

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS – MG**

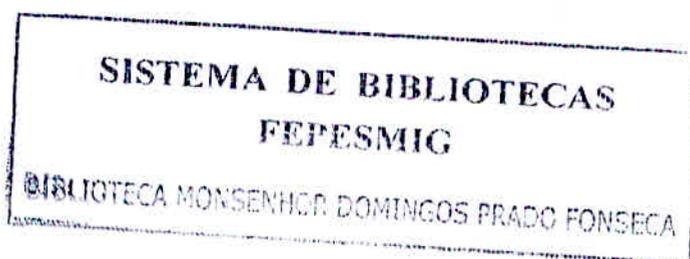
**ENGENHARIA MECÂNICA  
RAFAEL FERNANDES BARROS**

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca

N. Class. M 621.56

Cutter B277a

Ano/Ed. 2010



## **APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO NA REFRIGERAÇÃO**

**Varginha - MG**

**2010**

**RAFAEL FERNANDES BARROS**

**RAFAEL FERNANDES BARROS**

**APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO NA REFRIGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Alexandre Lopes.

**Varginha - MG**

**2010**

**RAFAEL FERNANDES BARROS**

## **APLICAÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO NA REFRIGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela banca Examinadora composta pelos membros: Prof. Esp. Márcio de Santana, Prof. Ms. Alexandre Soriano e Prof. Esp. Alexandre Lopes

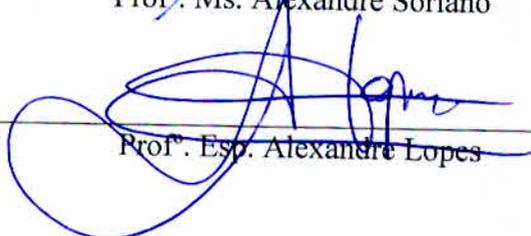
Aprovado em 01/12/2010



Prof.<sup>o</sup>. Esp. Márcio de Santana



Prof.<sup>o</sup>. Ms. Alexandre Soriano



Prof.<sup>o</sup>. Esp. Alexandre Lopes

OBS.:

Dedico este trabalho aqueles que contribuíram e acreditaram na sua realização. Principalmente minha mãe que me deu todo apoio para que pudesse concluir mais uma etapa estudantil de minha vida. Agradeço também a Deus que me guiou e orientou durante esses cinco anos.

Agradeço aos meus pais, professores,  
amigos e colegas pôr terem contribuído  
na execução deste trabalho

Não te irrites se te pagarem mal um  
benefício; antes cair das nuvens que de  
um terceiro andar.

(Memórias póstumas de Brás Cubas)

## RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo uma análise o dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , que está cotado para substituir os CFC's nos sistemas de refrigeração e ar condicionado automotivo. Como há poucos trabalhos disponíveis na literatura, onde a maioria é de origem européia, o presente trabalho abordará um histórico evolutivo das principais pesquisas, além de incluir uma análise das principais características do  $\text{CO}_2$  para um melhor esclarecimento do ciclo supercrítico e do ciclo em cascata e também um comparativo com outros ciclos trabalhando com fluidos convencionais. O dióxido de carbono é caracterizado por possuir condições de operação com elevadas pressões, assim, os equipamentos devem obedecer a condições especiais de fabricação. Outro fator importante se refere às principais exigências estipuladas nos acordos mundiais, ocasionando uma intensificação nas pesquisas sobre fluidos que não prejudicam a camada de ozônio nem o aquecimento global.

**Palavras-chave:** Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Sistemas de refrigeração.

## **ABSTRACT**

*This work aims at an analysis of carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, which is tipped to replace CFCs in refrigeration and mobile air conditioning. Since there are few jobs available in the literature, where the majority is of European origin, this paper will address a major evolutionary history research, and includes an analysis of the key characteristics of CO<sub>2</sub> for a better explanation of the cycle and supercritical cycle cascade and also a comparison with other cycles working with conventional fluids. Carbon dioxide is characterized by having the operating conditions with high pressures, so the equipment must conform to special conditions of manufacture. Another important factor refers to the main requirements stipulated in the agreements worldwide, causing an intensification of research on fluids that do not harm the ozone layer or global warming.*

*Keywords: Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in refrigeration systems.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Sistema subcrítico .....	17
Figura 02 - Sistema Cascata .....	18
Figura 03 - Instalação da fábrica Nestlé - Suíça.....	25
Figura 04 - Sistema subcrítico utilizando CO2 .....	27
Figura 05 - Racks no Centro de Treinamento e Tecnológico de CO2 Brasil.....	28
Figura 06 - Compressor de CO2.....	29
Figura 07 - Condensador de CO2.....	30
Figura 08 - Válvula de expansão eletrônica de CO2.....	31
Figura 09 - Válvula de alívio e uma válvula de bloqueio CO2.....	32
Figura 10 - Detalhe das válvulas de segurança de CO2 .....	33
Figura 11 – Sistema de exaustão de ar em caso de vazamento de CO2 .....	34

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Diagrama Pressão-Entalpia CO <sub>2</sub> .....	19
Gráfico 02 - Diagrama de Fases do R744 destacando seu ponto Triplo e Crítico .....	20
Gráfico 03 - Viscosidade do R744 em função da temperatura.....	21
Gráfico 04 - Diagrama pressão versus entalpia .....	22
Gráfico 05 - Diagrama temperatura versus entropia .....	22
Gráfico 06 - Pressão de vapor de vários refrigerantes em função da temperatura .....	23
Gráfico 07 - Tensão superficial dos refrigerantes .....	23
Gráfico 08 - Variação das características dos fluidos no processo isobárico .....	24
Gráfico 09 - Diagrama Temperatura-Entropia ilustrando um ciclo transcrito .....	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Comparação do Impacto Ambiental dos Refrigerantes.....	36
Tabela 02 - Segurança nos Sistema de Refrigeração.....	37
Tabela 03 – Comparativo de capacidade.....	37

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. OBJETIVO .....	16
2.1. Objetivo específico .....	16
3. REFERENCIAL TEORICO.....	17
3.1. CO2 Como Fluido Secundário .....	17
3.2. Instalações Tipo Cascata .....	18
4. PESQUISA .....	20
4.1. Propriedades do R-744 .....	20
4.1.1. Ciclo Transcrítico .....	24
4.1.2. Princípio de operação do sistema CO <sub>2</sub> – subcrítico .....	26
4.2. Principais Componentes do Sistema Subcrítico .....	28
4.2.1. Compressor CO <sub>2</sub> .....	28
4.2.2. Trocador de calor CO <sub>2</sub> (Condensadores e Evaporadores) .....	29
4.2.3. Válvula de expansão CO <sub>2</sub> .....	30
4.3. Sistema de segurança.....	31
4.3.1. Válvulas de segurança e alívio .....	31
4.3.2. Sistema de monitoramento de vazamento CO <sub>2</sub> .....	33
4.3.3. Unidade de emergência do sistema de CO <sub>2</sub> .....	34
4.4. Comparação do impacto ambiental dos refrigerantes.....	35
4.5. Segurança dos fluidos refrigerantes.....	36
4.6. Comparativo de capacidade utilizando fluidos refrigerantes distintos.....	37

4.7. Resultados.....	37
4.7.1 Vantagens e Desvantagens .....	37
CONCLUSÕES .....	40
REFERÊNCIAS .....	41

**SISTEMA DE BIBLIOTECAS**  
**FEPESMIG**  
BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas com a preocupação das mudanças climáticas ocorridas no globo terrestre, a comunidade científica tem buscado novas fontes para substituição dos compostos halogenados, principalmente os CFC's, que destroem a camada de ozônio, bem como aqueles que colaboram com o efeito estufa. Nesse sentido, diversos pesquisadores estão retomando ou iniciando estudos envolvendo o dióxido de carbono, R-744, que esteve em evidência até 1940, quando por meio de rentabilidade, estabilidade e facilidade na construção dos equipamentos, começaram a ter como refrigerante a amônia,  $\text{NH}_3$ , CFC-12 e posteriormente o HCFC-22.

O número de projetos apresentados nas conferências anuais está aumentando consistentemente e, com o tratado de Kyoto, que trata do aquecimento global, a tendência é o incremento substancial das pesquisas, inclusive aquelas apoiadas por indústrias, pelo motivo financeiro.

Porém, existe uma pequena desvantagem no uso de  $\text{CO}_2$  (R-744) que se encontra no seu coeficiente de eficácia, COP, ser baixo quando operado com altas temperaturas ambientes, comparado com outros fluidos refrigerantes. Uma medida eficaz é a utilização de ciclos em cascata, onde o  $\text{CO}_2$  é utilizado no circuito de baixa temperatura e outro fluido refrigerante, R-134 R-404A, Amônia, entre outros, é usado no circuito de alta temperatura. Assim, a condensação do  $\text{CO}_2$  se dá com a evaporação do outro fluido, elevando o COP do ciclo.

Uma tendência já adotada por algumas indústrias automobilísticas da Europa é a substituição dos compostos halogenados, principalmente o R-134a, chamado erroneamente de refrigerante ecológico, pois colabora direta e indiretamente com o efeito estufa, onde a partir de 2010 todos os veículos automotores devem sair da fábrica com o sistema de ar condicionado operando com o dióxido de carbono como fluido de trabalho. Entretanto, deve ser destacado que o  $\text{CO}_2$  em sistemas automotivos opera de maneira distinta dos fluidos halogenados. Enquanto os halogenados acontece a condensação do fluido, nos sistemas com  $\text{CO}_2$  ocorre um resfriamento do fluido, pois as temperaturas, nesse caso, superam a temperatura crítica do  $\text{CO}_2$ . Esses sistemas são denominados de ciclos transcíticos.

Já nos anos 90 ressurgiram as discussões sobre as vantagens oferecidas pelo R744( $\text{CO}_2$ ) devido a restrição ao uso dos refrigerantes CFC'S, HCFC'S e HFC'S com elevado ODP (Ozone Deplation Potencial-Potencial de Destruição da Camada de Ozônio) e GWP

(Global Warming Potencial-Potencial de Aquecimento Global). A legislação restringe o uso dos refrigerantes sintéticos no mundo inteiro e, conseqüentemente, ressurge a necessidade de utilizar os refrigerantes alternativos e naturais. O R-744 pertence ao grupo dos refrigerantes naturais junto com o R-717 (Amônia), os Hidrocarbonetos como R-170 (Etano), R-290 (Propano), R-600<sup>a</sup> (Isobutano).

Todos esses refrigerantes têm suas vantagens e desvantagens ou perigos: a Amônia tem o melhor efeito de refrigeração, mas é tóxica; os Hidrocarbonetos são inflamáveis. Em compensação, o R-744 não é tóxico e nem inflamável, mas exerce um duplo papel na natureza. O CO<sub>2</sub> é necessário para toda vida na terra, entretanto é um gás estufa, que causa aquecimento global e que pode mudar o meio ambiente caso haja alteração da sua concentração na atmosfera.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho e apresentar novas tecnologias e ferramentas de projeto de uma forma simples e objetiva para aplicação do Dióxido de Carbono utilizando como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração comercial e industrial, abordando temas que vão desde o projeto da instalação até suas características operacionais, comparando com dois sistemas de refrigeração convencionais Operando com R404a e outro com R22.

Aplicação do Dióxido de Carbono limita-se apenas aos sistemas subcríticos em cascatas, onde são apresentadas as novas tecnologias dos equipamentos e componentes, tais como: compressores, trocadores de calor, válvula de expansão, controladores de nível de óleo e vasos de pressão.

### 2.1. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Conhecer as propriedade e característica do R744 (CO<sub>2</sub>)
- ✓ Componentes do sistema com R744 (CO<sub>2</sub>).
- ✓ Sistema de refrigeração com R744 (CO<sub>2</sub>).
- ✓ Comparar resultados entre um sistema de refrigeração convencional e um operando com R744 (CO<sub>2</sub>)
- ✓ Segurança dos sistemas Aplicados com R744 (CO<sub>2</sub>)

### 3. REFERENCIAL TEORICO

#### 3.1. CO<sub>2</sub> Como Fluido Secundário

Este tipo de sistema representa a forma mais simples de aplicação do CO<sub>2</sub> com a tecnologia atual, visto que neste tipo de sistema o CO<sub>2</sub> é utilizado como um refrigerante secundário, já que o mesmo é bombeado e não comprimido. Um sistema frigorífico (R404A, R717,...) é encarregado de re-condensar o CO<sub>2</sub> que se evapora parcialmente nos evaporadores, e uma vez condensado, armazena-se em um tanque de acumulação de CO<sub>2</sub>.

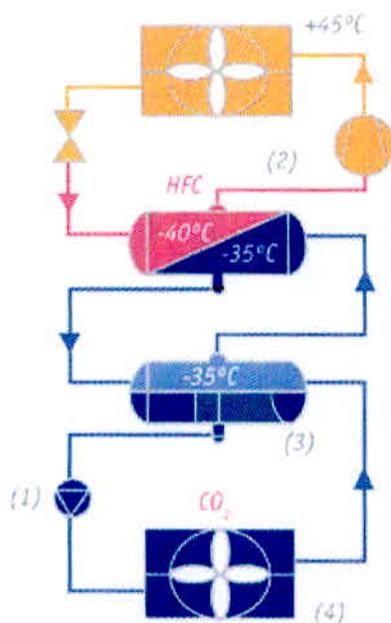


Fig. 1 Sistema de subcrítico

Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

O sistema da figura 1 consta dos seguintes elementos principais:

- (1) Estação de bombeamento do CO<sub>2</sub>.
- (2) Sistema de Resfriamento/condensação do CO<sub>2</sub>.
- (3) Tanque de acumulação de CO<sub>2</sub>.
- (4) Evaporadores de CO<sub>2</sub>.

### 3.2. Instalações Tipo Cascata

A figura 2 mostra um exemplo de aplicação em cascata para o uso com o Dióxido de Carbono (R744), no qual o mesmo é utilizado no sistema secundário para média e baixa temperatura de evaporação. No sistema primário utilizado para condensar o CO<sub>2</sub>, o fluido refrigerante poderá ser do tipo natural (R290, R717, etc.) ou sintético (HFC's, por exemplo: R134a, R404A, etc.), porém em menor quantidade, pois estará confinado somente no circuito que envolve o compressor, condensador e evaporador (trocador de calor cascata).

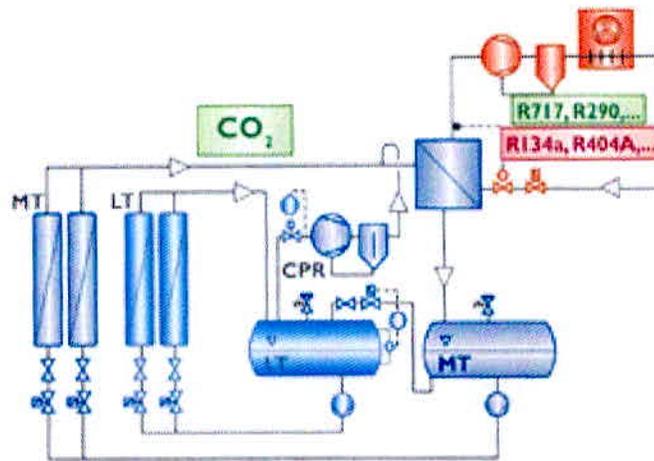


Fig. 2 Sistema de Cascata

Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

As aplicações de média temperatura nas instalações frigoríficas de supermercado, são obtidas através de um sistema com re-circulação de líquido, nesse caso os evaporadores trabalham inundados com CO<sub>2</sub> líquido a  $-10^{\circ}\text{C}$ . O sistema de baixa temperatura é realizado através de um ciclo de compressão a vapor utilizando compressores semi-herméticos alternativos, operando com expansão direta evaporando a  $-30^{\circ}\text{C}$ , na qual o CO<sub>2</sub> é condensado na temperatura de aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$ . O sistema de média temperatura está incluído no ciclo, no qual o CO<sub>2</sub> no estado líquido a  $-10^{\circ}\text{C}$  é circulado através dos evaporadores de resfriados por uma bomba especialmente projetada para a re-circulação desse fluido.

Para obter vantagem da alta eficiência do refrigerante, o CO<sub>2</sub> é usado no estágio de baixa pressão em cascata onde o mesmo é condensado a  $-10^{\circ}\text{C}$  (condição subcrítica).

O estágio de baixa pressão é conectado a um sistema primário de refrigeração (R404A), no qual transfere o calor absorvido dos evaporadores do sistema de média e baixa temperatura e o dissipa a atmosfera através de um condensador resfriado a ar ou água. Devido à alta densidade do vapor e a elevada eficiência volumétrica, os compressores aplicados com CO<sub>2</sub> geram economias de energia bem superiores comparados aos sistemas de refrigeração convencionais. O sistema cascata também tem a vantagem de obter um elevado grau de líquido sub-resfriado, que resulta em reduções significativas no diâmetro das linhas e também na carga de refrigerante – comparado com os refrigerantes convencionais. (SILVA, 2009, p.77).

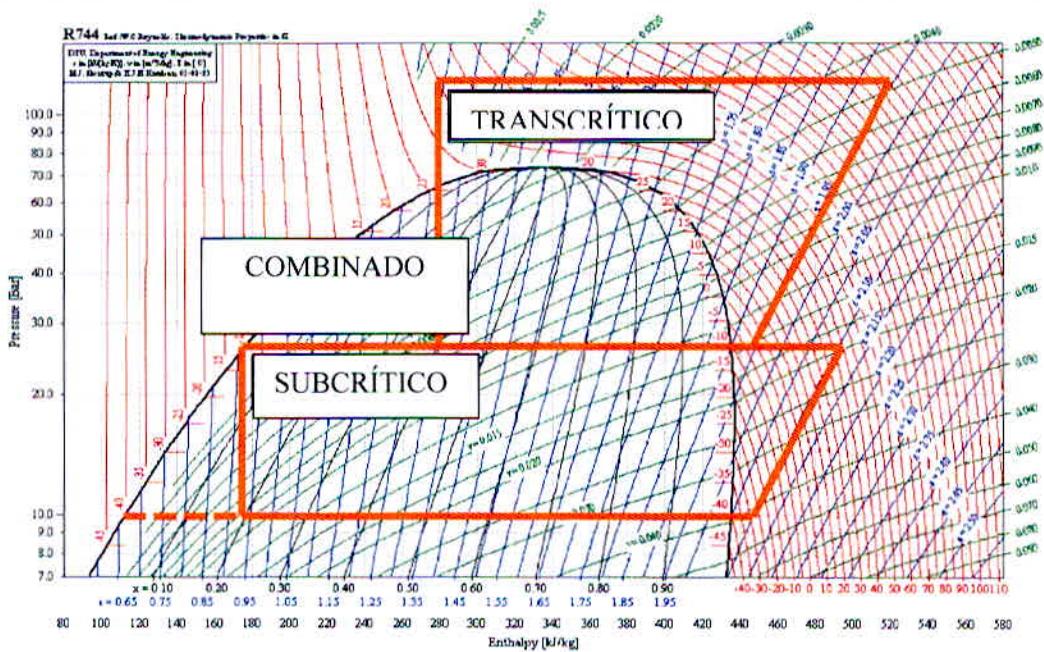
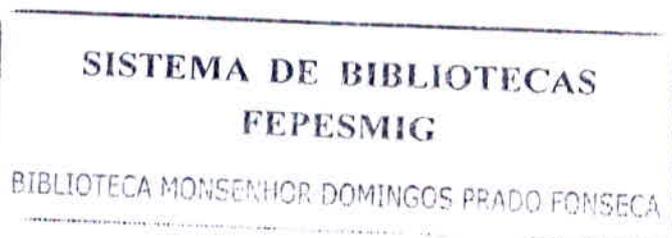


Gráfico. 01 Diagrama Pressão-Entalpia  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

O gráfico 01 mostra a posição de trabalho de cada ciclo no Diagrama Pressão & Entalpia destacando as diferenças termodinâmicas.

## 4. PESQUISA



### 4.1. Propriedades do R-744

Nessa seção, serão apresentadas as principais motivações dos pesquisadores para iniciarem ou retomarem suas pesquisas com o refrigerante R-744, mormente aquelas associadas às melhores características em relação aos refrigerantes usados atualmente. Alguns itens podem ser destacados como segue:

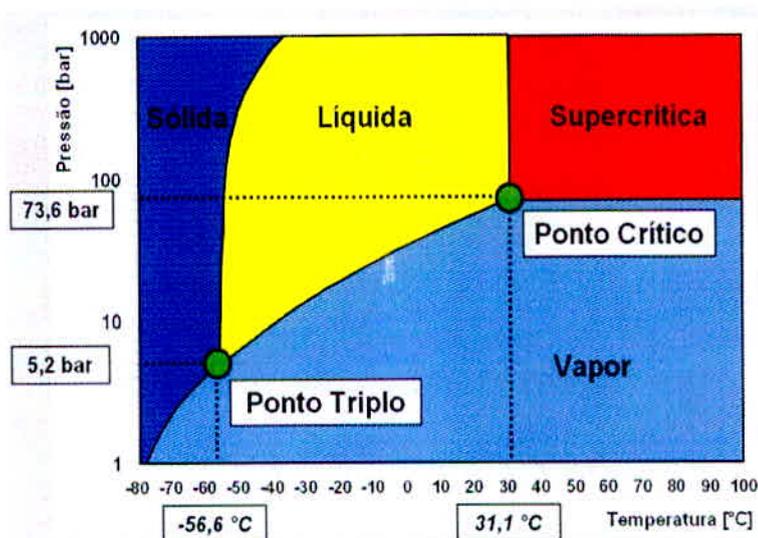


Gráfico. 2 Diagrama de Fases do R744 destacando seu ponto Triplo e Crítico  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

- ✓ CO<sub>2</sub> não é inflamável e não tóxico Projeto conceitual;
- ✓ Pressão crítica é 73,8 bar (7,38 MPa) e temperatura crítica 31,1 °C
- ✓ Pressão reduzida a 0 °C é 0,47 (é considerada muito alta para um fluido usual), pressão reduzida é a razão entre a pressão de saturação a 0 °C e a pressão crítica.
- ✓ Capacidade de refrigeração muito alta 0 °C é 22545 kJ/m<sup>3</sup>, que se define como a retirada de calor do produto a ser refrigerado com mais eficiência e menos tempo de congelamento (caso de frigoríficos)
- ✓ Ponto triplo -56,6 °C e 5,2 bar (520 kPa) como pode ser observado no diagrama de fases no gráfico 2.

Todas as substâncias que podem existir como sólido, líquido ou vapor têm um ponto triplo, mas o ponto triplo do R744 ocorre em temperatura e pressão muito mais elevadas do que outros refrigerantes. O ponto triplo de uma substância é o valor de pressão e temperatura onde os três estados (sólido, líquido e vapor) coexistem neste ponto. Para os sistemas com R744, se as pressões caírem abaixo de 420 Kpa, ocorrerá a formação do estado sólido do R744 (conhecida como gelo seco), já que neste caso o sistema estará abaixo de ponto triplo.

Como pode ser visto através do gráfico 2, a pressão do ponto triplo do R744 é 518,5 Kpa e a temperatura no ponto triplo a  $-56,6^{\circ}\text{C}$ , sendo seu ponto de ebulição normal. No entanto, se a pressão permanecer acima deste valor o R744 irá agir como qualquer outro líquido.

O ponto crítico de um refrigerante é aquela temperatura e/ou pressão acima do qual o mesmo não poderá mais ser liquefeito, sendo que para o R744 este ponto equivale a  $31,1^{\circ}\text{C}$  com 7382 Kpa. Assim que R744 se aproxima destes valores, as densidades do vapor e do líquido se tornam próximas uma da outra e acima deste valor não haverá diferença entre as fases do líquido e vapor. Acima do ponto crítico o líquido e vapor do R744 têm as mesmas densidade e aparência. Quando as pressões e temperatura de operação do sistema estão próximas dos valores críticos a expansão do vapor poderá criar ( $\text{CO}_2$ ) no estado sólido (formação de gelo seco) no orifício ou no ponto de expansão. O  $\text{CO}_2$  não expande como a água quando se congela, assim não haverá nenhum perigo de "estourar" as tubulações ou vasos de pressão. (SILVA, 2009, p.21).

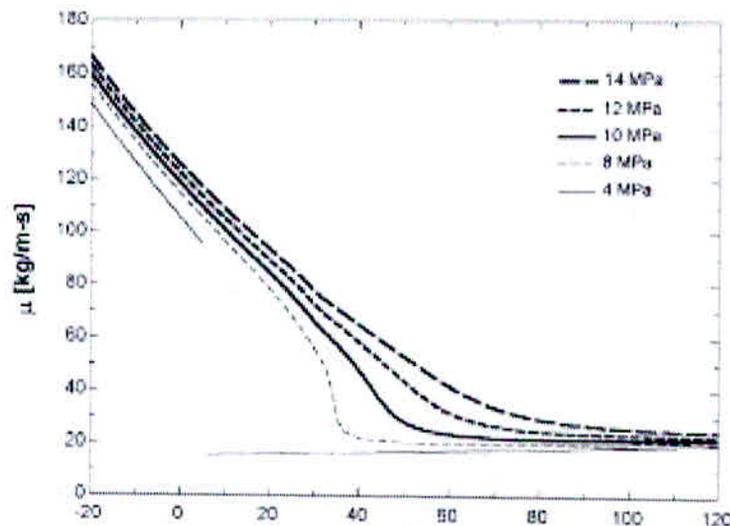


Gráfico.03 Viscosidade do R744 em função da temperatura  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

A viscosidade tem uma alteração considerável na região supercrítica, bem diferente da região transcrítica.

Os gráficos, (gráf.4 e gráf.5), ilustram a mudança brusca perto do ponto crítico de entalpia e entropia em função da pressão. Abaixo da temperatura crítica, a pressão influencia muito pouca a entropia e entalpia, porém acima dessa temperatura a variação é considerável.

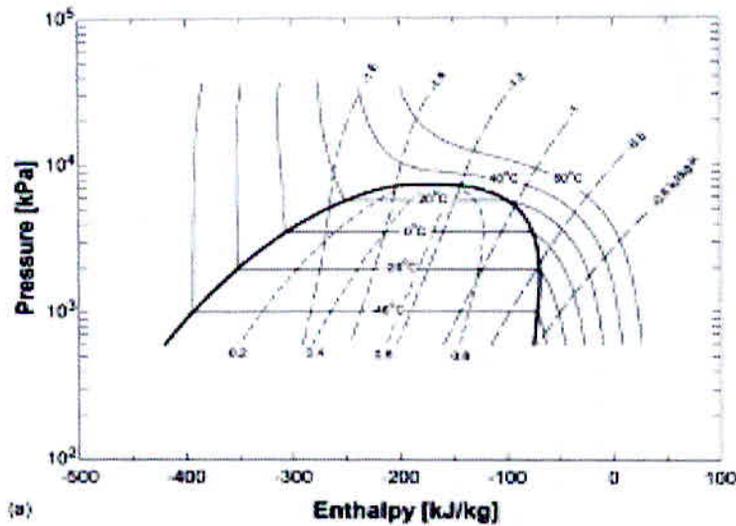


Gráfico.4 Diagrama pressão versus entalpia  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

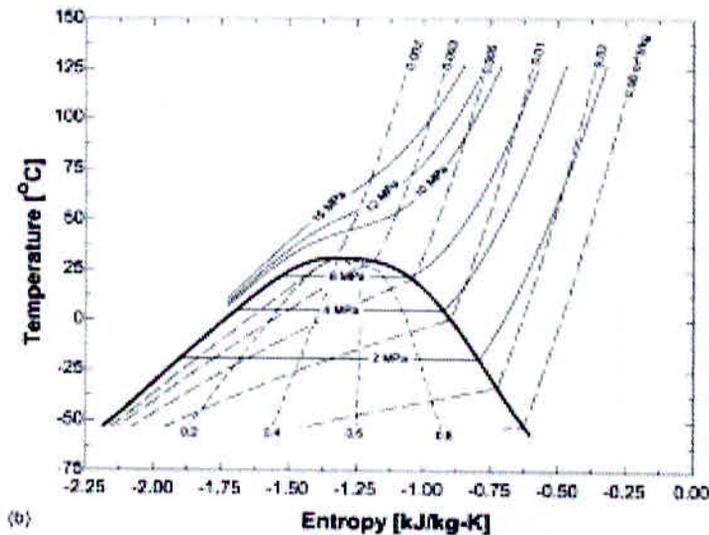


Gráfico.5 Diagrama temperatura versus entropia  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

O gráfico 06 apresenta uma comparação do R-744 com os outros refrigerantes utilizados em sistemas frigoríficos. Verifica-se que a pressão de vapor do R-744 é maior que os outros refrigerantes e que perto do ponto crítico há uma pequena variação na temperatura para alterar a pressão.

A densidade de CO<sub>2</sub> altera rapidamente com a temperatura, próximo do ponto crítico, e a variação de densidade de CO<sub>2</sub> é menor que os outros refrigerantes. Por esse motivo há mais homogeneidade nas duas fases (alta e baixa pressão) comparada com outros refrigerantes. A elevada densidade do R-744 lhe confere uma boa capacidade de refrigeração com temperaturas abaixo de 22°C.

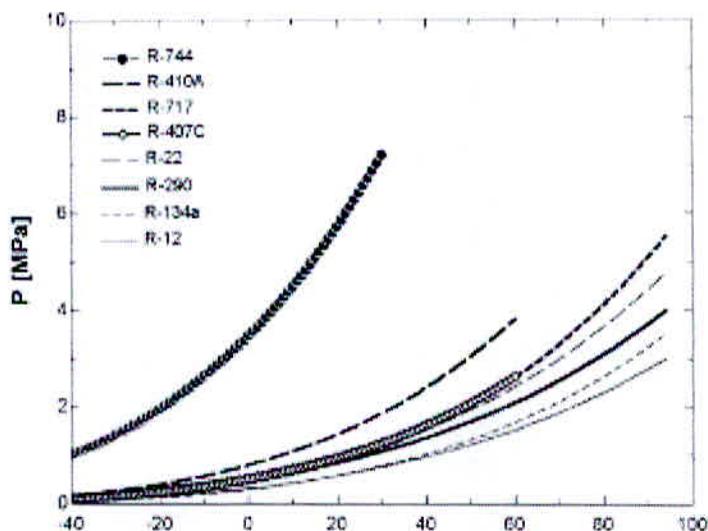


Gráfico.6 Pressão de vapor de vários refrigerantes em função da temperatura  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

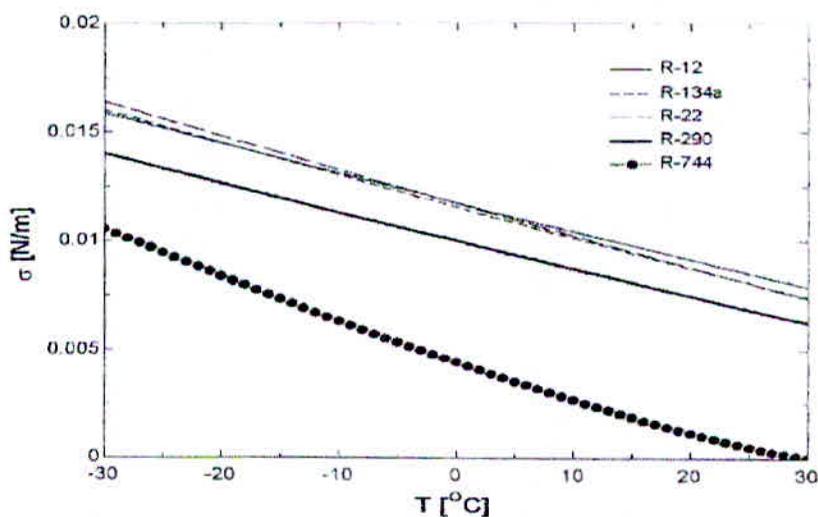


Gráfico.7 Tensão superficial dos refrigerantes  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

A tensão superficial,  $\sigma$ , do refrigerante influencia na formação de bolhas e uma pequena tensão reduz a nucleação e crescimento das mesmas. A tensão do R-744 é a menor de todos os outros refrigerantes como pode ser observado no gráfico 07.

Uma das mais importantes características dos fluidos que operam na região supercrítica é que perto do ponto crítico as suas propriedades alteram rapidamente com a temperatura no processo isobárico como pode ser verificado no gráfico 08.

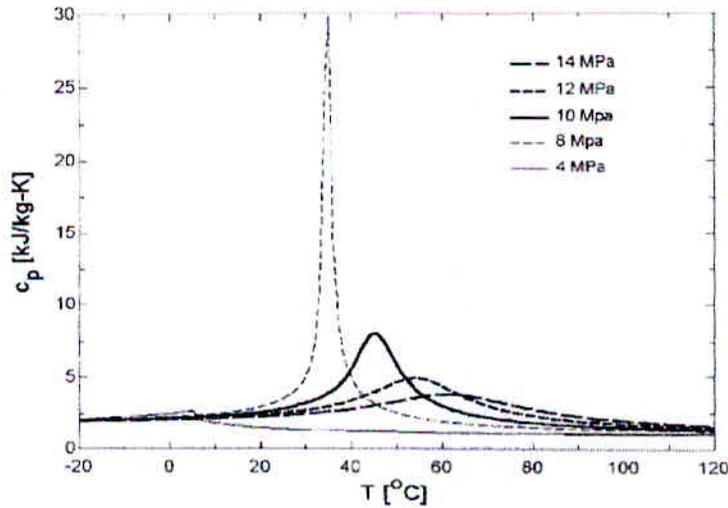


Gráfico.8 Variação das características dos fluidos no processo isobárico  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

Uma das principais conclusões desse item é que as propriedades de transportes do CO<sub>2</sub>, R-744, favorecem a transferência de calor comparado com outros refrigerantes usados atualmente.

#### 4.1.1. Ciclo Transcrítico

O gráfico 09, o processo 1-2s é um processo denominado compressão isoentrópica, enquanto processo 1-2 é o processo de compressão real. A linha pontilhada abaixo do processo 2-3 representa o fluido externo aquecido.

O processo 5-6 é o processo de evaporação e o pontilhado sobre o processo de evaporação representa o fluido externo sendo resfriado. O sistema completo foi modelado baseado no equilíbrio de energia de componentes individuais do sistema para render a melhor eficiência possível. A energia de fluxo baseia-se na primeira lei da termodinâmica.

As seguintes suposições foram realizadas na presente análise:

1. A transferência de calor com o ambiente foi negligenciada.

2. A transferência de calor de fase única foi considerada para o fluido externo.
3. O processo de compressão é adiabático, mas não-isentrópico.
4. O processo de evaporação é isobárico.

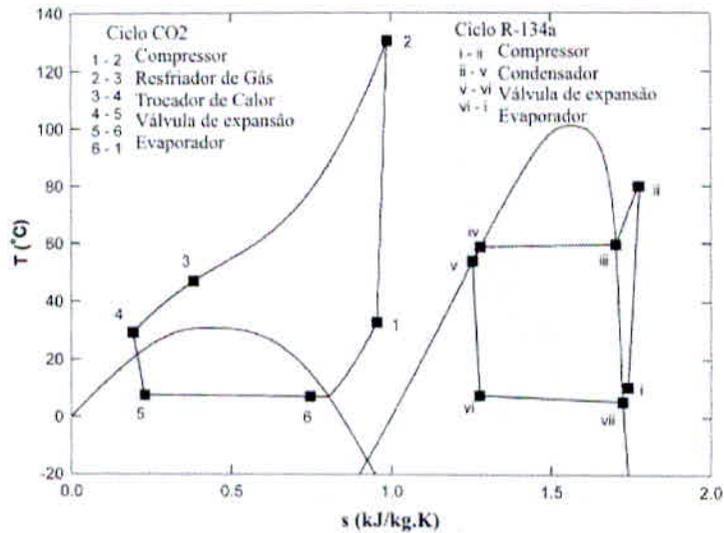


Gráfico. 09 Diagramas Temperatura-Entropia ilustrando um ciclo transcrito  
 Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração.

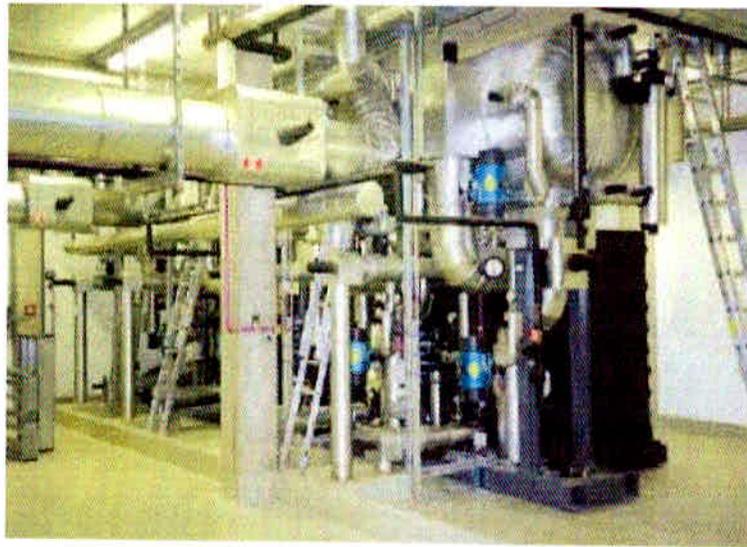


Fig.3 Instalação da fábrica Nestlé - Suíça  
 Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

O sistema cascata consiste na combinação de dois ciclos de simples estágio, formando assim, dois níveis diferenciados de temperatura. No ciclo de alta temperatura utiliza-se, por exemplo, um circuito com o fluido de trabalho  $\text{NH}_3$  (amônia ou R-717), e no ciclo de baixa temperatura tem-se então, o circuito com o dióxido de carbono.

A transferência de calor entre os dois circuitos é realizada através de um trocador que evapora a amônia e condensa o dióxido de carbono. A Figura 3 ilustra uma fotografia de uma planta em operação operando com o ciclo em cascata da empresa Nestlé na Suíça.

#### **4.1.2. Princípio de operação do sistema CO<sub>2</sub> - subcrítico**

De acordo com a figura 04, os evaporadores de média temperatura com CO<sub>2</sub> trabalham com re-circulação de líquido, enquanto que os de baixa temperatura trabalham com expansão direta a através do ciclo de compressão a vapor utilizando um compressor semi-hermético.

Para obter a vantagem da alta eficiência do refrigerante, o CO<sub>2</sub> é usado no estágio de baixa pressão em cascata onde o mesmo é condensado a  $-5^{\circ}\text{C}$  (condição subcrítica).

O estágio de baixa pressão é conectado a um sistema primário de refrigeração que utiliza o R404a, no qual transfere o calor absorvido dos evaporadores do sistema de média e baixa temperatura com CO<sub>2</sub> e o dissipa à atmosfera através de um condensador resfriado a ar ou água.

Devido à alta densidade do vapor e a elevada eficiência volumétrica, os compressores aplicados com CO<sub>2</sub> geram economias energéticas bem superiores quando comparadas aos sistemas de refrigeração convencionais com o R404a e R22.

O sistema cascata também tem a vantagem de obter um elevado grau de sub-resfriamento de líquido, que resulta em reduções significativas no diâmetro das linhas e também na carga de refrigerante comparado com os refrigerantes R404a e R22.

Em geral, os diâmetros das linhas do sistema com CO<sub>2</sub> foram reduzidos em até 1/5 comparados com os sistemas de R404a e R22 para a mesma capacidade frigorífica.

Devido ao preço de aquisição do CO<sub>2</sub> ser muito mais barato do que os refrigerantes R404a e R22 atualmente comercializados, o custo total da carga de refrigerante foi significativamente reduzido.

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

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

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

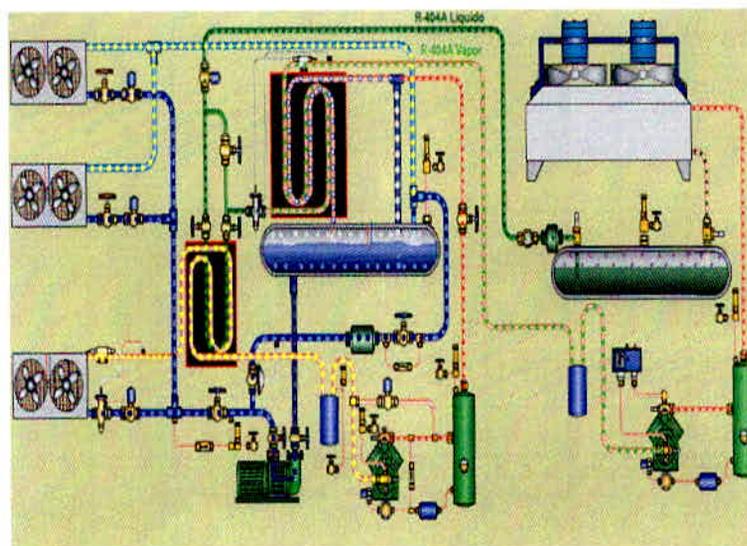


Fig. 4 Sistema subcrítico utilizando CO<sub>2</sub>  
 Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

No coração do sistema está um tanque de líquido especialmente projetado que alimenta uma bomba com CO<sub>2</sub> líquido. Esta bomba alimenta todo o sistema de resfriados e congelados com líquido refrigerante CO<sub>2</sub>.

O CO<sub>2</sub> líquido é bombeado através dos evaporadores de média temperatura no qual se evapora parcialmente, depois o mesmo retorna ao tanque de líquido através de uma mistura “líquido / vapor”, permanecendo ainda na temperatura de aproximadamente  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Os evaporadores de baixa temperatura também são alimentados pela bomba de CO<sub>2</sub>. Porém, neste caso o refrigerante passa através de uma válvula de expansão, ao qual assegura que somente vapor refrigerante superaquecido irá retornar ao compressor de baixa temperatura de evaporação.

O vapor refrigerante que chega na sucção do compressor de baixa temperatura, é por sua vez comprimido até a temperatura de condensação. Este vapor comprimido é então enviado a um trocador de calor a placa juntamente com o retorno do refrigerante proveniente dos

evaporadores de média temperatura, assim ambos são condensados e acumulados no tanque de líquido.



Fig. 5. Detalhe dos racks no centro de treinamento e tecnológico de CO<sub>2</sub> Alemanha  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

Concluída no final de 2008, a primeira etapa do projeto do Centro de Treinamento & Tecnologia CO<sub>2</sub> conta com a instalação de 03 racks de capacidades frigoríficas similares, que utilizam os modernos compressores semi-herméticos alternativos, montados em paralelo, aplicados em média e baixa temperatura de evaporação. De acordo com a figura 5, cada rack utiliza um fluido refrigerante diferente, sendo o CO<sub>2</sub> na condição subcrítica (CO<sub>2</sub>/R404a), R404a e R22

## 4.2. Principais Componentes do Sistema Subcrítico

### 4.2.1. Compressor CO<sub>2</sub>

A pressão do vapor de CO<sub>2</sub> é mais alta que o convencional no ciclo transcrito, conseqüentemente, os equipamentos tem que ser confeccionados de forma especial. Como o compressor é um dos componentes mais importantes do sistema de refrigeração e ar condicionado e tem um efeito importantíssimo na eficiência do sistema, ele deve ser projetado da melhor forma possível.

Há 04 fatores principais que determinam o tamanho relativo dos compressores de CO<sub>2</sub> são:

- ✓ A densidade do vapor (volume específico, L/kg) do R744 é mais elevada do que a do R404A
- ✓ O R744 permite que os compressores operem com taxas menores de compressão
- ✓ Os compressores CO<sub>2</sub> comprimem somente até o estágio intermediário
- ✓ O CO<sub>2</sub> é mantido sub-resfriado no tanque a -10°C



Figura 6. Compressor de CO<sub>2</sub>

Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

Diversas empresas têm apresentado ao mercado mundial alguns modelos de compressores que suportam de maneira adequada as elevadas pressões. Um detalhe interessante que merece ser mencionado é a respeito do tamanho do compressor que opera com o CO<sub>2</sub>, como pode ser observado abaixo, o compressor que opera com o dióxido de carbono apresenta dimensões reduzidas em comparação com o tradicional operando com os outros fluidos.

#### 4.2.2 Trocador de calor CO<sub>2</sub> (Condensadores e Evaporadores)

Os principais estudos sobre trocadores de calor estão sendo voltados para aqueles denominados de micro canais (aqueles com canais da ordem de 1-2 mm), pois os estudos demonstram que são mais eficientes que os tradicionais, além de mais seguros. Entretanto, o desenvolvimento de trocadores mais eficientes está sendo elaborado.

Condensadores resfriados a ar ou a água (inclusive o estágio de alta do rack CO<sub>2</sub> subcrítico). Os ventiladores dos condensadores resfriados a ar também possuem opção de operação com variadores de frequência e controle ON/OFF através de pressostatos para controlar a temperatura de condensação. Os condensadores resfriados a água são do tipo shell-and-tube (casco e tubo) e trabalham em conjunto com uma torre de resfriamento de água. . (SILVA, 2009, p.47).



Figura7. Condensador de CO<sub>2</sub>  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

Os evaporadores dos racks com R404a e R22 utilizados nas câmaras são de expansão direta e possuem opção de operação com válvulas de expansão termostática e válvulas de expansão eletrônica. Os evaporadores do rack com CO<sub>2</sub> são da Bitzer Austrália (Bufalo Trident), os evaporadores de congelados trabalham com expansão direta e utiliza somente a opção com válvula de expansão eletrônica, os 02 evaporadores de resfriados de CO<sub>2</sub> trabalham com re-circulação de líquido e utilizam somente válvulas de expansão manual para controlar a vazão do refrigerante

#### 4.2.3. Válvula de expansão CO<sub>2</sub>

Tem a função de diminuir a pressão para que possa trocar calor melhor e com mais eficiência, alguns autores cogitaram a possibilidade de colocar turbina no lugar da válvula para gerar energia para o compressor, porém o custo de uma turbina de alta pressão é consideravelmente alto para pouca geração de energia.

As válvulas de expansão eletrônica trabalham com 480 diferentes posições de aberturas e possui uma ótima performance na utilização com CO<sub>2</sub>. O “cérebro” dessa válvula é um módulo eletrônico que recebe as informações de temperatura e pressão na saída do evaporador para comandar a abertura e fechamento da válvula de acordo com o superaquecimento, utilizando algoritmo de controle PID que garante a estabilização da temperatura. Além de controlar o superaquecimento do evaporador, o módulo controla as rotinas de degelo em tempo real, as rotinas dos ventiladores dos evaporadores e o controle da solenóide da linha de líquido. Todos os módulos enviam as informações das válvulas como alarmes, % abertura, pressão, temperatura, etc. ao sistema de supervisão, onde é possível visualizar e otimizar todas as condições de operação de cada válvula.. (LORENÇON, 2010, p.22.)



Figura 8. Válvula de expansão eletrônica de CO<sub>2</sub>  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

O controlador recebe as informações de temperatura e pressão na saída do evaporador calcula o superaquecimento e comanda a abertura e fechamento de acordo com o superaquecimento, utilizando algoritmo de controle PID garante a estabilização da temperatura.

### 4.3. Sistemas de Segurança

#### 4.3.1. Válvulas de segurança e alívio

Nos sistemas com o R404a e R22 utiliza-se somente uma válvula de segurança no tanque de líquido de cada rack. Qualquer um desses racks quando pára de operar, a pressão do lado de alta diminui e a de baixa aumenta, até ocorrer a equalização das pressões a um nível equivalente à temperatura ambiente. Entretanto, se em qualquer um dos racks de R404a e R22

a válvula de segurança estiver fechada, a pressão do sistema não irá aumentar drasticamente. Já no sistema de CO<sub>2</sub>, por uma questão de segurança, o CO<sub>2</sub> não poderá ficar aprisionado em nenhuma parte do sistema, principalmente na fase líquida, o que poderá aumentar sua temperatura e pressão caso ocorra alguma transferência de calor.

Por este motivo, foi instalada uma válvula de alívio em cada parte do sistema para evitar o aprisionamento do CO<sub>2</sub>, assim as pressões acima de 40 bar do lado de alta e 25 bar do lado de baixa serão aliviadas e o sistema irá trabalhar com segurança.



Figura 9. Válvula de alívio e uma válvula de bloqueio CO<sub>2</sub>  
 Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

No rack de CO<sub>2</sub> as principais áreas são protegidas com válvulas de segurança, como por exemplo, lado de sucção, lado descarga, tanque de líquido e descarga da bomba de CO<sub>2</sub> (linha de líquido). “Juntamente com cada válvula de segurança foi instalada uma válvula de serviço de ¼” para manutenção. Com isso é possível ter acesso ao sistema através de vários pontos, o que permite adicionar, remover e transferir o refrigerante, ou para fazer evacuação. Já que o CO<sub>2</sub> se transforma em gelo seco com temperaturas abaixo de -56°C ou abaixo de 5,2 bar, a transferência de gás de uma tubulação para outra é uma prática muito útil para impedir a formação de gelo quando houver a presença de líquido.

Para evitar qualquer obstrução ocorrida pela formação de gelo seco no interior das linhas de alívio, recomenda-se sempre instalar a linha de alívio de pressão até a válvula de segurança e nunca após a mesma, principalmente as linhas que irão aliviar o CO<sub>2</sub> na fase líquida. Caso contrário, se o CO<sub>2</sub> for liberado através de uma

linha de alívio instalada após a válvula de segurança, essa linha irá congelar (ocorrerá a formação de gelo seco –  $\text{CO}_2$  no ponto de expansão) e, conseqüentemente, ainda haverá  $\text{CO}_2$  em alta pressão nessa linha e possivelmente causará problemas para o pessoal de manutenção..( SILVA, 2009, p.55).

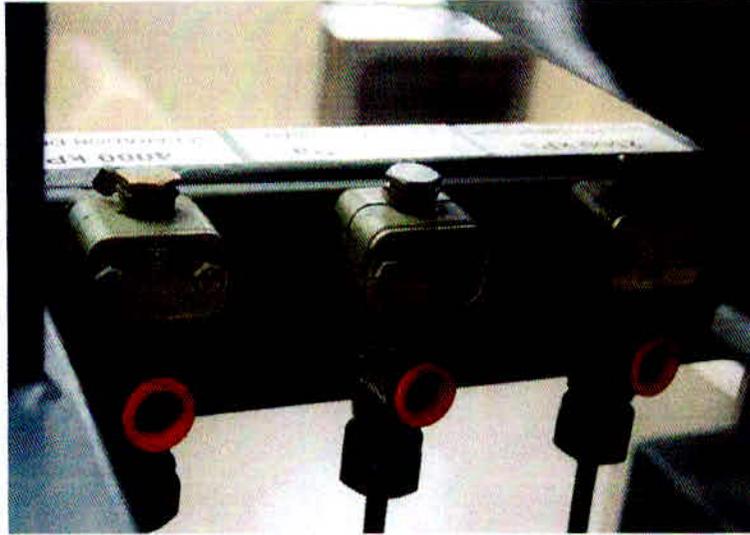


Figura 10. Detalhe das válvulas de segurança de  $\text{CO}_2$   
 Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

As válvulas de segurança sempre deverão ser direcionadas longe das áreas ocupadas, preferencialmente para o lado de fora da sala de máquinas e também longe dos dutos de entrada do ar condicionado; o mesmo deverá ser feito quando o  $\text{CO}_2$  for liberado para a atmosfera. É importante saber que quando o  $\text{CO}_2$  na fase líquida for retirado de um sistema ele estará a  $-56^\circ\text{C}$ , como sua pressão ficará abaixo 5,2 bar, conseqüentemente sua temperatura cairá a  $-78^\circ\text{C}$  e irá formar gelo seco.

#### 4.3.2. Sistema de monitoramento de vazamento $\text{CO}_2$

Os sensores de  $\text{CO}_2$  (monitores) foram instalados na sala de máquinas e câmaras para detectar possíveis vazamentos de  $\text{CO}_2$  e acionar o sistema de exaustão e alarme. Os sensores de  $\text{CO}_2$  são do tipo infravermelho e possuem limites de alarme de 500 – 9.000 ppm. Aqueles refrigerantes com densidades maiores do que o ar permanecerá nos pontos mais baixos do ambiente. Todos estes gases podem matar uma pessoa. O Dióxido de Carbono pode causar asfixia e morte em áreas confinadas e mal ventiladas.

O vazamento de CO<sub>2</sub> dentro de um espaço confinado poderá ser fatal se a pessoa estiver realizando serviços de manutenção no equipamento tais como: substituição de um ventilador, válvula ou banco de resistência.



Figura 11. Sistema de exaustão de ar em caso de vazamento de CO<sub>2</sub>  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

Todas as pessoas que trabalham ou estão envolvidas com sistemas de refrigeração que utilizam CO<sub>2</sub>, devem se preocupar com suas próprias seguranças e com as dos outros.

#### 4.3.3. Unidade de emergência do sistema de CO<sub>2</sub>

Para evitar o problema com a elevação da pressão quando o rack de CO<sub>2</sub> estiver fora de operação, foi instalada uma unidade condensadora em conjunto com o trocador cascata de CO<sub>2</sub> (ver a figura 12).

A função básica dessa unidade é manter o CO<sub>2</sub> frio dentro do tanque de líquido. Esta unidade, chamada de unidade de emergência de CO<sub>2</sub>, é acionada pela energia elétrica da concessionária e também por um gerador elétrico de maneira automática em caso de falta de energia. Existem também outras maneiras para manter o CO<sub>2</sub> frio dentro do tanque, por exemplo, instalar o próprio tanque dentro da câmara de congelados, instalar o conjunto gerador no estágio de alta pressão, etc.

O CO<sub>2</sub> tem propriedades diferentes dos outros tipos de refrigerante, seu comportamento é extremamente perigoso quando e exposto ambientes com temperaturas

elevadas, a pressão de condensação pode ultrapassar a pressão do ponto crítico neste ponto não há diferença de densidade da fase líquida para a fase sólida.

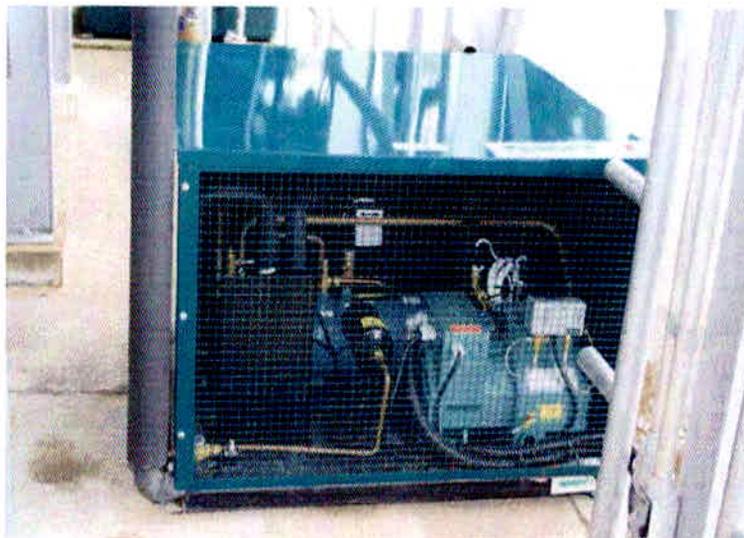


Figura 12. Unidade de emergência do sistema de CO<sub>2</sub>  
Fonte: Silva (2009), Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração

#### 4.4. Comparação do impacto ambiental dos refrigerantes

O Brasil, assim como vários outros países, é signatário do Protocolo de Montreal e possui uma data limite para eliminar as substâncias destruidoras da camada de Ozônio.

Tabela1. Comparação do Impacto Ambiental dos Refrigerantes

<b>Comparação do Impacto Ambiental dos Refrigerantes</b>				
<b>Refrigerante</b>	<b>Nome</b>	<b>Formula Química</b>	<b>ODP</b>	<b>GWP 100 anos</b>
R22	Clorodifluorometano	CHClF <sub>2</sub>	0,05	1500
R404a	Mistura HFC	R125/R134a/R143a	0	3260
R507a	Mistura HFC	R125/R134a	0	3300
R290	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	3
R717	Amônia	NH <sub>3</sub>	0	0
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	0	1

Fonte: Autor

Os refrigerantes alternativos e naturais, que são ecologicamente corretos, está sendo cada vez mais utilizados devido ao baixo potencial ou zero de destruição do Ozônio.

A Natureza exigiu e a Brasil cumprindo um amplo programa de desenvolvimento e padronização global, vem utilizando novas tecnologias com refrigerantes alternativos naturais como o Dióxido de Carbono – CO<sub>2</sub>, evitando assim os problemas causados pelos (H) CFC's e HFC's na Camada de Ozônio e Aquecimento Global (efeito estufa).

#### 4.5. Segurança dos fluidos refrigerantes

Devemos ter muito cuidado ao trabalho com os refrigerantes, pois são asfixiantes e podem também causar graves queimaduras por baixas temperaturas em contato com a pele, olhos, etc.

Tabela2. Segurança nos Sistema de Refrigeração

<b>Segurança nos Sistemas de Refrigeração</b>				
<b>Refrigerante</b>	<b>Código HAZCHEM</b>	<b>Ponto de ebulição °c</b>	<b>Código segurança</b>	<b>Perigo</b>
CO <sub>2</sub>	2RE	-78,5	A1	Asfixiante
R410a	2RE	-52,2	A1	Asfixiante em alta concentração
R404a	2RE	-46,8	A1	Asfixiante em alta concentração
R507	2RE	-46,7	A1	Asfixiante em alta concentração
R407C	2RE	-43	A1	Asfixiante em alta concentração
R22	2RE	-40,7	A1	Asfixiante em alta concentração
R134a	2RE	-26,2	A1	Asfixiante em alta concentração
R717	2RE	-33,4	B2	Tóxico por inalação

Fonte: Autor

Ocorrendo um acidente com inalação de altas concentrações desses gases, imediatamente deve-se remover a vítima para ar fresco.

A principal diferença entre os refrigerantes está na sua temperatura de evaporação. Em caso de vazamento, o contato do gás com a pele a -78,5°C terá um efeito muito mais grave do que um gás refrigerante a -40°C.

Todas as pessoas que trabalham ou estão envolvidas com sistemas de refrigeração que utiliza CO<sub>2</sub>, devem se preocupar com suas próprias seguranças e com as dos outros.

#### 4.6. Comparativo de capacidade entre sistemas utilizando fluidos refrigerantes distintos

A tabela 03 mostra os resultados obtidos de 3 câmaras frigoríficas, sendo 2 de média temperatura (resfriados e walk-in cooler) e 1 de baixa temperatura (congelados).

Tabela 03. Comparativo de Ciclos Utilizando Fluidos Refrigerantes Diferentes

	<b>Rack (CO2/R404A)</b>	<b>Rack R404A</b>	<b>Rack R22</b>
<b>Condição de projeto MT</b>	TO = -10°C (estágio alta) TC = 40°C (estágio alta)	TO = -10°C TC = 40°C	TO = -10°C TC = 40°C
<b>Condição de projeto LT</b>	TO = -30°C (CO2) TC = -5°C (CO2)	TO = -30°C TC = 40°C	TO = -30°C TC = 40°C
<b>Compressores</b>	01 x 2KC-3.2K (CO2) 01 x 4CC-9.2Y (R404A)	01x4CC-9.2Y (MT) 01x4TCS-8.2Y (LT)	01x4CC-9.2 01x4TCS-8.2
<b>Capacidade sistema MT</b>	<b>21,0 kW</b>	<b>21,0 kW</b>	<b>19,82 kW</b>
<b>Capacidade sistema LT</b>	<b>9,81 kW</b>	<b>10,66 kW</b>	<b>9,9 kW</b>
<b>Carga de refrigerante total</b>	32 Kg	125 Kg	115 Kg
<b>Tubulação cobre utilizada</b>	62 Kg	196 Kg	187 Kg
<b>Carga de óleo total</b>	3 litros	20 litros	18 litros
<b>Tipo óleo</b>	BSE60K (Polioléster)	BSE32 (Polioléster)	B5.2 (sintético)
<b>Potência nominal instalada dos Compressores de MT e LT</b>	3 Hp (CO2) 9 Hp (R404A) <b>Total = 12 Hp</b>	9 Hp (MT) 7,5 Hp (LT) <b>Total = 16,5 Hp</b>	9 Hp (MT) 7,5 Hp (LT) <b>Total = 16,5 Hp</b>
<b>Potência consumida comp. MT</b>	8,66 kW (estágio R404A)	8,66 kW	7,49 kW
<b>Potência consumida comp. LT</b>	2,26 kW (estágio CO2)	6,72 kW	6,11 kW
<b>Potência consumida do Rack</b>	10,92 kW (compressores) 0,5 kW (bomba CO2) <b>Total = 11,42 kW</b>	<b>Total = 15,38 kW</b>	<b>Total = 13,6 kW</b>

Fonte: Autor

Em cada câmara estão instalados os evaporadores (forçadores de ar) de seus respectivos racks (CO2, R404a e R22). Além disso, também estão instaladas 02 ilhas de congelados conectadas somente no rack de CO2. Para fins de comparação do consumo energético, o funcionamento dos equipamentos limita-se a apenas um rack por vez, ou seja, enquanto um rack estiver operando os outros dois permanecerão desligados.

#### 4.7. Resultados

Os principais resultados dos sistemas são: Elevada eficiência do sistema e redução do custo de operação.

Estes sistemas consomem menos energia e operam somente por poucas horas decido às superfícies dos evaporadores que são usados eficientemente com boa distribuição de refrigerante, conseqüentemente as superfícies internas dos tubos ficam completamente molhados, os compressores por sua vez, são protegidos do retorno de líquido que ocorre através da flutuação das cargas ou do mau funcionamento do sistema, sendo este líquido separado do vapor da sucção dentro do tanque da baixa pressão.

É importante e necessário que o todo o grupo técnico (O&M, instalador, cliente final, etc.), seja previamente treinado com a tecnologia de CO<sub>2</sub> antes de iniciar os serviços de instalação, operação e manutenção dos equipamentos com CO<sub>2</sub>.

De certo modo o sistema subcrítico com CO<sub>2</sub> é mecanicamente muito simples, mas exige um amplo conhecimento referente ao seu comportamento sob certas condições. O mais importante é saber como o sistema irá reagir com a falta de energia elétrica, ou com uma falha no estágio de alta pressão que deixará de refrigerar o trocador de calor cascata.

É muito importante que cada situação seja muito bem estudada antes do equipamento ser entregue ao cliente, de modo que a equipe de comissionamento saiba como será a reação do sistema, e a equipe de manutenção, que é responsável pelo sistema, saiba o que deverá fazer. Somente então o sistema poderá ser instalado e operado de maneira segura e confiável com a satisfação de todos.

O pessoal de manutenção precisa ter um conhecimento íntimo das interdependências entre os sistemas de controle do estágio de alta e baixa, assim como ser eficaz na manutenção e na conservação destes sistemas. O pessoal já deverá ter familiaridade com a operação, questões de segurança e controle para se assegurar de que o sistema irá operar de maneira segura e eficiente ao longo de sua vida útil.

#### **4.7.1. Vantagens e Desvantagens**

A principal diferença entre um sistema com CO<sub>2</sub> e outro, é que o CO<sub>2</sub> opera com pressões mais elevadas.

No sistema Transcrítico existe algumas restrições, devido seu COP (coeficiente de eficaz), quando se trabalha com a temperatura ambiente elevada. Já no sistema Subcrítico com a aplicação do sistema Cascata, conseguimos condensar o CO<sub>2</sub>, mesmo com temperaturas mais elevadas, aumentando seu coeficiente de eficaz.

Sendo assim temos vantagens e desvantagens em se trabalhar com este tipo de refrigerante.

Tabela 04. Comparativo de Ciclos Utilizando Fluidos Refrigerantes Diferentes

<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
Economia de energia (aprox. 30%)	Necessário um nível técnico mais elevado para realização do serviço
Baixa relação de compressão & Aumento da vida útil	Perda potencial da eficiência dos sistemas com elevação na temperatura
Alta densidade do vapor – Menor superaquecimento	Aumento da pressão CO <sub>2</sub> em caso da parada total da instalação
Redução na carga de refrigerante	Necessário utilizar controles extras de segurança
Redução dos diâmetros da tubulação	
Baixo custo do refrigerante (50 Centavos/Kg)	
Fonte disponível na natureza	
Elevada Entalpia de refrigeração	
Baixo GWP & Menor taxa de carbono	
Menor volume deslocado dos compressores	
Baixo custo de manutenção	
Operam somente por poucas horas	

Fonte: Autor

O Sistema básico de refrigeração com compressão a vapor subcrítico usando o R744 não é diferente do sistema convencional com R22 ou R404a.

Os componentes são similares em relação ao tamanho, porém com variações da capacidade dependendo das condições de trabalho

## CONCLUSÃO

A reativação do CO<sub>2</sub> como um refrigerante começou há mais de 15 anos na Europa, e houve um desenvolvimento de novas tecnologias que a utilizam desde então. Desenvolvimentos que inicialmente foram dirigidos principalmente por preocupações ambientais resultaram vantagens adicionais usando CO<sub>2</sub>, com coeficiente de eficácia mais elevado, resfriando e aquecendo com melhor capacidade e com possibilidades de recuperação de calor. Com foco crescente na redução de emissão de gases poluentes na atmosfera, os estudos dirigirão claramente em geral aos refrigerantes naturais e o R-744 em particular.

Mesmo que os estudos estejam iniciando, os desenvolvimentos de novos projetos para sistemas frigoríficos e ar condicionado são de fundamental importância para o setor. Infelizmente, no Brasil, as empresas possuem uma dependência de informações provenientes do exterior.

## BIBLIOGRAFIA

CATALOGUE OF HERMETIC REFRIGERANT PUM – **Installation And Operation Instructions** – TH. Witt Kaltermaschinenfabrik

DIÓXIDO DE CARBONO CO<sub>2</sub> – **Ficha De Informação De Segurança De Produto Químico** Lique Gas – Aga, 2004,p. 1 a 8

KALTEMASCHINENOEL BSE 60K – **Synthetic Refrigeration Oil For Bitzer CO<sub>2</sub> Compressors** – Subcritical Application – Technical Documentation. Sindelfingen, Bitzer, 2007, p. 1 a 4

SILVA, Alessandro da. **Aplicações do CO<sub>2</sub> no setor de Refrigeração Comercial para Supermercado** - Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado. Publicação Técnica. 1º Ed. 2008, p. 22 a 153

STENHEDE, Clae. **Manual Alfa Lava Trocadores De Calor**. 4º Ed. 2001, pag. 162 a 164

**TECHNICAL ARTICLE OF REFRIGERANT FOR INDUSTRIAL REFRIGERATION** – RZOZR102 – A/S (RC-CM/MWA). Danfoss,2002

[http:// www.eco2technologies.com.au](http://www.eco2technologies.com.au) acesso em 18 set. 2010

[http:// www.r744.com](http://www.r744.com) acesso em 18 set. 2010