

Projeto de um sistema de refrigeração não cíclico auxiliar de baixo custo para um banho ultratermostático

Os sistemas de refrigeração desempenham papéis essenciais em nossa vida diária, que vão desde sistemas residenciais de ar-condicionado até a conservação de alimentos, medicamentos entre outros produtos. Sua história é caracterizada por inovações e avanços tecnológicos que moldaram nossa sociedade. No começo da utilização dos sistemas de refrigeração, os equipamentos eram grandes, caros, pouco eficientes e utilizavam fluidos refrigerantes tóxicos que agrediam o meio ambiente. Devido ao contínuo aperfeiçoamento, os sistemas de refrigeração foram diminuindo de tamanho e se tornando mais eficientes, junto a isso, o desenvolvimento de refrigerantes menos danosos ao meio ambiente e com melhor performance, foram responsáveis por viabilizar o uso dos sistemas de refrigeração em diversas áreas, popularizando esses equipamentos em indústrias, comércios, residências e até automóveis. O ciclo de refrigeração por compressão de vapor, embora seja amplamente utilizado e adequado para muitas aplicações de refrigeração, não possui a capacidade de atingir rapidamente temperaturas negativas, como acontece em geladeiras domésticas, por exemplo, que levam algumas horas para começar a formar gelo. Devido a essa limitação e à escassez e alto custo de sistemas de refrigeração no mercado com essa capacidade, tornou-se necessário desenvolver um sistema que possuísse a característica de atingir temperaturas negativas rapidamente, o dióxido de carbono foi escolhido como fluido refrigerante devido a sua abundância, baixo custo e por possuir características de não toxicidade, não inflamabilidade, não causar danos à camada de ozônio, e por possuir baixo potencial de aquecimento global. Este trabalho tem como objetivo apresentar um projeto de um sistema de refrigeração não cíclico de baixo custo para ser utilizado como equipamento auxiliar em um banho ultratermostático, utilizado no laboratório de calibração de uma empresa de engenharia clínica.

Palavras-chave: Sistema de refrigeração não cíclico; CO₂; Dióxido de carbono; Refrigerantes naturais.

Design of a low cost auxiliary non-cyclic cooling system for an ultrathermostatic bath

Refrigeration systems play essential roles in our daily lives, ranging from residential air conditioning systems to preserving food, medicine and other products. Its history is characterized by innovations and technological advances that have shaped our society. At the beginning of the use of refrigeration systems, the equipment was large, expensive, inefficient and used toxic refrigerants that harmed the environment. Due to continuous improvement, refrigeration systems have been decreasing in size and becoming more efficient, along with this, the development of refrigerants that are less harmful to the environment and with better performance, were responsible for enabling the use of refrigeration systems in several areas, popularizing this equipment in industries, businesses, homes and even automobiles. The vapor compression refrigeration cycle, although widely used and suitable for many refrigeration applications, does not have the ability to quickly reach negative temperatures, as happens in domestic refrigerators, for example, which take a few hours to start forming ice. Due to this limitation and the scarcity and high cost of refrigeration systems on the market with this capacity, it became necessary to design a system that had the characteristic of reaching negative temperatures quickly, carbon dioxide was chosen as refrigerant due to its abundance, low cost and because it has characteristics of non-toxicity, non-flammability, does not damage the ozone layer, and has low global warming potential. This work aims to present a design of a low cost non-cyclic refrigeration system to be used as auxiliary equipment in an ultrathermostatic bath, used in the calibration laboratory of a clinical engineering company.

Keywords: Non-cyclic cooling system; CO₂; Carbon dioxide; Natural refrigerants.

Topic: **Projeto Mecânico**

Received: **01/12/2022**

Approved: **25/05/2023**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Lucas Gabriel de Oliveira Nery 
Centro Universitário do Vale do Ipojuca, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3107019196977310>
lucasneryab@gmail.com

Evandro de Souza Queiroz 
Centro Universitário Vale do Ipojuca, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3686272912938558>
<https://orcid.org/0000-0002-2995-8752>
evandro.queiroz@unifavip.edu.br



DOI: 10.6008/CBPC2318-3055.2023.001.0006

Referencing this:

NERY, L.G.O.; QUEIROZ, E. S... Projeto de um sistema de refrigeração não cíclico auxiliar de baixo custo para um banho ultratermostático.

Engineering Sciences, v.11, n.1, p.44-51, 2023. DOI:

<http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2023.001.0006>

INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração possuem importantes papéis em nossa vida diária, além de estarem presentes em sistemas de condicionamento de ar, permitem que alimentos, medicamentos, equipamentos eletrônicos e muitos outros produtos sejam armazenados e transportados em condições adequadas, possuindo tanto aplicações comerciais como industriais, entre elas podemos citar a separação de ar para obtenção de oxigênio e nitrogênio líquidos, a liquefação de gás natural e produção de gelo. A história dos sistemas de refrigeração é marcada por uma série de inovações e avanços tecnológicos que influenciaram diretamente a vida e o comportamento da sociedade (MORAN et al., 2013).

O objetivo de um sistema de refrigeração é reduzir a temperatura de uma determinada região abaixo daquela do meio ambiente e/ou manter constante a temperatura desse lugar de interesse (MORAN et al., 2013). O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o ciclo de refrigeração mais utilizado, e o mais adequado para a maioria das aplicações de refrigeração, estando presente na maioria das geladeiras e sistemas de ar-condicionado. A refrigeração por compressão de vapor data de 1834, quando Jacob Perkins patenteou uma máquina que usava éter ou outros fluidos voláteis como refrigerantes num ciclo fechado que utilizava o princípio da compressão e expansão de gases para resfriar o ambiente interno para produzir gelo (ÇENGEL et al., 2013).

O éter etílico foi um dos primeiros refrigerantes utilizados comercialmente em sistemas por compressão de vapor, assim como a amônia, dióxido de carbono, cloreto de metil, dióxido de enxofre, butano, etano, propano, isobutano, gasolina e clorofluorcarbonos, entre outros. Em 1850, Alexander Twining começou a projetar e construir máquinas de gelo por compressão de vapor que usavam éter etílico, que é um tipo de fluido refrigerante utilizado nos equipamentos por compressão de vapor. No princípio, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor tinham porte grande e eram usados principalmente para fabricar gelo, não possuíam nenhum tipo de controle automático e eram movidos por máquinas a vapor (ÇENGEL et al., 2013).

Nos anos de 1890, começaram a surgir máquinas menores, que eram movidas por motores elétricos e equipadas com controles automáticos, e gradativamente passaram a substituir os sistemas mais antigos, devido a essa otimização, os sistemas de refrigeração tornaram-se mais viáveis e começaram a aparecer em comércios e residências. Na década de 1930, houve um marco que popularizou, graças ao contínuo aperfeiçoamento, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor onde passaram a ser fabricadas máquinas relativamente eficientes, confiáveis, pequenas e baratas, assim, nos anos subsequentes os sistemas de ar-condicionado foram tornando-se cada vez mais comuns em casas e até em automóveis (ÇENGEL et al., 2013).

Uma grave desvantagem dos sistemas de refrigeração nessa época, era a alta toxicidade dos primeiros fluidos refrigerantes utilizados, como o dióxido de enxofre, o cloreto de etileno e o cloreto de metileno. Devido, a ocorrência de alguns casos de vazamento que resultaram em doenças graves e mortes na década de 1920, foi necessário desenvolver um refrigerante que fosse seguro principalmente para o uso

doméstico. Começou-se a buscar refrigerantes que possuísssem características de não serem tóxicos, corrosivos ou inflamáveis, e que fossem quimicamente estáveis, também era desejada uma alta entalpia de vaporização e que possuisse o menor custo possível (ÇENGEL et al., 2013).

Em 1928, o laboratório de pesquisas da General Motors produziu o R-21, o primeiro componente dos refrigerantes CFC. Entre vários CFCs desenvolvidos, foi definido pela equipe de pesquisa que o R-12 seria o refrigerante mais apropriado para o uso comercial. A fabricação do R-11 e R-12 iniciou em 1931, e sua versatilidade e baixo custo, tornaram os CFCs populares, sendo utilizados na maioria dos sistemas de compressão de vapor. O R-11 era utilizado em sistemas resfriadores de água de alta capacidade, enquanto o R-12 era utilizado em refrigeradores e congeladores domésticos e sistemas de condicionamento de ar automotivos. Houve ainda refrigerantes formados pela combinação entre fluidos refrigerantes, por exemplo o R-502, que era formado pelo R-115 e o R-22, e foi amplamente usado em sistemas de refrigeração de supermercados, por exemplo, uma vez que possibilitava baixas temperaturas nos evaporadores operando em regime de compressão de único estágio (ÇENGEL et al., 2013).

Em meados da década de 1970 pesquisadores descobriram que os CFCs afetavam a camada de ozônio, e facilitavam a entrada de radiação ultravioleta na atmosfera da Terra, que contribuíam com o efeito estufa e o aquecimento global. Devido a isso, tratados internacionais embargaram o uso de alguns CFCs que causavam maiores danos à camada de ozônio, e posteriormente, refrigerantes que não eram danosos à camada de ozônio foram desenvolvidos (ÇENGEL et al., 2013).

Os chamados refrigerantes naturais são substâncias não sintéticas, naturais, que podem ser usadas como fluidos refrigerantes, alguns deles são: o dióxido de carbono, a amônia, e os hidrocarbonetos, os refrigerantes naturais geralmente têm baixos potenciais de aquecimento global. O dióxido de carbono não causa danos à camada de ozônio, e seu potencial de aquecimento global de 1 é pequeno comparado ao do R-134a, comumente usados em sistemas de ar-condicionado de automóveis (MORAN et al., 2013).

Dados de Refrigerantes Incluindo o Potencial de Aquecimento Global (GWP)			
Número do Refrigerante	Tipo	Fórmula Química	GWP ² Aprox.
R-12	CFC	CCl ₂ F ₂	10900
R-11	CFC	CCl ₃ F	4750
R-114	CFC	CClF ₂ CClF ₂	10000
R-113	CFC	CCl ₂ FCClF ₂	6130
R-22	HCFC	CHClF ₂	1810
R-134a	HFC	CH ₂ FCF ₃	1430
R-1234yf	HFC	CF ₃ CF=CH ₂	4
R-410A	Mistura HFC	R-32, R-125 (50/50 Peso %)	1725
R-407C	Mistura HFC	R-32, R-125, R-134a (23/25/52 Peso %)	1526
R-744 (dióxido de carbono)	Natural	CO ₂	1
R-717 (amônia)	Natural	NH ₃	0
R-290 (propano)	Natural	C ₃ H ₈	10
R-50 (metano)	Natural	CH ₄	25
R-600 (butano)	Natural	C ₄ H ₁₀	10

²O Potencial de Aquecimento Global (GWP) depende do período de tempo em que é estimada a influência potencial do aquecimento global. Os valores listados são baseados em um período de 100 anos, que é um intervalo apoiado por algumas entidades reguladoras.

Figura 1: Tabela de dados de fluidos refrigerantes (MORAN et al., 2013).

O dióxido de carbono não é tóxico, não é inflamável e não possui odor. Uma vez que é abundante na atmosfera e nos gases de exaustão de alguns tipos de plantas industriais, o CO₂ é uma escolha relativamente

barata como refrigerante (MORAN et al., 2013), devido a isso, foi o fluido escolhido como refrigerante para este projeto de sistema de refrigeração auxiliar que tem como objetivo ser de baixo custo.

A motivação para a criação desse sistema surgiu devido a uma deficiência de um banho ultratermostático utilizado no laboratório de calibração de uma empresa de engenharia clínica, que possui dificuldade em atingir temperaturas negativas em períodos aceitáveis.



Figura 2: Banho ultratermostático sendo utilizado na calibração de um termômetro de líquido em vidro.

Devido ao alto custo e dificuldade de se encontrar no mercado sistemas de refrigeração que atinjam temperaturas baixas rapidamente, fez-se necessária a realização desse projeto. Com o auxílio desse sistema, o que antes levava horas passará a levar minutos, isso se traduz em economia de energia devido à diminuição do tempo que o equipamento precisa permanecer ligado, e maior rapidez no processo, destacando a empresa em relação às concorrentes.

METODOLOGIA

Para a realização desse projeto, foram feitas pesquisas em literaturas das áreas de termodinâmica, fundamentos de física e química, de forma que respaldasse o princípio de funcionamento do projeto de acordo com as leis da física e química relacionadas a processos de refrigeração. Não foi possível dimensionar detalhadamente o sistema por não ter sido encontrado referenciais teóricos que tratem sobre sistemas de refrigeração não cíclicos, mesmo assim, é possível garantir que o equipamento irá funcionar devido ao princípio de expansão dos gases, onde, por causa da relação existente entre pressão e temperatura, a queda de pressão no fluido quase sempre é acompanhada por uma grande queda na temperatura no processo de mudança de fase. Os componentes do sistema foram definidos de acordo com a pressão que eles enfrentariam no funcionamento do equipamento, levando em conta a adequação de uso, custo e disponibilidade no mercado.

DISCUSSÃO TEÓRICA

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor, apesar de ser o ciclo de refrigeração mais utilizado e adequado para grande parte das aplicações de refrigeração, não possui a característica de atingir temperaturas negativas rapidamente, como acontece em geladeiras domésticas, por exemplo, que demoram

algumas horas para começar a formar gelo, devido a essa desvantagem e a dificuldade e alto custo de encontrar sistemas no mercado com essas características, tornou-se necessário projetar um sistema que resolvesse esse problema.

Descrição do princípio de funcionamento do sistema de refrigeração

O sistema idealizado nesse trabalho difere da maioria dos sistemas de refrigeração por não apresentar um funcionamento cíclico, e possui a vantagem de alcançar baixas temperaturas rapidamente, uma vez que o dióxido de carbono se encontra liquefeito a alta pressão dentro do reservatório.

Durante um processo de mudança de fase, pressão e temperatura são propriedades dependentes, existindo definitivamente uma relação entre elas. A queda de pressão no fluido quase sempre é acompanhada por uma grande queda na temperatura, o que forma a base da operação de refrigeradores e condicionadores de ar, e por esse motivo os dispositivos de estrangulamento normalmente são usados em aplicações de refrigeração e condicionamento de ar (ÇENGEL et al., 2013).

O processo de fazer um líquido passar do estado líquido para o estado gasoso (vaporização), requer energia porque os átomos ou moléculas devem ser liberados de seus aglomerados (HALLIDAY et al., 2009). Como o dióxido de carbono muda do estado líquido para o gasoso espontaneamente ao ser transferido de um meio de alta pressão onde estava liquefeito, para outro meio de pressão próxima à atmosférica, seu escoamento é acompanhado de uma queda de temperatura, uma vez que ele absorveu energia para mudar de estado.

Uma situação comum onde o dióxido de carbono apresenta queda de temperatura ao escoar de um ambiente de alta pressão para um ambiente de pressão mais baixa onde ele passa para o estado gasoso, é na operação de extintores de incêndio que usam o dióxido de carbono. À medida que o dióxido de carbono sai do reservatório, sua temperatura cai significativamente. A água que está em estado gasoso no ar é condensada pelo dióxido de carbono frio, e é formada uma névoa branca que acompanha o CO₂ incolor, também pode-se notar formação de gelo ao redor do bocal de saída do extintor (BROWN et al., 2009).



Figura 3: Bombeiro operando um extintor de incêndio de dióxido de carbono (BROWN et al., 2009).

Comparando os valores do efeito volumétrico de refrigeração do dióxido de carbono em relação a

outros fluidos refrigerantes, vemos que a curva do dióxido de carbono apresenta valores de efeito volumétrico de refrigeração relativamente mais altos que outros gases. A elevada massa específica do CO₂ significa que um pequeno fluxo de vapor é suficiente para gerar uma alta capacidade de refrigeração (PEREIRA, 2010).

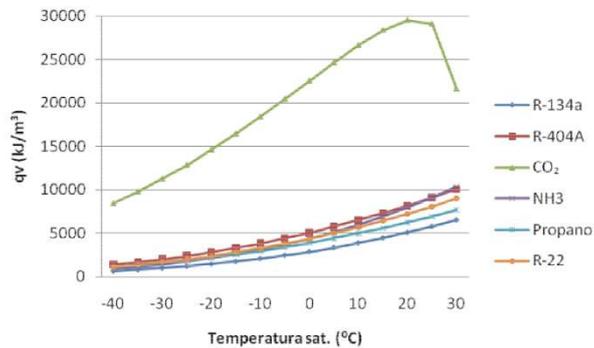


Figura 4: Entalpia de vaporização versus temperatura (PEREIRA, 2010).

Além disso, outra vantagem do uso do dióxido de carbono é a baixa tensão superficial. Essa característica influencia diretamente na transferência de calor, que pode facilitar a ebulição do fluido caso seja baixa, ou dificultar a ebulição caso possua tensão mais elevada, o CO₂ apresenta baixa tensão superficial em relação aos fluidos refrigerantes comparados (PEREIRA, 2010).

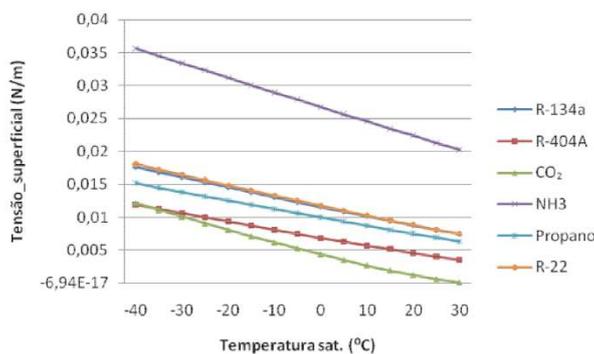


Figura 5: Tensão superficial versus temperatura de saturação (PEREIRA, 2010).

As etapas do sistema são mostradas na representação esquemática na Figura 06.

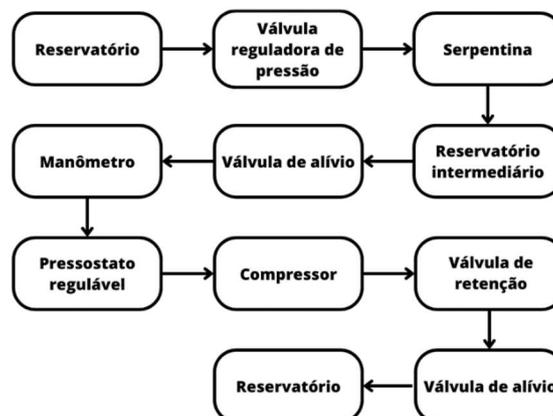


Figura 6: Representação esquemática das etapas do sistema.

O dióxido de carbono se encontra armazenado em alta pressão no estado líquido no reservatório inicial, ao passar pela válvula reguladora de pressão, o gás encontra um ambiente de menor pressão, nesse

momento o mesmo muda para o estado gasoso, entretanto, para que esta mudança de estado aconteça, o gás precisa absorver energia (energia térmica), dessa forma, será conduzido pela serpentina, que estará submersa no fluido do banho, como um gás em baixa temperatura, devido à diferença de temperatura entre a serpentina e o fluido do banho, haverá uma transferência de calor que será responsável por diminuir a temperatura do fluido utilizado no equipamento, pois, como a temperatura do sistema (serpentina) é menor que a temperatura do ambiente (fluido), uma certa quantidade de calor é absorvida pelo sistema para que o equilíbrio térmico seja reestabelecido (HALLIDAY et al., 2009), dessa forma, o processo de diminuição da temperatura será acelerado, fazendo com que o ponto de temperatura da calibração seja atingido mais rapidamente, conforme desejado.

Na linha de saída do reservatório inicial a pressão máxima será definida como 3 atm (aproximadamente 3 bar) para se distanciar das regiões onde o dióxido de carbono possui estado sólido e líquido, portanto, observando o diagrama de fases, espera-se alcançar na serpentina, temperaturas entre -34,5°C e -23,5°C.

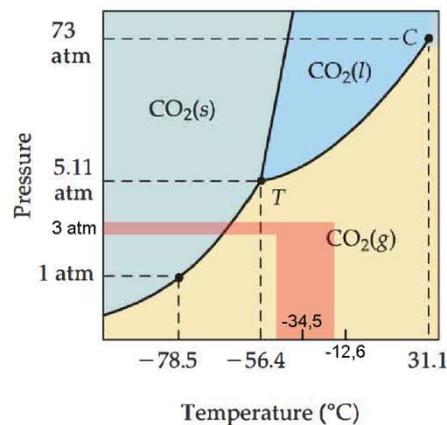


Figura 7: Diagrama de fases do dióxido de carbono (BROWN et al., 2009).

Depois de passar pela serpentina, o gás será encaminhado para um reservatório intermediário, que está presente no sistema com a finalidade de criar uma região de volume significativo para ser preenchida pelo gás, de forma que quando o pressostato acione o compressor, a pressão da linha não caia rapidamente, evitando assim sucessivos ativamentos e desativamentos do motor do compressor, nessa seção também será posicionado um manômetro para acompanhamento da pressão nessa parte do sistema e uma válvula de alívio, para garantir que a pressão nessa linha permaneça igual ou abaixo da máxima desejada.

Para o funcionamento adequado do compressor, é importante que em sua entrada tenha apenas dióxido de carbono no estado gasoso, podemos garantir isso observando o diagrama de fases, pela pressão máxima do sistema após a válvula reguladora, que será de 3 atm. Como a temperatura e pressão do ponto triplo do dióxido de carbono são -56,4°C e 5,11 atm, só pode existir dióxido de carbono líquido a pressões acima de 5,11 atm. Portanto, a pressões menores que 5 atm, dióxido de carbono líquido não pode existir em nenhuma temperatura (TIPLER et al., 2014).

Passando pelo compressor, o gás será pressurizado para outro reservatório, para posteriormente ser reutilizado, a válvula de retenção nesse local tem a função de impedir que o gás pressurizado percorra a linha de alta pressão no sentido contrário, nessa seção, por questões de segurança devido à alta pressão, também

será posicionada uma válvula de alívio. Na Figura 08 é mostrada uma ilustração do sistema projetado, e uma sugestão de montagem do equipamento no banho ultratermostático.

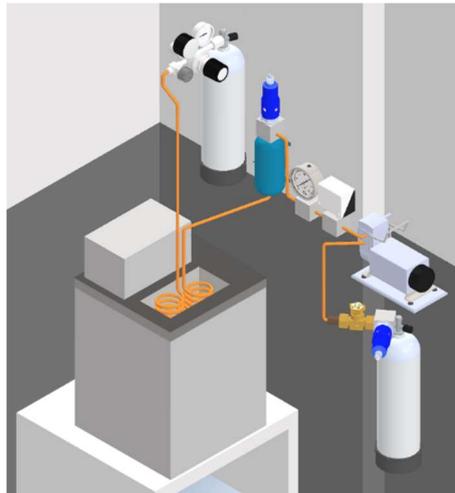


Figura 8: Ilustração do sistema projetado, e sugestão de montagem do equipamento no banho ultratermostático.

CONCLUSÕES

Este trabalho propôs-se a apresentar o projeto de um sistema de refrigeração não cíclico de baixo custo que utiliza dióxido de carbono como refrigerante, para ser usado como equipamento auxiliar num banho ultratermostático com o objetivo de atingir temperaturas negativas rapidamente no fluido utilizado no banho, no processo de calibração.

O princípio de funcionamento do sistema foi baseado nas características e no comportamento do dióxido de carbono em mudanças do estado líquido para o gasoso, também foram utilizadas literaturas das áreas de termodinâmica, fundamentos de física e química, que respaldaram o funcionamento do projeto de acordo com as leis da física e química relacionadas a processos de refrigeração.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se a construção do sistema para validação de funcionamento dele, uma vez que não foi possível simular seu funcionamento devido à ausência de literaturas que tratem sobre sistemas de refrigeração não cíclicos.

REFERÊNCIAS

BROWN, T. L.; LEMAY, H.; EUGENE, J. R.; BURSTEN, B. E.; MURPHY, C. J.; WOODWARD, P.. **Chemistry: The Central Science**. 11 ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.. **Termodinâmica**. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B.. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PEREIRA, G. S.. **Análise de sistemas de refrigeração a CO2 em supermercados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G.. **Física para cientistas e engenheiros**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.