



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM REFRIGERADOR E SEU IMPACTO AMBIENTAL

Gabriel Bessa Muniz; Luiz Gustavo de Moraes
Eugenio De Souza Morita

Universidade São Francisco
Gustavo.mooraes98@gmail.com
Gbbessa2016@gmail.com

Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco, Campus de Itatiba.

Aluno do Curso de Engenharia de Produção, Universidade São Francisco, Campus de Bragança Paulista.

Professor Orientador Eugenio, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Campus de Itatiba.

RESUMO. O objetivo deste trabalho é analisar o sistema termodinâmico do refrigerador e seu impacto ambiental. Ele apresenta uma revisão bibliográfica sobre os princípios termodinâmicos que envolvem os refrigeradores domésticos e como eles contribuem para o aumento do aquecimento do planeta Terra. O estudo também destaca a importância de se utilizar ciclos ideais de refrigeração, como o ciclo de Carnot reverso, como padrão de comparação para os ciclos de refrigeração reais. Além disso, o trabalho utiliza o *software* EES como uma ferramenta para calcular equações termodinâmicas relacionadas aos refrigeradores. Por fim, apresenta uma análise da dissipação de calor no meio ambiente gerada pelos condensadores dos refrigeradores. Em resumo, oferece-se uma visão abrangente sobre o sistema termodinâmico do refrigerador e seu impacto ambiental, fornecendo informações importantes para aqueles que desejam entender melhor esse tema.

ABSTRACT. This undergraduate thesis aims to analyze the thermodynamic system of the refrigerator and its environmental impact. It provides a literature review on the thermodynamic principles involving household refrigerators and how they contribute to the Earth's global warming. The study also emphasizes the importance of using ideal refrigeration cycles, such as the reverse Carnot cycle, as a standard for comparison with real refrigeration cycles. Additionally, the paper introduces the EES software as a useful tool for calculating thermodynamic equations related to refrigerators. Finally, it presents an analysis of heat dissipation in the environment generated by refrigerator condensers. In summary, this thesis offers a comprehensive view of the refrigerator's thermodynamic system and its environmental impact, providing important information for those who wish to better understand this topic and opening the door to future studies on how technology related to gases and heat exchanger devices can evolve in terms of efficiency and harm.

Palavras-chave: Refrigerador, termodinâmica, dissipação, eficiência, impactos ambientais.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INTRODUÇÃO

Os refrigeradores, desde sua criação, tornaram-se indispensáveis no dia a dia da sociedade para garantir a conservação dos alimentos e produtos perecíveis. Embora seja um dispositivo essencial, ele também realiza uma dissipação de energia no meio ambiente, contribuindo com aumento do aquecimento do planeta terra. Diante disso é importante ter conhecimento dos princípios termodinâmicos que envolvem os refrigeradores domésticos.

A transferência de energia em forma de calor é estudada e existe a necessidade de entender o quão nocivo é a dissipação do calor ao meio ambiente e encontrar formas de reduzir os impactos negativos.

No que envolve este estudo, a ferramenta para análise EES (*Engineering Equation Solver*), que é um *software* que possibilita calcular equações termodinâmicas é de grande importância para submeter informações e dados a respeito do aumento da transferência de calor causado pelos refrigeradores. Tendo como base de estudo o crescimento histórico da dissipação de calor no meio ambiente, gerado através dos condensadores, desde o surgimento do primeiro refrigerador até os mais desenvolvidos em termo de tecnologia.

De início, será apresentado a revisão dos conceitos básicos da termodinâmica e sua relação com os refrigeradores para obter base teórica, facilitando estudos posteriores em relação a diminuição dos impactos ambientais e aumento de eficiência dos gases presentes nos refrigeradores domésticos. Em seguida, a análise histórica sobre a evolução dos equipamentos, destacando as mudanças no sistema de refrigeração.

Conceitos básicos da termodinâmica

No que rege o desenvolvimento e construção dos refrigeradores, a termodinâmica tem um papel fundamental no funcionamento e entendimento do equipamento, visto que esse campo da física contribui nas análises de troca de calor que acontecem no sistema de refrigeração.

Os princípios termodinâmicos presentes nos refrigeradores permitem a transferência de calor, ou seja, os equipamentos dissipam o calor do espaço interno refrigerado, para o externo, meio ambiente e vizinhança.

Os refrigeradores trabalham e desempenham o resfriamento a partir de quatro processos, sendo eles: compressão, condensação, expansão e evaporação de gases onde esse conjunto de processos é responsável por garantir com que ocorra a troca de calor no sistema do equipamento, e quando acionados e interligados, permitem que o calor seja removido do espaço interno e de imediato extraído para o ambiente externo. Esse processo permite que a temperatura interna fique em níveis mais baixos de temperatura.

De acordo com Cengel e Boles (2013), a eficiência de um refrigerador é definida pelo COP – Coeficiente de desempenho e performance. O COP determina a quantidade de energia que será extraída do ambiente interno e o trabalho exercido no ciclo de refrigeração. Quanto maior for esse coeficiente, maior será a eficiência na remoção de calor do ambiente interno, e maior será o seu consumo de energia.

História do refrigerador

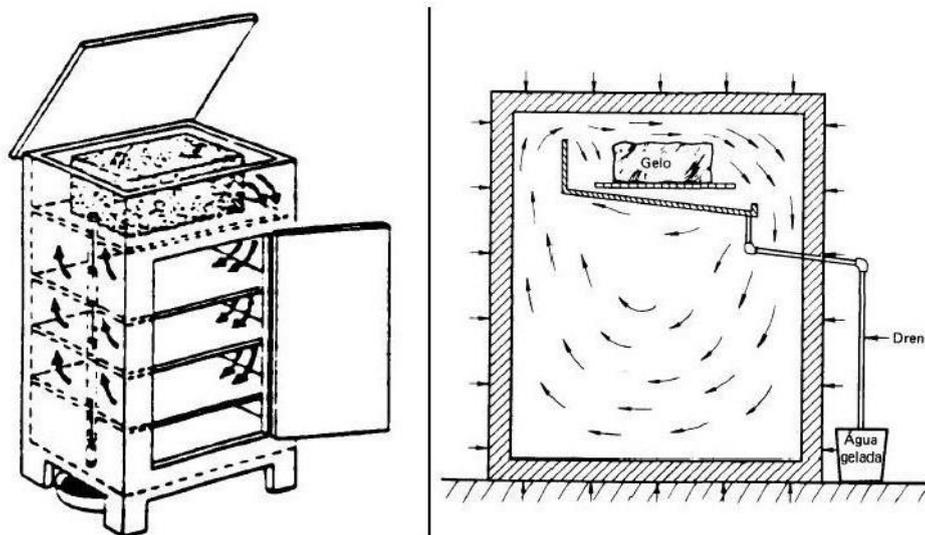
De acordo com o site Castellmaq (2013) antes da criação dos refrigeradores, os armazenamentos e resfriamentos eram desafiadores, pois não havia nenhum equipamento com o papel de manter a baixa temperatura dos alimentos e métodos utilizados pelas pessoas eram



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

de armazenar os alimentos perecíveis em locais frescos e arejados juntamente à neve (Figura 01).

Figura 01 – Primeiro método utilizado para a conservação de alimentos.



Fonte: <https://semearonline.com/um-breve-resumo-da-historia-da-refrigeracao>

Com o passar do tempo, na busca de encontrar formas mais eficientes na preservação dos alimentos, foram criados sistemas de refrigeração através do princípio de compressão de vapor, entre os séculos XIX e XX. Os primeiros refrigeradores constituíam em uma máquina de vapor que usava a compressão e expansão internamente ao sistema. Adicionava-se um líquido e na mudança do seu estado, de líquido para o gasoso. Sua evaporação garante o resfriamento do sistema. Mesmo sendo um avanço na época, o refrigerador apresentava ineficiência energética e se tornou um causador de impactos ambientais, devido ao tipo de fluido refrigerante utilizado. (CASTELLMAQ, JANEIRO 2023).

A ineficiência energética presente nesse refrigerador era responsável pelo extremo consumo de energia para funcionar. No âmbito da degradação ambiental, isso se tornava um fator exponencial nos impactos, pois essas energias, na grande maioria, eram extraídas de fontes não renováveis. (CASTELLMAQ, JANEIRO 2023).

As primeiras geladeiras surgiram em meados de 1850, mas o seu uso só foi difundido no século 20. Surgiram para solucionar os problemas que envolviam o armazenamento de alimentos perecíveis. Sua estrutura externa era feita de madeira, muito diferente dos refrigeradores que estão presentes nas casas das pessoas atualmente, o método de resfriamento era feito por cubos de gelo que se formavam pela água coletada no ambiente externo.

Em 1834 surgia o primeiro refrigerador que utilizava o vapor ao invés do líquido no resfriamento, mas só em 1857 foi criado um sistema de refrigeração desenvolvido por James Harrison com o objetivo de conservar cervejas. O mesmo conceito foi utilizado no armazenamento e transportes de carnes, no entanto, o uso era de exclusividade industrial. (CASTELLMAQ, JANEIRO 2023).

Os refrigeradores domésticos só vieram ao mundo em 1913, nomeado como Domerle. O primeiro refrigerador foi construído e comercializado nos Estados Unidos, seu nome é oriundo de uma sigla para: *Domestic Electric Refrigeration*, nome que foi dado pelo seu inventor, W. Wolf Jr. (CASTELLMAQ, JANEIRO 2023).

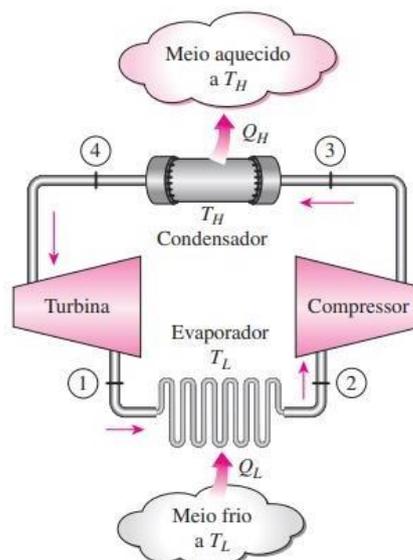
O refrigerador foi pensado para não ocupar muito espaço nas residências, por este motivo seu tamanho era pequeno. Outro ponto de atenção no desenvolvimento foi em relação à facilidade de conectar em qualquer tomada. O maior desafio naquela época era o consumo intenso de energia. (CASTELMAQ, JANEIRO 2023).

Sistemas de refrigeração

Antes de citar os principais componentes do refrigerador, é preciso entender sobre o ciclo de Carnot, que consiste em dois processos, isotérmicos e isentrópicos. O processo isotérmico consiste na constância da temperatura e isentrópico tem como característica a constância da entropia. Trata-se de um ciclo reversível, composto por 4 processos. O sentido do ciclo altera as direções nas trocas de calor e trabalho (CENGEL e BOLES, 2013).

O esquema da figura 02 representa o ciclo de Carnot reverso e como uma substância refrigerante atua nesse processo. O Ciclo serve como padrão de comparação de ciclos ideais para os ciclos de refrigeração reais (CENGEL e BOLES 2013).

Figura 02– Ciclo de Carnot reverso



Fonte: Termodinâmica 7ª edição

Embora o ciclo de Carnot reverso sirva como comparação de um modelo ideal, não se pode levar em consideração esse modelo para um ciclo real de refrigeração, pois no ciclo de Carnot reverso encontra-se a presença de uma turbina, ocorrendo a conversão de energia térmica do vapor em energia mecânica usada para realizar trabalho (CENGEL e BOLES, 2013).

A princípio, o sistema de refrigeração real tem como objetivo a remoção de calor de um espaço refrigerado sem a realização de trabalho mecânico. Nos sistemas de refrigeração reais o principal componente que desempenha o papel similar ao da turbina no ciclo de Carnot reverso é o compressor. Ele é responsável pelo aumento de pressão do refrigerante, consequentemente elevando a temperatura do fluido e preparando-o para a próxima etapa que é a liberação de calor no condensador. O compressor trabalha de forma oposta ao da turbina, por comprimir o refrigerante ao invés de expandi-lo.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No ciclo de refrigeração real os compressores são de grande importância para o processo, pois permite alcançar o resfriamento desejado. No sistema de refrigeração real de um refrigerador doméstico, faz-se necessário o uso de uma válvula de expansão para que se tenha o controle do ciclo de refrigeração. Esse componente permite a evaporação do refrigerante a uma baixa pressão no evaporador, permitindo o resfriamento. A imagem 04 representa o ciclo real de um refrigerador

O processo de resfriamento acontece quando um determinado gás em alta pressão passa pelo condensador em um circuito fechado, ou seja, o gás circula sem perda, a menos que ocorra um vazamento no sistema. Nos refrigeradores mais antigos, utilizava-se o gás freon R12. Suas características eram adequadas para o processo de refrigeração. O elevado calor de condensação e temperatura baixa de ebulição justificavam o seu uso e por ser também não inflamáveis

As principais funções de um refrigerador doméstico estão diretamente ligadas a um grupo de componentes e elementos que atuam nessa função, sendo eles: gás, compressor, tubo de descarga, espira do condensador, condensador interno, tubo de secagem, secador, tubo capilar, evaporador, tubo de sucção e acumulador. A Tabela 01 exhibe os componentes presentes no refrigerador (CENGEL e BOLES, 2013).

Tabela 1 - Componentes do refrigerador

Componente	Função
Gás	Refrigerante que circula pelo ciclo de refrigeração
Compressor	Comprime o gás refrigerante
Tubo de Descarga	Conduz o gás do compressor para o condensador
Espira do Condensador	Tubo serpentina onde o gás se condensa
Condensador Interno	Libera calor do refrigerante para o ambiente
Tubo de Secagem	Remove umidade do sistema
Secador	Filtra partículas e umidade do refrigerante
Tubo Capilar	Restringe o fluxo do refrigerante para o evaporador
Evaporador	Absorve calor do interior do refrigerador
Tubo de Sucção	Conduz o refrigerante do evaporador para o compressor
Acumulador	Evita que o refrigerante líquido entre no compressor

Fonte: Próprio autor

O grupo de componentes que atuam na troca de calor está diretamente ligado aos impactos ambientais causados no uso do refrigerador. O gás ou fluido refrigerante tem a função de fazer as trocas térmicas no sistema de refrigeração. Suas propriedades permitem a transformação do composto físico de líquido para gás e vice-versa. Essa reação faz o controle da temperatura no ambiente interno do equipamento. (PANASONIC, ARQUIVO INTERNO, 2023)

Conforme Staak (2019), engenheiro de aplicação na *Nidec Global Appliance* o gás mais comum é o isobutano (R-600A).

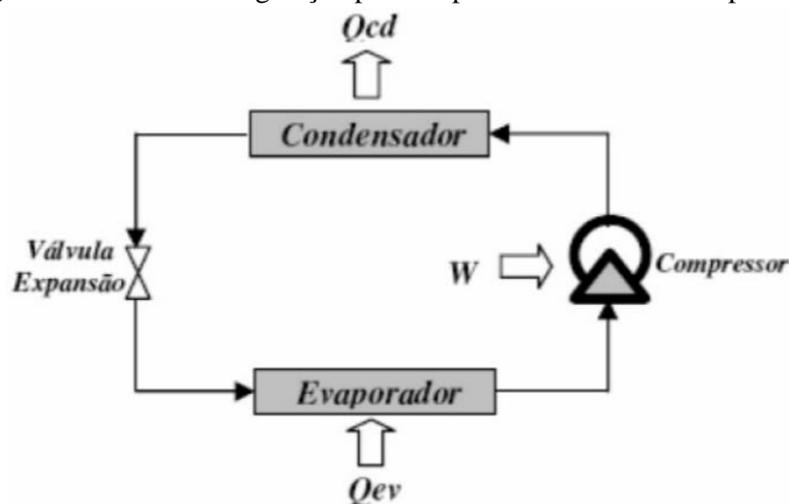
Além da redução na carga de gás, é importante salientar que o ciclo de refrigeração é mais eficiente quando se utiliza R600a, em comparação ao R134a. Isso significa que o sistema de refrigeração terá menor consumo de energia ao utilizar um compressor projetado para R600a, o que se reflete diretamente na conta de luz. (FELIPE AURELIO STAAK, 2019).

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Diante da evolução dos refrigeradores, a redução do consumo de energia foi um fator amplamente estudado, pois essa redução permitiu uma economia no consumo de energia, trazendo benefícios em relação aos gastos financeiros e redução dos recursos naturais. Com o avanço da tecnologia, é comum encontrar compressores com o sistema inverter, sistema que permite a reversão do sentido de escoamento do fluido refrigerante. Dependendo da necessidade essa característica traz benefícios tanto para a redução do consumo de energia quanto a redução dos impactos ambientais causados pela dissipação de calor. O condensador tem um papel fundamental no funcionamento do refrigerador, no entanto é através dele que o calor é transferido ao meio ambiente. Ele faz com que o fluido refrigerante seja condensado, ou seja, o fluido passa de vapor para líquido absorvendo o calor de todo o sistema, incluindo o calor gerado pelo compressor. Por fim, dissipando este calor para o ambiente externo (PANASONIC, ARQUIVO INTERNO, 2023)

Um sistema típico de refrigeração, pode ser observado na figura 03.

Figura 03 - Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor



Fonte: Guimarães (2012, p.123)

Impactos ambientais dos refrigeradores

Com o aumento do uso dos refrigeradores, estudos foram iniciados com o intuito de pesquisar os malefícios destes gases ao meio ambiente. Os resultados foram muito negativos, sendo que cientistas confirmaram a contribuição do elemento na destruição da camada de ozônio. Essa destruição acontecia à medida que o gás se adentrava na camada de ozônio, intensificando o processo através da absorção da radiação ultravioleta. Para cada partícula liberada de um átomo de cloro, era destruída uma grande quantidade de moléculas de O³ (Gás presente na camada de ozônio) (EMBRACO, 2019).

A radiação causada pelo gás é devastadora, danificando a camada de ozônio e superaquecendo o planeta. Essa radiação é responsável por causar câncer de pele, atacar o sistema imunológico, deixando o ser humano propenso a doenças. Animais e principalmente o meio ambiente também sofrem com o seu uso (EMBRACO, 2019).

Após essas conclusões, criou-se movimentos para combater os desastres ambientais, e foi a partir de um protocolo criado em 1987 e chamado de Protocolo de Montreal que reuniu diversos países onde o objetivo foi diminuir o uso de substâncias destruidoras da camada de ozônio. O protocolo impulsionou a substituição do Freon 12 e a opção da troca foi o HFC –



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

R134a que apresenta características semelhantes no processo de resfriamento e vantagens na preservação do meio ambiente. (CETESP, 2020).

Esses gases são classificados determinando o grau de destruição na camada de ozônio, chamados por ODP (*Ozone Depletion Potential*) que é uma medida que avalia o impacto de uma substância na camada de ozônio, substâncias como os clorofluorocarbonetos (CFCs) que eram comumente usados em refrigeradores e GWP (*Global Warming Potential*) que é uma medida que avalia o impacto de uma substância no aquecimento global ao longo do tempo, considerando seu efeito estufa. Ele é expresso em relação ao dióxido de carbono (CO_2), que é usado como referência com GWP. Substâncias como metano, óxido nitroso e certos gases fluorados têm elevado GWP. Estes gases contribuem para o aquecimento global, retendo o calor na atmosfera e contribuindo para as mudanças climáticas. A seção de resultados e discussão presente neste trabalho, abordará a comparação dos gases: R-12, R-22, R134a, R-190, R-600 e R-600a, apresentando o ODP e GWP de cada um, além de apresentar o tempo de vida (anos) em que o gás permanece na atmosfera (COMPENSA, 2023).

METODOLOGIA

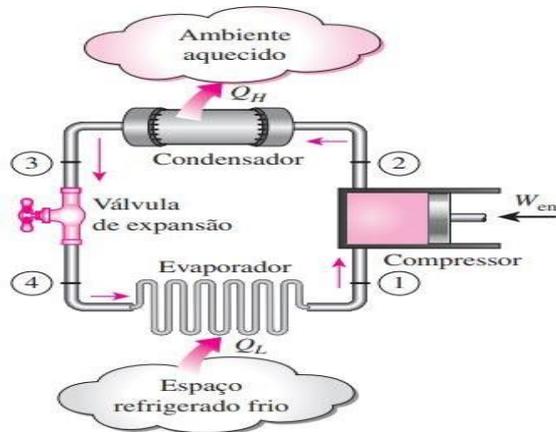
Para análise e entendimento, foi submetido cálculos utilizando o EES, com o objetivo de representar o gás refrigerante R-134a como fluido de trabalho que opera em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Determinando a taxa de remoção de calor do ambiente interno refrigerado e a potência fornecida pelo compressor, ilustrando também a taxa de remoção de calor para o ambiente e o coeficiente de eficiência “COP” de um refrigerador ou coeficiente de desempenho que é uma medida usada para indicar a eficiência de um sistema. É a relação entre a energia térmica produzida pelo sistema e a energia elétrica consumida. O COP é utilizado especificamente para avaliar o desempenho do sistema quando este está em modo de aquecimento.

Esta seção apresenta os equacionamentos para cálculo do coeficiente de performance, energias por unidade de tempo ou calor no condensador, evaporador e trabalho consumido pelo compressor.

A figura 04 ilustra os dispositivos essenciais de refrigeração e mostra a troca de calor presente neste processo, os pontos 01, 02, 03 e 04 representam o trabalho exercido em cada componente, sendo o ponto 01 o compressor retirando o fluido no estado gasoso do evaporador após o trabalho, fornece uma elevada pressão ao sistema em direção a fase de condensação (ponto 02), que tem a função de rejeitar o calor do fluido e dissipar essa energia para o ambiente. No ponto 02 - 03 o condensador atua sobre o refrigerante, ele sofre mudança de estado físico, passando de vapor saturado para líquido saturado. O ponto 03 – 04 tem-se a válvula de expansão que serve para expandir os gases.

Por fim o ponto 04 – 01 está presente o evaporador que tem a função de fazer a evaporação das partículas de líquido para vapor saturado (fluido). E assim o ciclo se repete garantindo a refrigeração.

Figura 04: Sistema de refrigeração



Fonte: Termodinâmica 7ª edição

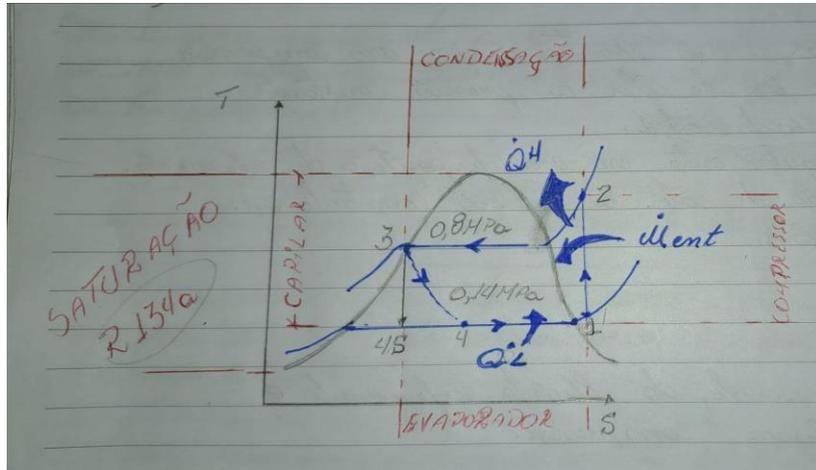
Através da figura 05 é possível identificar os pontos considerados nas fórmulas de trabalho utilizadas no EES. Ilustra a correlação de saturação do fluido R-134a em relação a temperatura por entropia, onde a temperatura é uma medida de energia cinética média das partículas em um sistema e a entropia é uma medida da quantidade de desordem ou aleatoriedade em um sistema. A segunda lei da termodinâmica descreve que a entropia de um sistema fechado não diminui, ou seja, o sistema tende a seguir para um estado de maior desordem com o passar do tempo. A temperatura está relacionada com a entropia, pois as partículas recebem mais energia cinética à medida que a temperatura aumenta, este efeito resulta no aumento da desordem.

Um sistema de refrigeração pode ser observado na figura 05. Do ponto 01 para o ponto 02, encontra-se o compressor que é adicionado trabalho mecânico para a compressão do fluido R-134a, resultando-o em líquido comprimido. Do ponto 02 – 03 se encontra o condensador que permite a dissipação do calor para o ambiente diminuindo a entropia no sistema elevando sua temperatura. Neste ponto é possível observar através do diagrama (Figura 05) que o líquido se encontra em seu ponto máximo de compressão, antes de ser condensado. Logo então, inicia-se a condensação rumo ao ponto 03. No ponto 03 – 04 encontra-se o dispositivo responsável por regular o fluxo refrigerante no sistema, chamado tubo capilar posicionado entre o condensador e evaporador, obtendo a diferença de pressão ao restringir o fluxo de refrigerante, o tubo capilar aumenta a sua entropia no sistema ao direcionar o fluxo do ponto 03 ao ponto 04, em seguida tem-se o ponto de evaporação do líquido diminuindo a pressão do fluido e direcionando o mesmo até o evaporador, tendo como resultado vapor saturado à medida que o ar interno do refrigerador perde calor para o refrigerante em estado de vapor no evaporador. O refrigerante flui na direção do ponto 04 – 01 é transportado por um tubo de sucção sendo aspirado pelo compressor, onde será pressurizado criando de novo uma reversibilidade no sistema.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 05: Diagrama de temperatura (T – S) ideal de refrigeração por compressão de vapor ilustrado no cálculo do EES (Fig.06)



Fonte: Próprio autor

A Equação 01 apresenta o Calor rejeitado do condensador que é calculado através do fluxo de massa "m_dot" (kg/s) do fluido refrigerante expelido para o meio ambiente, vezes a entalpia no ponto 2 (imagem 05) kJ/kg) (P=P₂;s=s₂) "h₂" (kJ/kg) menos a entalpia no ponto 3 (imagem 05) (kJ/kg) (P=P₃;s=s₃) "h₃", onde o seu resultado final será apresentado por (kJ/s).

$$Q_{\text{dot_cond}} = m_{\text{dot}} \times (h_2 - h_3) \text{ Eq.01}$$

A equação 02 apresenta a quantidade de calor absorvida pelo evaporador é igual ao fluxo de massa "m_dot" (kg/s) vezes a entalpia no ponto 1 (kJ/kg) (P=P₁; x=x₁) "h₁" menos a entalpia do ponto 4 (kJ/kg) (P=P₄;s=s₄) "h₄" onde o seu resultado final será apresentado por (kJ/s).

$$Q_{\text{dot_evap}} = m_{\text{dot}} \times (h_1 - h_4) \text{ Eq.02}$$

A Equação 03 pode ser calculada através do trabalho "W" (kJ/s), igual ao fluxo de massa "m_dot" (kg/s) vezes a entalpia no ponto 2 (imagem 05) (kJ/kg) (P=P₂;s=s₂) "h₂" menos a entalpia no ponto 1 (kJ/kg) (P=P₁;x=x₁).

$$W_{\text{dot_comp}} = m_{\text{dot}} \times (h_2 - h_1). \text{ Eq.03}$$

Para cálculo do COP foi utilizado a Equação 04:

$$\text{COP}_{\text{real}} = \frac{Q_{\text{dot_evap}}}{W_{\text{dot_comp}}} \text{ Eq.04}$$

O coeficiente de performance real de um refrigerador é igual ao calor rejeitado pelo evaporador dividido pelo trabalho do compressor (Eq.04) "W" (kJ/s) que resulta em unidades de energia térmica do espaço refrigerado para cada unidade de energia consumida.

Cálculos do EES

O EES foi a Ferramenta utilizada para a resolução das equações presentes neste trabalho. O *software* é dedicado para análises termodinâmicas e sistemas de energia. Ele contempla uma gama de informações como a modelagem termodinâmica que permite cálculos de ciclo de refrigeração, transferência de calor e as propriedades termodinâmicas de substâncias. Além de permitir gerar gráficos através das equações. Os cálculos são feitos de maneira automática. Ao definir as equações o EES encontra a necessidade sem intervenção manual.

Conforme a Figura 06 o *software* EES serviu como ferramenta para cálculos do coeficiente de performance (COP) (Eq.04), com ele é possível ser calculado o COP real de um refrigerador, que opera em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, entre 0,14 MPa e 0,8 MPa, determinando a taxa de remoção de calor absorvido pelo evaporador (Eq.02) do espaço refrigerado, e através do calor do condensador (Eq.01), foi possível calcular também a taxa de rejeição do calor para o ambiente, e a potência exercida pelo compressor.

É possível calcular as mudanças na entalpia do fluido refrigerante à medida que o fluxo passa pelo ciclo de refrigeração. (CENGEL e BOLES, 2013).

Figura 06: Análise ESS

```

P1 = 0,14 [MPa]
P2 = 0,8 [MPa]
s2 = s1
P3 = P2
ṁ = 0,05 [kg/s]
P4 = P1

Ponto 1 - Entrada do compressor
x1 = 1 Título do Vapor saturado
h1 = h ( R134a ; P = P1 ; x = x1 ) Entalpia
s1 = s ( R134a ; P = P1 ; x = x1 ) Entropia

Ponto 2 - Entrada no condensador
h2 = h ( R134a ; P = P2 ; s = s2 ) Entalpia

Ponto 3 - Entrada do capilar
x3 = 0 Título do Líquido saturado
h3 = h ( R134a ; P = P3 ; x = x3 ) Entalpia

Ponto 4 - Entrada do Evaporador
h4 = h3 Dispositivo Isoentálpico

(a) taxa de remoção de calor do espaço refrigerado e a entrada de potência fornecida no compressor são definidas por suas definições
Qevap = ṁ · ( h1 - h4 ) Calor absorvido pelo evaporador
Wcomp = ṁ · ( h2 - h1 ) Trabalho fornecido para o compressor

(b) A taxa de rejeição de calor do refrigerante para o ambiente é
Qccnd = ṁ · ( h2 - h3 ) Calor rejeitado do condensador

(c) O coeficiente de performance do refrigerador é
COPreal =  $\frac{Q_{evap}}{W_{comp}}$  Coeficiente de Performance
    
```

Fonte: Próprio autor



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Nocividade do refrigerante ao Meio Ambiente

Embora o refrigerador seja projetado para ser hermeticamente fechado, é comum que pequenos vazamentos ocorram ao longo do tempo, devido a desgastes, corrosão e danos. Na maioria das vezes esses desgastes são imperceptíveis, mas quando somados se tornam um causador de danos ao meio ambiente, e por esse motivo se torna tão importante a escolha correta dos gases na fabricação dos refrigeradores. Essa é uma estimativa do quão nocivo esses gases se tornam ao longo do tempo: De acordo com o site Embraco (2019) pode-se considerar uma possível vazão de um gás, que escocce aproximadamente 0,03 kg/s e um refrigerador que contém uma quantidade de fluido refrigerante armazenada de 60g. O gás utilizado neste refrigerador é R-134a que sua nocividade pode ser considerada ao meio ambiente, após 7,8 kg/ano, conforme estimativa 01.

Estimativa 01: Calculando essa estimativa tem-se: Para determinar quanto tempo levaria para que a quantidade armazenada de R-134^a (60g) seja liberada a uma taxa de 0,03 kg/s, assim, até 7,8 kg conforme a equação 05:

Equação 05:

Tempo(s) = Quantidade total(kg)

Taxa de vazão(kg/s)

Neste caso, a quantidade total é de 7,8kg e a taxa de vazão é de 0,03kg/s.

Tempo(s) = 7,8 kg

0,03kg/s

Tempo(s) = 260 segundos

Agora, para converter esse tempo de segundos para anos, será necessário dividir pelo número de segundos em um ano (365 dias x 24 = 8760 horas x 60 segundos = 31536000 segundos):

Tempo (anos) = 260segundos

31536000 segundos/ano

Tempo (anos) \approx 0,00000824anos

Agressividade do condensador ao efeito estufa

Sabe-se que o condensador é responsável por rejeitar calor ao meio ambiente. Portanto calcula-se levando em consideração que o calor do espaço refrigerado é igual a 8,99 kJ/s (Figura 07).

Considerando a população mundial que hoje consiste em 8,04 bilhões de pessoas, e a cada 04 pessoas tem-se 01 refrigerador, pode ser multiplicada a quantidade de calor rejeitado



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

do condensador pela estimativa do valor de refrigeradores presente no mundo. (WORLDOMETER, 2023).

Estimativa 02: Calculando essa estimativa tem-se: O calor é rejeitado pelo condensador do refrigerador considerando a proporção de 4 pessoas a cada 01 refrigerador existente no mundo, conforme a equação 06:

$$\frac{\text{Quantidade de pessoas no mundo}}{\text{Quantidade de pessoas por refrigerador 4}} = \frac{8.400.000.000}{4} = 2.100.000.000 \text{ Eq.06}$$

Estimativa de quantidade de refrigerador no mundo = 2.100.000.000 unidades

Calor rejeitado pelo condensador Q_{cond} (Figura 07) = 8,99 kJ/s

Calor rejeitado no mundo pelos refrigeradores: $2.100.000.000 \times 8,99 = 18.879.000.000 \text{ J/s}$

Estima-se uma quantidade de calor rejeitada ao mundo pelos refrigeradores seja de 18.88 GW

Estima-se uma quantidade de calor rejeitada ao mundo pelos refrigeradores seja de 18.88 GW. Envolvendo comparação de grandeza deste valor, caso seja conhecida a eficiência de um veículo elétrico em termos de quilômetros por kWh. Conforme a equação 07 pode-se calcular a distância que 18.88 gigawatts-hora (GW-h) de energia poderiam percorrer.

$$\text{Distância} = \frac{\text{Energia em GWh}}{\text{Eficiência do veículo em km/kWh}} \text{ Eq.07}$$

Conforme o site (NEO CHARGE, 2021) a eficiência energética de um carro elétrico é de 8 km / kWh. Portanto:

$$\text{Distância} = \frac{18.88 \text{ gigawatts-hora (GWh)}}{8 \text{ km / kWh}}$$

Distância = 2,36 bilhões de km

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Redução dos impactos ambientais

Redução de recursos naturais dos refrigeradores podem acontecer com a substituição dos refrigerantes prejudiciais ao meio ambiente, como os clorofluorocarbonos (CFCs) e hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), por alternativas que apresentam uma maior segurança e um menor impacto ambiental, podendo ser os hidrofluorocarbonetos (HFCs). Os hidrofluorocarbonos são considerados refrigerantes naturais que apresentam um GWP menor.

Através da tabela 02 é possível comparar os fluidos e identificar aqueles que podem ser alternativos para a redução dos impactos ambientais, e de acordo com os resultados a melhor opção é o R-600a. A escolha deste fluido refrigerante contribui com os objetivos de



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

desenvolvimento sustentável, incluindo a redução dos gases geradores de efeito estufa, pois ele tem ODP zero e os menores índices de GWP, seu tempo de vida na atmosfera fica abaixo de um ano, e quando se compara o seu COP, tem-se um baixo consumo energético sem impactar o desempenho do equipamento.

Estimativa 01

Estima-se que levaria aproximadamente 0,00000824 anos, ou cerca de 31,5 segundos para liberar 7,8 kg de R134a, supondo que a taxa de vazão seja constante. Isso é apenas uma estimativa aproximada, e a realidade pode ser influenciada por vários fatores, como variações na taxa de vazão e na eficiência da detecção e correção de vazamentos. A estimativa propôs um valor de 0,03 kg/s diante de uma vazão de 0,05 kg/s utilizada no cálculo presente na figura 06. O valor de 0,03 kg/s foi idealizado para ilustrar um possível vazamento de gás no sistema refrigerado, adotando a redução em seu valor por imaginar-se uma possível perda de carga de sua vazão original ao longo do sistema.

Estimativa 02

Com uma eficiência de 8 km/kWh, 18.88 GW-h de energia poderiam percorrer aproximadamente 2.36 bilhões de km. Ou seja, a quantidade de energia dissipada no mundo pelos refrigeradores é capaz de gerar uma autonomia a um carro elétrico de 2,36 bilhões de km, que é aproximadamente 59 voltas na terra.

Composição dos fluidos

Através da tabela 02 é possível comparar os fluidos e identificar aqueles que podem ser alternativos para a redução dos impactos ambientais, diferentemente do R134a que se destaca pelo seu COP. De acordo com os resultados temos como melhor opção o R-600a que se destaca pelos seus índices de ODP e GWP (Tabela 02).

Tabela 02 - Comparação entre fluidos

REFRIGERANTE	ODP	GWP	TEMP. DE VIDA NA ATMOSFERA (ANOS)	COP
R-12	0,82	10600	100	3,60
R-22	0,034	1900	11,8	3,97
R-134a	0	1600	13,6	3,97
R-290	0	< 3	< 1	3,55
R-600	0	< 3	< 1	3,27
R-600a	0	< 3	< 1	3,11

Fonte: Próprio autor



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

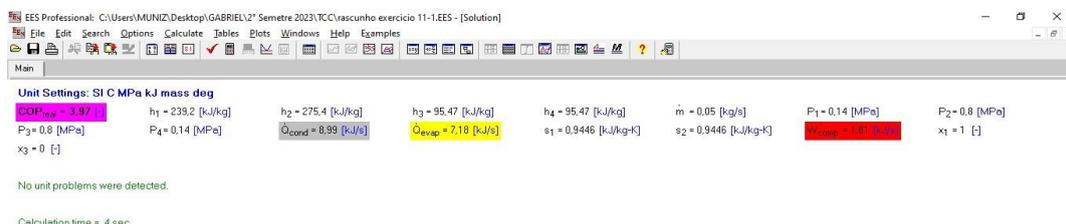
A escolha do R-600a contribui com os objetivos de desenvolvimento sustentável, incluindo a redução dos gases geradores de efeito estufa, pois ele tem ODP zero e os menores índices de GWP, seu tempo de vida na atmosfera fica abaixo de um ano.

Resultados COP obtidos no EES

Para conhecimento foi calculado um fluido refrigerante com a melhor performance. Resulta-se que de acordo com a figura 07, cálculo do COP para o fluido R-134a é igual a 3,97 isso quer dizer que quanto maior o COP, mais eficiente é o refrigerador, sendo assim. O COP foi definido como a relação entre a capacidade de refrigeração do refrigerador e a energia consumida para produzir essa capacidade.

Entretanto o COP mostrará a quantidade de calor rejeitada para o meio ambiente através do resultado “Q_cond” no exemplo deste estudo (Fig.07), que é igual a 8,99 kJ/s (Fig.07) que é o resultado da vazão mássica do sistema multiplicado pela diferença de entalpia do ponto 2, para o ponto 3 (fig.05). Sendo possível gerar a informação de calor absorvido pelo evaporador, através da sigla “Q_evap.” (Fig.07), que é igual a 7,1899 kJ/s. Que é o resultado da vazão mássica do sistema multiplicado pela diferença de entalpia do ponto 1, para o ponto 4 (fig.05), que também é entrada da potência fornecido pelo compressor “w_comp”, resultando em 8,81 kJ/s que é o resultado da vazão mássica do sistema multiplicado pela diferença de entalpia do ponto 2, para o ponto 1 (fig.05).

Figura 07: cálculo EES

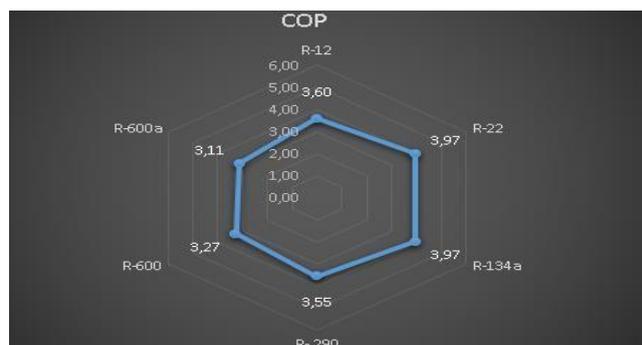


Fonte: Próprio autor

A figura 08 apresenta uma análise comparativa dos Coeficientes de Performance (COP) de diversos gases refrigerantes, incluindo R-12, R-22, R-134a, R-290, R-600 e R-600a. O COP é um indicador crucial de eficiência térmica em sistemas de refrigeração.

]

Figura 08: Gráfico do COP



Fonte: Próprio autor



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCLUSÃO

A análise termodinâmica do refrigerador e seu impacto ambiental apresentada neste trabalho de conclusão de curso, permite concluir que o funcionamento dos refrigeradores é regido por princípios termodinâmicos complexos que envolvem a transferência de calor e a compressão de gases. Esses princípios têm um impacto significativo no meio ambiente, uma vez que os refrigeradores são responsáveis por uma parcela considerável do consumo de energia elétrica e pela emissão de gases de efeito estufa. Para minimizar esses impactos, é fundamental buscar soluções mais eficientes e sustentáveis para o funcionamento dos refrigeradores. A utilização de ciclos ideais de refrigeração, como o ciclo de *Carnot* reverso, pode ser uma alternativa viável para reduzir o consumo de energia e minimizar os impactos ambientais. Além disso, é importante considerar a dissipação de calor gerada pelos condensadores dos refrigeradores e buscar formas de reduzir esse impacto. O uso de tecnologias mais avançadas e eficientes, aliado a uma conscientização por parte dos consumidores, pode contribuir para um futuro mais sustentável e responsável em relação ao uso de refrigeradores. É importante que os consumidores estejam cientes dos impactos ambientais dos refrigeradores e busquem adquirir aparelhos mais eficientes e sustentáveis, além de adotar práticas que contribuam para a redução do consumo de energia elétrica. Por fim, é fundamental que as empresas que produzem refrigeradores invistam em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, buscando reduzir o impacto ambiental desses aparelhos. A análise termodinâmica do refrigerador e seu impacto ambiental apresentada neste arquivo pode ser um ponto de partida para futuros estudos e pesquisas nessa área, contribuindo para um futuro mais sustentável e responsável em relação ao uso de refrigeradores.

REFERÊNCIAS

BRUNO AMARAL MATOS, 2019. **Trabalho de conclusão de curso**. Disponível em: file:///C:/Users/55119/Documents/TCC/BRUNO_AMARAL_MATOS_TccFinalizado.pdf.

CASTELMAQ, 2023. **História da refrigeração**. Disponível em: <https://blog.castellmaq.com.br/historia-da-refrigeracao-quem-inventou-a-geladeira/>

CETESP, 2020. **O Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/materiais-de-apoio/fundamentos-da-preservacao/o-protocolo-de-montreal-sobre-substancias-que-destroem-a-camada-de-ozonio/>

COMPENSA, 2023. **O que são GWP, CO₂ equivalente e gases de efeito estufa**. Disponível em: <https://compensa.eco/blog/gestao-emissoes/o-que-sao-gwp-co2-equivalente-e-gases-de-efeito-estufa/#:~:text=Como%20calcular%20o%20CO2%20equivalente,25%20%3D%20250%20to neladas%20de%20CO2e>

EMBRACO, 2019. **Vantagens e boas práticas no uso do refrigerante natural isobutano**. Disponível em: <https://www.embraco.com/blog/vantagens-e-boas-praticas-no-uso-do-refrigerante-natural->

