



ESTUDO DO DIÓXIDO DE CARBONO, CO₂, OPERANDO COMO FLUIDO REFRIGERANTE EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Heverson Marcos Souza Ladeira

Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160
Uberlândia - MG - 38400-902
heversonmsladeira@yahoo.com.br

Enio Pedone Bandarra Filho

Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2160
Uberlândia - MG - 38400-902
bandarra@mecanica.ufu.br

Resumo: *Esse artigo tem como objetivo uma análise da literatura disponível sobre o dióxido de carbono, CO₂, 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 CO₂ para um melhor esclarecimento do ciclo supercrítico e do ciclo em cascata. 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: CO₂, dióxido de carbono, transcrito, cascata, refrigerante.

1. INTRODUÇÃO

Nas ultimas 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, NH₃, 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 CO₂ (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 CO₂ é utilizado no circuito de baixa temperatura e outro fluido refrigerante, R-134a, R-

404A, Amônia, entre outros, é usado no circuito de alta temperatura. Assim, a condensação do CO₂ 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 CO₂ em sistemas automotivos opera de maneira distinta dos fluidos halogenados. Enquanto os halogenados acontece a condensação do fluido, nos sistemas com CO₂ ocorre um resfriamento do fluido, pois as temperaturas, nesse caso, superam a temperatura crítica do CO₂. Esses sistemas são denominados de ciclos transcíticos. A Figura 1 ilustra o exemplo de ciclos em sistemas de ar condicionado automotivo, num diagrama Temperatura versus Entropia, do CO₂ (R-744) e R-134a.

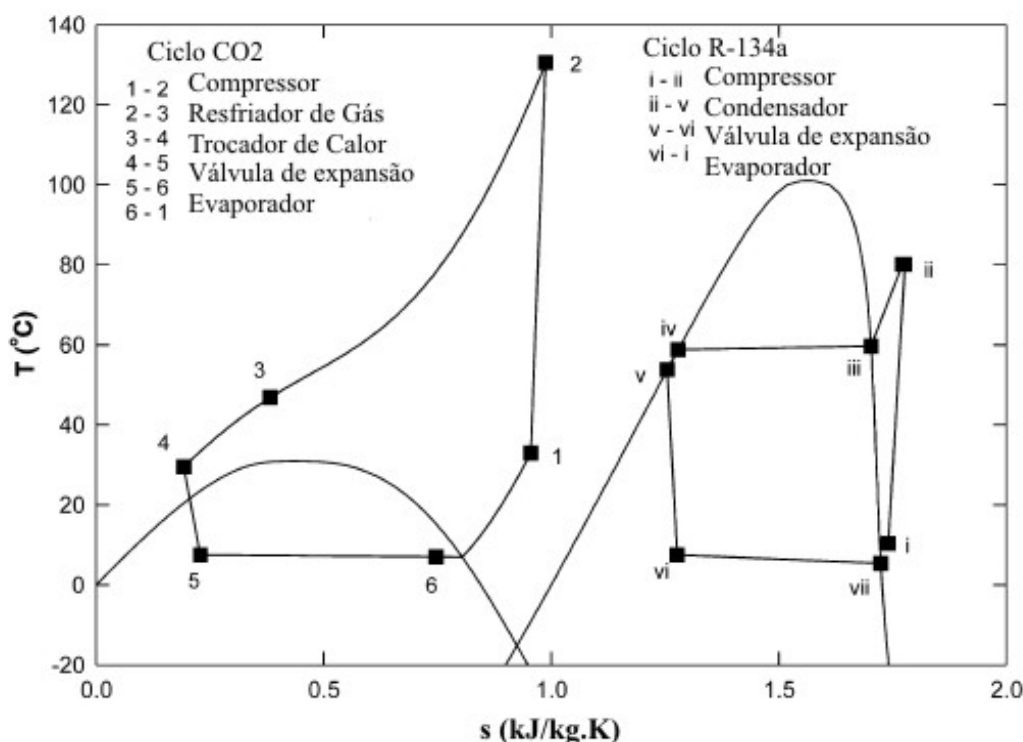


Figura 1 Exemplo de ciclos em sistemas de ar condicionado automotivo.

2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Existem poucos trabalhos realizados com o R-744 como fluido refrigerante, por esse motivo há uma dependência de trabalhos de pesquisadores europeus, como pode ser verificado nas referências bibliográficas. Nessas condições, serão apresentados alguns pontos essenciais para o início de estudos nessa linha de pesquisa.

2.1 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:

- CO₂ não é inflamável e não tóxico
- Pressão crítica é 73,8 bar (7,38 MPa) e temperatura crítica 31,1°C

- Ponto triplo $-56,6^{\circ}\text{C}$ e 5,2 bar (520 kPa) como pode ser observado no diagrama de fases na Figura 2.
- 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^3 , que se define como a retirada de calor do produto a ser refrigerado com mais eficiência e menos tempo de congelamento (caso de frigoríficos).

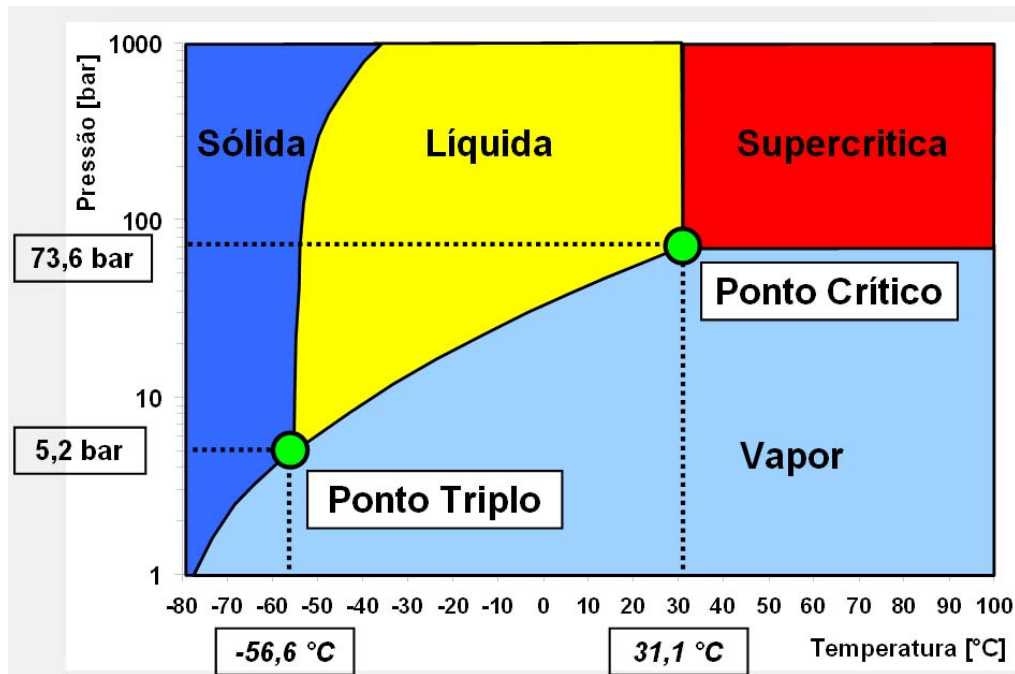


Figura 2. Diagrama de fases do dióxido de carbono, CO_2 .

- A viscosidade tem uma alteração considerável na região supercrítica em relação àquela abaixo da crítica, conforme mostrado na figura abaixo.

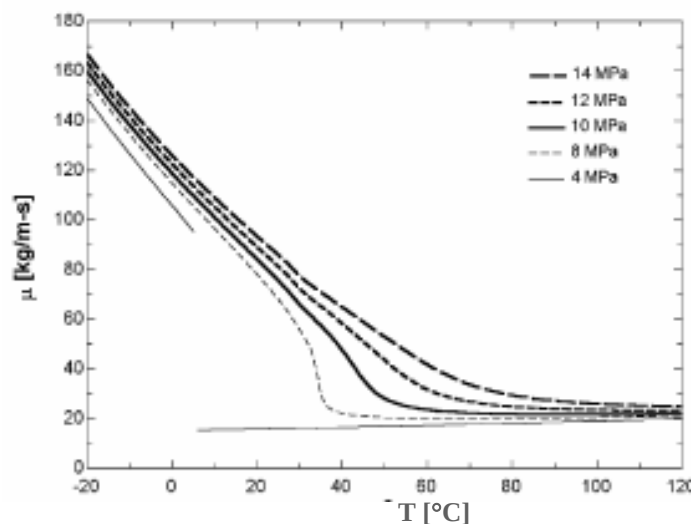


Figura 3. Viscosidade do R-744 em função da temperatura.

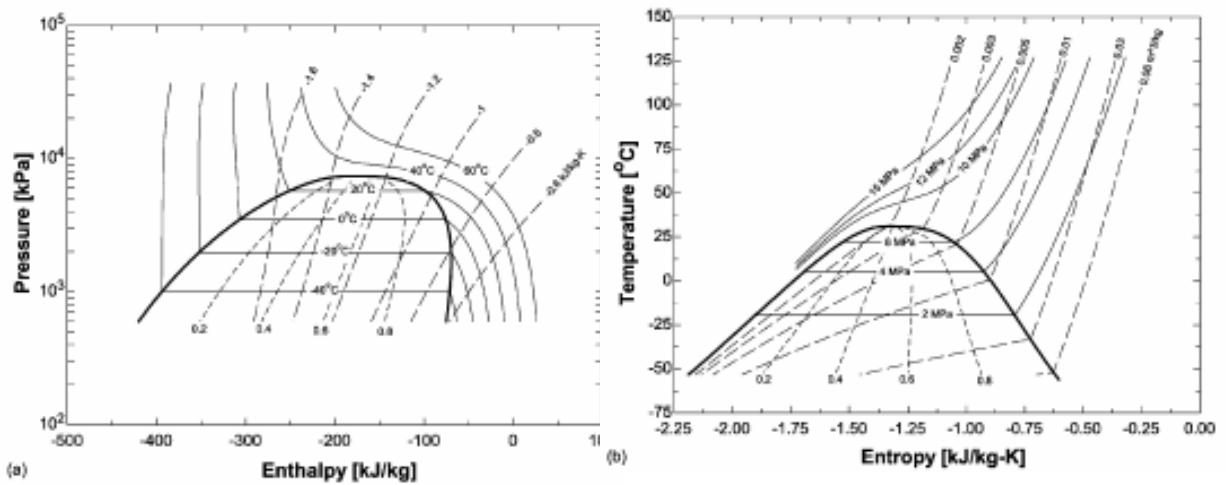


Figura 4. Diagrama Pressão versus entalpia (a) e temperatura versus entropia (b).

A Figura 5 ilustra a mudança brusca perto do ponto crítico de entalpia e entropia em função da pressão. Abaixo da temperatura crítica, a pressão influencia muito pouco a entropia e entalpia, porém acima dessa temperatura a variação é considerável.

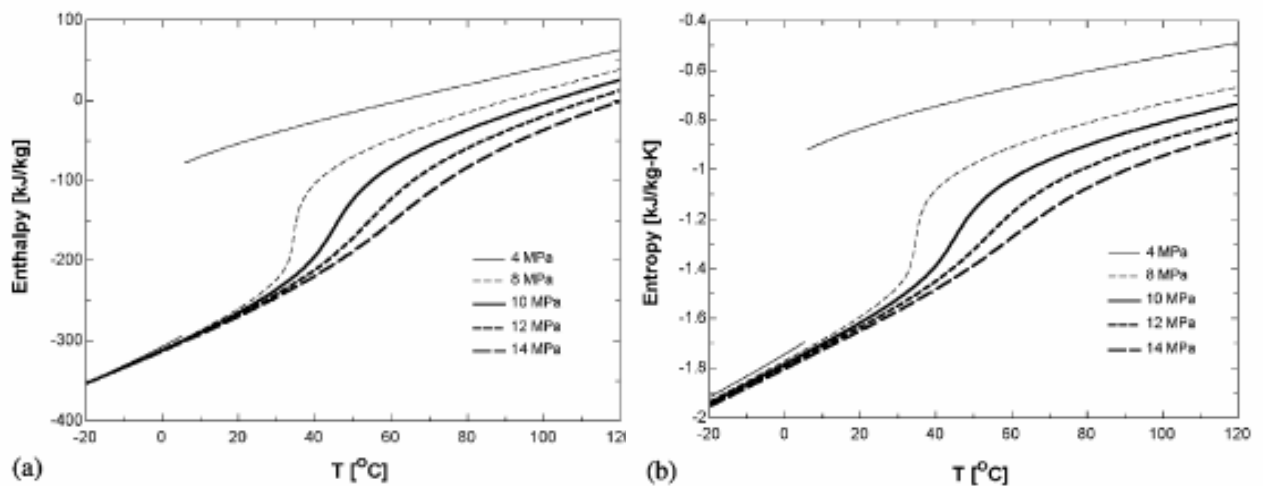


Figura 5. Variação de entropia e entalpia em função da pressão.

A Figura 6 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.

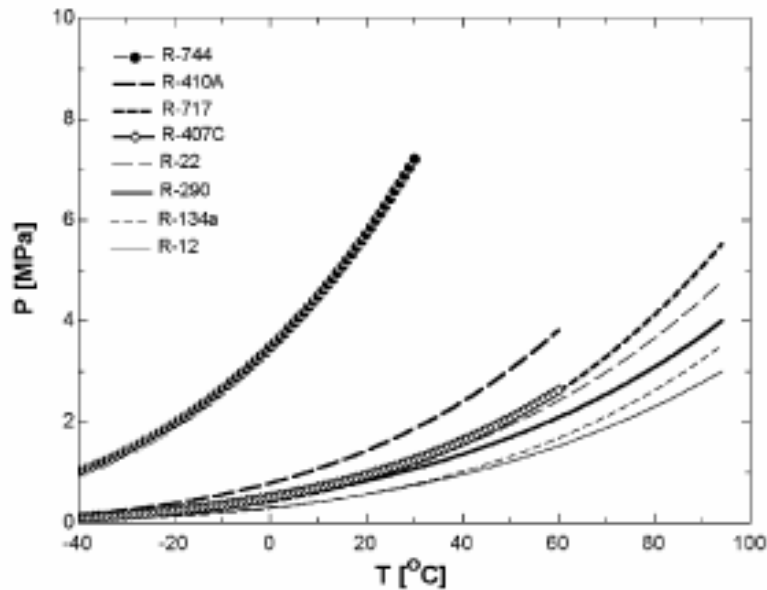


Figura 6. Pressão de vapor de vários refrigerantes em função da temperatura.

A densidade de CO_2 altera rapidamente com a temperatura, próximo do ponto crítico, e a variação de densidade de CO_2 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 .

A tensão superficial, σ , 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 na Figura 7.

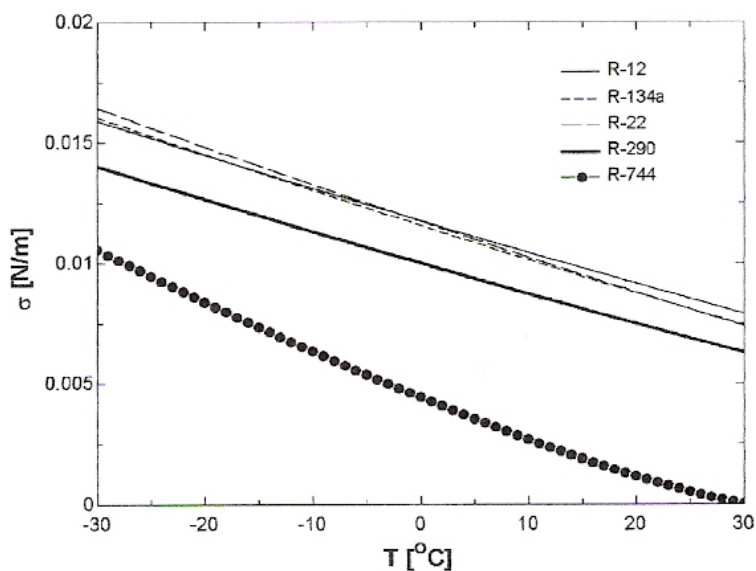


Figura 7. Tensão superficial dos refrigerantes.

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 na Figura 8.

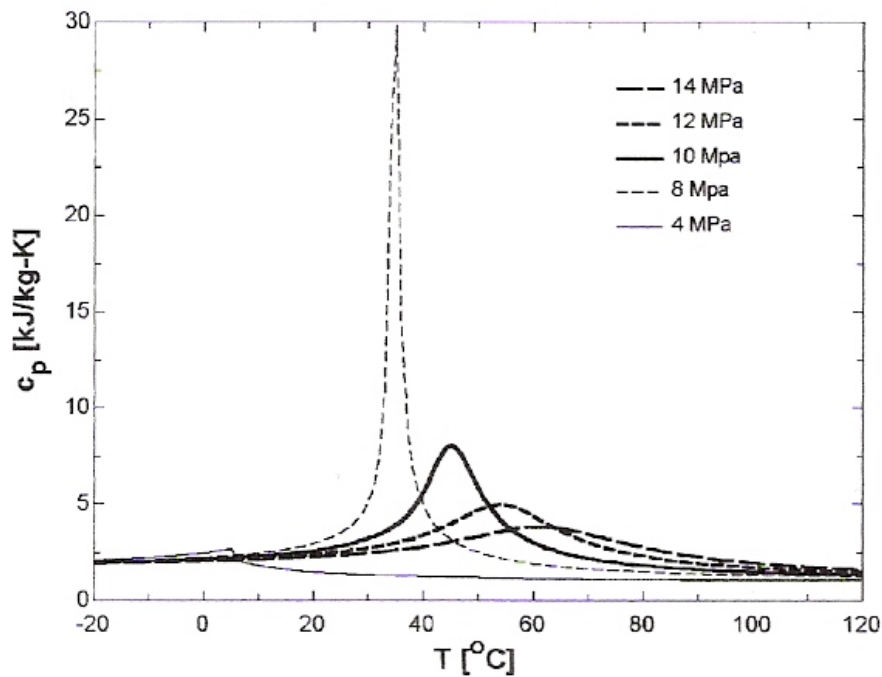


Figura 8. Variação das características do fluido no processo isobárico.

Uma das principais conclusões desse item é que as propriedades de transportes do CO₂, R-744, favorecem a transferência de calor comparado com outros refrigerantes usados atualmente.

2.2 Ciclo Transcrítico

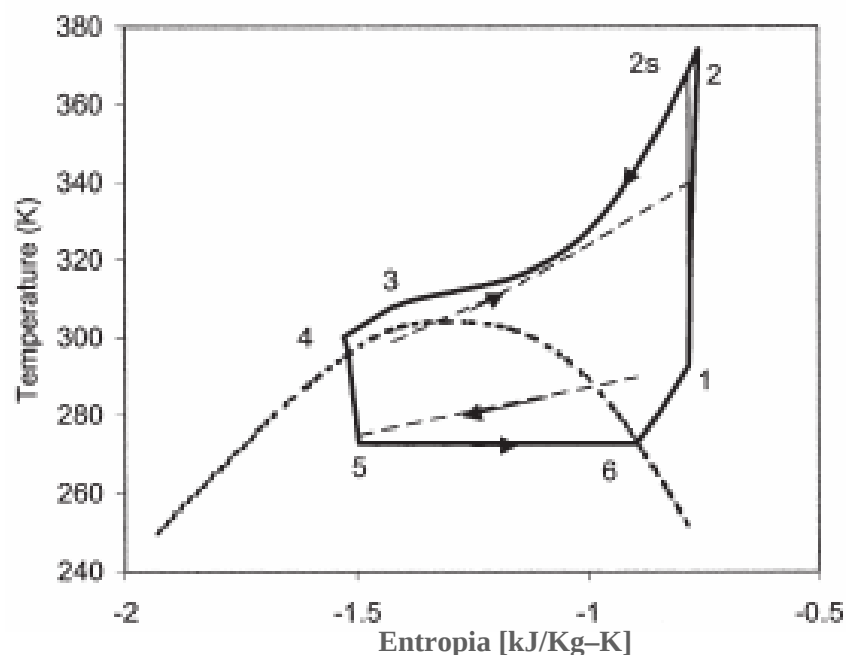


Figura 9. Diagrama Temperatura-Entropia ilustrando um ciclo transcrito de CO₂.

Na Figura 9, o processo 1-2s é um processo denominado compressão isentrópica, 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.

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 NH_3 (amônia ou R-717), e no ciclo de baixa temperatura tem-se então, o circuito com o dióxido de carbono (R-744). 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 10 ilustra uma fotografia de uma planta em operação operando com o ciclo em cascata da empresa Nestlé na Suíça.



Figura 10. Planta experimental do ciclo de CO_2 com NH_3 - Nestlé - Suíça

3. PRINCIPAIS COMPONENTES EM UM CICLO COM CO_2

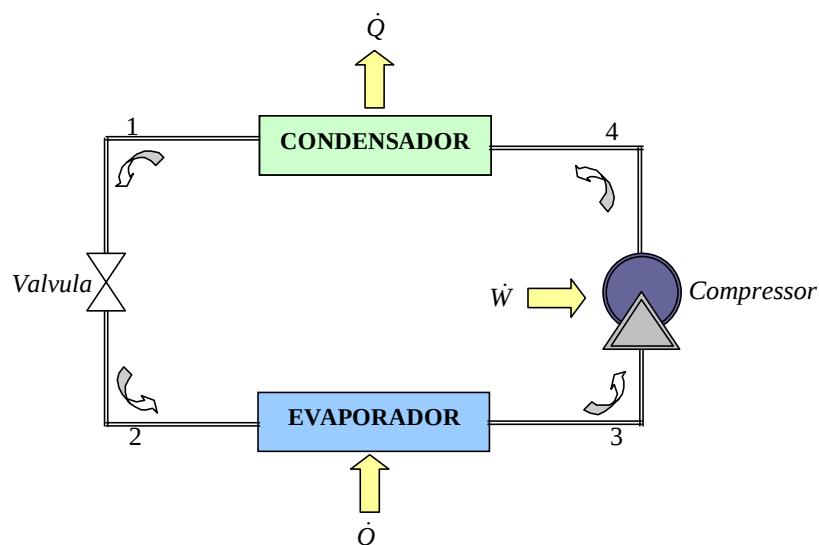


Figura 11. Componentes de um ciclo básico de compressão de vapor.

3.1 Compressor

A pressão do vapor de CO_2 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 importante do sistema de refrigeração e ar condicionado e tem um efeito importantíssimo na eficiência do sistema, ele deve ser projetado da melhor forma possível. Diversas empresas tem 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_2 , como pode ser observado na Fig. 10, o compressor que opera com o dióxido de carbono apresenta dimensões reduzidas em comparação com o tradicional operando com o R-134a.

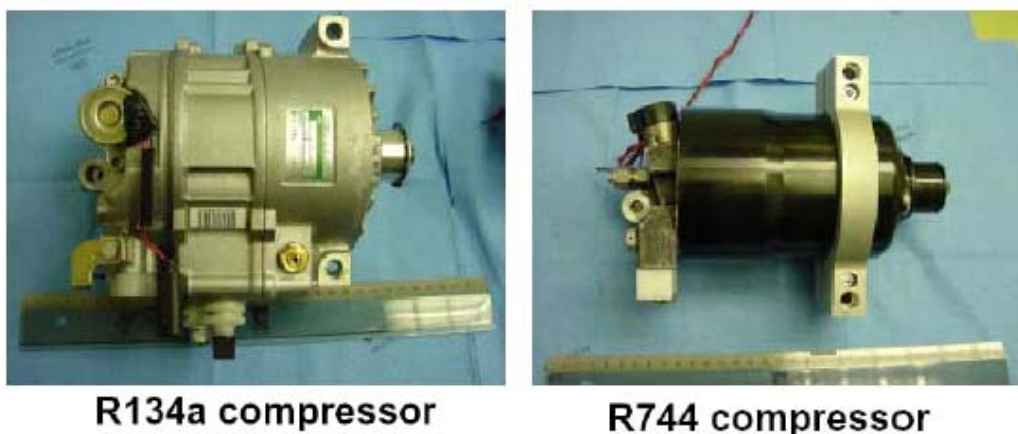


Figura 12. Comparação entre compressores operando com R-134a e R-744.

3.2 Trocadores de calor

Os principais estudos sobre trocadores de calor estão sendo voltados para aqueles denominados de microcanais (aqueles com canais da ordem de 1-2mm), 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.

3.3 Válvulas de expansão

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.

4. CONCLUSÕES GERAIS

A reativação do CO_2 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_2 , 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, o desenvolvimento 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.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kauf F., 1999, "Determination of the optimum high pressure for transcritical CO₂ – refrigeration cycles", International Journal of Thermal Sciences vol. 38.
2. Pearson, A. 2001, "New Developments in Industrial Refrigeration", Ashrae Journal, Vol. 43, No. 3, pp 54-59.
3. Billiard, F. 2002, "Use of carbon dioxide in refrigeration and air conditioning", International Journal of Thermal Sciences vol. 25.
4. Karkar, J. , Bhattacharyya, S., Gopal, M.R., 2004 , "Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications", International Journal of Thermal Sciences.
5. Kim, M.H., Pettersen, J., Bullard, C.W., 2004, "Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems", International Journal of Thermal Sciences vol 30.
6. Neksa, P., 2004, "CO₂ as refrigerant for systems in transcritical operation principles and technology status", International S. natural refrigerants in Sydney
7. Lorentzen, G., Pettersen, J., 1993, "A new efficient and environmentally bening system for car air conditioning", International Journal of Thermal Sciences vol 16.

STUDY OF CARBON DIOXIDE, CO₂, IN REFRIGERATION SYSTEM

Heverson Marcos Souza Ladeira

Faculdade Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Laboratório Energia e Sistemas Térmicos

heversonmsladeira@yahoo.com.br

Enio Pedone Bandarra Filho

Faculdade Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

Laboratório Energia e Sistemas Térmicos

bandarra@mecanica.ufu.br

Abstract: *This paper provides a critical review of literature on the carbon dioxide, CO₂, which is quoted to substitute CFC in the systems of refrigeration and air-conditioning. This paper presents properties and characteristics of CO₂, for a better application of the transcritical CO₂ cycle. The vapor pressure of R-744 is higher than conventional refrigerants. Higher pressure gives special requirements regarding the design of suitable components.*

Keywords: CO₂, carbon dioxide, transcritical, cascade, refrigerant.