



PROGRAMA
BRASILEIRO DE
ELIMINAÇÃO DOS
HCFCs
Projeto para o Setor de RAC

Workshop

Fluidos Frigoríficos Alternativos para
Equipamentos de Refrigeração Comercial

DIÓXIDO DE CARBONO
CO₂

25 DE ABRIL DE 2019

Autores:

Eng. Edgard Soares Pinto Neto - Especialista Nacional em Refrigeração do Projeto RAC - UNIDO

Eng. Enio Bandarra - Consultor

Eng. David Marcucci - Consultor

Revisão Técnica:

Frank Amorim - Analista Ambiental do Ministério do Meio Ambiente

Coordenação:

Magna Ludovice – Analista Ambiental do Ministério do Meio Ambiente

Sérgia de Souza Oliveira - Consultora Nacional do Projeto RAC - UNIDO

Este documento foi elaborado pela equipe técnica do Projeto de Refrigeração e Ar Condicionado, PROJETO RAC, no âmbito do Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH) – Etapa 2, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e executado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial.

Todas as atividades e procedimentos a serem realizados no escopo do assunto abordado nesse Boletim Técnico são de inteira responsabilidade do executor das atividades, cabendo a este buscar informações adicionais, realizar treinamentos, adotar os procedimentos de segurança necessários e legais e usar as ferramentas compatíveis com a alternativa selecionada. Este Boletim não deve ser a única referência sobre o assunto uma vez que não contém informações detalhadas para qualquer execução e não se caracteriza como um treinamento.

1 Proteção da Camada de Ozônio

O ozônio (O₃) é um dos gases que compõem a atmosfera e cerca de 90% de suas moléculas se concentram entre 20 e 35 km de altitude, região denominada Camada de Ozônio.

A importância do Ozônio está no fato de ser o único gás que filtra o excesso de radiação ultravioleta do tipo B (UV-B), que é nociva aos seres vivos. A exposição a esta radiação está associada aos riscos de danos à visão, ao envelhecimento precoce, à supressão do sistema imunológico e ao desenvolvimento do câncer de pele. Os raios ultravioletas também causam prejuízos nos estágios iniciais do desenvolvimento de peixes, camarões, caranguejos e outras formas de vida aquáticas, além de reduzir a produtividade do fitoplâncton, base da cadeia alimentar aquática, provocando desequilíbrios ambientais.

A camada de ozônio começou a sofrer com os efeitos da poluição crescente provocada pela industrialização mundial, em especial a utilização de produtos químicos como Halon, Tetracloroeto de Carbono (CTC), Hidroclorofluorcarbono (HCFC), Clorofluorcarbono (CFC) e Brometo de Metila. Essas substâncias, quando liberadas no meio ambiente, deslocam-se atmosfera acima, degradando a camada de ozônio por meio de uma reação química entre átomos de bromo ou cloro e a molécula de ozônio.

O “buraco da camada de ozônio” é o fenômeno de queda acentuada na concentração do ozônio. As substâncias químicas que a degradam são denominadas “Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio” (SDOs).

Em 1985, um conjunto de nações se reuniu na Áustria manifestando preocupação técnica e política quanto aos possíveis impactos que poderiam ser causados com o fenômeno da redução da camada de ozônio. Nesta ocasião foi formalizada a Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio que propiciou a pactuação do Protocolo de Montreal sobre

Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio no ano de 1987. Esse tratado objetiva proteger a camada de ozônio por meio da eliminação da produção e do consumo das SDOs e é o único acordo ambiental multilateral com adoção universal, tendo 197 Estados Partes, sendo um deles o Brasil, cuja adesão data de 1990.

Para a adequada implementação do Protocolo de Montreal, foi criado o Fundo Multilateral (FML), mecanismo financeiro que provê assistência técnica e financeira aos países em desenvolvimento (caso do Brasil), contribuindo para a eliminação do consumo das SDOs de acordo com os cronogramas específicos de eliminação de cada substância química controlada.

Na 19ª Reunião das Partes do Protocolo de Montreal ocorrida em setembro de 2007, as Partes decidiram, por meio da Decisão XIX/6, antecipar os prazos de eliminação da produção e do consumo dos Hidroclorofluorcarbonos – HCFCs, considerando que essas substâncias, além do potencial de destruição da camada de ozônio, possuem alto potencial de aquecimento global.

Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFC (PBH)

Com o objetivo de desenvolver ações para controlar e eliminar o consumo dos HCFCs no Brasil, foi elaborado o Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH). Dividido em três etapas (Etapa 1, Etapa 2 e Etapa 3), o PBH é o documento que apresenta o diagnóstico do consumo dos HCFCs no País e define as diretrizes e ações a serem executadas para a eliminação dessas substâncias no Brasil até 2040,

adotando a estratégia de redução escalonada de seu consumo segundo o cronograma abaixo:

Etapa 1	2013	Congelamento do consumo dos HCFCs (Linha de Base ^{a1})
	2015	Redução de 16,6% do consumo de HCFCs sobre a LB
Etapa 2	2020	Redução de 39,3% do consumo de HCFCs sobre a LB
	2021	Redução de 51,6% do consumo de HCFCs sobre a LB
Etapa 3	2025	Redução de 67,5% do consumo de HCFCs sobre a LB
	2030	Redução de 97,5% do consumo de HCFCs sobre a LB ^b
	2040	Eliminação do consumo de HCFCs

Fonte: <http://mma.gov.br/clima/protecao-da-camada-de-ozonio/acoes-brasileiras-para-protecao-da-camada-de-ozonio/programa-brasileiro-de-eliminacao-dos-hcfc-pbh>

^a Linha de Base (LB) correspondente à média do consumo de HCFCs para os anos de 2009 e 2010

^b Consumo residual de 2,5% somente para o setor de serviço de refrigeração.

A Etapa 1 do PBH está no último ano de sua implementação, tendo sido iniciada em 2012 com o objetivo de cumprir as metas de congelamento do consumo de HCFCs em 2013 e a redução de 16,6% em 2015.

Em 2014, o Governo Brasileiro coordenou as ações de coleta de dados e informações para a elaboração da Etapa 2, que contempla o diagnóstico do consumo de HCFCs entre os anos 2009 a 2013 nos diversos setores que utilizam estas substâncias e apresenta a estratégia a ser adotada pelo Brasil para a redução de HCFCs nos anos de 2020 e 2021. A Etapa 2 do PBH prevê a redução de 39,3% de HCFCs em 2020 e de 51,6% em 2021, conforme estabelecido pela Instrução Normativa Ibama nº 04, de 14 de fevereiro de 2018².

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) é o coordenador do PBH e conta com o apoio do IBAMA no controle da importação e da exportação dos HCFCs e das agências implementadoras (PNUD, UNIDO e GIZ) nas ações previstas para auxiliar financeira e tecnicamente o setor produtivo brasileiro que utiliza HCFCs na migração para alternativas tecnológicas que não degradam a camada de ozônio e possuem baixo impacto ao sistema climático global.

Este material técnico faz parte das ações da Etapa 2 do PBH, especificamente do seu Componente 3, que trata dos projetos de conversão industrial para o setor de manufatura de equipamentos de refrigeração e ar condicionado cujo objetivo é promover a eliminação de 1.110,04 t SDO de HCFC-22 (61,06 t PDO) até 2021.

2 Objetivo

Este boletim tem por objetivo reunir informações básicas sobre o dióxido de carbono (CO₂) e a sua aplicação como fluido frigorífico. As informações que constam neste boletim visam auxiliar técnicos e engenheiros de refrigeração, bem como pessoas responsáveis pelo processo de

¹ Fonte: <http://www.mma.gov.br/clima/protecao-da-camada-de-ozonio/programa-brasileiro-de-eliminacao-dos-hcfc/documentacao>.

²

<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=16/02/2018&jornal=515&pagina=67&totalArqui vos=126>

tomada de decisão, para a conversão de equipamentos de refrigeração para o uso do CO₂ como fluido refrigerante.

Desta forma, este boletim contém informações a respeito do fluido natural dióxido de carbono (CO₂) e das regulamentações existentes. Aborda questões relacionadas às modificações necessárias nos equipamentos e nas fábricas, mais precisamente na área de manufatura; sugere algumas medidas fundamentais para os serviços em campo e destaca aspectos relacionados à segurança e aos custos.

Destaca-se que este Boletim não pretende ser a única e completa referência sobre o assunto, assim, todas as atividades e procedimentos a serem realizados são de inteira responsabilidade das empresas, cabendo-lhes buscar outras informações disponíveis, bem como realizar treinamentos adequados, adotar os procedimentos de segurança necessários e legais e usar ferramentas compatíveis com a alternativa selecionada.

3 História e características básicas dos fluidos refrigerantes

Resumidamente, a história do uso dos fluidos refrigerantes pode ser apresentada observando o desenvolvimento da tecnologia e o impulso dado por descobertas globais sobre os efeitos adversos dessas substâncias para o homem e o meio ambiente.

Gerações dos Fluidos Refrigerantes – Histórico

A refrigeração e a climatização de ambientes são uma das mais importantes criações da civilização moderna e é tida como uma das maiores realizações de engenharia do século 20³. A possibilidade de armazenar alimentos resfriados ou congelados impulsionou metodologias para armazenar gelo. Segundo relatos históricos, a primeira demonstração científica para produção de gelo foi executada por Willian Cullen por volta de 1748, que utilizou éter como fluido refrigerante, uma vez que essa substância é capaz de absorver calor, vaporizar e criar gelo⁴.

Jacob Perkins, em 1834, foi o responsável pela primeira patente de um ciclo de refrigeração, utilizando o éter etílico³. James Harrison, entre 1856 e 1857, obteve patentes britânicas ao criar um equipamento utilizando o princípio da refrigeração por compressão mecânica. A partir deste momento diversas máquinas começaram a ser criadas e diversos fluidos refrigerantes começaram a ser testados.

Este primeiro momento ficou conhecido como a primeira geração de fluidos refrigerantes, e durou aproximadamente um século, de 1830 a 1930, tendo sido marcado pela utilização de fluidos refrigerantes naturais, como a amônia (NH₃), o dióxido de carbono (CO₂), o propano (R-290) e o isobutano (R-600a). O critério de escolha do fluido dependia da sua disponibilidade e de qual substância funcionava melhor de acordo com o tipo de aplicação. Destaca-se que nesta época o desenvolvimento tecnológico e o conhecimento a respeito dos fluidos ainda eram limitados, bem como a disponibilidade de componentes e soluções compatíveis com essas substâncias.

Em um segundo momento, por volta de 1920, impulsionado pelo desenvolvimento industrial e pela disponibilidade de sistemas de refrigeração totalmente herméticos, os refrigeradores domésticos começaram a ser desenvolvidos e fabricados, mas esses equipamentos ainda

³ <http://www.greatachievements.org/>

⁴ http://www.mma.gov.br/estruturas/ozonio/_publicacao/130_publicacao24082011121500.pdf

precisavam de um fluido refrigerante adequado à realidade da época. Por volta de 1926, o primeiro fluido refrigerante sintético, o CFC-12 (clorofluorcarbono 12) foi desenvolvido por Thomas Midgley Jr. Os CFCs ganharam mercado rapidamente, tanto em aplicações industriais como residenciais, pois eram termodinamicamente eficientes e não eram inflamáveis nem tóxicos, solucionando importantes problemas de segurança.

A popularidade dos CFCs criou um cenário favorável à ampliação de sua utilização em novas aplicações, aumentando também o campo de pesquisa e o desenvolvimento tecnológico que, com o passar dos anos, culminou no surgimento de novas alternativas, tais como os HCFCs, e mais tarde, os HFCs. Nos anos 70, cientistas apresentaram estudos demonstrando que a destruição da camada de ozônio estava diretamente relacionada com a utilização dos CFCs.

A segunda geração de fluidos refrigerantes durou entre 1930 e 1990 e foi marcada por um forte desenvolvimento tecnológico e pela segurança e durabilidade dos sistemas de refrigeração e ar condicionado.

O fim da segunda geração de fluidos refrigerantes está relacionado ao advento do Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio, que promoveu a eliminação dos CFCs e vem promovendo a eliminação dos HCFCs.

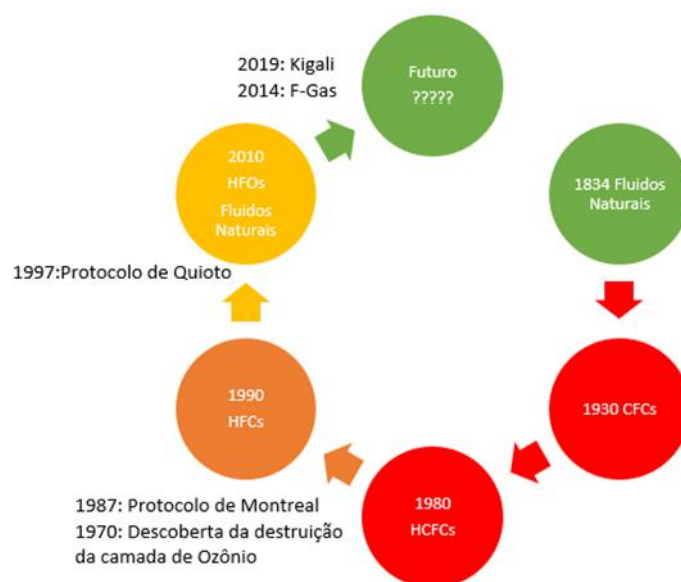


Figura 01: Breve história dos refrigerantes ao longo dos anos.

A terceira geração de fluidos é marcada pelo aumento da conscientização ambiental e contribuiu, em âmbito global, para auxiliar o processo de eliminação dos CFCs e vem contribuindo também para a eliminação dos HCFCs, uma vez que as alternativas disponíveis, tais como os HFCs e fluidos naturais, não contribuem para a degradação da camada de ozônio. No entanto, os Hidrofluorcarbonos (HFCs) são, em sua maioria, substâncias de alto impacto para o sistema climático global, e, em virtude disto, entraram para a lista de substâncias controladas pelo Protocolo de Montreal, após a aprovação da Emenda de Kigali⁵, em 2016. No Brasil, em um

⁵ Emenda de Kigali: institui o controle dos HFC no âmbito do Protocolo de Montreal e estabelece obrigações de redução (phase-down) gradativa de seu consumo e produção, tendo como referência uma linha de base previamente determinada. Entrou em vigor em 01 de janeiro de 2019. No Brasil, o texto da

futuro próximo, espera-se que os HFCs passem a ter seu consumo controlado e reduzido. A Figura 01 descreve a evolução histórica dos fluidos frigoríficos ao longo dos anos.

Alternativamente, nos últimos anos os fluidos naturais, impulsionados pelo domínio dos sistemas de refrigeração, pelo desenvolvimento tecnológico, pela disponibilidade de componentes e pela existência de ferramentas compatíveis, voltaram a ganhar força como alternativas sustentáveis.

Além dos fluidos naturais, a indústria química tem se empenhado no desenvolvimento de novos fluidos que não agredam a camada de ozônio, possuam baixo impacto ao sistema climático global e não apresentem elevado grau de inflamabilidade e de toxicidade.

Breve Histórico do Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO₂) foi um agente natural usado extensivamente no passado como fluido frigorífico em sistemas de refrigeração do tipo de compressão, sobretudo nos quarenta anos iniciais do século passado. Após a Segunda Guerra Mundial o CO₂ entrou em desuso, mas no passado recente sua utilização voltou a ser estudada devido as suas propriedades termodinâmicas e por questões ambientais. Atualmente este fluido é amplamente investigado e estudado para uma variedade de aplicações.

O primeiro relato do uso de CO₂ é datado de 1835, quando o físico francês Thilorier utilizou o dióxido de carbono para resfriar o mercúrio. Em 1867, o inventor americano Lowe descreveu que o CO₂ poderia ser utilizado em aplicações de refrigeração, e em 1886, Franz Windhausen foi responsável por patentear o primeiro compressor específico para CO₂. Estes foram os marcos iniciais da utilização do CO₂ como fluido frigorífico, e deste então sua aplicação se expandiu, assim como o número de fabricantes de compressores e componentes compatíveis com esta substância. Atualmente é utilizado em diversas aplicações do setor de refrigeração e aquecimento, sendo os sistemas de refrigeração subcrítico e transcrito em instalações de supermercados as aplicações de maior destaque. Essas aplicações serão descritas a seguir.⁶

Mas o que são realmente os fluidos frigoríficos e quais são as suas características?

Os fluidos frigoríficos são substâncias usadas para transferência de calor em um sistema de refrigeração, absorvendo o calor de uma fonte fria e o transferindo para uma fonte quente, com maior temperatura e pressão (ver Figura 02). Esse processo ocorre, usualmente, com mudança de fase⁷.

Conforme apresentado anteriormente, os fluidos frigoríficos HCFCs terão seu consumo reduzido até sua completa eliminação em 2040. Atualmente, existe uma grande variedade de fluidos frigoríficos alternativos ao HCFC-22. Na Norma brasileira ABNT NBR 16666:2018 estão listados a designação e classificação de segurança de uma grande variedade de fluidos frigoríficos existentes.

Entre as substâncias alternativas ao HCFC-22, destacam-se os HFCs, hidrocarbonetos (HCs), amônia (R-717), dióxido de carbono (R-744), HFCs insaturados (comercialmente chamados de

Emenda encontra-se no Congresso Nacional e uma vez aprovado será depositado na ONU e promulgado pelo Presidente da República.

⁶ Cavallini, A. and Zilio C., Carbon dioxide as a natural refrigerant, International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 2, Issue 3, July 2007, Pages 225–249,

⁷ ABNT NBR 16666:2018 - Fluidos frigoríficos — Designação e classificação de segurança

HFOs). Cada uma dessas substâncias possui características particulares e devem ser avaliadas quanto às restrições de uso.

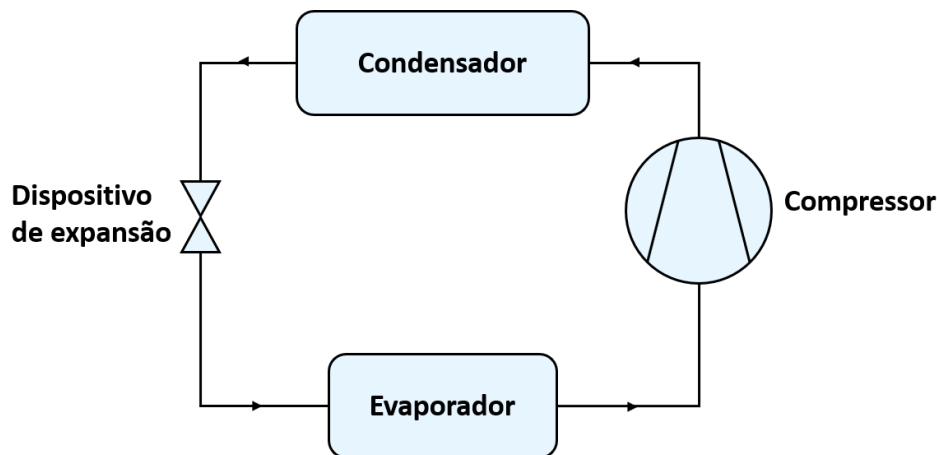


Figura 02: Sistema de refrigeração

A seleção de um fluido refrigerante para determinado sistema de refrigeração ou de condicionamento de ar é uma das mais importantes etapas de um projeto. A substância a ser escolhida deve levar em consideração os custos envolvidos e a eficiência do sistema, bem como os impactos ambientais, de segurança e de confiabilidade.

Com a finalidade de tomar uma decisão correta com relação à escolha mais apropriada de um fluido refrigerante, há a necessidade de avaliar os vários fatores e as propriedades das alternativas disponíveis. Os critérios mais importantes para a seleção de uma tecnologia e fluido refrigerante são os seguintes:⁸

- Disponibilidade;
- Custo/benefício;
- Ter propriedades termodinâmicas e de transferência de calor favoráveis;
- Ter elevado calor latente de vaporização;
- Pressão de condensação moderada;
- Evaporar-se a pressões acima da atmosférica;
- Ser quimicamente estável;
- Não ser corrosivo;
- Lubrificante compatível com o fluido refrigerante (solubilidade);
- Compatibilidade do fluido refrigerante / lubrificante com os componentes e materiais do equipamento;
- Inflamabilidade (segurança);
- Toxicidade (segurança);
- Aceitação do Mercado;
- Requisitos e condições de serviços de pós-venda;
- Requerimentos para fornecimento de kits dos fabricantes originais do equipamento;
- Elevada eficiência energética;
- Reduzido impacto ambiental, incluindo os danos à camada de ozônio e o impacto direto e indireto ao sistema climático global.

Atualmente, considerando os compromissos assumidos pelo Brasil, que incluem os aspectos ambientais, os fluidos refrigerantes adequados devem possuir zero potencial de destruição da

⁸ MMA. Programa Brasileiro de eliminação de HCFC – ETAPA2, ANEXO 12.1. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80179/PROGRAMA%20BRASILEIRO%20DE%20ELIMINACAO%20DOS%20HCFCs%20%20PBH_Diagramado%201.PDF>

camada de ozônio (O PDO, da sigla, **P**otencial de **D**estruição da Camada de **O**zônio), e devem apresentar baixo potencial de aquecimento global (baixo GWP, da sigla em inglês, **G**lobal **W**arming **P**otential).

O Comitê de Opções Tecnológicas para Refrigeração, Ar Condicionado e Bombas de Calor - RTOC (UNEP, 2014⁹), do Protocolo de Montreal, adota a classificação apresentada na Tabela 01 como indicativa do potencial de aquecimento global dos fluidos frigoríficos.

Tabela 01. Classificação dos níveis de GWP.

GWP ¹⁰⁰	Classificação
< 30	Ultra-baixo ou Desprezível
< 100	Muito baixo
< 300	Baixo
300–1.000	Médio
> 1.000	Alto
> 3.000	Muito alto
> 10.000	Ultra-alto

4 Dióxido de Carbono (CO₂)

O Dióxido de carbono (CO₂) é um fluido 100% natural, sua concentração na atmosfera é aproximadamente 0,04% em volume. O CO₂ é liquefeito, incolor, inodoro e não é inflamável. É produzido industrialmente a partir de processos da indústria petroquímica ou via queima de combustíveis fósseis.

O uso de fluidos frigoríficos naturais, como o dióxido de carbono (R-744), em aplicações de refrigeração e bombas de calor tem ganhado popularidade nos últimos anos em decorrência do cronograma de eliminação dos HCFCs e da previsão de redução do consumo de HFCs. Diversas empresas, localizadas principalmente na Europa, Japão e Estados Unidos, têm adotado este fluido frigorífico, destacando mais especificamente as seguintes aplicações: *chillers* em aplicações para supermercados nas condições subcrítica e transcítica e bombas de calor. Esses equipamentos possuem custo final elevado, mas em países com clima frio essas aplicações possuem um retorno de eficiência energética que justifica tal investimento. Essas aplicações foram aprimoradas e ajustadas para serem utilizadas em países com temperaturas mais elevadas, como o Brasil¹⁰.

O CO₂ também é utilizado comercialmente para outras aplicações de refrigeração e ar condicionado, tais como unidades condensadoras e ar condicionado automotivo.

Além das aplicações listadas anteriormente, o CO₂ é utilizado em bebidas carbonatadas, em agentes extintores de incêndio, aplicações industriais tais como resfriamento e congelamento de alimentos e aplicações medicinais. A Figura 03 apresenta a forma molecular do CO₂.

⁹ UNEP (2014). *2014 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps*. Technical Options Committee of Montreal Protocol. Nairobi, Kenya.

¹⁰ Atualmente o Brasil possui mais de 300 sistemas de CO₂ subcrítico e 13 sistemas de transcítico instalados em supermercados.

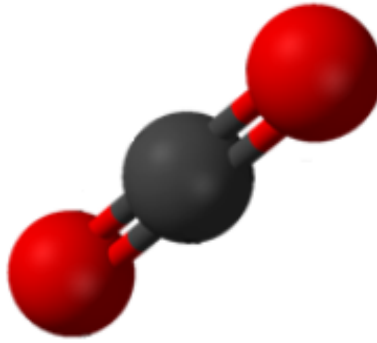


Figura 03: molécula do Dióxido de carbono (CO₂)¹¹.

Características Termodinâmicas do CO₂

O CO₂ possui alto ponto triplo e baixo ponto crítico quando comparado com outros fluidos frigoríficos. O ponto triplo é a condição determinada por valores de temperatura e pressão onde as fases sólida, líquida e gasosa coexistem. O ponto crítico é uma condição dada a uma temperatura e uma pressão, onde não existe distinção entre a fase líquida e gasosa (31,1 °C, 73,6 bar).

Acima de -56,6 °C e à pressão atmosférica normal (101,3 kPa), o CO₂ encontra-se na fase vapor e, abaixo dessa temperatura, é torna-se uma substância branca, sólida, conhecida como gelo seco. O ponto triplo do CO₂ ocorre à pressão de 5,2 bar e à temperatura de -56,6 °C. A Figura 04 mostra o diagrama de fases do dióxido de carbono.

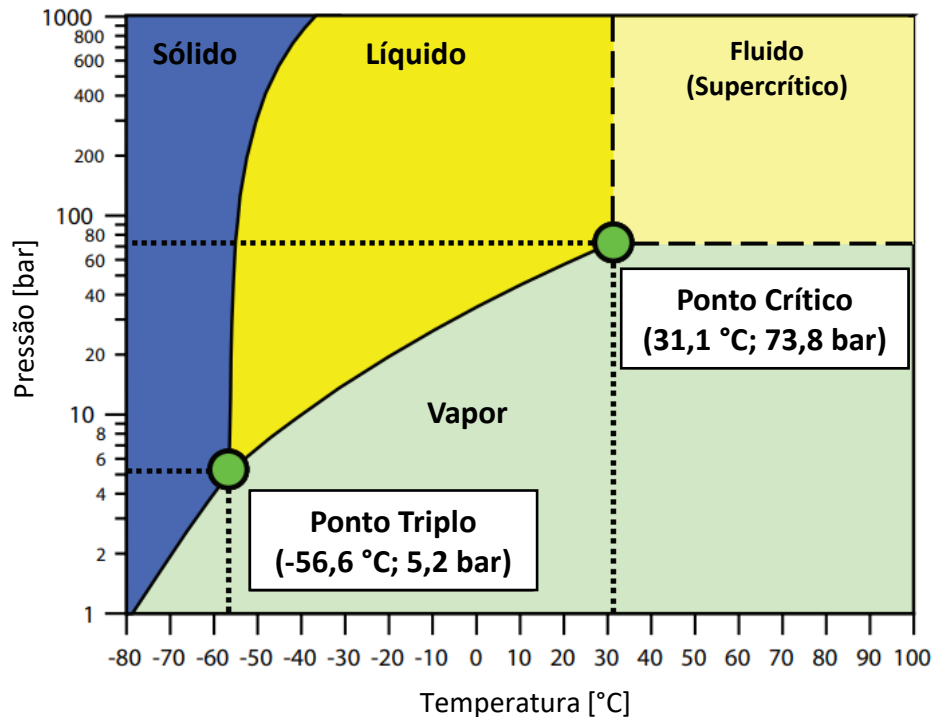


Figura 04 - Diagrama de fase do Dióxido de carbono (adaptado¹²).

¹¹<https://www.quora.com/Why-is-CO2-non-polar>

¹² Danfoss, Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide (CO₂): How to design and operate a small-capacity (< 10 kW) transcritical CO₂ system.

Quando em operação próxima do ponto triplo, a expansão do vapor pode gerar gelo seco, contudo, o CO₂ não dilata como a água quando se torna sólido, assim não gera perigo de romper a tubulação.

O ponto crítico, temperatura/pressão acima da qual não é possível mais condensar a substância, para o CO₂ é de 31,1 °C e 73,8 bar. Quando a substância se aproxima desse valor, a densidade do líquido e vapor se tornam próximas uma da outra, sendo que acima deste não há diferença visual entre as fases de líquido e vapor.

Por possuir um ponto crítico em, relativamente, baixa temperatura e alta pressão, a solução de um sistema cascata torna-se uma boa alternativa ao uso deste fluido. A alta pressão de operação/saturação leva a uma alta densidade de vapor, reduzindo o volume específico do fluido, o que resulta em equipamentos menores. Essa alta pressão de vapor resulta também em maior capacidade de refrigeração volumétrica, sendo esta de 3 a 10 vezes maior que os HCFC, HFC e HC.¹³

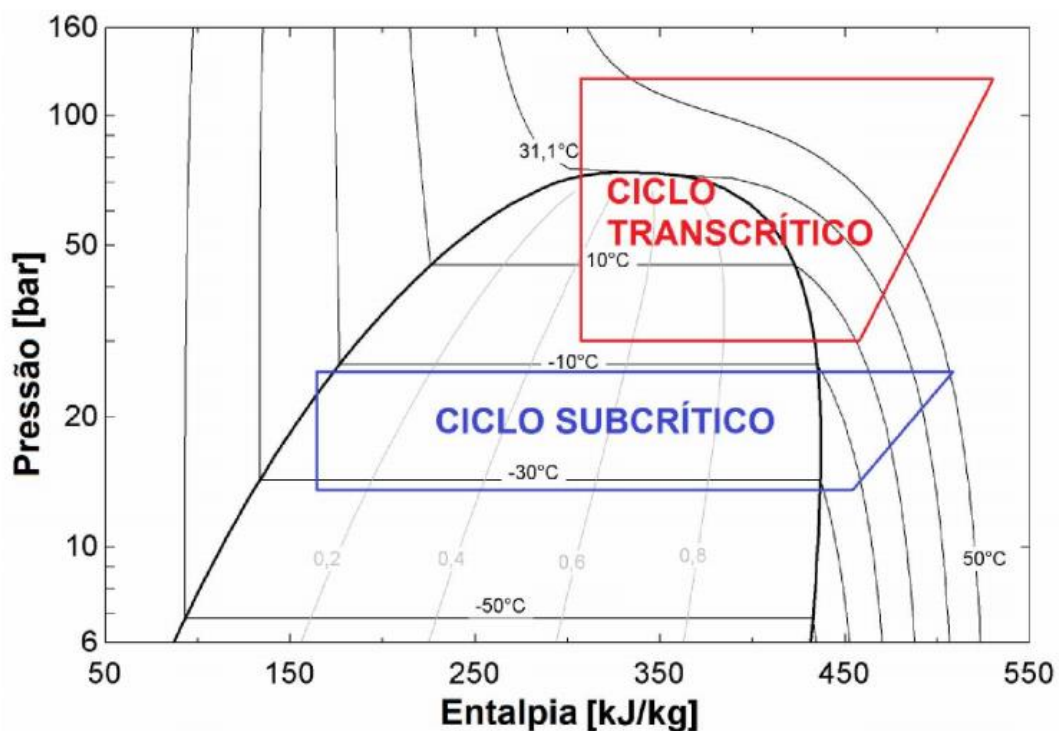


Figura 05 - Diagrama Pressão x entalpia do CO₂¹⁴.

A Figura 05 mostra o diagrama pressão x entalpia, em valores próximos aos usuais de operação subcrítica e transcritical. As aplicações subcríticas e transcriticals serão apresentadas mais adiante, na seção projeto de equipamentos.

¹³ KIM, Man-Hoe; PETERSEN, Jostein; BULLARD, Clark W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems. Progress in energy and combustion science, v. 30, n. 2, p. 119-174, 2004.

¹⁴ <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19110/1/AvaliacaoExperimentalSistema.pdf>

Principais vantagens do CO₂:

- Zero potencial de destruição da camada de ozônio (PDO=0);
- Potencial de aquecimento global desprezível (GWP=1);
- Não é inflamável (A1);
- Não é tóxico (A1);
- Não é corrosivo;
- Alternativa abundante no meio ambiente;
- Baixo custo;
- Não há necessidade de recolher o fluido durante uma manutenção ou no descarte do equipamento;
- Excelente miscibilidade com óleos lubrificantes;
- Alta capacidade de refrigeração volumétrica;
- Baixa queda de pressão em tubulações e trocadores de calor.

Principais desvantagens:

- Opera em elevadas pressões;
- Requerem componentes, como compressores e tubulações, especiais, devido as altas pressões de operação;
- Projeto do sistema requer mão de obra qualificada;
- Custo elevado;
- Risco de asfixia caso ocorra um vazamento de CO₂ em ambientes confinados.
- Pouca disponibilidade de técnicos capacitados.

Grupo de segurança do CO₂

A classificação de segurança do CO₂ é A1¹⁵. A letra maiúscula indica a toxicidade e o algarismo arábico denota a inflamabilidade.

Toxicidade:

- “A” indica que o fluido refrigerante não é tóxico em concentrações abaixo de 400 ppm.
- “B” indica que o fluido refrigerante é tóxico em concentrações abaixo de 400 ppm.

Inflamabilidade:

- Classe 1: não propaga chamas;
- Classe 2: baixa inflamabilidade;
- Classe 3: altamente inflamável.

Tabela 02 – Classificação de segurança de fluidos refrigerantes

Classificação		Toxicidade	
		Classe A	Classe B
Inflamabilidade	Classe 1	A1	B1
	Classe 2	A2	B2
		A2L	B2L
Classe 3	A3	B3	

Conforme o critério de classificação de segurança apresentado, o dióxido de carbono (CO₂) não é tóxico e não é inflamável.

¹⁵ Norma ISO 5149: 2014 - Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements.

Identificação

- Número da ONU¹⁶: 1013¹⁷
- Classe de risco: 2 – gás não inflamáveis
- Número de risco: 20
- Família química: Óxido
- Fórmula molecular: CO₂

Aparência

- Gás comprimido liquefeito ou sólido;
- Sem coloração;
- Sem odor, algumas pessoas chegam a sentir o odor e o descrevem como pungente;
- Produz nuvem de vapor visível.

Massa molar¹⁸:

44,0 g/mol

Risco ao fogo

- Não é inflamável;
- Os recipientes podem explodir, quando aquecidos;
- Esfriar os recipientes expostos, com água.

Toxicidade:

NR 15 -Anexo 11: 3900 ppm ou 7020 mg/m³, para jornadas de trabalho de até 48 horas/semana.

Recomenda-se também ver limites de tolerância na ACGIH e NIOSH.

Informações sobre intoxicação humana¹⁹

Tipo de contato	Síndrome tóxica	Tratamento
Vapor	Se inalado, causará tontura ou dificuldade respiratória.	Mover para o ar fresco. Se a respiração for dificultada, dar oxigênio.
Líquido	Causará enregelamento.	Lavar as áreas afetadas com muita água. Não esfregar as áreas afetadas.

Limite prático:

O limite prático de um fluido refrigerante é uma concentração utilizada para simplificar o cálculo para determinar a máxima quantidade aceitável de fluido refrigerante em um espaço ocupado²⁰. O limite prático do CO₂ é 0,1 kg/m³.

Grau de pureza

Recomendações quanto ao grau de pureza devem ser verificadas junto aos fornecedores dos principais componentes do sistema de refrigeração e nas respectivas normas. Em aplicações de R-744 (CO₂), é recomendado a utilização do dióxido de carbono com pureza maior ou igual a 99,9%²¹, em massa.

¹⁶ O número ONU é uma sequência numérica de quatro dígitos determinada pela Organização das Nações Unidas (ONU) para identificar produtos químicos e/ou produtos que oferecem perigo à vida. Este número fica na parte inferior do painel laranja (o painel de segurança). Pode ser definido como o RG de um produto perigoso.

¹⁷https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DI%C3%93XI DO%20DE%20CARBONO

¹⁸ Norma ISO 5149 - Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements.

¹⁹https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DI%C3%93XI DO%20DE%20CARBONO

²⁰ Norma ISO 5149- Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements.

²¹ AHRI 700:2017 – Specifications for Refrigerants.

5 Normas

As normas, regulamentações e instruções técnicas possuem papel importante quando se opta por adotar um novo fluido refrigerante, principalmente em relação ao quesito segurança. No caso do R-744, o principal cuidado ao se projetar ou executar algum tipo de serviço em um equipamento são as pressões do sistema, que são bastante elevadas.

A seguir são apresentadas as principais normas, além de uma orientação a respeito das instruções técnicas do corpo de bombeiros. Esta lista não é exaustiva e os responsáveis pelos equipamentos de refrigeração devem verificar a existência e validade das normas pertinentes às atividades a serem desempenhadas.

Normas ABNT

- ABNT NBR 15976:2011 Redução das emissões de fluidos refrigerantes halogenados em equipamentos e instalações estacionárias de refrigeração e ar condicionado — Requisitos gerais e procedimentos;
- ABNT NBR 15960:2011 Fluidos refrigerantes — Recolhimento, reciclagem e regeneração (3R) — Procedimento;
- ABNT NBR ISO 11650:2008 Desempenho de equipamento de recolhimento e/ou reciclagem de fluidos refrigerantes;
- ABNT NBR 13598:2018 Vasos de pressão para refrigeração;
- ABNT NBR 16069:2018 Segurança em sistemas refrigerantes;
- ABNT NBR 15833:2018 - Manufatura reversa – Aparelhos de refrigeração;
- ABNT NBR 16666:2018 - Fluidos Refrigerantes;
- ABNT NBR 16667:2018 - Especificações para fluidos refrigerantes;

Normas Regulamentadoras (NR)

As Normas Regulamentadoras - NR, relativas à segurança e medicina do trabalho, são de observância obrigatória de todas as empresas que possuem empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho - CLT. O não cumprimento das disposições legais e regulamentares sobre segurança e medicina do trabalho acarretará ao empregador a aplicação das

penalidades previstas na legislação pertinente. Entre as NRs, destacam-se:

- NR 06 - Equipamentos de Proteção Individual;
- NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;
- NR 12 - Máquinas e Equipamentos;
- NR 13 - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações;
- NR 20 - Líquidos Combustíveis e Inflamáveis;
- NR 26 - Sinalização de Segurança.

Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros

É recomendado que sejam avaliados os requisitos de segurança estabelecidos pelas Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros ao se utilizar fluidos inflamáveis. As instruções podem variar em cada estado e municípios.

Normas Internacionais

- IEC 60335-2-24: Refrigeração doméstica;
- IEC 60335-2-40: Ar condicionado e bombas de calor;
- IEC 60335-2-89: Refrigeração comercial;
- ISO 5149 e EN 378: abordam definições, classificação, critérios de seleção, projeto, construção, testes, identificação, documentação, local de instalação, operação, manutenção, reparo e recuperação.

6 Projetos de equipamentos

Devido às propriedades particulares desse fluido refrigerante, o R-744 possui uma temperatura de ponto crítico baixa ($31,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) aliada à pressão crítica relativamente alta (73,6 bar). Isto faz com que nas condições ambientais encontradas normalmente no Brasil não seja possível condensar o fluido refrigerante durante o processo de rejeição de calor, no ciclo de compressão de vapor. Duas propostas gerais de operação podem ser utilizadas dada tal limitação: utilizar o R-744 como fluido frigorífico em ciclo subcrítico ou transcrito. A Figura 05 apresenta os ciclos de compressão de vapor clássicos com as respectivas faixas de operação em regime transcrito e subcrítico, dentro do diagrama pressão-entalpia, na qual, pode ser observada a diferença na faixa de pressões de operação entre os dois ciclos.

Ciclo de refrigeração transcrito

O ciclo de refrigeração transcrito é similar ao ciclo de compressão a vapor convencionalmente utilizado, já que está composto por um processo de compressão, dois processos de troca de calor à pressão constante e um processo de expansão (ver Figura 06). No entanto, possui como diferencial que, é um sistema em que o fluido frigorífico recebe calor, do meio a ser resfriado, à uma temperatura abaixo do ponto crítico e o rejeita, ao meio externo, à uma temperatura acima da temperatura crítica. Devido às condições em que o processo de rejeição de calor é realizado, o R-744 não pode ser mais condensado e o fluido frigorífico é tratado como um gás denso. O trocador de calor que realiza esse processo é usualmente chamado de resfriador de gás (*gas cooler*).

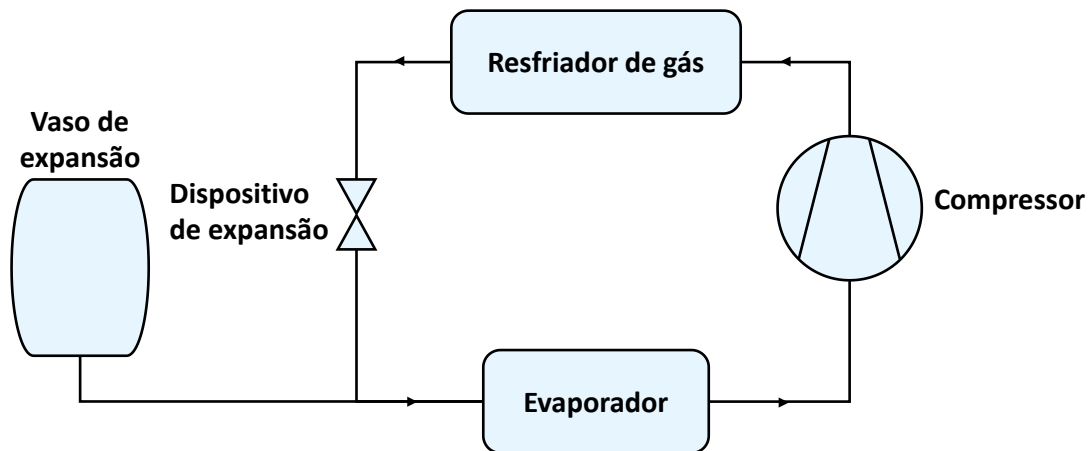


Figura 06 – Diagrama esquemático do ciclo fundamental de refrigeração transcrito.

A temperatura do R-744, dentro do resfriador de gás, no estado supercrítico, muda consideravelmente e opera com pressões elevadas, na faixa de 100 a 150 bar²². Esse componente se torna um dos elementos chave durante o projeto desse tipo de sistemas, uma vez que, a temperatura de saída do resfriador de gás e a pressão de descarga do compressor dependem fortemente do tamanho desse componente e da carga de fluido refrigerante contida no sistema. Isto faz com que, para cada condição de operação, exista uma pressão de descarga

²² Da Silva, Dióxido de Carbono (CO₂) em Sistemas de Refrigeração Comercial e Industrial, Editora Nova Técnica – Vol. 1, 1ª Reimpressão, 2011.

que maximize o coeficiente de desempenho (COP) do sistema²³. Adicionalmente, uma das principais desvantagens desse ciclo de refrigeração é a alta sensibilidade da capacidade de refrigeração e o COP com as mudanças da temperatura ambiente. Devido às elevadas pressões de operação, o ciclo transcrito precisa de componentes especialmente projetados para dada aplicação e medidas de segurança para alívio da pressão.

O ciclo de refrigeração transcrito de R-744, na sua configuração mais básica, é aplicado principalmente em sistemas de pequeno porte, tais como: ar condicionado automotivo, bombas de calor para aquecimento de água e refrigeração comercial leve; em configurações mais complexas, o ciclo transcrito pode ser utilizado para aplicações de grande porte em ambientes com temperatura ambiente baixa. Esse ciclo frigorífico permite uma solução completamente livre da utilização de fluidos frigorífico halogenados com alto potencial de aquecimento global, já que utiliza unicamente o R-744 como fluido frigorífico.

Ciclo de refrigeração subcrítico (sistema de refrigeração em cascata)

O ciclo de refrigeração de R-744 subcrítico difere do ciclo transcrito no processo de rejeição de calor, em que o fluido refrigerante é condensado completamente (ver Figura 07). Para realizar o processo de condensação do R-744, em uma de suas opções de sistemas de dois estágios, outro fluido frigorífico diferente do R-744 com ponto crítico acima da temperatura ambiente é utilizado. Tal sistema opera no chamado ciclo cascata, onde dois fluidos refrigerantes distintos, um de baixa temperatura (R-744) e outro fluido no ciclo de alta temperatura, operam com sua interface realizada por um trocador de calor convencionalmente chamado de trocador em cascata; em outras palavras, para o ciclo de alta temperatura, o trocador cascata funciona como evaporador e, para o ciclo de baixa temperatura, funciona como condensador.

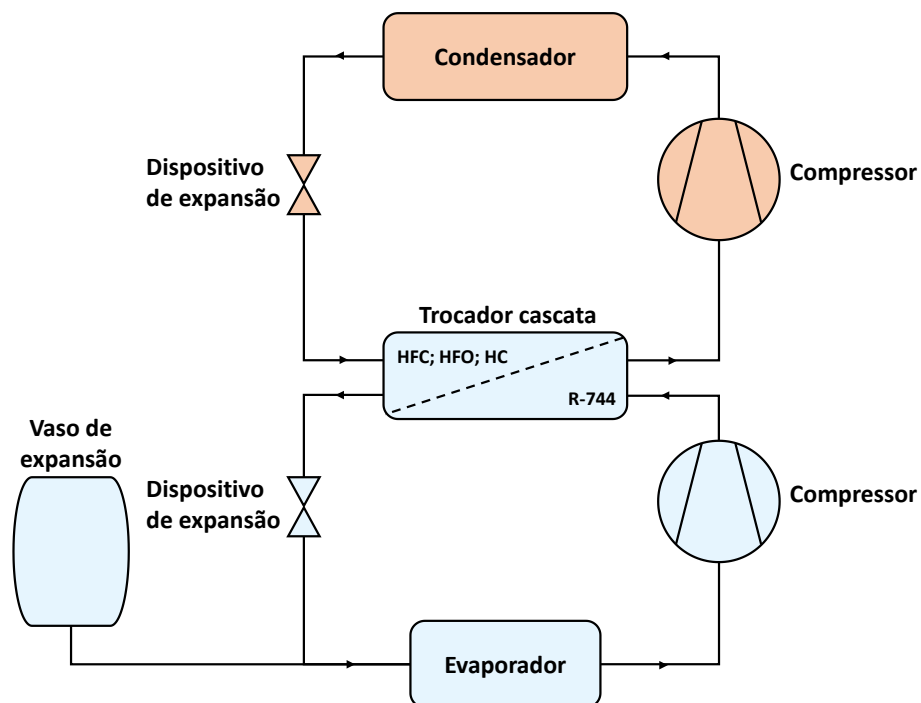


Figura 07 – Diagrama esquemático do ciclo fundamental de refrigeração cascata para CO₂.

²³ Emerson, Commercial CO₂ Refrigeration Systems: Guide for Subcritical and Transcritical CO₂ Application, 2016. Disponível em: http://www.r744.com/files/675_commercial_co2_guide.pdf

O sistema em cascata permite conciliar o uso de um fluido refrigerante natural (CO₂) com uma redução substancial da massa de fluido secundário (R-290, R-717, HFOs), quando comparado à sistemas convencionais de refrigeração por expansão direta, fornecendo uma solução de baixo potencial de aquecimento global.

Esse ciclo de refrigeração permite diversas configurações com as quais podem ser atingidas temperaturas de evaporação de -55 °C a -30 °C e temperaturas de condensação de -10 a 0 °C, para o ciclo de baixa temperatura, enquanto que, para o ciclo de alta temperatura, a faixa de operação se mantem similar à de um sistema de refrigeração convencional²⁴. Outras alternativas, mais complexas, permitem, que o R-744, condensado, possa ser utilizado como fluido secundário para aplicações de resfriamento a temperaturas mais elevadas (aproximadamente à -10 °C), utilizando bombas de circulação. Uma vez que as pressões de operação desse ciclo são menores, os componentes tendem a ser menos robustos e, conseqüentemente, mais econômicos, quando comparados com os componentes pertinentes ao ciclo transcrito. No entanto, o ciclo em cascata, em operação, utiliza grandes quantidades de R-744 no estado líquido. Nesse sentido, especial atenção deve ser fornecida durante o projeto da instalação para garantir a segurança em termos de alívio de pressão, dotando o sistema com vasos de expansão e válvulas de segurança em caso de falha no fornecimento de energia ao sistema ou possíveis falhas do sistema de alta temperatura deixando de refrigerar o trocador cascata.

7 Fábrica

O processo de fabricação de um sistema de refrigeração com CO₂ é similar a qualquer outro sistema, diferentemente do propano, o dióxido de carbono não é inflamável, mas por operar em altas pressões e por ser uma substancia asfixiante, cuidados devem ser tomados.

Processos de montagem

O processo de montagem padrão de um equipamento pode ser dividido em duas etapas.

Primeira etapa: o sistema de refrigeração ainda não foi carregado com fluido frigorífico, portanto, não requer medidas de segurança adicionais. Esta etapa inclui:

- Montagem de componentes;
- Evacuação.

Segunda etapa: o sistema é submetido a testes de pressão e é carregado com fluido frigorífico, ao final deste processo o sistema está submetido a altas pressões, havendo a necessidade de medidas de segurança adicionais. Esta etapa inclui:

- Teste de resistência e estanqueidade;
- Carga do fluido frigorífico;
- Verificação de vazamento;
- Área de reparo;
- Teste de segurança elétrico;
- Teste de operação;
- Montagem final;
- Embalagem.

²⁴ http://www.unep.fr/ozonaction/information/mmcfiles/6266-p-uso_fluidos_naturais.pdf

Cabe destacar que as empresas geralmente optam por realizar a carga do CO₂ no campo. Neste caso os procedimentos adotados em campo devem ser os mesmos aos adotados na fábrica.

A Figura 08 destaca as etapas padrão do processo de fabricação de um equipamento de refrigeração, delimitando uma área de segurança, onde o sistema de refrigeração é submetido a elevadas pressões.

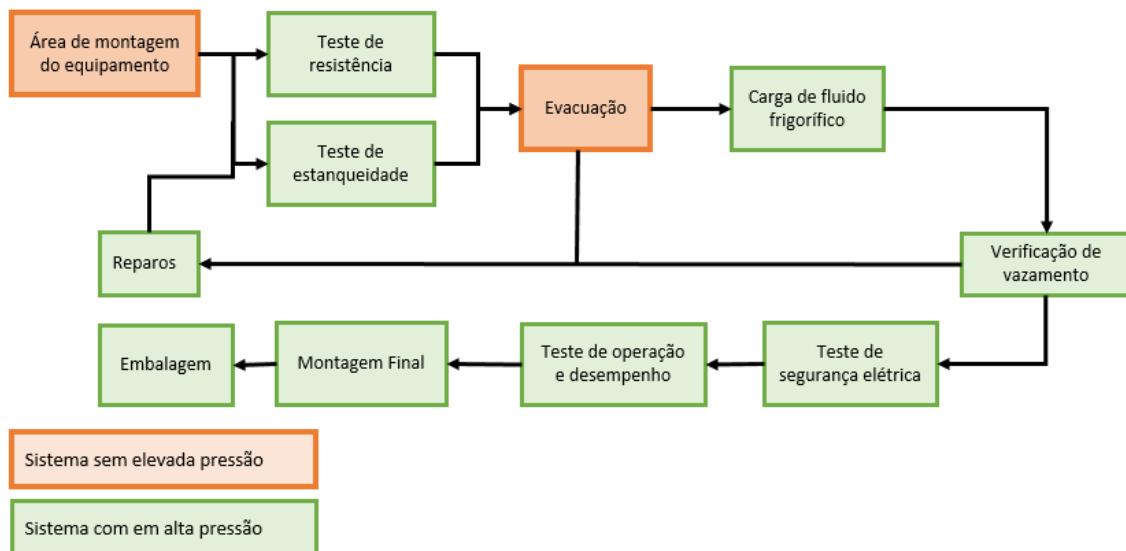


Figura 08: Processo de fabricação típico²⁵.

Armazenamento do CO₂

Tanto no armazenamento quanto no transporte de CO₂ devem ser tomadas as seguintes precauções:

- Recipientes devem ser mantidos longe de fontes de calor;
- Local deve ser ventilado, seco e protegido de luz solar direta;
- Os cilindros devem ser mantidos na posição vertical, fixados à parede, ou em outra estrutura sólida;
- Sinalização de advertência e de identificação do produto, assim como a Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) devem estar presentes neste local;
- Durante o transporte do cilindro, deve ser utilizado carrinho transportador com sistema de fixação de cilindro.

Área de carga, verificação de vazamento e retrabalho

- Espaço com dimensões suficientes para abrigar os operadores, equipamento de refrigeração, ferramentas, máquinas e outros equipamentos necessários para a atividade;
- Ser limpo;
- Ter acesso restrito;
- Ventilação adequada;
- Área afastada de local onde há presença de fontes de calor;

²⁵ MMA. Orientações para uso seguro de fluidos refrigerantes hidrocarbonetos: um manual para engenheiros, técnicos, instrutores e formuladores de políticas – para uma refrigeração e climatização mais sustentável. Brasília: MMA, 2015. 344 p.

- Sinalização;
- Ter instalações elétricas compatíveis com a atividade;
- Ter aterramento;
- Local deve ser ventilado;
- Sistema de detecção de vazamentos e alarme;
- Equipamentos de proteção individual e coletiva compatíveis com a atividade desempenhada;
- Programa de monitoramento e manutenção periódico;
- Deve haver treinamento de funcionários sobre boas práticas e riscos relacionados à segurança.

Área de testes e montagem final

As principais fontes de risco para gerar um vazamento são os choques mecânicos e a necessidade de substituição de um componente defeituoso, por isso, é recomendado a presença de sensores de vazamento e eventualmente um sistema de ventilação forçada neste ambiente.

Equipamentos e ferramentas

Todos os equipamentos devem ser compatíveis com o fluido utilizado. Para o manuseio do R-744, destaca-se:

- *Manifold* e mangueira de transferência/Máquina de carga compatíveis com altas pressões;
- Detector de vazamento;
- Equipamento de descarga/recolhimento.

Procedimento de carga

O procedimento de carga do sistema é composto por testes de pressão, testes de vazamento, vácuo e carga de fluido frigorífico, sempre seguindo as boas práticas de refrigeração.

O teste de pressão é importante para garantir que o sistema como um todo será capaz de suportar as pressões existentes durante a operação. Nesta etapa é possível identificar falhas construtivas, como soldas e conexões inadequadas.

É recomendado que seja realizado ensaios com pressão de 1,1 vezes a pressão máxima de trabalho admissível (PMAT) ²⁶. O regulador e as mangueira de transferência devem ser compatíveis com a pressão de teste. A área onde estão sendo realizados os testes deve ser ventilada e ter acesso restrito.

Passado o ensaio de pressão, o sistema deve ser despressurizado e evacuado. A evacuação do sistema é importante para retirada principalmente de umidade, gases não condensáveis, particulados e outros resíduos. A umidade pode contribuir para redução da eficiência do sistema e da vida útil do compressor, enquanto que a presença de gases não condensáveis pode acarretar no aumento da pressão e redução da capacidade de refrigeração do sistema.

²⁶ EN-378-2:2017 Refrigerating systems and heat pumps Safety and environmental requirements – Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation. E ABNT NBR 16069.

Deve-se garantir que todo o sistema seja evacuado. Durante este procedimento deve ser utilizado um vacuometro, sendo o valor ideal de vácuo abaixo de 500 microns de Hg.

Antes de iniciar a carga o responsável pela atividade deve ligar um detector de vazamentos compatível com CO₂, garantir que não há risco de tombamento dos cilindros de carga, que as ferramentas são compatíveis com as pressões do sistema, que os EPIs adequados estejam sendo utilizados, que o local é ventilado e que está bem sinalizado.

Procedimentos específicos devem ser adotados em sistemas subcríticos em cascata ou em sistemas transcíticos. É recomendado treinamento específico para cada sistema. Nos sistemas em cascata, o lado de alta do sistema deve ser carregado e comissionado antes do lado de baixa pressão. Em sistemas transcíticos, provavelmente não será possível carregar o sistema sem ter que dar partida no equipamento, desta forma medidas alternativas para reduzir a pressão interna do sistema ou aquecimento do cilindro de CO₂ devem ser utilizadas.

Após a carga, deve ser verificado, novamente, a existência de vazamentos no sistema, principalmente nas conexões e em seguida deve ser feita uma inspeção geral. Durante esta atividade deve ser feita uma avaliação visual do sistema e devem ser anotadas todas as informações dos ensaios de pressão, vazamento e a carga. A depender da carga de CO₂, um detector de fluido deve ser instalado ou deve ser criado um procedimento para detecção de vazamentos.

Descarga do sistema

Normalmente o CO₂ é descarregado para fora da instalação em vez de ser recolhido. Por ser asfixiante, deve-se garantir que toda a substância seja descarregada em um local ventilado, a uma distância segura de pessoas e animais. Durante o procedimento de descarga, deve-se tomar cuidado com a queda de pressão repentina do sistema. Esse fenômeno pode resultar no congelamento dos componentes do sistema de refrigeração, conseqüentemente um local potencial de acidente, em caso de descuido do operador é possível que ocorra queimaduras a frio. Caso seja utilizada uma recolhadora e um cilindro de recolhimento, deve-se garantir que elas sejam compatíveis com pressões elevadas, pois a maioria das máquinas disponíveis no mercado não são compatíveis com sistemas com CO₂.

8 Serviço em campo

As principais atividades em campo, são a instalação, carga do sistema, o comissionamento e manutenção. O primeiro ponto a se destacar para a execução correta destas atividades é o treinamento. A equipe responsável pelo serviço deve ser capacitada para manusear o CO₂ e operar sistemas de alta pressão. Os procedimentos de campo devem seguir, no mínimo, as mesmas diretrizes do serviço realizados na fábrica.

Durante as atividades, os responsáveis devem estar munidos das informações sobre sistema. Toda a documentação deve estar sempre disponível em local de rápido acesso. É recomendado manter sempre ligado um detector de CO₂. Seguir as recomendações dos fabricantes dos componentes e do sistema de refrigeração, e planejar as atividades de forma que haja tempo suficiente para a execução do serviço.

9 Planejamentos de custos

Com o intuito de auxiliar a empresa na tomada de decisão da seleção de uma alternativa, são sugeridas que as atividades de planejamento e conhecimento da tecnologia sejam realizadas antes de escolher a(s) alternativa(s). As soluções escolhidas e decisões tomadas nesse momento influenciam diretamente no tempo e na forma de execução da conversão. A lista de recomendações apresentada a seguir não é exaustiva, sendo de responsabilidade da empresa avaliar as alternativas disponíveis, selecionar o fluido alternativo e iniciar seu planejamento.

Avaliação das tecnologias disponíveis

- Buscar informações das tecnologias disponíveis;
- Buscar informações sobre mudanças que estão acontecendo no setor;
- Buscar informações sobre normas disponíveis;
- Buscar informações a respeito das propriedades de fluidos alternativos;
- Buscar informações sobre empresas que atuam no mesmo setor e que já se converteram.

Protótipos e equipamentos de refrigeração

- Verificar disponibilidade e custo do fluido frigorífico;
- Verificar disponibilidade e custo de componentes;
- Verificar custos para desenvolver o projeto de conversão dos equipamentos de refrigeração;
- Adquirir ferramentas básicas compatíveis com o fluido escolhido para carregar os protótipos;
- Adquirir os componentes necessários;
- Realizar ensaios de performance dos protótipos;
- Avaliar e testar a segurança do protótipo, com a coleta de dados e parâmetros para avaliação.

Produção dos equipamentos de refrigeração

- Realizar um estudo sobre a forma mais adequada para a carga do fluido alternativo:
 - Máquinas de carga de fluido aprovadas para dióxido de carbono;

- Métodos padrão, utilizando *manifold* e balança.
- Avaliação do *layout* e projeto da área de carga;
- Carga de fluido:
 - Orçar e adquirir ferramentas e/ou máquinas compatíveis com fluidos que operam com altas pressões;
 - Orçar e adquirir um sistema de sensores e alarmes;
 - Orçar custo da instalação dos equipamentos e ferramentas adquiridos e treinamento de operação;
 - Adquirir ferramentas e equipamentos para serviço de campo.
- Intervenções e obras civis:
 - Adequar o local de armazenamento de fluido;
 - Executar obras civis;
 - Instalar sinalização de segurança.

Treinamentos e serviço

- Treinar a equipe de manufatura: procedimentos de montagem e segurança;
- Treinar a equipe de campo sobre manutenção e reparo;
- Realizar campanha de capacitação e sensibilização.

Equipamentos mínimos para área de carga

- Pacote de manuseio de fluidos frigoríficos: adquirir sistema de carga de fluido;
- Medidas de segurança: adquirir detectores de vazamento.





ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS
PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL
