

CO₂ - PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

Luís M.P. Souza; Enio.P.B. Filho.

O presente trabalho trata do estado da arte sobre o refrigerante dióxido de carbono, que vem sendo amplamente difundido como substituto dos CFC's nos sistemas de refrigeração. Esse estudo aborda um histórico evolutivo das principais aplicações do CO₂, além de incluir uma análise das principais características do mesmo. O CO₂ possui características únicas de operação, como por exemplo, elevadas pressões. Dessa forma os equipamentos, bem como a mão de obra envolvida devem atender às condições especiais de fabricação, manutenção e operação. Destacam-se ainda as exigências estabelecidas nos acordos mundiais (Protocolo de Montreal e Kyoto) que estabelecem parâmetros e restrições quanto ao uso dos CFC's, HCFC's e HFC's, intensificando-se assim as pesquisas sobre fluidos refrigerantes naturais, dos quais o CO₂ se destaca uma vez que este não agride a Camada de Ozônio e possui baixo valor de Potencial de Aquecimento Global.

A comunidade científica vem buscando novas técnicas para a substituição dos compostos halogenados, principalmente os CFC's, que destroem a camada de ozônio, bem como aqueles que colaboram com o efeito estufa. Como a legislação restringe o uso de fluidos refrigerantes sintéticos no mundo todo, ressurgiu a necessidade de utilizar os refrigerantes alternativos e naturais dos quais se destaca o dióxido de carbono. O Dióxido de Carbono - CO₂ é também conhecido como R744 de acordo com a norma ANSI/ASHRAE 34 – 1989. O CO₂ não é um fluido refrigerante novo, sua proposta de utilização é dada no ano 1850, tendo como pico de utilização as décadas de 20 e 30, mas por diversos motivos entre eles o financeiro, este fluido foi esquecido, cedendo espaço aos refrigerantes halogenados. No ano de 1993 o Prof. Gustav Lorentzen propôs a reinserção do CO₂ fluido refrigerante natural para aplicações de refrigeração devido as vantagens oferecidas pelo CO₂. Essa reinserção é devido aos fluidos refrigerantes halogenados CFC's, HCFC's e HFC's, possuem elevado ODP (Potencial de Destruição da Camada de Ozônio) e GWP (Potencial de Aquecimento Global), o que não ocorre com o CO₂, pois seu ODP é zero e seu GWP é 1 (O CO₂ é referência aos demais fluidos). Na Fig. 1 pode ser observado o ciclo de utilização do CO₂ com o decorrer dos anos.

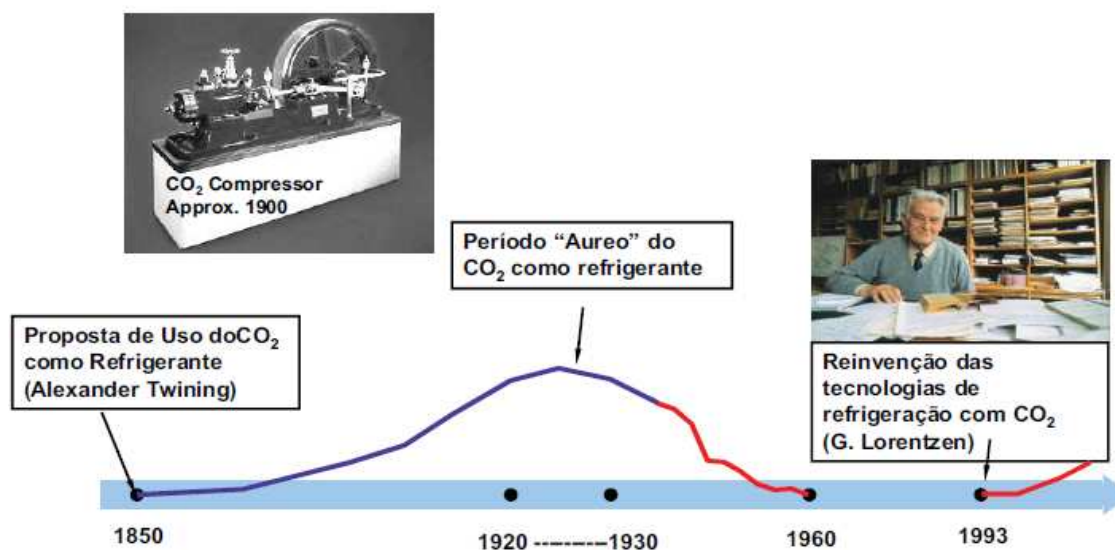


Figura 1: Evolução no uso de CO₂.

O CO₂ pertence ao grupo de fluidos refrigerantes naturais junto com o R717 (Amônia), os Hidrocarbonetos, como o R710 (Etano), o R290 (Propano), o R600 (Isobutano), e o R718 (Água), por ser natural é encontrado na atmosfera na proporção de 0,036%, ou 360 ppm. Todos os fluidos

refrigerantes possuem suas respectivas vantagens e desvantagens. O R717 possui melhor efeito de refrigeração, porém é tóxica, os hidrocarbonetos são inflamáveis, e a água tem aplicações limitadas. Em contrapartida o CO₂ não é tóxico e nem inflamável, entretanto é um gás do efeito estufa, que causa aquecimento global e que pode mudar o meio ambiente caso haja alteração na sua concentração na atmosfera. Uma desvantagem no uso do CO₂ é seu coeficiente de eficácia, COP, ser baixo quando operado com altas temperaturas ambientes. Para sanar o problema do COP o CO₂ é utilizado no ciclo subcrítico em cascata. No ciclo subcrítico em cascata o CO₂ é utilizado no circuito de baixa temperatura e outro fluido refrigerante como o R134a, o R404A, o R22, ou o R717, por exemplo, 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. Destaca-se também que o CO₂ opera de maneira distinta dos fluidos halogenados, enquanto nos halogenados ocorre à condensação do fluido, nos sistemas de CO₂ principalmente no ciclo transcrito, ocorre um resfriamento do fluido, pois as temperaturas superam a temperatura crítica do CO₂.

Silva, A. discute em seu trabalho a aplicação de CO₂ no setor supermercadista, principalmente em países Europeus, entre eles Alemanha, Dinamarca e Suécia, e outros. O autor realiza um estudo sobre a aplicação do CO₂ (R744) e da Amônia (R717) em sistema cascata, para substituição do R22, que possui alto GWP, uma vez que este último é utilizado por cerca de 180 mil lojas de supermercado no Brasil, perfazendo um total de uso de 5.000 toneladas de R22/ano. Neste trabalho o autor apresenta diversas possibilidades de aplicações utilizando o CO₂ e o R717 em cascata, uma vez que estes apresentam uma alternativa promissora no setor de refrigeração comercial para supermercados. Estes fluidos (CO₂ e Amônia), além de minimizarem os impactos no meio ambiente, também geram menor consumo de energia e outros fatores relevantes comparados aos refrigerantes sintéticos.

Em seu trabalho, Bandarra Filho, apresenta uma revisão geral sobre o uso de fluidos refrigerantes alternativos utilizados em sistemas de ar condicionado automotivo, conforme diagrama esquemático mostrado na Fig. 2. Com levantamento bibliográfico abrangente foi possível verificar as principais tendências de utilização de fluidos emergentes como o HCFC-152a, HFO-1234yf e CO₂. Dos resultados observados pelo autor, destaca-se o tempo de resfriamento da cabine de carros com potência média e elevada, quando utilizado o CO₂ como fluido refrigerante. Quanto aos carros com menor potência os resultados foram promissores. O consumo de combustível neste caso foi menor e o COP do sistema de ar condicionado mostrou superior àquele com sistema utilizando o refrigerante R134a que é utilizado atualmente. Como conclusões do seu trabalho destacam-se a tecnologia já desenvolvida para utilização do CO₂ em ar condicionado automotivo, concluindo que o CO₂ será o refrigerante da década na Europa e por consequência nos demais países com o decorrer do tempo, porém as montadoras estão aguardando novos testes com fluidos potenciais, devido aos custos de implantação do CO₂.

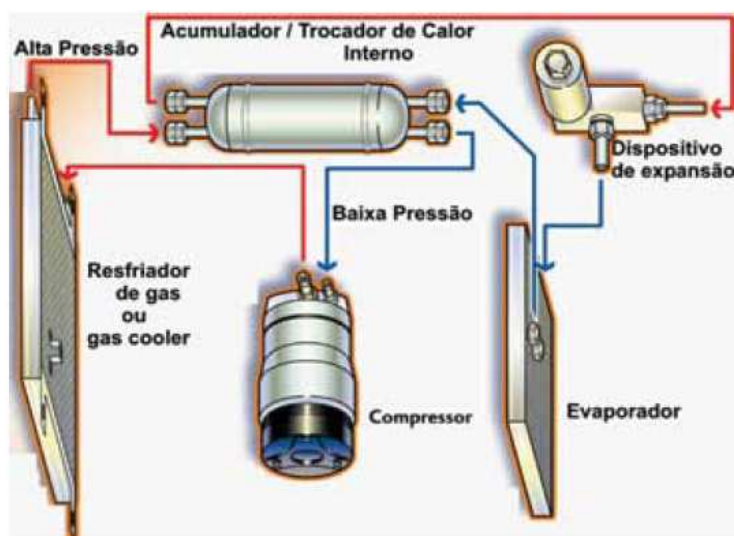


Figura 2 - Diagrama esquemático de um circuito de ar- condicionado automotivo utilizando o CO₂.

Com uma análise sobre o desempenho de um ciclo de refrigeração em cascata, Nicola et al, realizaram um trabalho utilizando com misturas de CO₂ com hidrocarbonetos (etano ou R170, propano ou R290, etileno ou R1150, propileno ou R1270) e éter dimetílico (ou RE170) como fluido do lado de baixa temperatura. Esse trabalho foi realizado a fim de viabilizar a possibilidade de utilizar misturas de dióxido de carbono nas aplicações abaixo do ponto triplo do CO₂. Os resultados mostraram que o COP do ciclo em cascata com misturas de CO₂ atinge valores aceitáveis, mesmo que o melhor desempenho seja obtido utilizando refrigerantes HC's puros no estágio de baixa temperatura. Tal estudo refere-se ainda ao fato de menor impacto ambiental do CO₂ e particularmente à sua capacidade de reduzir a inflamabilidade de HC's.

Dopazo et al, com um trabalho numérico, analisaram o COP e a otimização de um sistema em cascata com CO₂ e Amônia como fluidos refrigerantes. Fizeram também uma análise exérgica dos parâmetros de operação do sistema, que é determinada como uma função de projeto/parâmetros de funcionamento. Os autores utilizaram de ferramentas estatísticas para analisar os resultados obtidos, que validados com dados experimentais disponíveis na literatura. Os resultados mostram que houve um aumento de 70% no COP do sistema quando a temperatura de vaporização do CO₂ varia de -55°C a -30°C. Porém o COP do sistema diminuiu 45% quando a temperatura de condensação da amônia aumenta de 25°C para 50°C. No geral o COP do sistema diminuiu 9% quando a diferença de temperatura no trocador de calor varia entre 3 e 6 °C. Com respeito a eficiência exérgica, esta apresentou diminuição em ambos os casos estudados.

A seguir são listadas algumas propriedades do CO₂

- CO₂ não é inflamável e não é tóxico
- Pressão crítica é de 73,6 bar e temperatura crítica 31,1°C
- Ponto triplo ocorre à pressão de 5,2 bar e temperatura de -56,6°C
- Pressão reduzida a 0°C é 0,47
- Capacidade de refrigeração a 0°C é 22545 kJ/m³ (definida como calor retirado do produto a ser refrigerado com maior eficiência e menor tempo)

Alguns destes pontos podem ser melhores visualizados na Fig. 3 que é o diagrama P-h do CO₂.

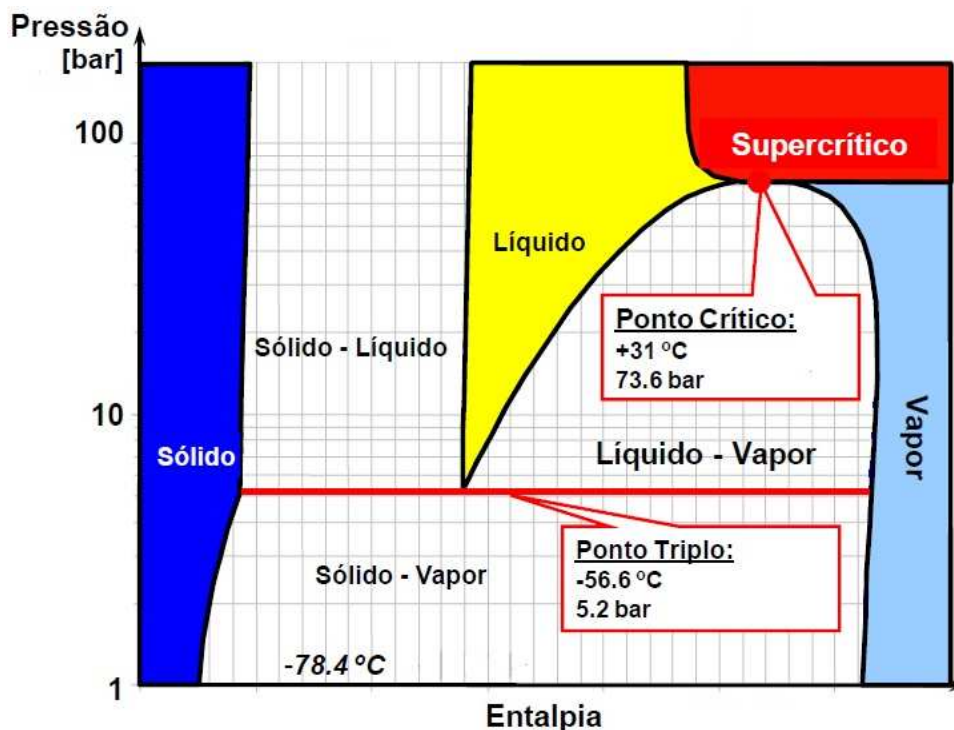


Figura 3 – Diagrama P-h do CO₂.

Como uma das aplicações do CO₂ é em ciclos subcrítico em cascatas com outros fluidos refrigerantes, onde os mais comuns são R717 e R134a, apresenta-se na Fig. 4 os pontos críticos e triplos dos respectivos fluidos, onde é possível observar que o CO₂ apresenta pontos crítico e triplo diferente dos demais que seguem uma tendência aproximada para tais pontos.

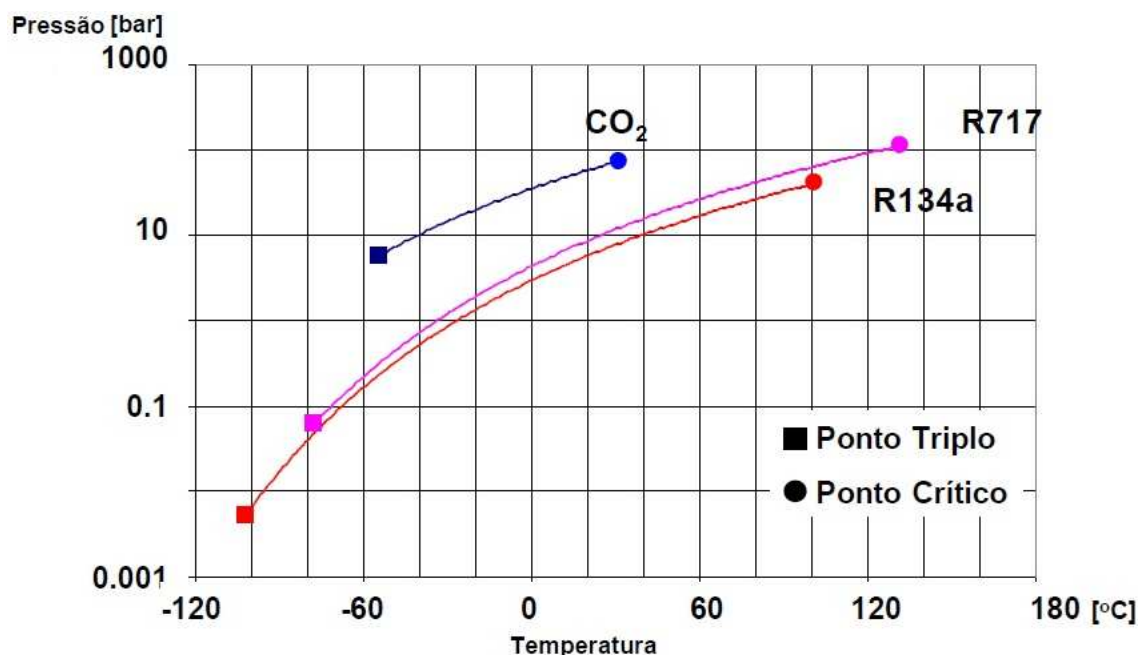


Figura 4 – Diagrama P x T para CO₂, R717 e R134a.

Outro fato interessante a respeito do CO₂ é que quando se aproxima do ponto crítico, as densidades do vapor e do líquido se tornam próximas como observado na Fig. 5, não havendo diferença de fases do líquido/vapor apresentando assim a mesma densidade e aparência.

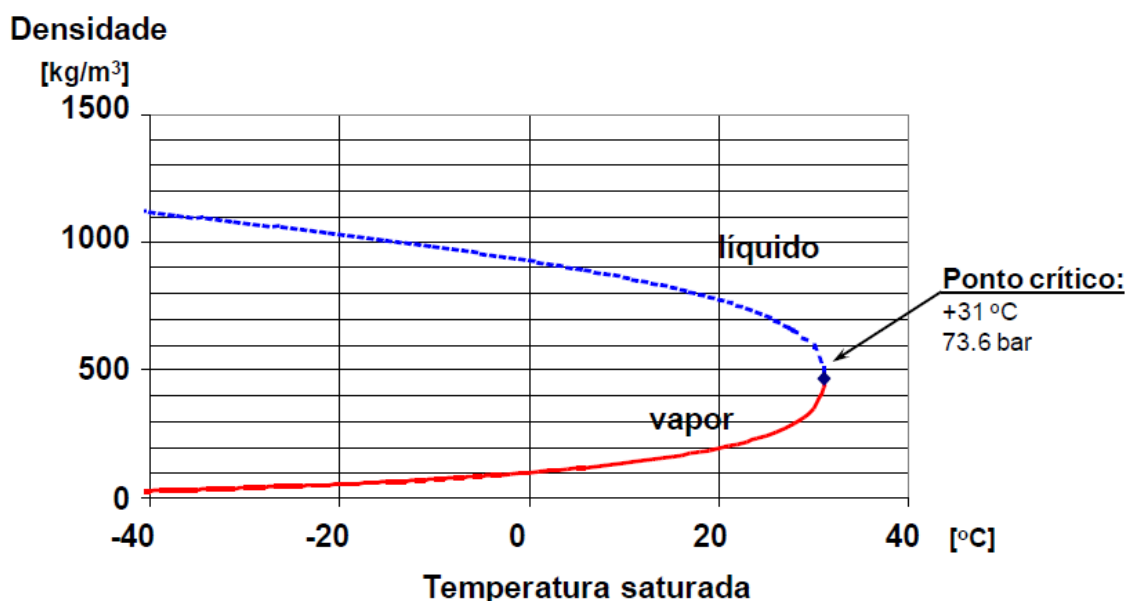


Figura 5 – Densidade do CO₂ nas fases líquido e vapor.

Nas Fig. 6 e 7 são apresentadas as densidades dos fluidos CO₂, R143a, R717 nas fases líquido e vapor (Fig.6) e líquido-vapor (Fig.7), onde é possível visualizar as diferenças de densidades entre estes fluidos. Na Fig. 6 é possível visualizar que para o CO₂ a diferença entre vapor e líquido é mínima, enquanto que para dos demais fluidos essa diferença é maior. Essa diferença torna o CO₂ um fluido atraente, pois a quantidade de fluido utilizado no sistema será reduzida. E o CO₂ por possuir uma elevada capacidade de refrigeração, permite menores custos de carga e reposição de fluido, menores diâmetros nas tubulações, menores trocadores de calor e redução do isolamento térmico, por exemplo, propiciando assim um sistema mais compacto, o que é de interesse para as indústrias de modo geral.

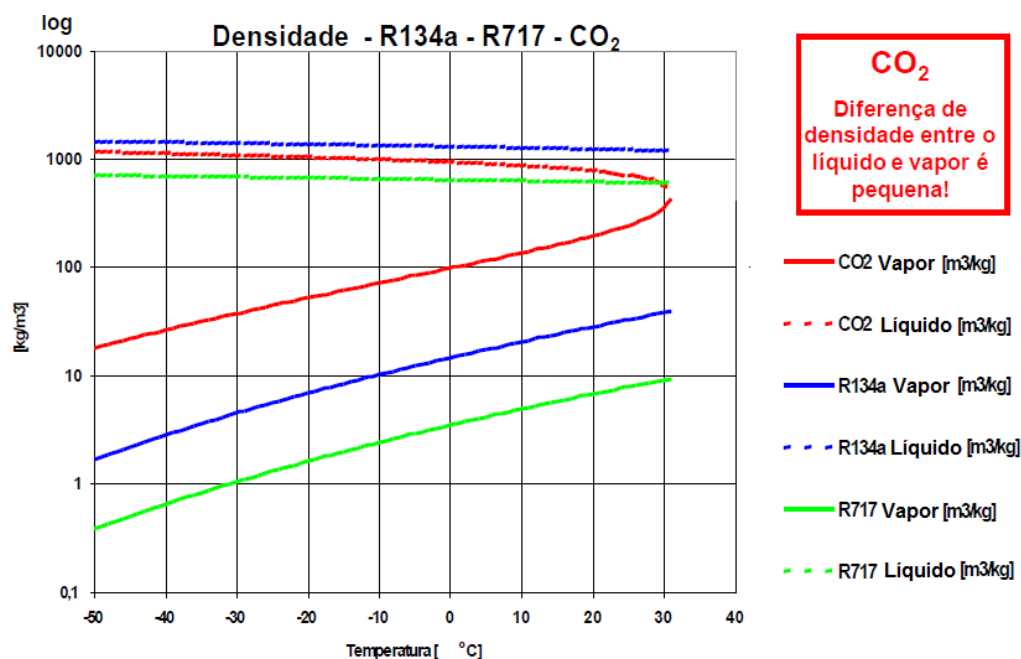


Figura 6 – Densidade dos fluidos CO₂, R717 e R134a nas fases líquido e vapor.

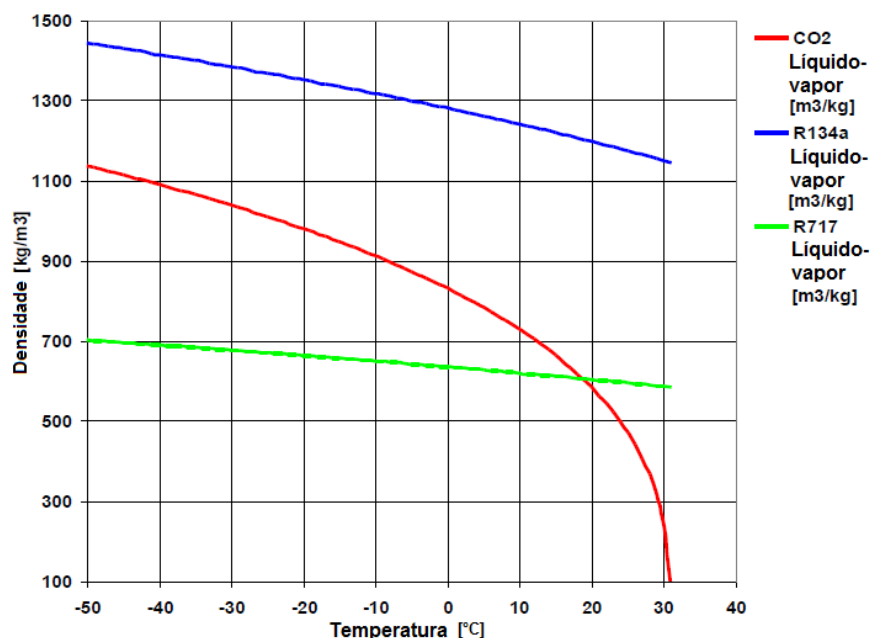


Figura 7 – Densidade dos fluidos CO₂, R717 e R134a na fase líquido-vapor.

Na Tabela 1 é apresentado de forma mais detalhada alguns dados sobre os fluidos R143a, R717, e CO₂.

Tabela 1- Dados sobre os fluidos refrigerantes R143a, R717, e CO₂.

Refrigerantes	R134a	R717	CO ₂
Substância Natural	Não	Sim	Sim
Destruição da Camada de Ozônio	0	0	0
Potencial de aquecimento Global	1300	-	1
Ponto Crítico	101,2 °C / 40,7 bar	132,4°C / 113 ba r	31,1°C / 73,6 bar
Ponto Triplo	- 103°C / 0,004 bar	- 77,7 °C / 0,06 bar	- 56,6 °C / 5,18 bar
Inflamável ou explosivo	Não	Sim	Não
Tóxico	Não	Sim	Não

Os ciclos de operação onde o CO_2 é utilizado são conhecidos como Ciclo Subcrítico, Transcrítico, Sistemas de dois Estágios, Sistemas Combinado (Booster) e Compressor Duplo Estágio. Neste trabalho é dada maior ênfase aos dois ciclos mais utilizados, que são o ciclo subcrítico e o ciclo transcrítico. Na Fig. 8 o ciclo subcrítico e ciclo transcrítico podem ser visualizados em um diagrama P-xh, onde é possível observar as diferenças de pressões entre estes ciclos.

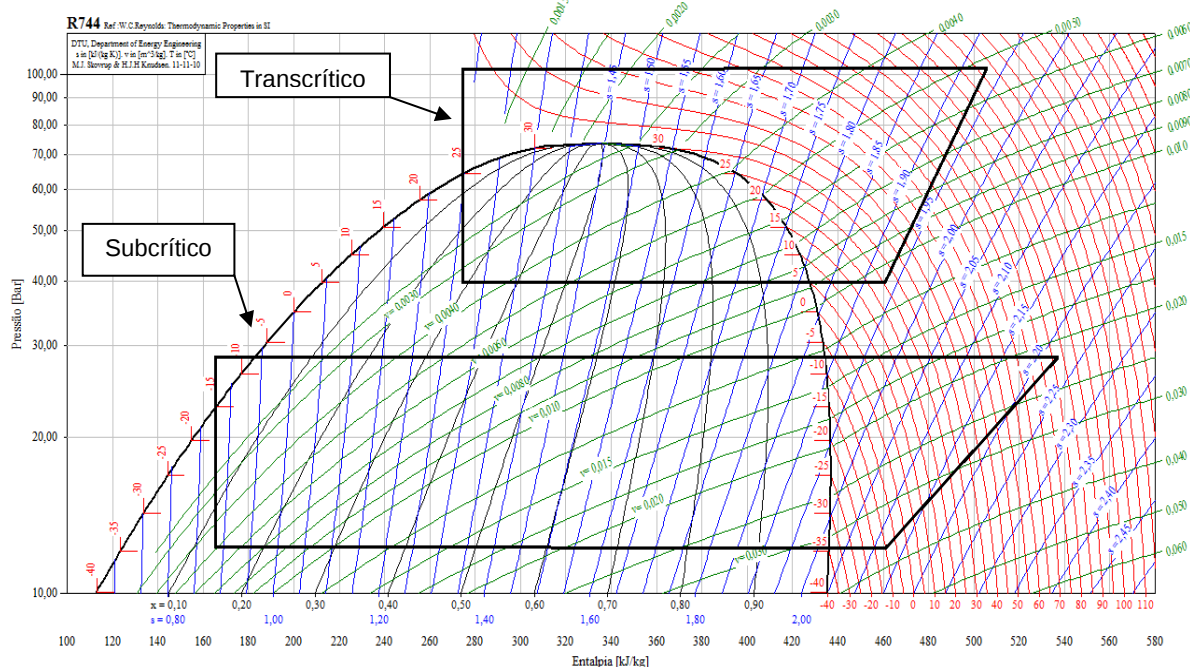


Figura 8 - Ciclos transcrítico e subcrítico em diagrama P-xh.

A principal diferença entre os dois ciclos está na característica do CO_2 no sistema transcrítico o fluido é comprimido até uma temperatura acima do ponto crítico, dessa forma o mesmo não pode mais se condensar, pode apenas ser resfriado. Por não haver condensadores o fluido é resfriado na descarga por um trocador de calor conhecido por Gás Cooler (Resfriador gasoso). A pressão de alta do sistema transcrítico varia entre 100 e 150 bar e a pressão de baixa poderá atingir 73,6 bar. No sistema subcrítico as pressões são relativamente mais baixas que no ciclo transcrítico, ficando em torno de 25 a 36 bar no lado de alta e aproximadamente 10 bar no lado de baixa, o que supera a faixa de pressões utilizadas por fluidos convencionais. As altas pressões de trabalho do CO_2 são superadas pelo sistema que são sistemas de dois estágios chamado de sistema cascata, nesse caso é utilizado outro refrigerante para trocar calor com o CO_2 .

A Tabela 2 apresenta um comparativo com alguns dados dos ciclos transcrítico e subcrítico.

Tabela 2 - Ciclos transcrítico e subcrítico para o CO_2 .

	Ciclo subcrítico	Ciclo transcrítico
Ponto crítico	31,06 °C/ 73800kPa	31,06 °C/ 73800kPa
Pressão de descarga	Abaixo do ponto crítico	Acima do ponto crítico
Condensação	Igual a refrigerantes convencionais T cond<31°C Isobárico e isotérmico	sem condensação, mas com dispositivo de expansão Isobárico e não isotérmico

A Fig. 9 apresenta como exemplo um diagrama do Ciclo cascata simples, onde é possível visualizar o ciclo do CO_2 e do R717.

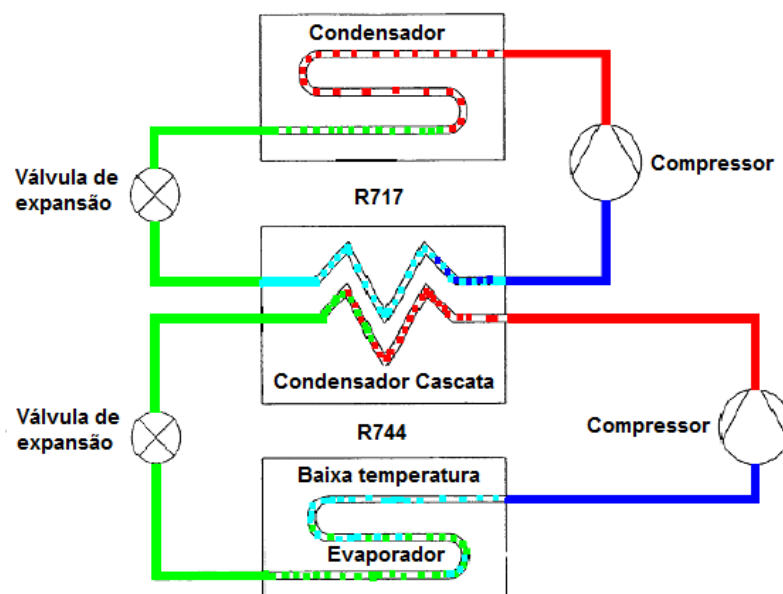


Figura 9- Diagrama do Ciclo cascata simples CO₂/R717.

Este trabalho apresentou uma visão geral das propriedades e aplicações do CO₂, mostrando suas principais características e aplicações que são amplas e vão desde aplicações em supermercados a ar condicionado automotivos.

Em se tratando de aplicações futuras o CO₂ é um fluido promissor, uma vez que suas características satisfazem as exigências de aplicação e dos protocolos de Kyoto e Montreal niveladores dos níveis de Aquecimento Global e Destruição da Camada de Ozônio, porém para sua aplicação é necessária mão de obra especializada, uma vez que seus equipamentos são específicos para sua aplicação e operação.

REFERÊNCIAS

Silva, A. Dióxido de Carbono- CO₂ em sistemas de Refrigeração Comercial e Industrial, Editora Nova Técnica – Vol. 1, 1ª Reimpressão, 2011.

Silva, A. Aplicação de Fluidos Naturais na Refrigeração de Supermercados: Sistemas Cascata com CO₂/NH₃ – Uso de Fluidos naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-Condicionado-Ministério do Meio Ambiente - MMA, Publicação Técnica, 2011.

Bandarra Filho, E. P. Tendências do Uso de Fluidos Refrigerantes Alternativos em Sistemas de Ar Condicionado Automotivo – Uso de Fluidos naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-Condicionado-Ministério do Meio Ambiente - MMA, Publicação Técnica, 2011.

Dopazo, J., Seara, J.F., Sieres, J., Uhía, F.J. Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures. Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp 1577-1583, 2009.

Nicola, G., Polonara, F., Stryjek, R., Arteconi, A., Performance of cascade cycles working with blends of CO₂ + natural refrigerants. International Journal of Refrigeration, Vol. 34, pp, 1436-1445, 2011.