda a expansão do uso de sistemas usando refrigerantes tóxicos ou inflamáveis como a amônia e hidrocarbonetos.

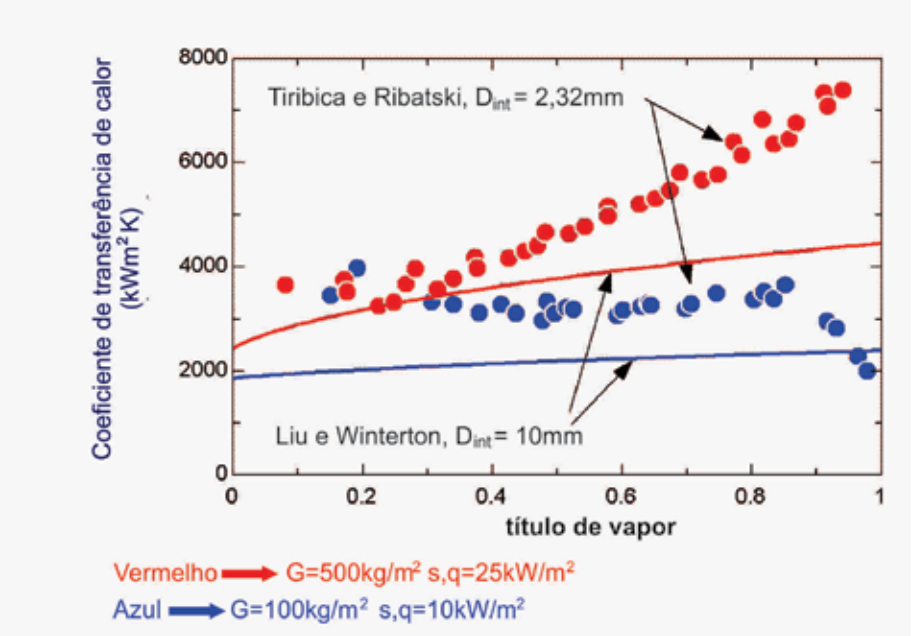



**Figura 8** – Comparação entre coeficientes de transferência de calor durante a evaporação convectiva no interior de macro e microcanais, R134a e Tsat=22 °C.

vi. Para ser competitivo, do ponto de vista ambiental, sistemas com inventário reduzido de refrigerante devem apresentar uma eficiência energética similar aos sistemas tradicionais. Efeitos indiretos, relativos ao consumo de energia e ao impacto de sua geração, e efeitos diretos relativos a vazamento de refrigerantes devem ser minimizados.

vii. Evaporadores do tipo película descendente proporcionam elevados coeficientes de transferência de calor em condições de perdas de cargas reduzidas. Adicionalmente, essa tecnologia permite reduzir o inventário de refrigerante em cerca de uma ordem de magnitude quando comparado aos trocadores inundados, mantendo a capacidade de refrigeração.

viii. Trocadores de calor baseados em microcanais e apropriadamente projetados permitem a redução substancial do inventário de refrigerante mantendo a potência de bombeamento e o calor dissipado.

# 5 Agradecimento

O autor agradece ao suporte financeiro proporcionado pela FAPESP (Fundação de Auxílio a Pesquisa do Estado de São Paulo) durante a elaboração deste artigo por meio do auxílio com números de contratos 05/60031-0 e 06/52089-1.

# 6 Referências



Ayub, Z. **"Current and future prospects of enhanced heat transfer in ammonia systems"**, Int. J. Refrigeration, vol. 31, pp. 652-657, 2008.

Bellas, I. and Tassou, S.A. **"Present and future applications of ice slurries"**, Int. J. Refrigeration, vol. 28, pp. 115–121, 2005.

Gonzalez Garcia J.M., Saiz Jabardo J.M. and Stoecker W.F. **"Falling film ammonia evaporators"**, ACRC Technical Report, TR-33, University of Illinois, Urbana, 1992.

Hinde, D., Zha, S. and Lan, L. **"Carbon dioxide in North American Supermarkets"**, ASHRAE Journal, vol. 51, pp. 18-26, 2009.

Larkin, A. and Davies, K. **"Natural refrigerants: The Solution"**, Greenpeace, http://www.greenpeace.org/usa/assets/binaries/hfc-solutions-fact-sheet, 2009.

Little Inc., A.D. **"Global comparative analysis of HFC and alternative technologies for refrigeration, air conditioning, foam, solvent, aerosol propellant, and fire protection applications"**, report for The Alliance for Responsible Atmospheric Policy, Cambridge, MA, Reference 75966, http://www.arap.org/adlittle/HFCstudy3-22JD.pdf, 2002.

Liu, Z. and Winterton R.H.S., **"A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli based on a nucleate pool boiling equation"**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34, pp. 2759–2766, 1991.

Lyle O. **"The efficient use of steam"**, London: H.M. Stationery Office; 1947.

Palm, B. **"Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant"**, Applied Thermal Eng., vol. 27. pp.1693-1701, 2007.

Ribatski, G. and Thome, J.R. **"A visual study of R134a falling film evaporation on enhanced and plain tubes"**, in: Proc. 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion, Xi'an, China, 2005.

Ribatski, G., **"Falling film evaporation on horizontal and enhanced tubes"**, in: 7th ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Florianópolis, Brazil, 2009.

Ribatski, G., Cabezas-Gómez, L., Navarro H.A. and Saiz-Jabardo, J.M. **"The advantages of evaporation in micro-scale channels to cool microeletronic devices"**, RETERM-Thermal Engineering, vol. 6, pp. 34-39, 2007.

Saiz-Jabardo, J.M. **"Performance analysis of falling film evaporators (in portuguese)"**, Report to The National Council for Scientific and Technological Development of Brazil (CNPq), 1996.

Schwartz, W. and Harnisch, J. **"Establishing leakage rates of mobile air conditioners"**, prepared for the European Commission (DG Environment), http://www.oekorecherche.de/english/berichte/volltext/leakage_rates.pdf, 2003.

Tibiriçá, C.B. and Ribatski, G., **"An experimental study on micro-scale flow boiling heat transfer"**, in: 7th ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Florianópolis, Brazil, 2009

# Novas Tendências da Utilização de Fluidos Secundários em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar

**Dr. JOSÉ ALBERTO R. PARISE**
Engenheiro Mecânico
Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
parise@puc-rio.br



## RESUMO

O presente trabalho discorre sobre a utilização de fluidos secundários em sistemas de refrigeração, caracterizados por uma considerável redução na carga de refrigerante, se comparados com sistemas tradicionais de expansão direta. Tal característica ressalta seu potencial de menor impacto ambiental. São apresentados os critérios básicos para escolha de fluidos secundários. São mostrados, em seguida, os fluidos secundários mais comumente utilizados. São também apresentadas algumas soluções inovadoras como pasta de gelo e $CO_2$.

# 1 Introdução

Sistemas de refrigeração empregando fluidos secundários (também chamados de sistemas de refrigeração indireta) têm, como principal característica, a considerável redução da carga de refrigerante.

A figura 1 apresenta, esquematicamente, um sistema de refrigeração direto em comparação com um operando com fluido secundário. No sistema de expansão direta, o refrigerante é levado até o ponto de aplicação de carga térmica, o que significa, em supermercados, por exemplo, longas linhas de líquido. Esta situação representa, em termos práticos, maior probabilidade de vazamentos e uma contribuição significativa (superando os 50%) para a carga total de refrigerante. Tal contribuição pode ser quantificada pela equação abaixo:

$$m_{ref} = \rho_l \frac{\pi D^2}{4} L \qquad (1)$$



onde $m_{ref}$ é a massa de refrigerante na linha de líquido, $\rho_l$ a densidade (massa específica) do refrigerante líquido e $D$ e $L$ são o diâmetro e comprimento da linha de líquido, respectivamente.

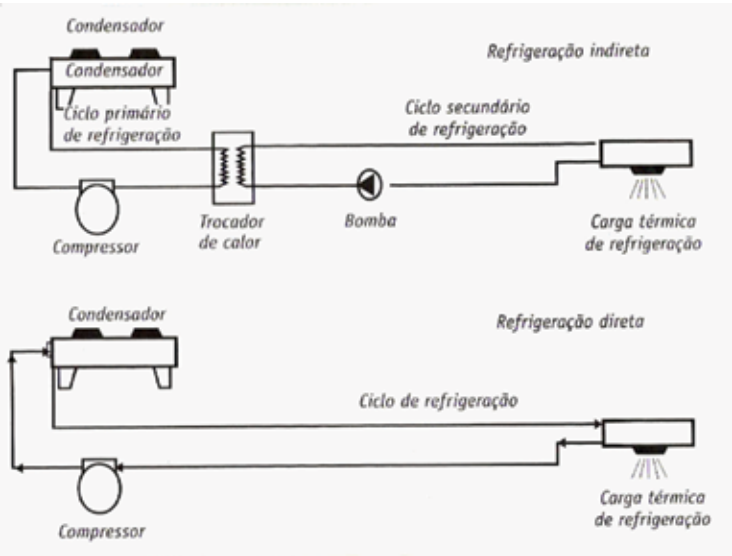



**Figura 1** – Esquemas de: (a) Refrigeração com fluido secundário; (b) Refrigeração direta (Pruzaesky et al., 2008).

Por outro lado, com a utilização de um fluido secundário, figura 1, o calor é retirado do ponto de carga térmica por meio de um fluido térmico, isto é, com a função de transferir calor de um ponto a outro. Geralmente é empregado na fase líquida. A linha de fluido frio, ligando o sistema de refrigeração ao ponto de carga térmica que, no sistema de refrigeração direta, era preenchida pelo próprio refrigerante, passa a conter o fluido secundário, trazendo vantagens que serão comentadas mais adiante.

Do ponto de vista de equipamentos básicos, ao sistema de refrigeração com fluido secundário acrescenta-se uma bomba de circulação de fluido secundário e um trocador de calor intermediário, que passa a ter a função de evaporador (Kazachki e Hinde, 2006).

Fluidos secundários são também empregados em sistemas com termoacumulação, com melhor aproveitamento energético em situações de cargas térmicas variáveis ou tarifas diferenciadas (ASHRAE, 2006; Pruzaesky et al., 2008).

Como principais vantagens de sistemas operando com fluidos secundários (Melinder, 1997; Wang et al., 2010), com relação a um sistema de expansão direta, de capacidade equivalente, podem-se citar:

1) Considerável redução da carga de refrigerante (em até 85%);
2) Operação com sistemas de refrigeração mais compactos;
3) Limitam-se as instalações com refrigerante à "casa de máquinas", uma medida conveniente quando do uso de refrigerantes ditos "naturais", eventualmente tóxicos ($NH_3$) ou inflamáveis (R290);
4) Menor impacto ambiental direto (por vazamento para o meio ambiente), em função da menor carga de refrigerante;
5) Circuito de refrigeração simplificado, o que implica menos vazamentos, menor carga de refrigerante e menores custos de manutenção;
6) Temperatura de resfriamento mais estável, em função da presença de um segundo circuito térmico.

Por outro lado, podem-se enumerar as seguintes desvantagens (Wang et al., 2010):

1) Expectativa de maior custo, em função de equipamentos adicionais (bomba de circulação e trocador de calor), contrabalançada pelo fato de o fluido secundário acomodar tubulações de plástico, menos custosas que as de cobre, e a redução da carga de refrigerante representar uma contribuição menor ao custo inicial (Wang et al., 2010);

2) A introdução de mais um trocador de calor, entre o sistema de refrigeração e o ponto de carga térmica, implica uma maior diferença de temperatura o que, em princípio, resultaria em um maior consumo de energia. Entretanto, dependendo de condições específicas de operação e das características do sistema, a introdução de um circuito secundário pode até resultar em redução no consumo de energia.

3) A operação de sistemas com baixas temperaturas, notadamente abaixo de zero, requer a utilização de soluções com baixo ponto de fusão. Pode ocorrer que tais soluções resultem em elevação de custos e em problemas de corrosão.

# 2 Quesitos para a escolha de fluidos secundários



As demandas para um sistema de refrigeração operando com fluido secundário poderiam ser resumidas como a seguir:

1) Transporte de grande potência de refrigeração com fluxo volumétrico reduzido;

2) Operação com pequenas diferenças de temperatura nos trocadores de calor, isto é, operação com altos coeficientes de transferência de calor no lado do fluido secundário;

3) Operação com baixa potência de bombeamento.

Em vista do acima exposto, é de se esperar que um fluido secundário apresente as seguintes características básicas:

1) Capacidade de transporte de grande potência de refrigeração com vazão volumétrica reduzida, conforme observado na equação abaixo, para um fluido secundário monofásico:

$$\dot{Q} = (\rho \cdot c_p)\dot{V}\Delta T \qquad (2)$$

onde $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor, $\rho$ e $c_p$ são a densidade (massa específica) e o calor específico do fluido, respectivamente, $\dot{V}$ é a vazão volumétrica e $\Delta T$, a diferença de temperaturas ao longo do circuito secundário. Quanto maior for o produto $(\rho \cdot c_p)$, denominado de capacidade térmica volumétrica por Melinder (1997), maior será a capacidade de transferência de frio do fluido secundário para uma mesma diferença de temperatura e vazão volumétrica.

2) Capacidade para operar com pequenas diferenças de temperatura em trocadores de calor, de forma a minimizar o incremento na diferença global de temperatura entre o sistema de refrigeração e o ponto de carga térmica. Para tal, o fluido secundário deverá apresentar altos coeficientes de transferência de calor. Se o escoamento no trocador de calor for turbulento, o coeficiente de troca, mediante o número de Nusselt (equação de Dittus-Boelter), será dado por:

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (3)$$

em que os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl são definidos em função de propriedades do fluido (condutividade térmica, $k$, viscosidade cinemática $\nu$, viscosidade dinâmica, $\mu$, densidade $\rho$, e calor específico $c_p$), de características geométricas e de operação do trocador de calor (diâmetro hidráulico, $d$, e velocidade do fluido, $w$).

Com as devidas substituições, o coeficiente de troca de calor para escoamento turbulento, $h_{turb}$, pode então, ser explicitado por:

$$h_{turb} = 0.023 \cdot k^{2/3} (\rho \cdot c_p)^{1/3} \nu^{(1/3-0.8)} \frac{w^{0.8}}{d^{0.2}} \qquad (4)$$

Isolando, na equação (4), os parâmetros inerentes ao trocador de calor, independentes do fluido utilizado, $d$ e $w$, Melinder (1997) identificou o parâmetro que definiu como fator de transferência de calor para escoamento turbulento, $F_{turb}$:

$$F_{turb} = k^{2/3} (\rho \cdot c_p)^{1/3} \nu^{(1/3-0.8)} \qquad (5)$$

Definido exclusivamente em termos das propriedades termofísicas do fluido, o fator de transferência de calor atua como um indicador da capacidade de troca de calor do fluido. Método análogo pode ser empregado para a determinação de uma expressão para o fator de transferência de calor em escoamento laminar.

3) Capacidade de propiciar bombeamento com baixa potência. A potência de bombeamento, $\dot{W}$, será consumida para superar a perda de carga decorrente da circulação do fluido no circuito secundário $\Delta P$.

$$\dot{W} = \frac{\Delta P\, w\, A_t}{\eta_b} \qquad (6)$$

na qual $A_t$ é a área da seção transversal da tubulação do circuito secundário, e $\eta_b$ é a eficiência global da bomba. Assumindo que $w$, $A_t$ e $\eta_b$ se mantenham constantes, independentemente do fluido

empregado, a comparação entre diferentes fluidos secundários resume-se à queda de pressão no circuito, $\Delta P$.

$$\Delta P = f \rho \, w^2 \frac{L}{d} \qquad (7)$$

Melinder (1997), aproximando o fator de atrito, $f$, para:

$$f \cong \frac{0.092}{\mathrm{Re}^{0.2}} \qquad (8)$$

e substituindo na equação da queda de pressão,

$$\Delta P = 0,092 \, \rho \nu^2 \frac{w^{1.8} L}{d^{1.2}} \qquad (9)$$

chegou ao fator de queda de pressão para escoamento turbulento, $F_{p,turb}$ :

$$F_{p,turb} = 0,092 \rho \nu^2 = 0,092 \frac{\mu^2}{\rho} \qquad (10)$$

Altos valores do fator de queda de pressão incorrerão em maiores potências de bombeamento e, consequentemente, maior consumo energético do sistema como um todo.

4) Finalmente, se o objetivo for a operação do fluido secundário na fase líquida, a temperatura do ponto de solidificação deverá, obviamente, estar abaixo da temperatura de operação.

Do acima exposto, conclui-se que altos valores para o calor específico, para a densidade e para a condutividade térmica, assim como uma viscosidade não elevada à temperatura de operação, são características desejáveis para o fluido secundário, no que diz respeito a propriedades termofísicas. Além disto, o fluido deve apresentar temperatura de solidificação compatível com a temperatura de operação.

No que tange a outras características, o fluido secundário deve ser mecânica e quimicamente estável (quanto a separação e a degradação), não tóxico, não inflamável, seguro para alimentos, compatível com materiais, adequado à regulamentação de segurança e de saúde, seguro ao manipular, disponível a preços razoáveis e deve apresentar baixo, ou nenhum, impacto ambiental (Wang et al., 2010).

# 3 Substâncias empregadas como fluido secundário monofásico

No que se refere a substâncias empregadas para fluidos secundários monofásicos, duas categorias se destacam: soluções aquosas e soluções não aquosas (Wang et al., 2010).

## 3.1 Soluções Aquosas

Principalmente com o intuito de baixar o ponto de fusão do fluido secundário, as seguintes substâncias são adicionadas à água para formar soluções aquosas (Melinder, 1997): etileno glicol, propileno glicol, etanol, metanol, amônia, glicerina, carbonato de potássio, cloreto de potássio, cloreto de cálcio, cloreto de magnésio e acetato de potássio, entre outros.

Melinder (1997) procedeu a estudo detalhado de diversas soluções aquosas para amplas faixas de concentração em massa e temperatura. Diversos parâmetros relevantes foram levantados. Obviamente, todas essas soluções apresentaram ponto de congelamento, à pressão atmosférica, inferior ao da água. No que diz respeito à capacidade térmica volumétrica, $\rho c_p$ , e aos fatores de transferência de calor e de queda de pressão para escoamento turbulento, $F_{turb}$ e $F_{p,turb}$ respectivamente, a água mostrou-se sempre superior às soluções aquosas, ao longo de todas as faixas de temperatura (acima do ponto de fusão) e de concentração.

Melinder (2008) concluiu não haver fluido secundário ideal para todas as aplicações. Em resumo, para temperaturas acima de 0 °C, água é a melhor solução. Para sistemas de média temperatura, a predominância, nos EUA, por exemplo, é da solução água-propileno glicol (Hinde et al., 2009).

## 3.2 Soluções Não-Aquosas como Fluido Secundário

Existe uma ampla gama de fluidos sintéticos que podem ser empregados como fluidos secundários monofásicos. Melinder (1999) comparou alguns desses fluidos (Dowtherm J, Syltherm XLT, Baysilone KT3, Gilotherm DI2 e HFE-7100) com soluções aquosas tradicionais. Numa faixa de

temperaturas entre -40 °C e 20 °C, a capacidade térmica volumétrica das soluções aquosas situou-se em torno de 3500 kJ/m³K, ao passo que os fluidos sintéticos não apresentaram capacidade térmica volumétrica superior a 1750 kJ/m³K.

Por outro lado, em trabalho mais recente, Zyhowski et al. (2002) compararam as características de queda de pressão e transferência de calor dos seguintes fluidos: HFC-245fa, mistura CFC-11/HCFC-141b, HFE-7100, Hycool 40, Pekasol 50, Tyfoxit (80/20), CFC-113 e soluções aquosas com 42% de Propileno Glicol e com 55% de Propileno Glicol. Um fator dimensional, relacionando o ganho no coeficiente de troca de calor com o aumento no fator de atrito, foi definido e levantado para os fluidos acima. Nos resultados apresentados por Zyhowski et al. (2002), o refrigerante HFC-245fa mostrou-se superior aos outros fluidos, ao longo de uma faixa de temperaturas entre -35 °C e 0 °C. Abaixo do HFC-245fa, os outros fluidos tiveram sua posição relativa variável, dependendo da faixa de temperatura.



## 3.3 Uso do Dióxido de Carbono como Fluido Secundário

O dióxido de carbono tem sido considerado por diversos autores como uma alternativa viável, não somente para atuar como refrigerante, em um sistema de refrigeração em cascata para baixas temperaturas, mas também como fluido secundário. Em seu favor, pode-se enumerar seu baixo custo, baixo impacto ambiental direto, a segurança local, baixa potência de bombeamento (zero, se termosifão for usado) e a baixa vazão mássica. Como principais desvantagens do dióxido de carbono, Wang et al. (2010) tem-se a baixa temperatura crítica, o que leva a altas pressões de operação e, também, a certa indisponibilidade de componentes para este fluido de trabalho.

Hinde et al. (2009) comparam três sistemas a serem utilizados em supermercados: (a) um sistema de expansão direta operando com HFC; (b) um sistema com $CO_2$ bifásico como fluido secundário; e (c) um sistema de expansão direta em cascata HFC/$CO_2$.

**Tabela 01** – Comparação entre sistemas de expansão direta, com fluido secundário e em cascata (Hinde et al., 2009).

| Tipo de Sistema | Carga de HFC | Emissão [ton $CO_2$ equivalente] | Consumo Energia [ton $CO_2$ equivalente] | TEWI |
|---|---|---|---|---|
| HFC Expansão Direta | Ref. | Ref. | Ref. | Ref. |
| $CO_2$ Fluido Secundário | -60% | -92% | -3,4% | -69% |
| Cascata HFC- $CO_2$ | -60% | -92% | -7,7% | -70% |

Tomando o sistema de HFC em expansão direta como referência, observa-se uma redução considerável da carga de refrigerante para os outros dois sistemas. Tal redução é explicada pelo fato de que, nos sistemas em cascata ou com fluido secundário, o refrigerante (HFC) fica restrito a uma área muito menor, não tendo que ser bombeado, em longas linhas de líquido, aos diversos pontos de aplicação de frio no supermercado. Com a redução do impacto ambiental direto (vazamento de HFC), a emissão de gases de efeito estufa (kg de $CO_2$ equivalente) reduz-se drasticamente, acima de 90%. Contribuindo ainda mais para este resultado positivo, foi computada redução no consumo de energia (3,4% e 7,7%, respectivamente), reduzindo o impacto ambiental indireto.



## 3.4 Uso da Pasta de Gelo

A pasta de gelo (ice slurry em inglês) pode ser definida como um refrigerante bifásico constituído por uma grande concentração de partículas de cristal de gelo (com diâmetros entre 0,1 e 1 mm) suspensas em uma solução de água e redutor do ponto de fusão. Pastas de gelo escoam e são bombeadas como se estivessem em fase líquida, enquanto que trocam calor latente, em função da presença dos cristais de gelo. A referida característica torna a pasta de gelo um potencial candidato para sua utilização como fluido secundário.

Em oposição, durante a operação de um sistema com pasta de gelo como fluido secundário, tem-se um maior consumo de energia, decorrente da produção contínua da pasta de gelo, visto que os cristais de gelo mudam de fase (sólido para líquido) ao trocar calor com o meio a ser refrigerado. De fato, de acordo com Kauffeld et al. (2005), a produção de pasta de gelo é a chave tecnológica em qualquer sistema que se utilize deste dispositivo. Ticona (2007), por exemplo, descreve o desenvolvimento e análise de um gerador de pasta de gelo. O evaporador do sistema de refrigeração produz a pasta de gelo, que é removida (para bombeamento pelo circuito secundário) por meios mecânicos (raspagem de superfície).

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre sistemas de refrigeração operando com fluido secundário monofásico tradicional e com pasta de gelo (Egolf e Kauffeld, 2005). Devido à sua característica de transporte de calor latente, pode-se inferir (Pruzaesky et al., 2008) que a capacidade térmica volumétrica da pasta de gelo é significativamente maior que a de um fluido de trabalho monofásico, tendo Egolf e Kauffeld (2005) a estimado em oito vezes maior. A maior capacidade térmica volumétrica resulta, Tabela 2, em tubulações de menor diâmetro e instalações requerendo menor potência de bombeamento.

**Tabela 02–** Comparação entre sistemas de refrigeração com fluido secundário monofásico tradicional (tomado como referência) e com pasta de gelo (Egolf e Kauffeld, 2005).

| Característica | Fluido Secundário Monofásico Tradicional | Pasta de Gelo |
|---|---|---|
| Capacidade Térmica Volumétrica | 1 | 8 |
| Diâmetro da Tubulação | 1 | 0,5 |
| Consumo da bomba de circulação | 1 | 1/8 |
| Coeficiente de película nos trocadores de calor | 1 | 1,5 - 2 |



Wang et al. (2010) apresentam, em sua revisão bibliográfica, um resumo de casos com aplicações de pasta de gelo.

# 4 Conclusões

A utilização de sistemas de refrigeração com fluido secundário resulta, pela redução significativa da carga de refrigerante, em uma operação com menor impacto ambiental. Da mesma forma, para a aplicação de refrigerantes naturais inflamáveis, de baixo impacto ambiental, porém com o risco da inflamabilidade, a utilização de um circuito secundário, visando a redução da carga de refrigerante, impõe-se como uma solução praticamente mandatória.

As desvantagens relacionadas à utilização de fluidos secundários concentram-se em um eventual maior consumo de energia, decorrente da introdução de uma bomba de circulação e de um trocador de calor intermediário e, em um maior custo inicial, como apresenta a Tabela 3 (Ballot-Miguet et al., 2008).

**Tabela 03–** Comparação de custos, de investimento e operacional, entre sistemas de refrigeração, (Ballot-Miguet et al., 2008). (A) corresponde a menor custo e (D) corresponde a maior custo.

| Tipo de Planta | Custo de Investimento | Custo Operacional |
|---|---|---|
| R22 Expansão Direta | A | A |
| Pasta de Gelo como Fluido Secundário (-35°C) | D | B |
| Fluido Secundário Monofásico | B | A |
| $CO_2$ Bifásico como Fluido Secundário | C | A |

Há, portanto, um grande potencial de desenvolvimento nestes sistemas, no que diz respeito a novas tecnologias que incluirão: novos fluidos, sistemas bifásicos, controles inteligentes, novas geometrias de trocadores de calor, entre outros.



# 5 Agradecimento

O autor agradece ao CNPq, à FAPERJ, FINEP e CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório de Refrigeração e Condicionamento de Ar da PUC-Rio.

# 6 Referências

ASHRAE, ASHRAE **Handbook – Refrigeration**, Atlanta, EUA, 2006.

Ballot-Miguet, B., Lafargue, A., Rached, W., Ice slurry at -35°C :**Energy efficiency and comparison with other refrigerating systems**, 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Dinamarca, 2008.

Egolf, P.W., Kaufeld, M., **From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications**, International Journal of Refrigeration, vol 28, pp. 4-12, janeiro 2005.

Hinde, D., Zha, S., Lan, L., **Carbon dioxide in North American supermarkets**, ASHRAE Journal, pp. 18-26, fevereiro 2009.

Kauffeld, M., Kawaji, M., Egolf, P.W., **Handbook on Ice Slurries – Fundamentals and Engineering**, International Institute of Refrigeration, Paris, França, 2005.

Kazachki, G.S., Hinde, D.K., **Secondary coolant systems for supermarkets**, ASHRAE Journal, pp. 34-46, setembro 2006.

Kruse, H., **Refrigerant use in Europe**, ASHRAE Journal, pp. 16-24, setembro 2000.

Melinder, Å, **Choice of liquid secondary refrigerant as we enter the 3rd millenium**, 20th International Congress of refrigeration, IIR/IIF, Sydney, Australia, 1999.

Melinder, Å, **General properties and characteristics of aqueous solutions used in indirect systems**, 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Copenhagen, Dinamarca, 2008.

Melinder, Å., **Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, Tables and diagrams for the refrigeration industry, International Institute of Refrigeration**, Paris, 1997.

Pruzaesky, F.C., Ticona, E.M., Braga, S.L., Parise, J.A.R., **Pasta de gelo e nanofluidos em sistemas de refrigeração**, Climatização e Refrigeração, pp. 47-60, agosto 2008.

Ticona, E.M., **Determinação experimental das características de transferência de calor de um gerador de pasta de gelo**, Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2007.

Wang, K., Eisele, Y.H., Hwang, Y., Radermacher, R., **Review of secondary loop refrigeration systems**, International Journal of Refrigeration, vol. 33, issue 2, pp. 212-234, março 2010.

Zyhowski, G.J., Spatz, M.W., Yana Motta, S.F., **An Overview of the properties and applications of HFC-245fa**, International Purdue Refrigeration Conference, Purdue University, West Lafayette, EUA, paper R7-1, julho 2002.

# Medidas para a Redução da Carga de Refrigerante em Sistemas de Refrigeração e de Condicionamento de Ar

**Dr. JOSÉ ALBERTO R. PARISE**
Engenheiro Mecânico
Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
parise@puc-rio.br



## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é apresentar as medidas mais comumente adotadas para a redução da carga de refrigerante. Uma revisão bibliográfica é apresentada. Relaciona-se, em primeiro lugar, a carga de refrigerante ao impacto ambiental direto (vazamentos) e indireto (eficiência energética) do sistema de refrigeração ou de condicionamento de ar. Na segunda parte, descrevem-se as medidas mais eficazes na redução da carga de refrigerante, a saber: arquitetura do sistema, escolha de refrigerante, dimensionamento da linha de líquido e do reservatório de líquido, tipo de trocador de calor empregado, tipo de dispositivo de expansão e escolha do compressor.

# 1 Introdução – Justificativa para a Redução da Carga de Refrigerante

Em primeiro lugar, cabe relacionar a redução de carga de refrigerante a um menor impacto ambiental em sistemas de refrigeração e de climatização. Os refrigerantes atualmente empregados ainda apresentam impacto ambiental relacionado ao aquecimento global. O refrigerante R22 e seus substitutos, as misturas não azeotrópicas, tais como o R404A ou R404C, entre outros, ainda apresentam índice GWP (Global Warming Potential – Potencial de Aquecimento Global) incompatível com os níveis esperados para os próximos anos. Nestes casos, de sistemas de refrigeração operando com tais refrigerantes, e considerando que apresentarão um nível de vazamento ao longo de sua operação, a redução da carga de refrigerante significará uma redução na emissão direta (por vazamentos) de gases de efeito estufa. Há, também, a possibilidade da utilização de fluidos naturais, em substituição aos sintéticos, uma escolha que tem recebido crescente apoio entre governos e formuladores de políticas ambientais. Nestes casos, há situações de uso de refrigerantes inflamáveis (por exemplo, R290), quando a redução de carga de refrigerante se impõe como uma questão de segurança.



Finalmente, cabe mencionar que, junto à redução da carga de refrigerante, fazem-se necessários esforços para a redução de vazamentos. O impacto ambiental direto do refrigerante ocorrerá, tão somente, quando de seu vazamento para o meio ambiente. Sistemas perfeitamente herméticos, seguidos de manutenção rigorosa com estrito esquema de coleta de refrigerante, não apresentariam, em princípio, impacto ambiental direto. Portanto, pode-se afirmar que, no que diz respeito a impacto ambiental direto, medidas voltadas à redução de carga de refrigerante e à redução de vazamentos, caminham juntas.

A figura 1 mostra uma estimativa da percentagem da carga de refrigerante em sistemas de refrigeração que vaza anualmente em supermercados suecos (Palm, 2007). São apresentados diversos casos, com diferentes refrigerantes, apontando todos para uma redução nos vazamentos ao longo dos últimos anos, resultado de um maior cuidado com a manutenção e operação de tais sistemas. Observa-se uma tendência geral para uma redução gradual, estabilizando-se em torno de 10% anuais, aproximadamente, mas nada que indique que se tornará nula em anos futuros. Em vista dos níveis tecnológicos de montagem e manutenção específicos de cada país, acredita-se que esses valores de percentagem de vazamento anual sejam mais elevados para o caso do Brasil.

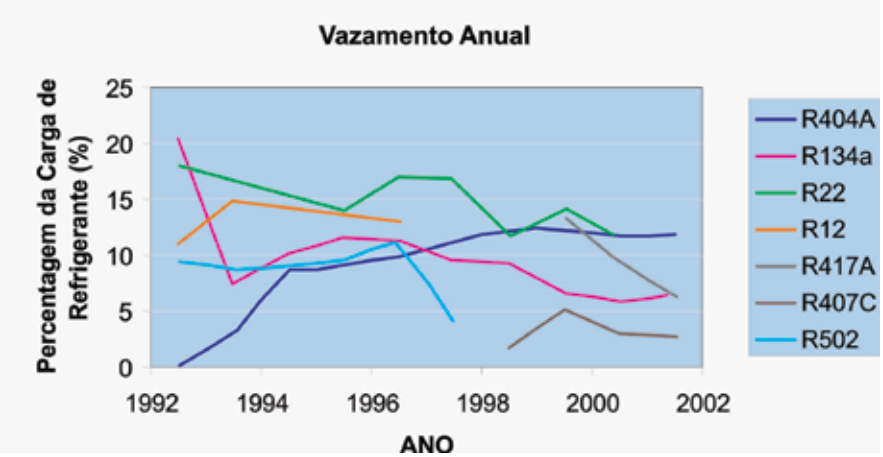



**Figura 1** – Evolução do percentual de vazamentos de refrigerantes em supermercados suecos (Palm, 2007).

A figura 2 apresenta uma estimativa de vazamento de refrigerante em sistemas condicionadores de ar automotivos para diversos fabricantes (não identificados). Por sua natureza de operação, com elevado índice de vibração e impacto, tais sistemas apresentam valor elevado, em média, em torno de 50-60 gramas anuais.



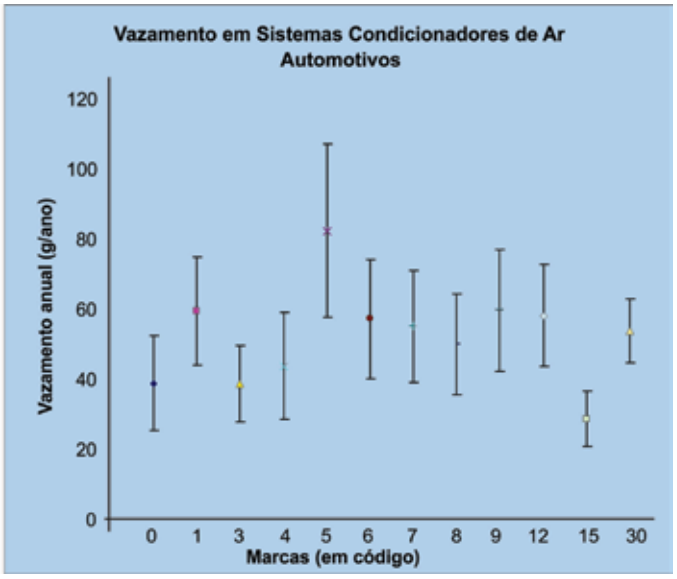



**Figura 2** – Vazamentos em sistemas condicionadores de ar automotivos para diferentes fabricantes (Palm, 2007).

Poggi et al. (2008) realizaram um trabalho de levantamento, identificando a carga específica de refrigerante (massa de refrigerante por capacidade frigorífica, kg/kW) para os sistemas mais usuais de refrigeração e condicionamento de ar. Observa-se, neste trabalho, como o tipo de trocadores de calor e a arquitetura do sistema empregados afetam o valor final da carga de refrigerante. Entretanto, qualquer que seja a carga específica de refrigerante de determinado sistema de refrigeração, esta representará impacto ambiental somente quando o refrigerante chegar à atmosfera. Portanto, carga de refrigerante e vazamentos estão associados no que diz respeito ao impacto ambiental direto de sistema de refrigeração e de condicionamento de ar. Não sem motivo, um dos primeiros encontros internacionais a respeito foi denominado "Zero Leakage - Minimum Charge" (Vazamento Nulo, Mínima Carga – ver, por exemplo, Barnes e Bullard, 2002).

# 2 Influência da Carga de Refrigerante no Desempenho do Sistema



Engenheiros e técnicos envolvidos na manutenção de sistemas de refrigeração e de condicionamento de ar sabem, por experiência própria, que o desempenho de determinado sistema é dependente do inventário de refrigerante. Alguns exemplos desta dependência são apresentados nas figuras 3 a 5.

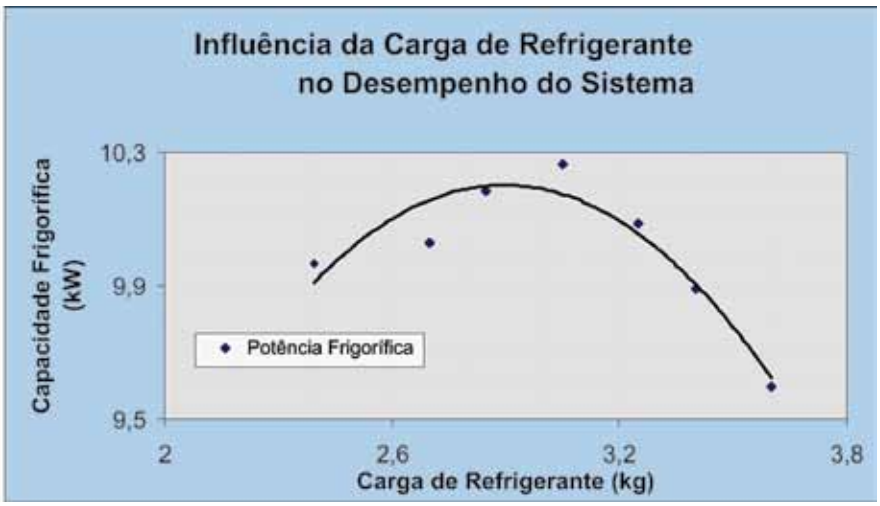



**Figura 3** – Influência da carga de refrigerante no desempenho de um "chiller" operando com R407C e trocadores de placas (Colasson et al., 2001).

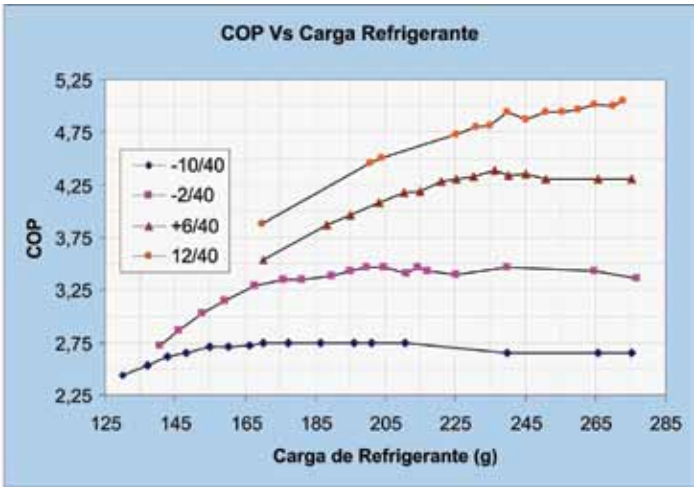



**Figura 4** – Influência da carga de refrigerante no desempenho de uma bomba de calor de pequena capacidade com trocadores de calor de microcanais (Primal et al., 2002).

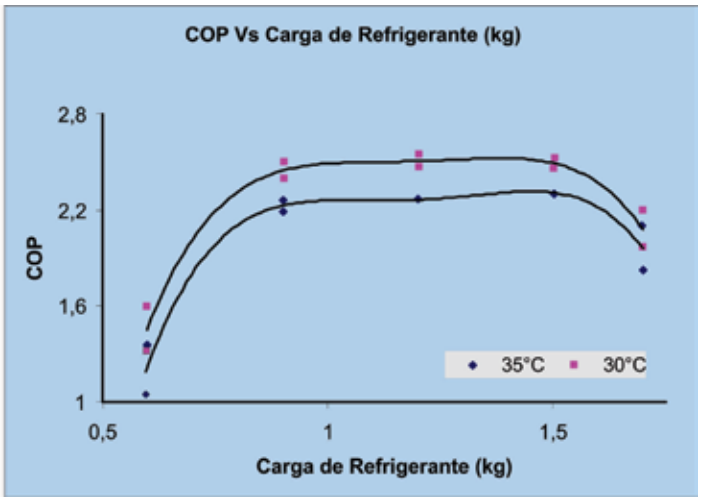



**Figura 5** – Influência da carga de refrigerante em um sistema de refrigeração (Grace et al., 2005).

Conclui-se que existe um ponto, ou região, de carga de refrigerante que resulta em COP máximo. Consequentemente, menores cargas de refrigerante não representrão, necessariamente, maiores valores de COP. Há que se avaliar conjuntamente os efeitos diretos (carga de refrigerante que, eventualmente, traduz-se em vazamento) e indiretos (consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa para a sua produção), para buscar o ponto ótimo, de menor impacto ambiental, de determinado refrigerante em determinado sistema. Observa-se, contudo, nas figuras 3 a 5, que existe uma região em torno da carga nominal ótima de refrigerante para a qual a variação do COP é pequena. Este patamar é observado

em todos os três exemplos. Na busca de uma redução da carga de refrigerante poder-se-ía definir a carga mínima de refrigerante abaixo da qual a eficiência energética do sistema (COP) começa a cair significativamente, resultando em um acréscimo na emissão de gases de efeito estufa por via indireta. Cumpre lembrar que, para cada sistema, esse patamar de desempenho ótimo varia com as condições de operação. Tal característica aponta para a necessidade de sistemas de controle mais complexos que incluiriam, por exemplo, válvula de expansão eletrônica ou compressor de rotação variável.

# 3 Medidas para a Redução da Carga de Refrigerante

Descrevem-se, nesta seção, as medidas adotadas no projeto e operação do sistema que resultam numa redução da carga de refrigerante. Os itens aqui comentados baseiam-se em lista apresentada por Poggi et al. (2008).



## 3.1 Arquitetura do Sistema

A arquitetura definida para um sistema de refrigeração tem influência marcante na carga final de refrigerante. O emprego de um sistema com fluido secundário, em oposição ao de expansão direta, figura 6, pode resultar em redução da carga de refrigerante da ordem de 60% (Poggi et al., 2008) ou até mais, com percentagens de 85% (Palm, 2007).

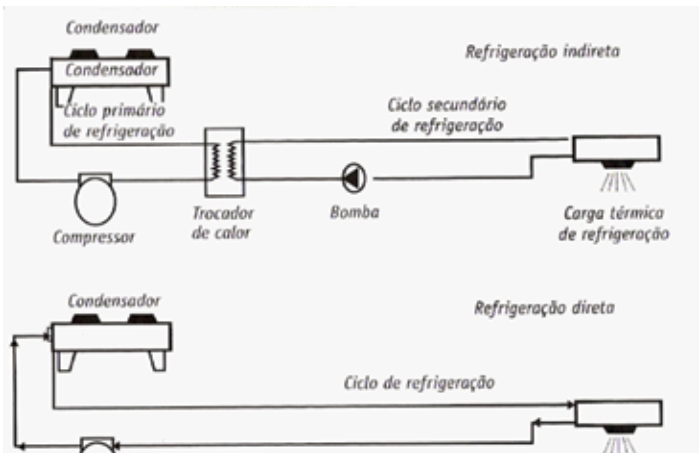



**Figura 6** – Sistema de refrigeração por fluido secundário e por expansão direta (Pruzaesky et al., 2009).

A presença de um trocador de calor intermediário introduz uma diferença adicional de temperatura, resultando, em princípio, em menor temperatura de evaporação e, consequentemente, um menor COP, da ordem de 5% a menos, conforme Poggi et al. (2008). Outros fatores, todavia, podem contribuir para reduções menores do COP, ou até mesmo para incrementos. Tais fatores dependem do projeto específico de cada instalação.

Outro exemplo advém da escolha do tipo de evaporador para "chillers". De acordo com Poggi et al. (2008), a escolha de um evaporador de expansão direta, se comparado com um do tipo "inundado", pode resultar em redução de 50% da carga de refrigerante para uma mesma capacidade frigorífica.

## 3.2 Escolha do Refrigerante

A tabela 1 resume, dentre as propriedades termodinâmicas do fluido refrigerante, duas das mais determinantes no valor final da carga de refrigerante, a saber: densidade (massa específica) do líquido e calor latente de vaporização. A primeira delas indicará a quantidade de refrigerante líquido no condensador, evaporador, linha de líquido e reservatório. Por outro lado, o calor latente de vaporização relacionará a massa necessária de refrigerante para determinada carga frigorífica. Na tabela 1, para efeito de comparação, são apresentados os valores destas duas propriedades, tabelados, em condições de referência para alguns dos refrigerantes atuais, naturais e sintéticos.

**Tabela 1** – Propriedades mais relevantes à carga de refrigerante (Poggi et al., 2008).

| Propriedade | HCFC22 | HC290 (Propano) | R717 (amônia) | HFC134a | R410A | R404A | R407C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Densidade do Líquido a 20°C (kg/m³) | 1413,0 | 582,0 | 682,0 | 1206,0 | 1085,0 | 1066,0 | 1159,0 |
| Calor Latente de Vaporização a 1 atm (kJ/kg) | 233,9 | 413,9 | 1371,2 | 215,9 | 271,7 | 200,5 | 248,2 |

## 3.3 Linha de Líquido – Contribuição e Dimensionamento

A linha líquido, de alta pressão, pode conter parcela significativa da carga total de refrigerante em um sistema de refrigeração, notadamente o de expansão direta, se comparado, conforme já visto, ao sistema de fluido secundário. A tabela 2 apresenta um exemplo da distribuição de carga de refrigerante por componente para um sistema de expansão direta, de capacidade nominal de 300 kW, operando com uma carga total de 273 kg, entre as temperaturas de -10 °C e 35 °C (Macchi et al., 1999). Observa-se que praticamente 90% da carga de refrigerante estão distribuídos entre a linha de líquido, condensador e evaporador, sendo que, na linha de líquido, concentra-se mais da metade (60%) da carga total.

**Tabela 2** – Distribuição da carga de refrigerante por componentes – Sistema de expansão direta, 300 kW, -10 °C/35 °C e carga total de 273 kg (Macchi et al., 1999).

| Componente | Distribuição da Carga de Refrigerante |
|---|---|
| Linha de Líquido, alta pressão | 60% |
| Condesador | 20% |
| Evaporador | 9% |
| Reservatório, alta pressão | 7% |
| Linha de sucção | 4% |
| Compressor | 1% |



A figura 7 mostra o resultado de estudo de Azzouz (2003) avaliando o efeito do diâmetro da linha de líquido no impacto ambiental de um sistema de refrigeração de 5 kW, com evaporador de expansão direta operando entre -28 °C e 40 °C com uma vazão mássica de 50 g/s. O impacto ambiental foi mensurado pelo indicador TEWI (Total Equivalent Warming Impact), que computa o impacto ambiental total, tanto pelo efeito direto (vazamentos) como pelo indireto (consumo de energia). É dado por:

TEWI = {emissão direta} + {emissão indireta} = **GWP x M + a x B**

onde:

**GWP** (Global Warming Potential) é o indicador do impacto ambiental direto do refrigerante, relativo ao $CO_2$ (GWP[$CO_2$] = 1);

**M** é a massa total de refrigerante liberado (kg);

**a** é a quantidade de $CO_2$ liberado na geração local de eletricidade ($kgCO_2/kWh$), por exemplo, para geração hidroelétrica, a = 0, e, para geração termoelétrica, a = 0.8 $kgCO_2/kWh$; e

**B** é o consumo de energia do sistema ao longo de sua vida útil (kWh).

Observa-se, na figura 7, a existência de um diâmetro da linha de líquido de mínimo impacto ambiental. Maiores diâmetros implicarão uma maior quantidade de refrigerante líquido, contribuindo para um maior efeito direto. Por outro lado, diâmetros menores, para a mesma vazão mássica, resultarão em maior perda de carga na linha de líquido e, consequentemente, em queda na eficiência energética do sistema, aumentando o efeito indireto do TEWI. Note-se, na figura 7, que o diâmetro ótimo obtido por Azzouz (2003) resultou menor que o diâmetro usualmente empregado na instalação, apontando para o potencial existente de redução de impacto ambiental atuando-se no dimensionamento na linha de líquido.

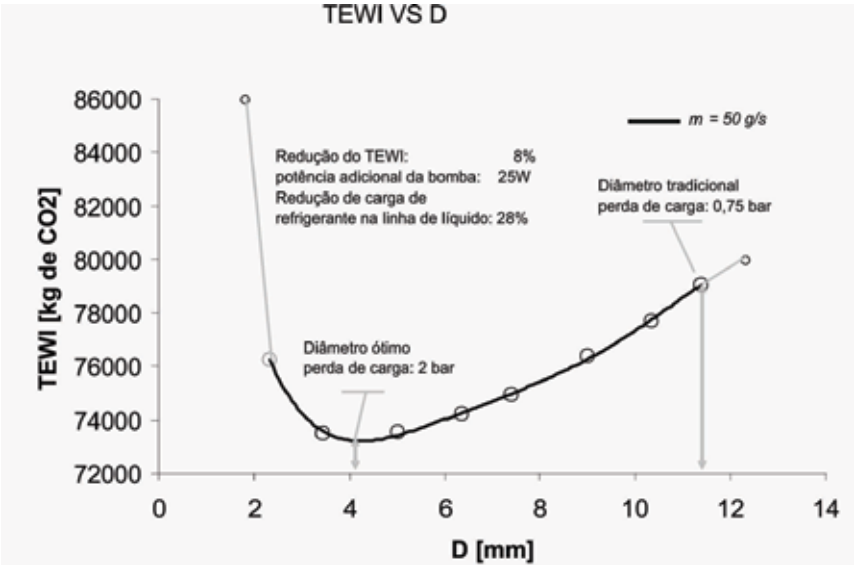



**Figura 7** – Influência da linha de líquido no impacto ambiental de um sistema com evaporador de expansão direta, 5 kW de capacidade, operando entre -28 °C e 40 °C, com vazão mássica de 50 g/s (Azzouz, 2003).

## 3.4 Dimensionamento dos Reservatórios de Líquido

Reservatórios de líquido podem conter parcela relevante da carga total de refrigerante. Uma busca no ASHRAE Handbook (ASHRAE, 2006) aponta para os seguintes critérios de dimensionamento de reservatórios de líquido:

a) oferecer capacidade de armazenamento de refrigerante;

b) lidar com excesso de refrigerante no sistema;

c) acomodar flutuação da carga térmica no evaporador;

d) ter capacidade de armazenar refrigerante em operação modulada do evaporador.

Observa-se que nenhum dos critérios acima limita um eventual sobre-dimensionamento do reservatório, com consequente aumento da carga de refrigerante. Identifica-se nesse aspecto (dimensionamento de reservatório) uma possível necessidade de mudança de paradigma.

## 3.5 Tipo de Trocador de Calor

A tabela 3 apresenta um resumo levantado por Poggi (2008) com valores típicos da carga específica de refrigerante (g/kW) para diversos tipos de trocadores de calor. Fica evidente a necessidade de se evitar trocadores de calor com refrigerante escoando por fora dos tubos, ou canais, como no evaporador inundado. No outro extremo, observa-se um potencial de redução da carga específica de refrigerante com a utilização de trocadores compactos, notadamente os de placa ou, mais recentemente, trocadores de micro e minicanais.



**Tabela 3** – Carga Específica de Refrigerante para diversos tipos de Trocadores de Calor (Poggi, 2008).

| | Diâmetro Hidráulico (mm) | Carga Específica (g/kW) Evaporador | Carga Específica (g/kW) Condensador |
|---|---|---|---|
| Trocadores de Microcanais | 0,7 | Ref. | 5-10 |
| Trocadores de Calor Compactos | 1,1 | | 15 |
| | 1,49 | | 25 |
| Trocadores de Placas | 2 | 17 | 19 |
| Refrigerante escoando no interior dos tubos | 3 | 12,5 | 25 |
| | 5 | 22 | 47 |
| | 7 | 28 | 61 |
| Evaporadores Inundados | 9 | 1000 | 650 |
| | 11 | 600 | 400 |

Por exemplo, Hrnjak e Litch (2008) demonstraram a possibilidade de minimização da carga de refrigerante em condensadores e "chillers" operando com amônia com o emprego de trocadores de calor de microcanais. É vasta a literatura a respeito e ampla a possibilidade de estudo e desenvolvimento nesta área.

## 3.6 Tipo de Dispositivo de Expansão

Conforme já mencionado, a utilização de sistemas de controle mais sofisticados pode resultar em menor carga de refrigerante e maior eficiência energética. Por exemplo, Choi e Kim (2004) efetuaram estudo comparativo para uma bomba de calor água-água empregando, como dispositivos de expansão, um tubo capilar e uma válvula de expansão eletrônica. A figura 8 mostra os resultados desta comparação. O uso da válvula de expansão eletrônica permitiu a operação do sistema com desvios negativos da carga plena recomendada mais acentuados, sem que tal resultasse em redução significativa da capacidade frigorífica.

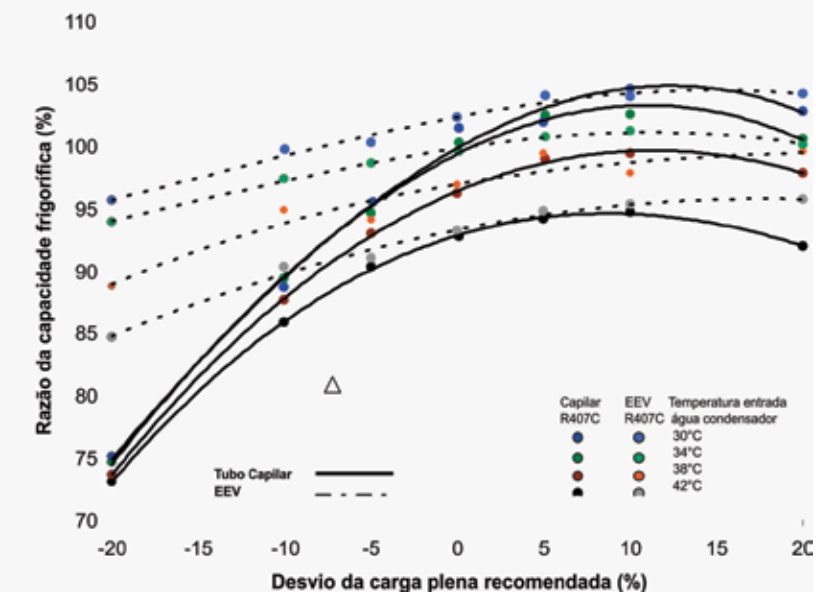



**Figura 8** – Razão de capacidade frigorífica versus desvio de carga plena recomendada para operação com tubo capilar e com válvula de expansão eletrônica EEV (Compressor: scroll, 3,5 kW; Condensador: tubo duplo, L=4787mm, diâmetros 9.52mm/15.88mm; Evaporador: tubo duplo; L=3564mm; diâmetros 9.52mm/15.88mm; Refrigerante: R407C; Dispositivo de expansão: 1) Tubo capilar: 900mm X 1,2 mm; 2) Válvula de expansão eletrônica: EEV Saginomiya Co., Model No. DKV-14D13, Step (pulse) 0–480, Diâmetro do orifício=1,4 mm, comprimento=3mm; (Choi e Kim, 2004).

## 3.7 Escolha do Compressor

Muito embora a contribuição do compressor para a carga total de refrigerante seja pequena, conforme tabela 2, vale lembrar que esta contribuição, em seguida a medidas adotadas quanto a trocadores de calor, reservatório e linha de líquido, poderá se tornar relevante. Como é sabido, o compressor retém refrigerante diluído no óleo lubrificante.

# 4 Conclusões

Apresentou-se, no presente trabalho, uma breve justificativa para a redução da carga de refrigerante com vistas à mitigação do impacto ambiental de sistemas de refrigeração e de condicionamento de ar. Da revisão das possíveis medidas direcionadas à redução da carga de refrigerante, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- faz-se necessária a redução de vazamentos;
- simples medidas de engenharia, tais como alteração da arquitetura do sistema ou redimensionamento da linha de líquido e de reservatório, podem resultar em substancial redução da carga de refrigerante;
- finalmente, novas tecnologias se fazem presentes na minimização do impacto ambiental, direto e indireto. Elas são: controle de capacidade do compressor, válvula de expansão eletrônica, trocadores de calor de micro canais, novos refrigerantes com GWP muito baixo, naturais e sintéticos, entre outros.



# 5 Agradecimento

O autor agradece ao CNPq, CAPES, FINEP e FAPERJ pelo apoio concedido ao Laboratório de Refrigeração e Condicionamento de Ar da PUC-Rio.

# 6 Referências


ASHRAE, **Handbook, Refrigeration**, Chapter 2, 2006.

Azzouz, K., 2003. **Conception optimisée d'un système frigorifique à TEWI minimum équipé d´échangeurs à mini-canaux.** Rapport de stage de DEA. Cemagref, Antony, 39 pp. + annexes, não publicado.

Barnes, P. R., Bullard, C. W., **Charge minimization in a compact chiller, Zero Leakage** – Minimum Charge Conference, 26-28 August 2002, Stockholm (Sweden), pp. 141-150.

Choi J., Kim Y. , **Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions,** International Journal of Refrigeration 27 (2004) 378–384.

Colasson, S., Mercier, P., Lebouche, M., 2001. **Effect of the R-407C charge on the behaviour of a liquid chiller with plate heat exchangers.** In: Commissions B1, B2 with E1, E2. IIF–IIR, Dubrovnik, Croácia, 11 pp. (conference RQO-18).

Grace, I.N., Datta, D., Tassou, S.A., 2005. **Sensitivity of refrigeration system performance to charge levels and parameters for on-line leak detection.** Applied Thermal Engineering 25 (4), 557–566.

Hrnjak, P., Litch, A.D., **Microchannel heat exchangers for charge minimization in air-cooled ammonia condensers and chillers**, International Journal of Refrigeration, vol. 31, Issue 4, June 2008, Pages 658-668.

Macchi, H., Guilpart, J., Mahungu, A., 1999. **Reduction de charge: comparaison entre detente directe, recirculation et refrigeration indirecte.** Journée Française du Froid – Interclima, 47–63.

Palm, B., **Refrigeration systems with minimum charge of refrigerant.** Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1693–1701.

Poggi, F., Macchi-Tejeda, H., Leducq, D., Bontemps, A., 2008. **Refrigerant charge in refrigerating systems and strategies of charge reduction,** International Journal of Refrigeration, n 31, pp. 353-370.

Primal, W. D. F., Palm, B., Granryd, E., Samoteeva, O., Anderson, K., 2002. **The behaviour of small capacity (5 kW) heat pump with micro-channelled flat tube heat exchangers.** In: Zero Leakage – Minimum Charge. CZ9, Stockholm, Sweden, pp. 179–186.

Pruzaesky, F. C., Ticona, E. M., Braga, S. L., Parise, J. A. R., **Pasta de gelo e nanofluidos em sistemas de refrigeração, Climatização e Refrigeração**, pp. 47-60, agosto de 2008.

# Segurança em Sistemas de Refrigeração

**MAURÍCIO ANTÔNIO DA COSTA**
Engenheiro Mecânico
COSTA & RIGA Eng Proc.Term. Ltda
costa.riga@uol.com.br



## RESUMO

Neste trabalho apresentamos de forma resumida diversos fatores que levam os usuários, com algumas exceções, a adotarem procedimentos incorretos em suas instalações frigoríficas devido à falta de conhecimento ou carência de normas e ou regulamentações do setor. O MMA (Ministério do Meio Ambiente), juntamente com ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração Ar Condicionado e Ventilação), IBF (Instituto Brasileiro do Frio) e outras instituições deste ramo, através dos diversos associados, vem trabalhando incansavelmente para aprimorar e melhorar esta condição. Ano após ano, elaboram-se novas normas, cartilhas, publicações, treinamentos, entre outros.. Todo este trabalho baseia-se nas necessidades do nosso mercado, bem como de experiências internacionais, por meio de normas já existentes.

Destacamos ainda a necessidade de haver uma seqüência lógica entre o projeto e a conclusão do empreendimento para que o mesmo seja mantido de forma adequada e principalmente de maneira segura.

Damos destaque à parte de manutenção, como forma de aprimorar o funcionamento das plantas, bem como melhorar as performances produtivas visando à eficiência operacional, patrimonial, do meio ambiente e financeira, sendo que estas se bem feitas conseguem reduzir os custos produtivos, alcançando-se a competividade, inclusive a internacional.

# 1 Introdução

Independentemente do tipo de fluido frigorífico a ser utilizado, toda instalação deve ser projetada, construída e operada, tomando-se cuidados especiais contra riscos acidentais, principalmente em relação a vazamentos.

Diversos são os fatores que levam os usuários, com algumas exceções, a adotarem procedimentos incorretos em suas instalações. Os principais são: a falta de planejamento e da execução de projetos detalhados; carência de pessoal específico e habilitado para a operacionalidade dos sistemas e equipamentos; orçamentos reduzidos fazendo com que o custo seja fator preponderante na tomada de decisão, e esquecendo-se do fator mais importante que é a qualidade do operacional, ou seja, da segurança.

Isso, em parte, deve-se ao fato de o Brasil não possuir restrições em forma de leis que obriguem as instalações a cumprir, item por item, procedimentos básicos de segurança, englobando sistemas, equipamentos, qualificação de pessoal, entre outros que são ligados diretamente ao bom e correto funcionamento das instalações.



Com a intenção de melhorar esse cenário, há cinco anos foi criado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) um Comitê Brasileiro denominado CB-55. Este nasceu com a intenção de elaborar normas relacionadas aos sistemas e equipamentos que funcionem no Brasil para todas as etapas da Cadeia do Frio. Contido nesta, encontra-se o subcomitê CB-55.001.04, denominado de "Segurança em Sistemas de Refrigeração", no qual a ABRAVA / IBF (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento / Instituto Brasileiro do Frio) estão responsáveis pela sua elaboração. Neste trabalho, o principal tópico é estabelecer normas e padrões que garantam resultados, visando proteger o meio ambiente e os consumidores em geral, além de valorizar a boa engenharia.

Essa nova norma já possui numeração "NBR 16069 – Segurança em Sistemas de Refrigeração" e está em vigor desde 20 de maio de 2010. É um excelente material para todos os envolvidos no setor de HVAC-R e para a segurança ambiental.

## Desenvolvimento

O Brasil é um país extraordinário. Tem excelente tecnologia na área do frio, principalmente quando o consumidor sabe especificar, discutir e exigir qualidade. Ainda, há consumidores que pretendem instalar ou modificar um sistema e, na maioria das vezes, negociam diretamente com o fabricante de equipamentos. Por outro lado, deixam sob responsabilidade desse fabricante

decisões ou critérios que, por vezes, são mais abrangentes. Um problema de cultura, formação, preço ou de pressões que podem levar a situações desagradáveis e, algumas vezes, irreversíveis. Por que não consultar um projetista, ou um instalador, ou mesmo o responsável pela obra? Por que não procurar a formação do quadro de colaboradores, a reciclagem, o comissionamento etc.? Sem esses critérios, sabe-se perfeitamente o que acontece quando a empresa fornecedora e o comprador apenas se preocupam com "custo da obra".

No momento do projeto, reforma ou operação desses sistemas devem ser considerados, além do investimento, os custos envolvidos, de forma a manter as temperaturas adequadas. Outro ponto importante é o consumo e o contrato de fornecimento de energia. Com sua contínua elevação, há grandes oportunidades para sua conservação e recuperação, levando-se em conta, permanentemente, a preocupação com o meio ambiente. A manutenção e segurança têm destacado papel para a continuidade da excelência dessas operações e não podem ser menosprezadas.

Apesar da tecnologia disponível, há que se disseminar as informações, haja vista a carência de recursos humanos devidamente preparados, assim como a necessidade de se uniformizar procedimentos que vão desde o projeto até a operação, tanto do lado do fornecedor quanto do usuário.



A refrigeração é essencial à vida humana e deve ser tratada como um dos bens de primeira necessidade. Também, o crescimento explosivo de centros urbanos e seu abastecimento, a adição de valor agregado ou novas formas de preparo, o comércio internacional, tanto na exportação quanto na importação, exige a utilização de uma eficiente Cadeia do Frio, onde o controle de certos parâmetros como a temperatura é vital. O tão propalado custo do frio, incluindo-se aí o investimento e operação, é absolutamente diluído na necessária relação entre custo e benefício.

Outrossim, as instalações mais antigas e obsoletas devem passar por reformas profundas ou por substituição pura e simples dos sistemas frigoríficos visando atender às normas embasadas em acordos ambientais. É evidente que sempre haverá certo canibalismo, além da tentativa de venda de sistemas já usados, muitas vezes obsoletos e sem obedecer aos critérios das normas, algo com que o possível comprador deverá tomar seus cuidados.

Dentro desse contexto, é importante abordar, além do projeto, a manutenção, como um fator de grande importância para o funcionamento e a manutenção da segurança dos sistemas frigoríficos.

Executar e gerenciar o trabalho de manutenção não é uma tarefa fácil, tampouco simples. Exige-se uma grande dedicação da parte de todos, além do espírito de equipe, o que é fundamental para o sucesso de rotina tão complexa da engenheira de campo.

Todo esforço que é direcionado para uma boa manutenção deve ser fruto de um trabalho baseado na sequência natural da boa engenharia, como descrito:

- **Haver um bom projeto**, que será denominado de Etapa Inicial.

  Para que se consiga uma condição aceitável de manutenção das futuras instalações, deve-se prever, na fase de projeto, a elaboração de um "layout" bem definido, demonstrando claramente a posição e os tipos de equipamentos; desenvolver memoriais de cálculos para conhecimento das características e dimensionamento dos equipamentos a serem instalados; certificar-se de que existe rastreabilidade da confecção até a instalação deles; vislumbrar a necessidade de espaço para retirada ou abertura de equipamentos; preocupar-se com a necessidade de utilização de ferramentas adequadas para manutenções mais específicas (que normalmente são esquecidas no projeto original), incluindo neste item talhas, roletes, escovas para limpeza de trocadores de calor, suportes para retirada de motores, pontos para drenagem de linhas / filtros, pontos de força, entre outras; também, prever a necessidade de acesso seguro aos equipamentos para manutenções e inspeções, instalação de plataformas de acesso, saída de emergência, disponibilidade de espaço para abertura de trocadores de calor/ retirada de motores, entre outros.

  Deve-se dar especial atenção às condições de operacionalidade a fim de que se obtenha uma operação eficiente dos equipamentos, ou seja, economia de energia. Outro aspecto que não deve ser negligenciado nesta etapa é a elaboração de um plano para as peças de reposição.

- **Montagem adequada** que contemple um correto planejamento, cronogramas, inspeções, acompanhamento das execuções dos serviços, relatórios diários, precauções com a segurança, limpeza, organização, entre outros. Esse trabalho de montagem deve focar a redução de futuros problemas tais como, corpos estranhos em tubulações, juntas mal soldadas, excesso de pressões, funcionamentos em vazio ou sobrecargas elétricas que possam danificar ou dificultar a operação das instalações, de forma a evitar a necessidade de manutenção necessária em curto espaço de tempo.

- **"Start-Up"** - é nesta fase que começam a surgir os problemas com a manutenção. Antes do funcionamento de uma instalação, independentemente de seu tamanho e

complexidade, alguns cuidados devem ser observados como a leitura de manuais de funcionamento das máquinas e instruções operacionais, limites de funcionamento com relação à pressão, estanqueidade das linhas, temperatura, amperagem, vibração, tensão de operação dos equipamentos; direção e fluxos dos fluidos em bombas e compressores; lubrificação; ruídos anormais e outras anomalias pertinentes a cada tipo de equipamento.

Quando não observados tais procedimentos, potencializa-se a chance de insucesso. Dependendo da complexidade do problema relevado, pode-se, em certos casos, tornar crônico o referido problema. Numa situação mais grave, pode haver uma parada prolongada ou geral da instalação.

Na maioria dos projetos, normalmente, não se acompanha esse planejamento inicial, o que significa um dispêndio financeiro a médio e longo prazo maior com a manutenção.

Outro problema muito comum de ser verificado é que, com o início do funcionamento e já concluído o "start-up", existe uma tendência muito forte ao "esquecimento" das instalações com relação às condições de funcionamento, principalmente nos primeiros meses, quando se imagina que o novo não precisa de cuidados, simplesmente por ser novo. Isso não é correto!

Somente como exemplo, sem considerar o mérito pessoal que a comparação poderia trazer, imagine um bebê recém-nascido sem os cuidados da mãe?! Seria trágico e, num caso extremo, sua morte seria certa e prematura!

Portanto, em uma nova instalação, deve-se ter os mesmos cuidados quando ela "nasce", idênticos ao de uma criança. Ainda, ao receber algumas "vacinas", esta não terá algumas doenças graves ou problemas de saúde no futuro. Pode-se, assim, imaginar que uma instalação bem projetada e adequadamente mantida poderá ter uma vida útil maior do que outra, de mesmo porte, que tenha desprezado os devidos cuidados. Esse é o motivo da abordagem neste artigo: o efeito da manutenção em instalações, inclusive para a segurança pessoal, patrimonial e ambiental.

## Categorias e conceitos

**Figura 1** – Categorias de Manutenção



Como demonstrado no diagrama da Figura 1, pode-se operacionalizar a manutenção com diferentes enfoques:

- **Corretiva** - Quebrou, conserte! Não há planejamento ou estrutura.
- **Preventiva** - Há planejamento e estruturação, adotando-se o critério da prevenção que leva a três vertentes, como se segue:

A manutenção **Corretiva** é aquela que está baseada na eliminação ou na correção de uma falha já declarada. Espera-se a quebra para depois consertar. Trata-se da manutenção puramente corretiva, somente executada após a manifestação da falha (a mais comum de se verificar no dia a dia das instalações).

O objetivo é restaurar a condição de normalidade com a máxima prioridade, principalmente nos casos de acidentes, quebras e danos imprevistos. Não há planejamento.

A manutenção **Preventiva** é aquela que está fundamentada na periodicidade de intervenções prefixadas, com o objetivo de evitar a ocorrência de falhas. É efetuada em intervalos de tempo predeterminados, números de operação, tempo de operação ou mediante critérios predefinidos quanto à condição das instalações e equipamentos.

**Figura 2** – Estrutura da Manutenção Preventiva

Em função de cada condição, existem as categorias da manutenção preventiva como se segue:

- **Programada**

Corresponde à manutenção preventiva efetuada independentemente da condição da máquina ou equipamento. Basicamente consiste em limpeza e serviços do tipo lubrificação, ajustes, aferições, inspeções, alterações de parâmetros, entre outros.

O objetivo da manutenção planejada é garantir as funções e performances, aplicadas predominantemente aos itens com vida útil bem definida. Dessa forma, há uma redução nas possibilidades de falhas e defeitos.

- **Preditiva**

Consiste em diagnosticar falhas e defeitos, por meio de análise instrumental ou sensorial para avaliar o estado de conservação, a condição de operacionalidade de máquinas / equipamentos, e definir quando se fará a intervenção de conservação e reparos. Seus objetivos são:

» Evitar intervenções desnecessárias;

» Prever as necessidades de intervenções e permitir o planejamento e programação das atividades de conservação;

» Por meio de históricos, atuar de forma assertiva, quando necessário

- **Baseada na Condição de Falhas ( B.C.F.)**

É a manutenção preditiva efetuada em resposta às condições das máquinas e equipamentos, originadas de:

» Diagnóstico

» Histórico de quebras

» Inspeções

» Indicadores de performance

Já os objetivos da Manutenção Baseada na Condição de Falhas são:



» Restaurar as funções e performance;

» Reduzir as possibilidades de falhas;

» Reduzir as futuras necessidades de manutenções;

» Aumentar o rendimento das máquinas;

» Melhorar continuamente;

» Diminuir os custos com a manutenção.

## Principais atividades da manutenção

Primeiramente, após a idealização da manutenção, deve-se ter em mente sempre a necessidade de haver pessoal qualificado para as manutenções das instalações. Em alguns casos adota-se o critério da contratação de empresas especializadas para referidos serviços (terceirização); em outros, há equipes próprias e, às vezes, a combinação destes. Não importa quem a faça, mas sim como é feita e de que forma é estruturada com relação à necessidade do quadro técnico.

Tal escolha deve ser baseada na qualificação das pessoas para desenvolver as seguintes atividades:

- **Inspeção**

Avaliação da condição por intermédio de recursos sensoriais ou equipamentos.

» **Monitoramento**

Determinação da condição pelas contínuas ou periódicas coletas e interpretações de dados, usando-se instrumentos específicos de medições e análise.

» **Reparos / Consertos**

Restauração de peças ou componentes com o objetivo de restabelecer ou chegar o mais próximo possível das condições originais.

» **Revisões**

Ampla restauração de conjuntos ou subconjuntos e até mesmo de máquina ou equipamento completo, com o propósito de trazer de volta os ajustes, as tolerâncias, os acabamentos de conformidade com seu estado original.

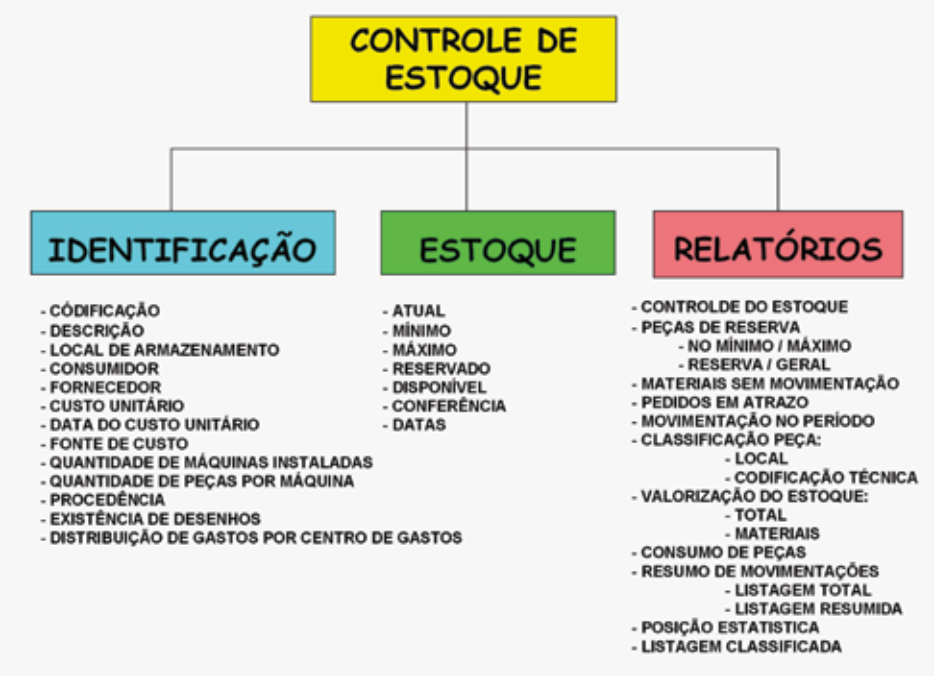


**Figura 3** – Controle de Estoque para Manutenção

## Organização da manutenção

- **Planejada**

Manutenção organizada e realizada de acordo com um plano predeterminado. O plano refere-se à intensidade, dosagem, frequência, duração das atividades de manutenção, bem como dos grupos profissionais envolvidos no desenvolvimento e execução dos trabalhos.

- **Não Planejada**

Manutenção realizada sem nenhum plano preestabelecido. Aplica-se em situações críticas e emergenciais típicas de manutenção corretiva, quando o objetivo é restaurar as funções e performance sem demora.



- **Seletividade**

Consiste na escolha correta e na dosagem adequada do tipo de manutenção mais apropriado para cada instalação ou equipamento, especialmente mediante avaliação dos riscos, consequências de falhas e dos custos de manutenção.

É também conhecida como Manutenção Produtiva Total ou da Qualidade Total, na qual as informações devem fluir do topo (gerência) para base (operadores, mantenedores, produtores e outros), respeitando-se as estratégias do negócio por intermédio de análise global da empresa, com relação ao mercado e instalações antes de se concentrar no próprio equipamento.

Tal avaliação é extremamente complexa, na qual se distinguem três categorias, definidas como níveis de importância, relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de Importância

| |
|---|
| **NÍVEL I = CONSEQUÊNCIA MAIOR** |
| Abrange as situações que implicam num impacto significativo nos negócios da empresa. |
| **NÍVEL II = CONSEQUÊNCIA MÉDIA** |
| Abrangem as situações que implicam num impacto moderado nos negócios da empresa, mas que não podem ser desprezados. |
| **NÍVEL III = CONSEQUÊNCIA MENOR** |
| Abrangem as situações em que os riscos e as consequências de falha não afetam os negócios da empresa, portanto são desprezíveis. |

Os riscos e consequências de falhas podem ser avaliados em termos de algumas variáveis, dependendo da empresa. Exemplos:

**a - Serviço ao Consumidor**

Avalia-se o impacto sobre os resultados, perda de oportunidades de negócios. Os riscos são particularmente elevados quando se opera com a capacidade máxima ou com abastecimento "just in time", sem estoque ou com baixos níveis de estocagem.

**b - Segurança**

Avaliação do impacto sobre vidas humanas, produtos alimentícios, meio ambiente, instalações, equipamentos (incluindo a própria edificação), resultado de explosões, contaminações, poluições severas, entre outras.

**c - Produção**

Avaliação do impacto sobre as perdas de materiais, produtos, embalagens, combustíveis, eletricidade, insumos como água, gás, óleo, produtos químicos, etc.; necessidade de retrabalhos, horas extras e outras variáveis.

**d - Instalações e Equipamentos**

Avaliação do impacto e danos nas instalações, máquinas e equipamentos, dos custos de reparos e de eventuais necessidades de substituições dispendiosas.

Note-se que as instalações com categoria Nível de Importância **I** devem ser identificadas pelos superiores, e o monitoramento do desempenho deve ser acompanhado com rigor.

Para a aplicação dos conceitos aqui demonstrados, exige-se **envolvimento** e **comprometimento de TODOS** os níveis hierárquicos da empresa, seja ela pequena, média ou grande. Geralmente existe um responsável técnico pela gestão, aplicação, controle e obtenção de resultados da manutenção baseada na seletividade. A estratégia desse sistema é maximizar o desempenho das instalações visando minimizar os custos totais com manutenção, em que um exemplo clássico é a operação ininterrupta. Não há como compensar a perda, portanto a manutenção corretiva deveria ser mínima (limitada às falhas aleatórias e imprevisíveis). Todo plano de manutenção deverá ser

estabelecido de forma preventiva / preditiva com planejamento / programação das intervenções, considerando-se sempre os limites de viabilidade econômica (não pecar por excessos ou omissões).

**Figura 4** – Dados para uma Ordem de Trabalho na Manutenção

O sucesso da seletividade encontra-se na escolha do tipo apropriado, na dosagem correta, na intensidade adequada de manutenção aplicada, fundamentada na expectativa de quebra ou probabilidade de falha e suas consequências (extensão e qualificação dos danos ou perdas).

## Quesitos da manutenção

1. **Que as instalações, máquinas e edifícios sejam:**
   - » Seguros para o pessoal, produto, meio ambiente e de acordo com as regulamentações oficiais do país, estado e cidade;
   - » Disponíveis com a devida flexibilidade, rapidez e agilidade para atender aos requisitos do mercado, sempre considerando os aspectos econômicos;
   - » Apropriados para garantir a qualidade do produto a custo competitivo.

2. **Que a manutenção preditiva por meio de ações pró-ativas permita:**
   - » Garantir funções de performances;
   - » Reduzir probabilidade de falhas;

» Reduzir a intensidade de intervenções de manutenção;

» Diagnosticar os problemas na sua forma precoce e eliminá-los o mais rápido possível, ou seja, cortar o mal pela raiz.

**3. Que no campo comportamental haja:**

» Verdadeira integração: operação + manutenção e administração;

» Envolvimento e comprometimento de todos com a manutenção;

» Evolução e crescimento profissional;

» Autorrealização e satisfação pessoal.

**4. Que haja minimização:**

» Dos trabalhos emergenciais;

» Dos custos totais de manutenção (custos da manutenção + custos de falhas/perdas);

» Das paradas técnicas de máquinas e equipamentos;

» Dos defeitos de fabricação;

» De retrabalho;

» Das perdas;

» Dos estoques;

» Dos índices de acidentes;

» Das reclamações dos clientes.

**5. Que haja maximização:**

» Da produtividade;

» Da qualidade;

» Da confiabilidade;

» Da vida útil das máquinas, equipamentos, peças, etc.

## Previsão financeira

Para se manter toda essa estrutura em níveis aceitáveis, do ponto de vista financeiro, também deverá ser estruturada uma provisão financeira - normalmente denominada de *budget*, e que haja um controle orçamentário dos gastos, um histórico. A Figura 5 resume sua estrutura.

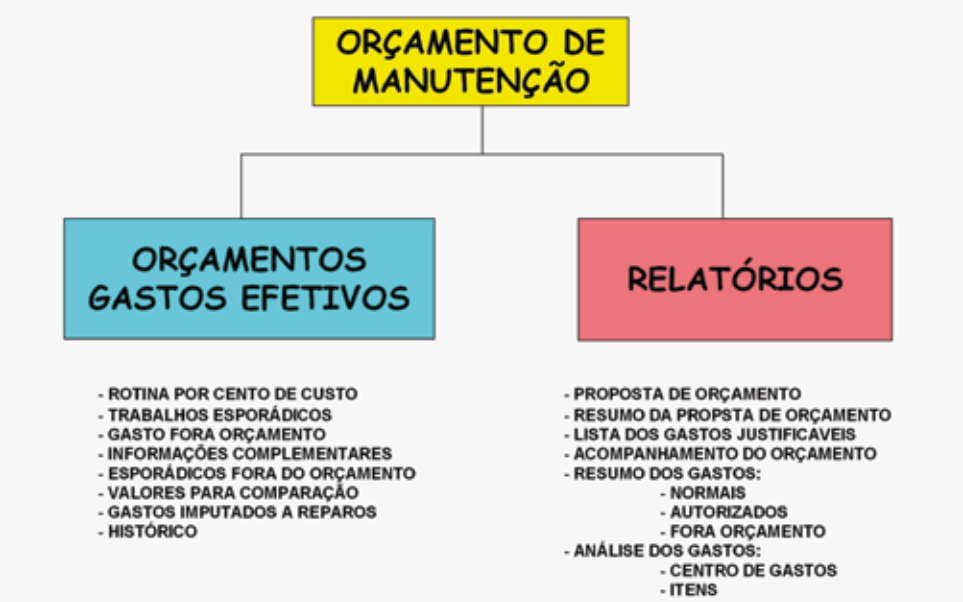



**Figura 5** – Montagem do Orçamento da Manutenção

Todas essas variáveis devem ser devidamente gerenciadas e fiscalizadas , com a intenção de se obter a "melhoria contínua" da manutenção, ou seja, minimizar custos aumentando-se a produtividade. Este trabalho de estruturação financeira deve ser considerado visando abranger todas as necessidades existentes, tanto no âmbito pessoal quanto no de materiais e peças de reposição, onde um exemplo é indicado na Figura 6, representativo do custo x benefício a ser empregado na manutenção.

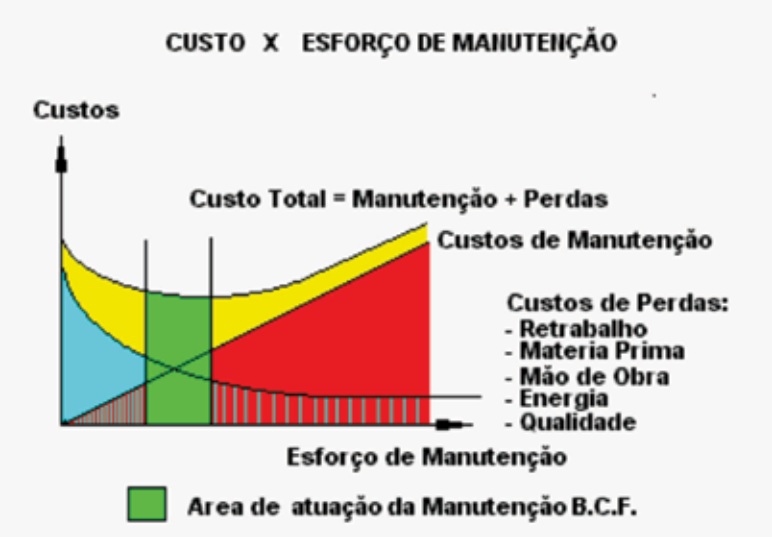



**Figura 6** – Relação Custo x Benefício na Manutenção



Com relação à organização dos custos, pode-se indicar que existem duas vertentes, a saber:

- Gastos com manutenção de rotina tais como: trocas de filtros, óleos, gaxetas, juntas, rolamentos, retentores (em peças móveis), entre outros. São aqueles que cobrem as despesas referentes aos trabalhos que se repetem mensal, trimestral, semestral ou anualmente, etc.
- Gastos esporádicos tais como: quebra de um eixo de bomba, quebra de uma engrenagem, perfuração de um trocador de calor, etc. São aqueles decorrentes de reparos que não se repetem ciclicamente.

Em face dos altos custos que uma boa manutenção requer com relação às verificações rotineiras, alguns critérios para minimizá-los, sem comprometer a qualidade dos serviços, podem ser aplicados para um bom funcionamento de uma instalação, desde que:

- Atendam as exigências operacionais de sua situação;
- Sejam seguras para as pessoas que estejam diretamente envolvidas, bem como ao meio ambiente;

- Cumpram as regulamentações oficiais (levando-se sempre em consideração os aspectos econômicos).

## Estratégias

Algumas estratégias devem ser incorporadas ao negócio, tais como:

- Garantia de que a manutenção seja parte integrante dos negócios da empresa e de sua estratégia;
- Direcionamento da estratégia da manutenção baseada na consequência da falha considerando-se seus riscos e custos, ou seja, o custo total influenciado pela manutenção;
- Captação profissional, por intermédio de treinamento e aprimoramento no processo de seleção e admissão de pessoal;
- Existência de pessoal atuante, envolvido e comprometido com as funções de manutenção em todos os seus níveis, num esforço comum e efetivo entre todos os departamentos existentes;
- Oferta de condições atrativas de trabalho, num clima de motivação;
- Adequação de equipamentos e ferramentas, bem como das máquinas e peças de reserva;
- Padronização de máquinas e equipamentos;
- Otimização entre:

» substituição ou reparos
» fabricação ou aquisição de peça nova
» peças originais ou peças do mercado local
» serviço próprio ou terceirizado

**Figura 7** – Organograma para os Indicadores

- Implementação de suporte informatizado para a gestão de:

» Peças de reserva;

» Manutenção preventiva ou preditiva;

» Ordens de trabalho;

» Controle dos gastos;

» Históricos de intervenções.

- Aperfeiçoamento constante

Finalmente, e de forma sucinta, pode-se apresentar a estrutura da manutenção como indicada na Tabela 2.

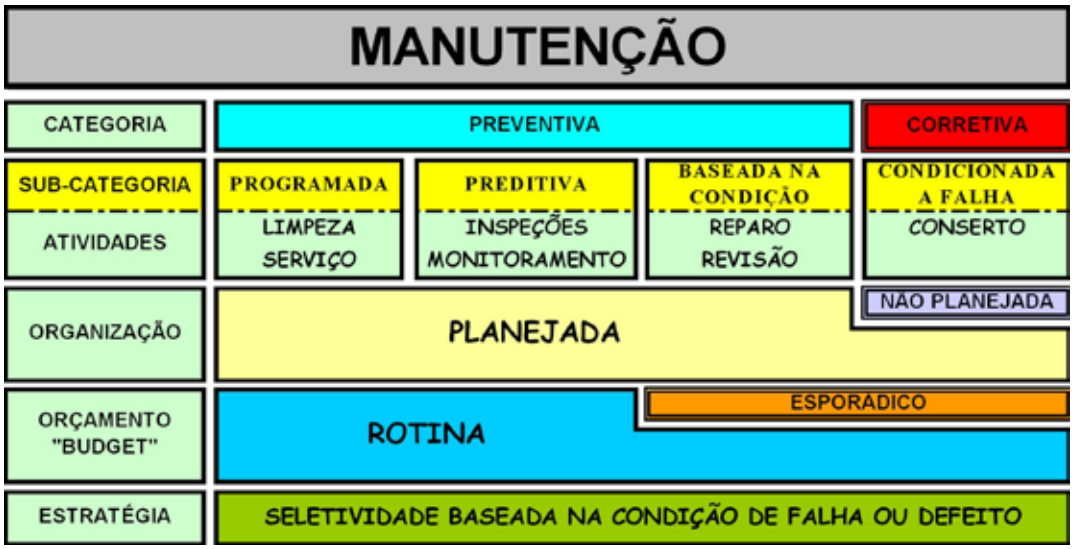



**Tabela 2** – Estrutura da Manutenção



# Conclusões

A maior dificuldade refere-se à cultura ou formação dos envolvidos na Cadeia do Frio, não importa o nível hierárquico. Basta citar um exemplo: em países com uma estrutura adequada, o registrador de temperatura é chamado de "cão de guarda". Aqui recebe o simpático codinome de "dedo duro", pois se sabe o que está errado e esse citado instrumento irá acusar as falhas. De outro lado, as informações, recomendações de projeto e correta operacionalidade estão disponíveis em vários seguimentos do mercado, inclusive por meio de Normas, além do uso de equipamentos apropriados, bem como de sistemas e da tecnologia. Não há dúvida de que os problemas de infraestrutura têm as mesmas dimensões deste extraordinário país, entretanto precisamos pensar diferente para que o meio ambiente não seja o maior prejudicado com tais situações.

Apresentamos todos esses instrumentos para que sejam executados na íntegra. Somente a título elucidativo, 60% do volume de gases vazados para a atmosfera são provenientes da falta de manutenção, por isso a extrema importância deste item neste contexto.

Outro ponto importante a ser ressaltado é que o setor de equipamentos tem oferecido sua contribuição por meio dos vários comitês da ABNT/ CB 55 (Comitê Brasileiro de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) mediante a participação dos vários fóruns de normalização

criado por iniciativa da ABRAVA e apoio de diferentes associações como o IBF, ABIAF, IBRAF, ANFIR, ABTF, etc. Com a participação efetiva de empresas, tanto usuárias quanto fabricantes, técnicos e especialistas interessados na área procuram, também, orientar de forma adequada o cliente final/usuário das instalações, com o objetivo de se obter a sua melhor relação custo/benefício. Criado há cinco anos, já preparou diferentes normas envolvendo expositores frigoríficos, carrocerias e equipamentos para transporte, trocadores de calor, compressores, monoblocos, ar-condicionado, isolamento térmico e câmaras, transporte de perecíveis e segurança para sistemas frigoríficos, para o meio ambiente na reciclagem de refrigerantes, entre outras. Tudo deveria ser considerado como uma atitude e não obrigatoriedade. Faço uma analogia ao cinto de segurança: há a imposição do uso sob pena de multas, apesar do comprovado papel ao salvar muitas vidas preciosas em acidentes.

Finalmente falta a fiscalização efetiva, presente e contínua. E não a conivência e/ou incompetência além da impunidade, quando este último item tem um fiel parceiro na burocracia ou nas leis, algumas vezes intencionalmente mal redigidas.

No mercado interno é importante ressaltar que o Código de Defesa do Consumidor (CDC) já começou a mostrar resultados, com o adquirente aprendendo a melhor selecionar suas necessidades, apesar do desconhecimento de seu poder de fogo associado a uma geral e incipiente cultura de direitos e deveres. Mas, como pode ser observada na mídia, a fase de apresentação já foi ultrapassada, e a tendência agora é de se tomar velocidade, o que pode levar qualquer elo dessa Cadeia a situações embaraçosas ou litigiosas. Além do mais, o referido código explicita que há uma responsabilidade solidária entre seus diferentes elos.

No final das contas, há que se pensar no retorno financeiro, alma de qualquer negócio e mola propulsora para futuros investimentos.

Há ainda normas e recomendações voltadas tanto para o equipamento quanto para os aspectos de segurança e higiênico-sanitários, que exigem adequado conhecimento. Com as recentes apresentações das normas "Transporte de Produtos Alimentícios Refrigerados", "Sistemas de Gestão da Segurança de Alimentos", "Expositores Frigoríficos", "Segurança em Sistemas Frigoríficos" – NBR 16069 etc., procurando uniformizar pontos conflitantes ou mesmo dispáres na atual legislação, deve-se entender sua aplicação e forma de medida ou acompanhamento, núcleo de tais normas.

# 6 Referências


ARIZA, Cláudio Fernandes. **Sistema de Administração para Manutenção Industrial**. São Paulo: Editora McGraw Hill do Brasil Ltda., 1978.

CLIFTON, R. C, **Principals of Planned Maintenance.** Londres: Editora Edward Arnold Publishers ltd., 1974.

FALCONI, Vicente Campo. **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia.** Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1994.

HIGGINS, Lindley R. **Maintenance Engineering Handbook.** 5a edição. New York: McGraw Hill Inc., 1995.

KELLY, A, HARRIS, M. J. **Administração da Manutenção Industrial.** Trad. Mário Amora Ramos. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 1978.

MIRSHAWKA, Victor. **Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos.** São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introdução ao TPM - Total Productive Maintenance.** Trad. Mário Nishimura. São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos, 1989.

TAVARES, Lourival Augusto. **Controle de Manutenção por Computador.** Rio de Janeiro: Editora Técnica Ltda., 1987.

MONCHY, François. **A Função Manutenção - Formação para a Gerência da Manutenção Industrial.** São Paulo: Editora Durban - Editora Brasileira Ltda. 1989.

COSTA, Mauricio **Revista ABRAVA** Publicação 214, de junho de 2004, páginas 52 a 57

# Substituição dos HCFC e os fluidos refrigerantes naturais: Cenário atual e tendências

**DR. ROBERTO DE AGUIAR PEIXOTO**
Engenheiro Naval
Instituto Mauá de Tecnologia
robertopeixoto@maua.br



## RESUMO

Desde o estabelecimento do Protocolo de Montreal, a indústria de refrigeração tem procurado substitutos para os refrigerantes CFCs e HCFCs e, mais recentemente, para os HFCs. Os hidrofluorcarbonos (HFCs) foram desenvolvidos nos anos 80 e 90 como refrigerantes alternativos aos CFCs e HCFCs. Os HFCs não contêm cloro e dessa forma não destroem a camada de ozônio, mas contribuem para o processo de aquecimento global. Os 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 Quioto . Os hidrocarbonetos, amônia, $CO_2$ 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 têm ajudado na consideração desses refrigerantes como alternativas aos HCFCs e HFCs e 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 papel importante no futuro como soluções técnicas em diversas aplicações.

# 1 Introdução

Refrigeração é a transferência de energia na forma de calor de uma região a uma temperatura mais baixa para uma região de temperatura mais alta. Equipamentos que produzem refrigeração são chamados de refrigeradores ou bombas de calor. Eles podem utilizar diversos ciclos termodinâmicos ou outros métodos, como por exemplo termoeletricidade ou termoacústica, para operar. A tecnologia mais largamente utilizada é a baseada no ciclo de compressão de vapor. Essa tecnologia é empregada na vasta maioria dos equipamentos de refrigeração e bombas de calor: desde um pequeno refrigerador doméstico a uma grande unidade resfriadora de líquidos ("chiller"). É utilizada em refrigeração de processos industriais ou em sistemas de ar condicionado de grandes edificações, em armazéns frigorificados, ar condicionado de janela, ar condicionado automotivo, entre outras aplicações. O fluido de trabalho dentro do ciclo de refrigeração é denominado de *refrigerante* e é selecionado com base nas suas propriedades termodinâmicas e outros critérios, tais como impacto ambiental, toxicidade, segurança, preço, etc. O papel do refrigerante é funcionar como um veículo de transporte de energia entre as regiões de baixa e alta temperatura.



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 usuários 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 tal quantia. Essa é uma das razões por que os impactos econômicos da eliminação de substâncias químicas refrigerantes (tal como CFCs e HCFCs no futuro previsível) foram e ainda são difíceis de calcular.

A primeira máquina de refrigeração a usar o princípio de compressão de vapor foi desenvolvida em 1834 e, no final de 1800, sistemas de refrigeração estavam sendo usados em fábricas de cervejas e câmaras frias para armazenamento. O projeto básico dos sistemas de refrigeração por compressor de vapor, usando ciclo fechado com um fluido de trabalho, constituído por um dos vários refrigerantes disponíveis, passando pelos processos termodinâmicos de evaporação, compressão, condensação e expansão, tem mudado pouco desde 1870. Sistemas atuais são mais eficientes, incluem características de segurança, estão disponíveis em tamanhos menores e exigem

investimentos comparativamente menores. A figura 1 apresenta um esquema básicos da tecnologia de refrigeração baseada no ciclo de compressão de vapor.

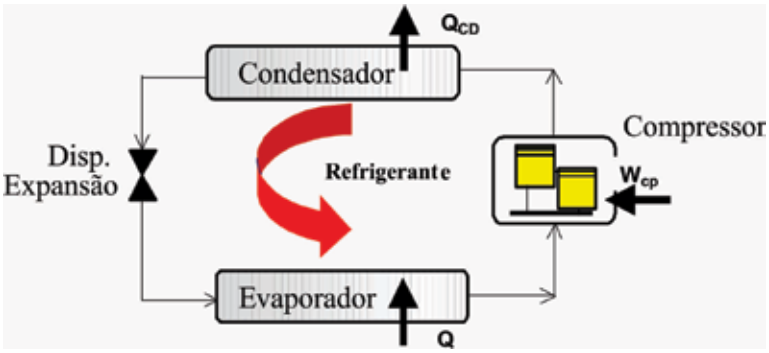



**Figura 1** – Componentes básicos da tecnologia de refrigeração baseada no ciclo de compressão de vapor

Os fluidos refrigerantes iniciais incluíam amônia, éter sulfúrico, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, cloreto de metileno e alguns hidrocarbonetos. Destes, a amônia foi o único que teve um papel durável como um refrigerante ao longo do tempo. Os hidrocarbonetos voltaram a ser utilizados novamente, de uma forma mais ampla, na última década.

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.

A figura 2 apresenta uma evolução dos fatos relevantes relacionados com o uso histórico de refrigerantes.

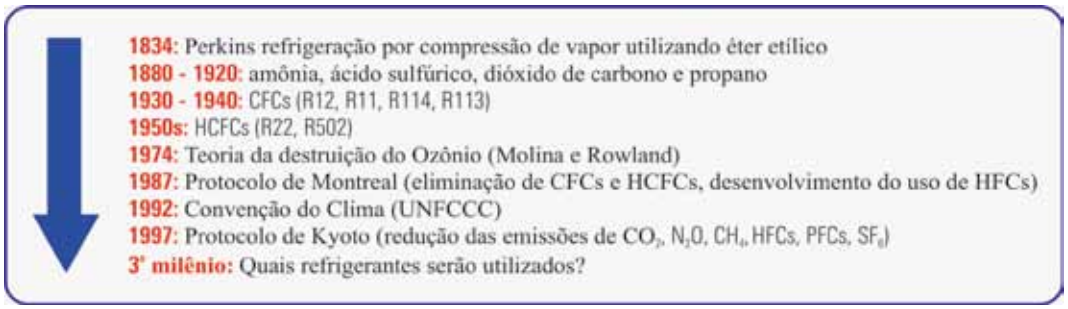



**Figura 2** – Evolução do uso de refrigerantes

Com a eliminação da produção e consumo dos refrigerantes CFCs praticamente finalizados, as atenções agora se voltam para os HCFCs



# 2 O Desafio da eliminação dos HCFCs

Embora os HCFCs tenham sido usados desde os anos 1930 devido ao seu Potencial de Destruição de Ozônio relativamente baixo (PDO), eles não foram em princípio incluídos nos controles para eliminação de Substâncias Destruidoras de Ozônio (SDOs). HCFCs foram usados em misturas com outros compostos químicos para permitir a substituição de CFCs. No entanto, considerava-se que HCFCs eram substâncias transitórias, devido ao fato de que sua produção e consumo também seriam eliminados gradualmente sob o Protocolo de Montreal. Embora tendo PDO consideravelmente mais baixo que os CFCs, muitos HCFCs têm alto potencial de aquecimento global (GWP), de mais de 2000 vezes que o dióxido de carbono ($CO_2$). Em 2006 a produção global de HCFC era de 34.400 toneladas de PDO e, aproximadamente 75% do seu uso global se encontrava nos setores de ar condicionado e de refrigeração. O principal HCFC utilizado é o R-22 ou diclorodifluormetano.

No 20º aniversário do Protocolo de Montreal, em Montreal em 2007, foi estabelecido um acordo entre os países signatários do Protocolo para acelerar a eliminação da produção e consumo de HCFCs. Essa decisão resultará numa redução significativa na destruição da camada de ozônio, com a intenção de simultaneamente reduzir o impacto no aquecimento global. Os cronogramas atuais para eliminação de HCFC para países Artigo 5 (países em desenvolvimento) e países e Não-Artigo 5 (países industrializados) são apresentados nas Tabela 1 e 2, respectivamente.

| Consumo | Ano |
|---|---|
| Linha de base | Média de 2009 e 2010 |
| Congelamento | 2013 |
| 90% (redução de 10%) | 2015 |
| 65% (redução de 35%) | 2020 |
| 32,5% (redução de 67.5%) | 2025 |
| Média Anual de 2,5% (redução de 97,5 %) | 2030 to 2040 |
| 0% (redução de 100 %) | 2040 |

**Tabela 1** – Cronograma para eliminação de HCFCs nos países Artigo 5 (produção e consumo)

| Consumo | Ano |
|---|---|
| Linha de base | 2,8% CFCs em 1989 mais 100% HCFCs em 1989 |
| Congelamento | 1996 |
| 25% (redução de 75%) | 2010 |
| 10% (redução de 90%) | 2015 |
| 0.5% (redução de 99.5%) | 2020 |
| 0% (redução de 100 %) | 2030 |

Tabela 2 – Cronograma para eliminação de HCFCs nos países não-Artigo 5 (produção e consumo)

Alguns países e regiões têm um cronograma de eliminação dos HCFcs mais rígido que o estabelecido pelo Protocolo de Montreal. Na Europa, o HCFC-22 foi eliminado em novos equipamentos em 31 de dezembro de 2003; nos USA, a produção de HCFC-22, para uso em novos equipamentos, terminou em 1º de janeiro de 2010 e, no Japão, o HCFC-22 foi eliminado em novos equipamentos em 1º de janeiro de 2010.

Além do cronograma acelerado para eliminação de HCFCs, a Reunião das Partes do Protocolo de Montreal em 2007 aprovou uma decisão para encorajar as Partes a promoverem a seleção de alternativas aos HCFCs que reduzam impactos no meio ambiente, particularmente no clima, levando em conta aspectos de saúde, segurança e econômicos.

# 3 A questão dos HCFCs

Os refrigerantes hidrofluorcarbonos (HFCs) foram desenvolvidos nos anos 80 e 90 como refrigerantes alternativos aos CFCs e HCFCs. HFCs não contêm 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 Quioto . Esses gases são: dióxido de carbono ($CO_2$), metano ($CH_4$), óxido nítrico ($N_2O$), hidrofluorcarbonos (HFCs ), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre ($SF_6$).

Pelo Protocolo de Quioto, as emissões individuais dos gases de efeito estufa serão integradas como emissões equivalentes de $CO_2$, utilizando seus potenciais de aquecimento global (GWPs).

Várias regiões e países do mundo estão adotando regulamentos para contenção e, dessa forma, prevenindo e reduzindo emissões dos gases estufa fluorados, considerados pelo Protocolo de Quioto. Um exemplo é o regulamento EC 842/2006 do Parlamento Europeu, que se aplica a vários HFCs, entre eles o R134a e o R404A. De acordo com esse regulamento, unidades de refrigeração estacionárias e ar condicionado com mais de 3 kg de carga de refrigerante (6 kg para unidades herméticas), devem:



- prevenir vazamento e reparar qualquer fuga o quanto antes;
- organizar a recuperação adequada do refrigerante por pessoal certificado durante as operações de manutenção e disposição;
- realizar avaliações regulares para verificação de vazamento (por exemplo ao menos uma vez a cada três meses para aplicações com 300 kg ou mais de gases de fluorados) por pessoal competente e certificado;
- manter registros de refrigerantes e de manutenção;
- etiquetar os equipamentos contendo gases fluorados;

De acordo com essa legislação, em equipamentos não estacionários (por exemplo, unidades móveis em caminhões) e quaisquer outros produtos contendo gases fluorados, operadores devem assegurar que pessoal, adequadamente qualificado, seja utilizado para recuperar gases.

Outras medidas no âmbito da União Européia concernentes ao uso de HFCs são cobertas pela Diretriz 2006/40/EC, relacionada com emissões de sistemas de ar condicionado automotivo, que proíbe o uso de refrigerantes com "GWP" maior que 150 (tal como R134a), a partir de 2011, para novos modelos de carros.

Outro caso de regulamento referente ao uso de HFCs é o representado pelas medidas adotadas pelo "California Air Resources Board" em 2007, para reduzir as emissões de HFC em sistemas de ar-condicionado veiculares. Essas medidas controlarão emissões de HFC na manutenção desses sistemas, exigindo testes de vazamento, durante assistência técnica.

Os fabricantes de sistemas de ar-condicionado veicular estão testando refrigerantes alternativos para atender às necessidades de longo prazo de fabricantes automotivos. Atualmente há duas alternativas em apreciação: R744 (dióxido de carbono) e R1234yf (um HFC insaturado). Ambos têm GWP baixo, são de baixa toxicidade e, enquanto R744 é não inflamável, R1234yf tem uma classificação de baixa flamabilidade. Essas alternativas estão em diferentes fases de testes e de desenvolvimento, e não está claro se um ou ambos serão adotados para sistemas de ar condicionado veicular.

# 4. Refrigerantes naturais



Os hidrocarbonetos, $CO_2$ e água fazem parte de um grupo chamado de "refrigerantes naturais". Todos os refrigerantes naturais existem em ciclos materiais da natureza mesmo sem a interferência humana. Evolução e inovações tecnológicas têm ajudado na consideração dos refrigerantes naturais como uma solução segura e econômica para aplicações em numerosas áreas. Devido aos menores impactos ambientais e por serem mais adequados dentro da perspectiva de desenvolvimento sustentável, sistemas de refrigeração com refrigerantes naturais podem vir a ter um papel importante no futuro como soluções técnicas em diversas aplicações.

Os refrigerantes naturais são muito baratos, o que tem um efeito positivo não só no custo associado à carga inicial de refrigerante de uma instalação, mas também, considerando os custos operacionais devido à necessidade de reposição em função dos vazamentos. Por outro lado, em face da questão de segurança, estima-se que os custos de investimento para instalações usando "refrigerantes naturais" são sempre 10 a 20 por cento mais alto que para instalações usando refrigerantes sintéticos, dependendo do tipo e tamanho do sistema.

## 4.1 Amônia ($NH_3$ ou R717)

A amônia está competindo com outros refrigerantes para retornar para algumas aplicações das quais ela foi deslocada pelos refrigerantes sintéticos e para ampliar o seu uso, a fim de ser utilizada em instalações onde, em função do desenvolvimento tecnológico, o uso da amônia pode ser feito hoje com eficiência e segurança..

A amônia (R717) é um refrigerante sem impacto ambiental direto porque não destrói o ozônio atmosférico, tem potencial de destruição de ozônio (ODP) zero, assim como não contribui para o aquecimento global, pois tem potencial de aquecimento global (GWP) também zero. Em função de suas propriedades termodinâmicas excelentes para a utilização como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração por compressão de vapor, o uso da amônia implica em um consumo menor de energia que o uso de outros refrigerantes em sistemas industriais de refrigeração de grande porte. Com relação à questão da segurança, a amônia tem um histórico de bom desempenho comprovado, em parte por causa do seu odor reconhecível e facilmente detectável, o que contribui para que as instalações sejam implantadas em conformidade com normas técnicas e com operadores bem treinados.



Hoje, a refrigeração com amônia é usada significativamente no processamento, congelamento e armazenamento de alimentos e, até certo ponto, nas indústrias químicas. Seu uso compreende a refrigeração pós-colheita de frutas e verduras, a refrigeração de carne bovina, aves e peixes, refrigeração na indústria de bebidas, particularmente para cerveja e vinho, refrigeração na indústria de laticínios e de sorvetes. Praticamente todas as frutas, verduras e carnes, assim como muitas bebidas e sucos passam pelo menos por uma instalação com sistema de refrigeração com amônia antes de chegar às residências.

Além disso, instalações de condicionamento de ar com sistemas de refrigeração com amônia começaram a ser utilizadas em diversas edificações. Essas instalações envolvem o uso de chillers para resfriamento de água e/ou glicol e também sistemas de termoacumulação com gelo. Amônia é também utilizada como refrigerante em sistemas de resfriamento distritais. Na Europa, onde, em função de medidas reguladoras, novas aplicações são encorajadas, sistemas de refrigeração com amônia têm sido usados com segurança para condicionamento de ar nos hospitais, edifícios públicos, aeroportos e hotéis.

## 4.1.1 Uso de Amônia em Refrigeração por Absorção

Um outro uso da amônia como refrigerante é em sistemas de refrigeração por absorção, que são sistemas que trabalham baseados num ciclo de absorção. Três dos quatro processos que abrangem o ciclo tradicional de refrigeração por compressão de vapor são usados no sistema de absorção. O processo de compressão é substituído por um circuito onde circula uma solução de dois fluidos de trabalho (fluido absorvido ou refrigerante e fluido absorvedor), que consiste em um "absorvedor", um "gerador" e uma "bomba de solução", que são complementados por um evaporador, um condensador e um dispositivo de expansão. Os fluidos de trabalho mais comumente usados em equipamentos de menor porte e temperaturas de evaporação negativas são amônia (fluido absorvido ou refrigerante) e água (fluido absorvedor); e, em equipamentos de grande capacidade, água (fluido absorvido ou refrigerante) com brometo de lítio (fluido absorvedor). A figura 3 mostra um ciclo de absorção onde, dentro da linha tracejada, vemos o sistema de elevação de pressão do refrigerante. A característica principal desse sistema movido por calor é que praticamente não consome trabalho, como ocorre num sistema de compressão de vapor (existe apenas um pequeno consumo de trabalho para movimentar a bomba de solução). No gerador a solução concentrada recebe calor, o que provoca a vaporização de parte do refrigerante que é encaminhado ao condensador. O refrigerante líquido proveniente do condensador passa por uma válvula de expansão e entra no evaporador onde a mistura bifásica recebe calor, que provoca a evaporação do líquido restante e criando o efeito de resfriamento. O vapor de refrigerante, originário do evaporador, é absorvido pela solução proveniente do gerador, formando uma solução diluída.



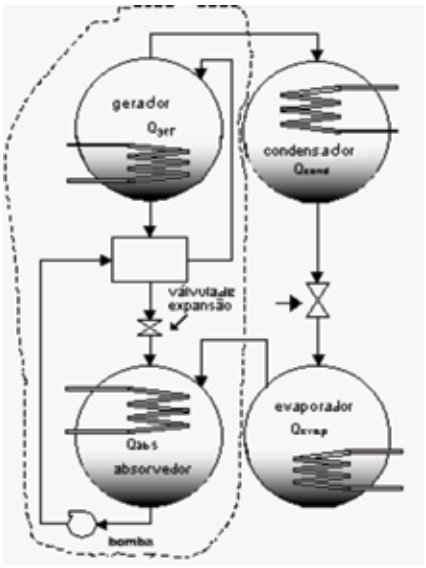



**Figura 3 –** Esquema de resfriamento por absorção **Fonte:** Guirardi, 2005

## 4.2 Hidrocarbonetos (HCs, R600a, R290, etc.)

Os refrigerantes hidrocarbonetos foram introduzidos no começo do século XX (na Alemanha em 1916) e, nos anos 20 e 30, refrigeradores foram desenvolvidos utilizando isobutano (R-600a) como fluido refrigerante. Gradualmente, os CFCs substituíram todos os outros refrigerantes. Mesmo assim, no início dos anos 50, podiam ser encontrados produtos novos no mercado europeu utilizando isobutano. Logo em seguida uma mudança mundial para CFC-12 se realizou.

Após essa mudança, seus usos como fluido refrigerante se restringiram a grandes plantas de refrigeração industrial dentro da indústria do petróleo e de gás. Os hidrocarbonetos são incolores e quase inodoros e têm potencial de destruição da camada de ozônio zero (PDO = 0) e potencial de aquecimento global direto desprezível (GWP = 3).

A opção pelo uso de hidrocarbonetos, como refrigerantes alternativos aos CFCs, recebeu atenção considerável na Alemanha em 1990/1991. Em 1993 uma companhia alemã (FORON), com o apoio do Greenpeace, iniciou a venda de refrigeradores usando uma mistura de propano e isobutano como refrigerante. Graças às suas destacadas características termodinâmicas, os hidrocarbonetos se constituem em eficiente refrigerantes, contribuindo para sistemas de refrigeração eficientes energeticamente.



Os hidrocarbonetos são mais pesados que ar e têm efeito anestésico e asfixiante em altas concentrações. Outro aspecto a destacar é que os hidrocarbonetos estão disponíveis a baixo custo no mundo inteiro. São solúveis em todos os lubrificantes e compatíveis com materiais como metais e elastômeros, que tradicionalmente são usados em equipamento de refrigeração.

Os hidrocarbonetos são inflamáveis, e medidas adequadas de segurança devem ser usadas durante sua manipulação, fabricação, manutenção, 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 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 e precauções associadas ao uso de refrigerantes inflamáveis.

## 4.3 Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ou R744)

Dióxido de carbono é um fluido refrigerante que vem sendo utilizado há mais de um século. Tem boa compatibilidade química com os materiais comuns e uma solubilidade boa com diversos óleos lubrificantes. Não tem ODP e apresenta GWP insignificante.

O R744 é classificado pelas normas como refrigerante A, não inflamável, tóxico em concentrações moderadas, acima de 5% em volume no ar. É de baixo custo e disponível em qualquer quantidade, em qualquer parte do mundo, tendo ainda propriedades bem conhecidas e documentadas. A grande diferença entre CO2 e outros refrigerantes comuns é sua relação pressão-temperatura e, particularmente, sua baixa temperatura crítica de 31 °C, conforme mostra a figura 4. Isso significa que ou o ciclo opera com uma temperatura baixa e limitada de condensação, ou deve ser um ciclo transcrítico, que difere dos ciclos de compressão convencionais.

Um ciclo de refrigeração com refrigerante $CO_2$ opera com altas pressões (5 a 10 vezes maior que sistemas com R-134a). No entanto, o risco de acidentes é baixo devido ao baixo volume e baixa carga de refrigerante no sistema. O ciclo transcrítico básico é potencialmente menos eficiente que um ciclo de compressão convencional em função das grandes perdas termodinâmicas.

Esforços significativos de pesquisa e desenvolvimento estão em curso para aumentar a eficiência do ciclo, por meio de desenvolvimento de expansores (ao contrário de válvulas de expansão) constituídos por ejetores de forma a recuperar as perdas.

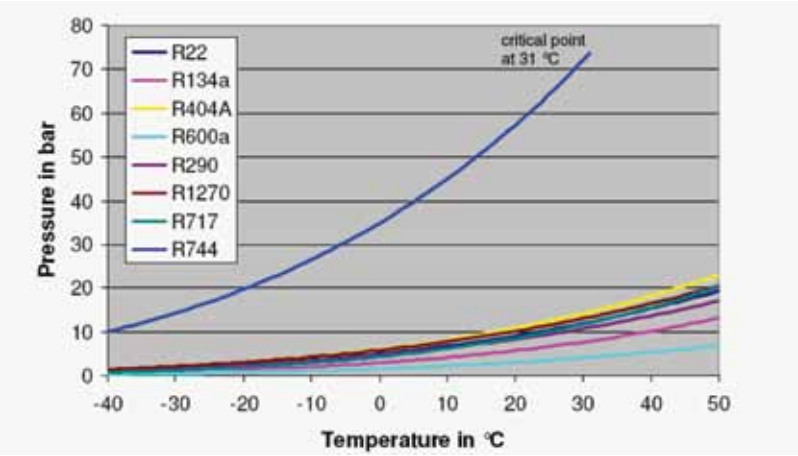



**Figura 4 –** Relação pressão-temperatura para vários refrigerantes

O dióxido de carbono está sendo utilizado em sistemas de refrigeração para supermercados, tanto em sistemas de expansão direta quanto em sistemas em cascata, com dióxido de carbono no estágio de baixa temperatura e amônia ou R404A no estágio de média temperatura. Além desse uso, uma outra aplicação desenvolvida e comercialmente disponível é constituída por bombas de calor para aquecimento de água residencial. Outras aplicações estão em fase de desenvolvimento e avaliação, tais como ar-condicionado veicular e equipamentos compactos de refrigeração ("freezers, displays, vending machines").

## 4.4 Propriedades dos Refrigerantes Naturais

A tabela 3 apresenta as principais propriedades físicas de segurança e ambientais da amônia, $CO_2$ e alguns hidrocarbonetos.

| Refrigerante | Dados Físicos | | | | Dados de Segurança | | | | Dados Ambientais | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Número composição nome | Massa molecular | NBP (°C) | Tc (°C) | Pc (MPa) | TLV-TWA (PPM) | LFL (%) | HOC MJ/kg | grupo | Tempo de vida Atmosférico (ano) | PDO | GWP 100 anos |
| R717 $NH_3$ amônia | 17.03 | 33.3 | 132.3 | 11.33 | 25 | 15.0 | 22.5 | B2 | <1 | 0.0 | <1 |
| R290 $H_3CH_2CH_3$ propano | 44.10 | 42.2 | 96.7 | 4.25 | 2500 | 2.1 | 50.3 | A3 | | 0.0 | 20 |
| R600a $CH(CH_3)_2$- $CH_3$ isobutano | 58.12 | 11.7 | 134.7 | 3.64 | 800 | 1.7 | 49.4 | A3 | | 0.0 | 20 |
| R744 $CO_2$ dióxido de carbono | 44.01 | 78.4 | 31.0 | 7.38 | 5000 | none | | A1 | >50 | 0.0 | 1 |

NBP = ponto de ebulição normal

Tc = temperatura crítica

Pc = pressão crítica

TLV-TLA = limite de concentração para exposição

LFL = limite inferior de flamabilidade (% volume no ar)

HOC = calor de combustão

## 4.5 Cenário internacional

Atualmente, é crescente a preocupação com o uso de fluidos refrigerantes devido a seus impactos ambientais e energéticos. O uso de refrigerantes naturais, inicialmente foco de divergência em alguns países, vem crescendo em algumas aplicações e sendo considerado uma alternativa ao uso de HCFCs e HFCs. Fato importante recente, a ASHRAE ("American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers") publicou um artigo de avaliação ("position paper") sobre hidrocarbonetos e refrigerantes naturais, destacando suas propriedades e o potencial de minimizar os impactos ambientais.

Diversas organizações vêm apoiando e divulgando o uso de fluidos refrigerantes naturais. São iniciativas conjuntas de empresas, instituições e indivíduos que visam a estabelecer centros de competência para o uso de fluidos de trabalho naturais em refrigeração. Uma das ações é a construção de plataformas de informações e conhecimentos, compartilhados com o objetivo de incentivar a aceitação de refrigerantes naturais e promover seu uso para projetar e implantar sistemas de refrigeração e ar condicionado dentro do conceito do desenvolvimento sustentável. Como exemplo podem ser citados a "Eurammon" e a "Refrigerants, Naturally"e, também, os portais da web: www.hydrocarbons21.com, www.r744.com e www.ammonia21.com.



# 5. Conclusões

Alternativas para uso de refrigerantes e metas de eficiência são provavelmente os principais motivadores hoje para inovações em equipamentos de refrigeração e ar-condicionado. Opções técnicas estão sendo desenvolvidas para reduzir a carga de refrigerante em equipamento, dessa forma diminuindo as emissões de refrigerantes e cooperando para o uso responsável de todas as alternativas. Em face do desenvolvimento tecnológico e da adoção de políticas de sustentabilidade, pode-se prever um aumento de aplicações de refrigerantes naturais. Cada refrigerante natural terá um nicho de aplicação substituindo mais e mais refrigerantes constituídos por gases de efeito estufa (GEE).

A tecnologia de refrigerantes hidrocarbonetos está consolidada na refrigeração doméstica e comercial, "stand alone", e está se desenvolvendo em outros segmentos (uso como refrigerante primário em sistemas secundários de refrigeração para supermercados e "chillers"). Dióxido de carbono está tendo uma utilização crescente em sistemas de refrigeração para supermercados, tanto em sistemas de expansão direta quanto em sistemas em cascata. O uso de sistemas indiretos em

supermercados (aplicando fluidos de transferência de calor em sistemas secundários) está crescendo, uma vez que permite o uso de fluidos refrigerantes naturais inflamáveis e/ou considerados tóxicos como refrigerante primário.

Devido à falta de mecânicos qualificados nos países em desenvolvimento, para trabalhar com tecnologias de refrigerantes hidrocarbonetos, amônia e $CO_2$, são necessárias ações de capacitação e treinamento.

Normas técnicas devem ser criadas nos países em desenvolvimento considerando, como referência, normas internacionais existentes para assegurar o uso de refrigerantes naturais com segurança.

# 6 Bibliografia



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 **Position Papers - Ammonia as Refrigerant**. 1992

ASHRAE, **Handbook Fundamentals**, ASHRAE, Atlanta, USA, 2005.

Bitzer. **Technical Report 15**. Edition, 2008 (http://www.bitzer.de/eng/products/docu/doc_det/1)

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.

Girardi, W.; Peixoto, R. A. **Análise De Alternativas Para Resfriamento Do Ar Na Entrada De Turbinas A Gás.** CONBRAVA 2005.

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

GTZ, **Natural Refrigerants**, Eschborn, Germany, 2008.

IIAR. **Ammonia: the Natural Refrigerant of Choice.** A Green Paper, International Institute of Ammonia Refrigeration, 2000.

IIR. **Ammonia as a Refrigerant.** International Institute of Refrigeration, 1999

IIR Gustav Lorentzen (a), **Conference Proceedings of the 7th Conference**, Norway, 2006

IIR Gustav Lorentzen (b), **Conference Proceedings of the 8th Conference**, Denmark, 2008

IPCC/TEAP, **Proceedings of Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs**, Petten, NL, 1999.

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.

Pearson; **S F. Ammonia – Yesterday, Today And Forever.** IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005

Lindborg, A. **Ammonia Refrigeration Systems – the Necessity, Risks and 150 years of Operation.** IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005

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.

Presotto A.; Süffert C.G. **Ammonia Refrigeration In Supermarkets.** ASHRAE Journal, October 2001. p. 25-31.

Rajendra, S. **Importance of Natural Refrigerants in Safeguarding Climate System and Ensuring the Sustainable Development.** IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005

Tiedemann T., Burke M., Kruse H. **Recent Developments to Extend the Use of Ammonia, Proceedings of the 1996 International Refrigeration Conference at Purdue,** Purdue University, West Lafayette IN, USA July 1996

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

UNEP, (United Nations Environment Programme), 2006: **Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee** (2006 Assessment).

**Websites**

www.ammonia21.com

www.eurammon.com

www.gtz.de/en/themen/umwelt-infrastruktur

www.hydrocarbons21.com

www.iiar.org

www.nrtb.org.au

www.nrfund.org

www.refrigerantsnaturally.com

www.r744.com

www.spm.com.br

www.uneptie.org/ozonAction

Todas as imagens e gráficos utilizada nesta publicação foram cedidos pelos autores e são de inteira responsabilidade dos mesmos.

Realização

PNUD Brasil

Ministério do Meio Ambiente

GOVERNO FEDERAL BRASIL PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA