

AVALIAÇÃO DE FATORES QUE AFETAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO¹

Romeiro José Belini

RESUMO

A eficiência energética é um assunto frequente nas indústrias preocupadas com a redução dos custos de produção, política de sustentabilidade e conscientização ambiental. As indústrias que utilizam refrigeração em seu processo ou em parte dele também se preocupam com a eficiência energética, uma vez que o processo de resfriamento na maior parte se resume na troca/transformação de energia. O objetivo deste estudo foi avaliar os fatores que afetam a eficiência energética em um sistema de refrigeração. A metodologia aplicada foi baseada em conceitos de refrigeração amplamente ilustrados em literatura e para atingir o objetivo, foi utilizada uma ferramenta de selecionamento de compressor de parafusos de um grande fabricante. O presente estudo inclui os efeitos da queda de pressão na sucção e descarga, superaquecimento útil e não útil, subresfriamento, temperatura mais baixa no evaporador e condensador.

Palavras-chaves: Energia. Queda de Pressão. Superaquecimento. Subresfriamento. Compressor.

ABSTRACT

Energy efficiency is a frequent issue in industries concerned with reducing production costs, sustainability policy and environmental awareness. Industries that use refrigeration in or part of their process are also concerned with energy efficiency, as the cooling process is mostly about energy exchange / transformation. The aim of this study was to evaluate the factors that affect energy efficiency in a refrigeration system. The applied methodology was based on refrigeration concepts widely illustrated in the literature and to achieve the objective, a screw compressor selection tool from a large manufacturer was used. The present study includes the effects of suction and discharge pressure drop, useful and non-useful overheating, lower evaporator and condenser temperature.

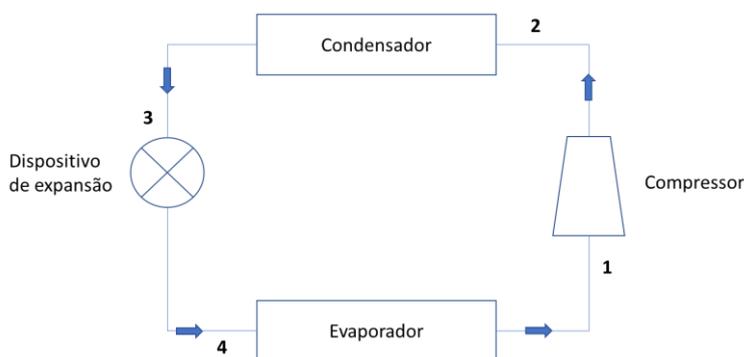
Keywords: Energy. Pressure Drop. Overheating. Subcooling. Compressor.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de refrigeração por compressão de vapor são certamente os mais usados nos processos de refrigeração. Possui quatro elementos básicos, compressor, evaporador, condensador e dispositivo de expansão. Um ciclo elementar de refrigeração é apresentado na Figura 1.

¹ BELINI, R. J.; AUTOR de Avaliação de fatores que afetam a eficiência energética em um sistema de refrigeração; Dissertação (Mestrado em Processos Industriais na área de Desenvolvimento e Otimização em Processos Industriais) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, 2019

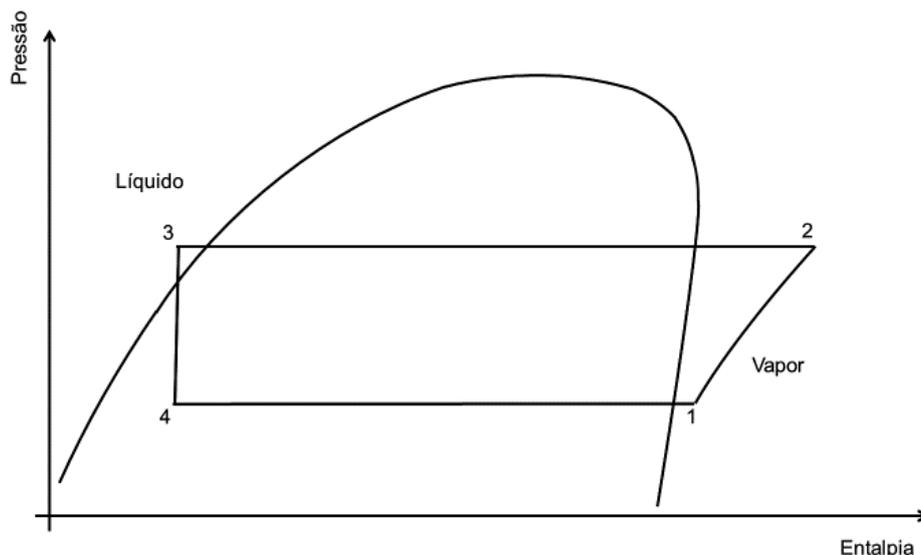
Figura 1 – Ciclo Elementar de Refrigeração



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O processo inicia no compressor que succiona o fluido refrigerante na forma gasosa a uma baixa pressão e temperatura. Ele aumenta a pressão e temperatura do fluido descarregando-o no condensador. No condensador, o calor absorvido pelo fluido durante o processo (evaporação e compressão), é rejeitado para a atmosfera através da troca com outro fluido que pode ser a água, o ar, ou uma combinação de ambos. Neste processo, o fluido na forma gasosa condensará tornando-se um líquido com alta pressão e temperatura próxima a do ambiente. Este líquido segue para o dispositivo de expansão onde sofrerá uma queda de pressão e então se tornará uma mistura de líquido e gás com uma baixa pressão e temperatura. Seguirá para o evaporador onde absorverá o calor do processo ou produto a ser resfriado. O ciclo que representa o processo é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama Pressão vs Entalpia



Fonte: Elaborado pelo autor com dados da apostila *Industrial Refrigeration School – Johnson Controls Inc* – (2018).

O presente estudo visa avaliar o efeito de alguns parâmetros na condição de trabalho de um sistema de refrigeração com amônia, focando no compressor, uma vez que ele é o componente que recebe a maior carga de trabalho (energia) do sistema através do motor. A avaliação é efetuada considerando a capacidade e rendimento do compressor empregando um *software* de seleção disponível na rede. Para esta avaliação, foi considerado um compressor de parafusos.

É um dispositivo de redução de volume com deslocamento positivo. Amplamente utilizado em refrigeração nos últimos 30 anos. Simples conceito e com geometria difícil de visualizar, pois compreende essencialmente apenas um par de rotores tipo engrenagens que são denominados macho e fêmea, e ranhuras helicoidais, contidos em uma carcaça. Os rotores e a carcaça são separados por folgas muito pequenas.

Uma característica importante do compressor de parafusos é a relação de volumes que se resume na relação entre o volume do gás na sucção (V_s) e o volume do gás na descarga (V_D). Esta relação (V_s/V_D) é conhecida como V_i e é um parâmetro importante do compressor pois, define a pressão de descarga do mesmo. A relação de compressão (RC) é o quociente entre a pressão de descarga (P_D) e a pressão de sucção (P_s). A correlação entre V_i e RC é definida na equação 1:

$$RC = P_D/P_s = (V_s/V_D)^k \quad (1)$$

Tabela 1 – Unidades convencionais dos fatores da formula no Sistema Internacional (SI)

Nomenclatura:	
Capacidade Frigorífica	(kW)
Temperatura	(°C)
Potência do Eixo	(kW)
Razão de Compressão (RC)	(adimensional)
Relação de Volumes (V_i)	(adimensional)
Coeficiente de Performance (COP)	(adimensional)
Pressão	(bar)

Fonte: Elaborado pelo autor

2 EFEITO DE VÁRIOS FATORES

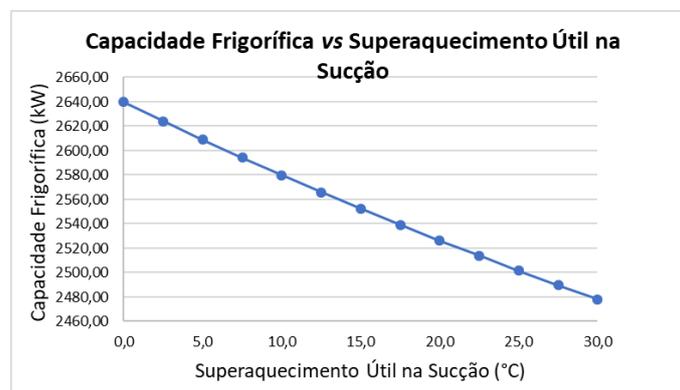
O trabalho foi desenvolvido para analisar o efeito de vários fatores no rendimento do ciclo frigorífico quando variações destes fatores acontecem durante o funcionamento. O uso da simulação é uma boa opção para este tipo de trabalho uma vez que a condução do mesmo com dados práticos necessitaria de altos requisitos de tempo e custo.

2.1 EFEITO DO SUPERAQUECIMENTO ÚTIL

O superaquecimento na linha de sucção é usado para garantir que o refrigerante que entra no compressor esteja no estado gasoso uma vez que não suporta comprimir líquidos. O superaquecimento conhecido como superaquecimento útil é aquele em que o aumento da temperatura do vapor acontece dentro do evaporador, aumentando o efeito de refrigeração.

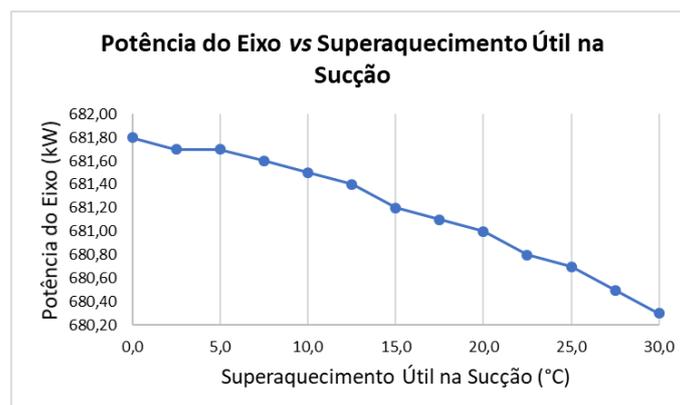
As Figuras 3 e 4 representam graficamente a redução tanto da capacidade frigorífica quanto da potência do eixo do compressor, respectivamente, à medida que o superaquecimento útil na sucção aumenta.

Fig. 3 – Capacidade frigorífica vs Superaquecimento útil na sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Fig. 4 – Potência do eixo vs Superaquecimento útil na sucção

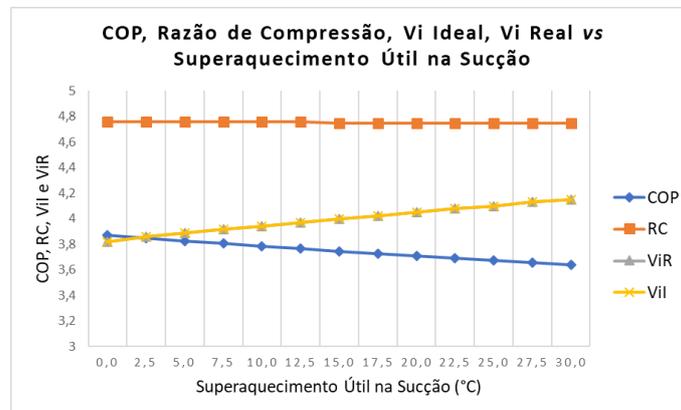


Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018)

Quando acontece um aumento na temperatura à pressão constante, o seu volume específico aumenta. Isto resulta no aumento do volume em relação a massa no mesmo (como o volume específico é o inverso da densidade, assim sendo, o aumento do volume específico resulta na diminuição da densidade). Então, o compressor comprimirá menos massa, o que exigirá menos do compressor e resultará numa capacidade frigorífica menor.

A Figura 5 representa graficamente a variação do COP, razão de compressão e razão de volume (real e ideal) em função do superaquecimento útil na sucção.

Fig. 5 – COP, razão de compressão, Vi ideal, Vi real vs Superaquecimento útil na sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

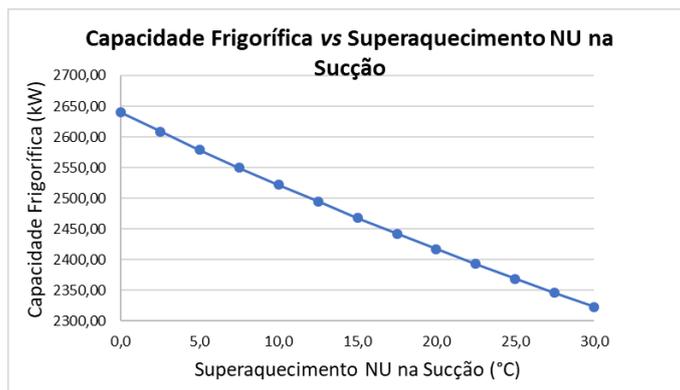
A razão de compressão não varia significativamente, podendo ser considerada constante em função da não alteração nas pressões de sucção e descarga do compressor. O COP é reduzido à medida que o superaquecimento útil na sucção aumenta devido à maior redução da capacidade frigorífica, como mostrado na e Figura 3, do que a redução da potência do eixo, como mostrado na Figura 4.

2.2 EFEITO DO SUPERAQUECIMENTO NÃO ÚTIL (NU)

O superaquecimento conhecido como superaquecimento Não Útil é aquele em que o aumento da temperatura do vapor acontece fora do evaporador, normalmente nas linhas de retorno do gás para o compressor. Ele é causado por falhas no cálculo, instalação ou manutenção do isolamento da tubulação de retorno e não contribui em nada com o efeito de refrigeração.

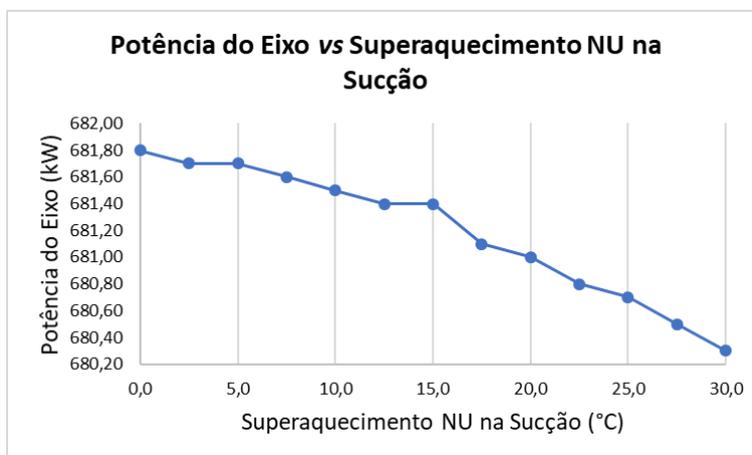
As Figuras 6 e 7 apresentam graficamente a redução tanto da capacidade frigorífica quanto da potência do eixo do compressor, respectivamente à medida que o superaquecimento NU na sucção aumenta.

Fig. 6 – Capacidade frigorífica vs Superaquecimento NU na sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Fig. 7 – Potência do eixo vs Superaquecimento NU na sucção

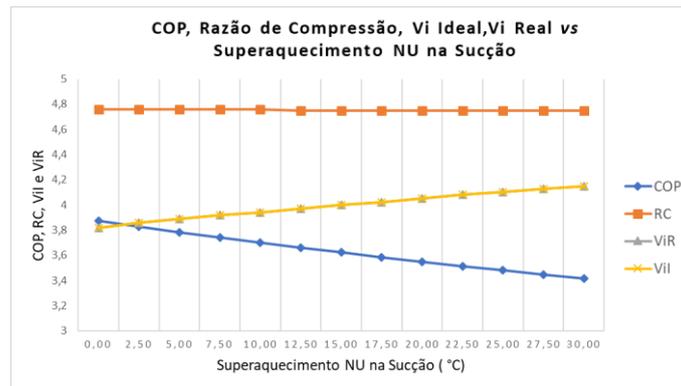


Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Os motivos são os mesmos já explicados no item 2.1. O fato do superaquecimento não ser útil (não contribui para o efeito refrigerante), induz a perdas maiores.

A Figura 8 representa graficamente a variação do COP, razão de compressão e razão de volume (real e ideal) em função do superaquecimento NU na sucção.

Fig. 8 – COP, razão de compressão, Vi ideal, Vi real vs Superaquecimento NU da sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

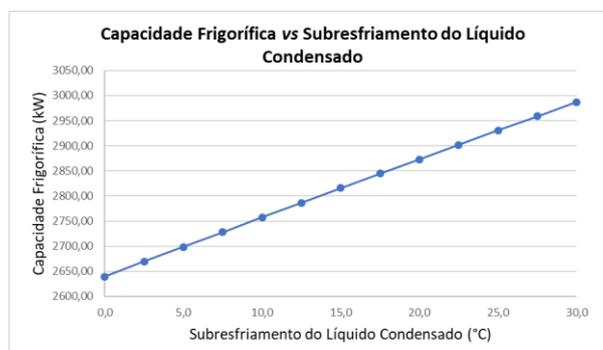
A razão de compressão não varia significativamente, podendo ser considerada constante em função de que não houve alteração nas pressões de sucção e descarga do compressor. O COP é reduzido à medida que o superaquecimento NU na sucção aumenta devido à maior redução da capacidade frigorífica, como mostrado na Figura 4, do que a redução da potência do eixo, como mostrado na Figura 5. Contribui nesta redução, diferente do superaquecimento útil, o fato de que o superaquecimento NU não contribui para o efeito de refrigeração.

2.3 EFEITO DO SUBRESFRIAMENTO DO LÍQUIDO CONDENSADO

O subresfriamento do líquido condensado é usado para reduzir a temperatura do líquido que sai do condensador. Esta redução de temperatura resultará numa melhora no desempenho do sistema. A redução da temperatura diminuirá a entalpia do líquido proporcionando um aumento no efeito de refrigeração e diminuirá a formação de gás instantâneo quando o líquido passar pelo dispositivo de expansão.

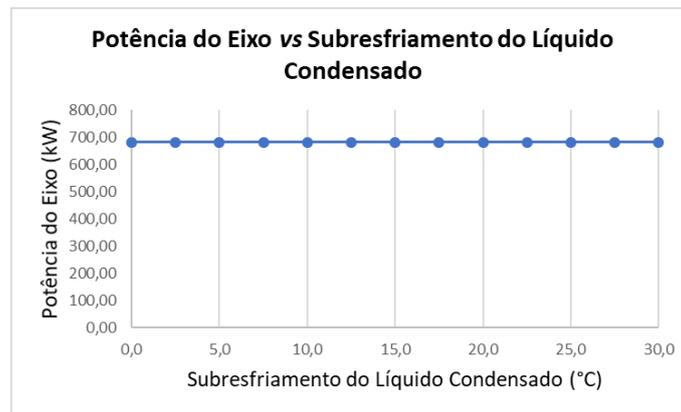
As Figuras 9 e 10 representam graficamente o aumento da capacidade frigorífica e a estabilidade da potência do eixo.

Fig. 9 – Capacidade frigorífica vs Subresfriamento do líquido condensado



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Fig. 10 – Potência do eixo vs Subresfriamento do líquido condensado

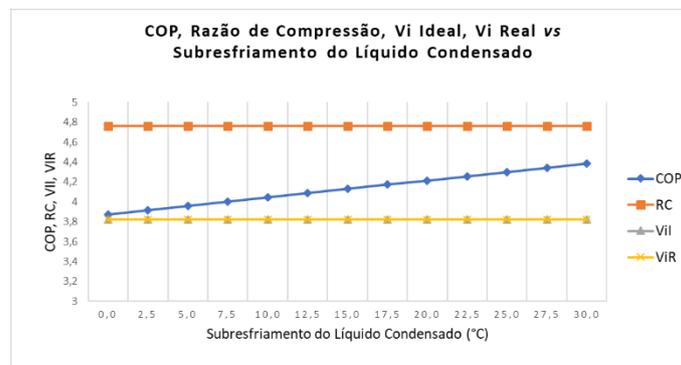


Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Este fenômeno acontece devido ao fato de o subresfriamento ocorrer no condensador e não ter nenhuma influência no trabalho fornecido pelo motor. Então, o ciclo adquirirá mais efeito de refrigeração líquida sem o aumento do trabalho do compressor.

A Figura 11 representa graficamente a variação do COP, razão de compressão e razão de volume (real e ideal) em função do subresfriamento do líquido condensado.

Fig. 11 – COP, razão de compressão, Vi ideal, Vi real vs Subresfriamento do líquido condensado



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

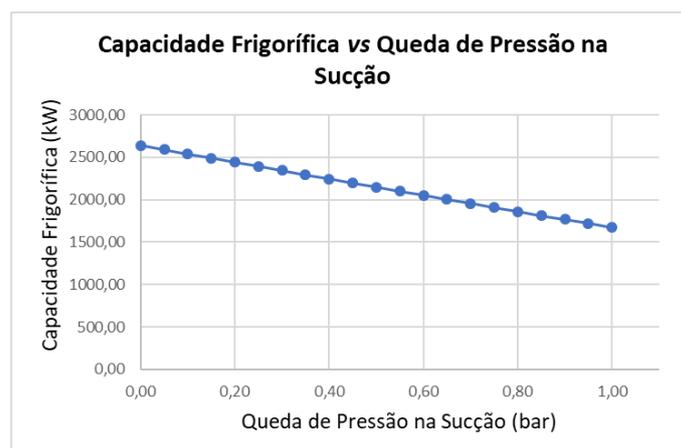
A razão de compressão e a razão de volume (real e ideal), não variam em função da não alteração nas pressões de sucção e descarga do compressor. O COP aumenta à medida que o subresfriamento do líquido condensado cresce devido ao aumento da capacidade frigorífica, como mostrado na Figura 9, e da potência do eixo estável, como mostrado na Figura 10.

2.4 EFEITO DA QUEDA DE PRESSÃO NA LINHA DE SUÇÃO

A queda de pressão na sucção é um efeito indesejado no sistema de refrigeração. É inevitável, uma vez que é consequência das características construtivas dos sistemas. A tubulação no total é responsável por uma parcela da perda de carga devido ao atrito entre o fluido refrigerante e a parede do tubo durante a movimentação dele na forma líquida ou gasosa. O restante da parcela de perda de carga pode ser atribuído aos acessórios instalados (válvula de bloqueio, válvulas solenoides, curvas, reduções, vasos etc.). Uma operação errônea no sistema também é um fator que pode ser acrescentado à perda de carga original do processo. Um pequeno descuido no abrir e fechar uma válvula de bloqueio na tubulação, acarretará um aumento da queda de pressão.

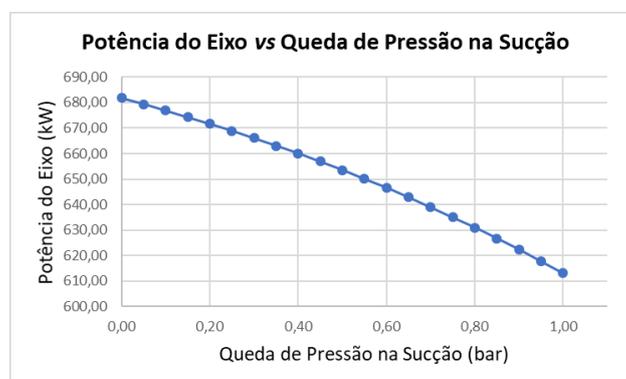
As Figuras 12 e 13 representam graficamente a redução tanto da capacidade frigorífica quanto da potência do eixo do compressor, respectivamente, à medida que a queda de pressão aumenta.

Fig. 12 – Capacidade frigorífica vs Queda de pressão na sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Fig. 13 – Potência do eixo vs Queda de pressão na sucção

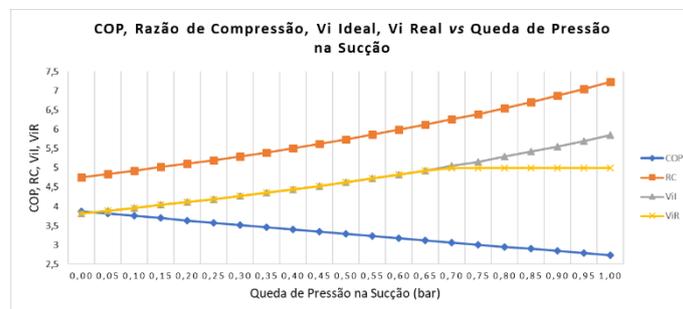


Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Este fenômeno ocorre devido à uma característica dos gases refrigerantes. Quando acontece uma queda de pressão na sucção do compressor provoca um aumento no volume específico do gás. Este aumento do volume específico do gás reduz a quantidade de massa dele, diminuindo a quantidade de trabalho para sua compressão. A pressão menor na sucção aumentará a razão de compressão, pois o compressor manterá a pressão na descarga devido suas características construtivas. O aumento da razão de compressão produzirá um aumento na relação de volumes V_i (real e ideal).

A Figura 14 representa graficamente a variação do COP, razão de compressão e razão de volume (real e ideal) em função da queda de pressão na sucção.

Fig. 14 – COP, razão de compressão, V_i ideal, V_i real vs Queda de pressão na sucção



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

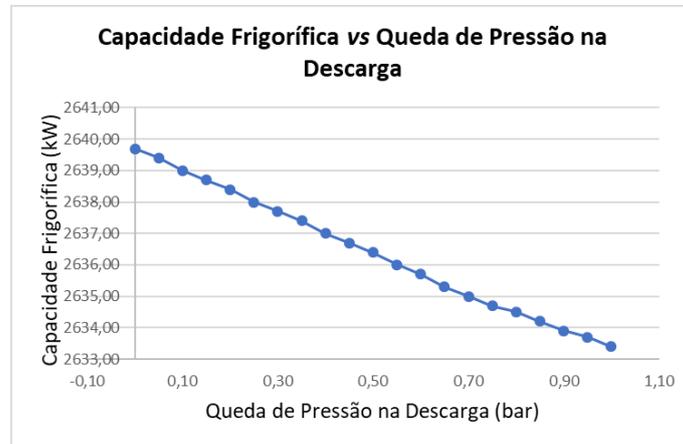
A razão de compressão aumenta à medida que a queda de pressão na sucção aumenta. O V_i Ideal aumenta proporcionalmente ao aumento da razão de compressão, porém o aumento do V_i real encontra a barreira relacionada à construção do compressor. O compressor usado no estudo trabalha com o V_i na faixa de 2.2 a 5.0, ou seja, o V_i real máximo neste compressor é 5.0. Tal condição explica a inflexão do gráfico na Figura 12 a partir do ponto 0,70 bar de queda de pressão. O COP é reduzido à medida que a queda de pressão na sucção aumenta devido à maior redução da capacidade frigorífica, como mostrado na Figura 10, do que a redução da potência do eixo, como mostrado na Figura 11.

2.5 EFEITO DA QUEDA DE PRESSÃO NA LINHA DE DESCARGA

A queda de pressão na descarga é um fenômeno inerente ao ciclo frigorífico. Ele acontece devido à necessidade de o compressor vencer a "barreira" formada pela pressão de condensação. Junte-se a esta barreira, as válvulas de saída do compressor e a perda de carga devido ao fluxo do fluido refrigerante. A queda de pressão na linha de descarga e condensador aumentará o trabalho de compressão.

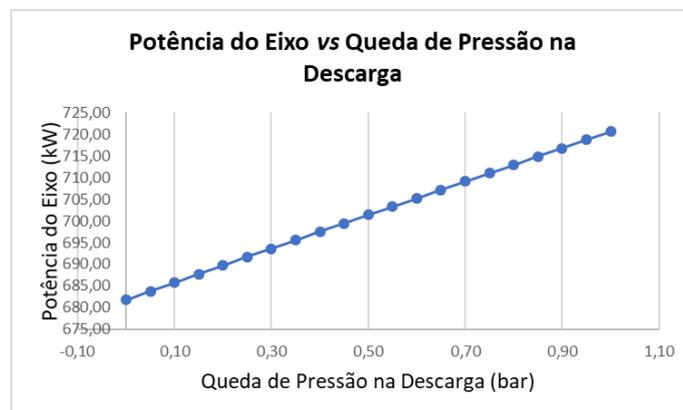
As Figuras 15 e 16 representam graficamente a redução da capacidade frigorífica e o aumento da potência do eixo, respectivamente, à medida que a queda de pressão na descarga do compressor aumenta.

Fig. 15 – Capacidade frigorífica vs Queda de pressão na descarga



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Fig. 16 – Potência do eixo vs Queda de pressão na descarga

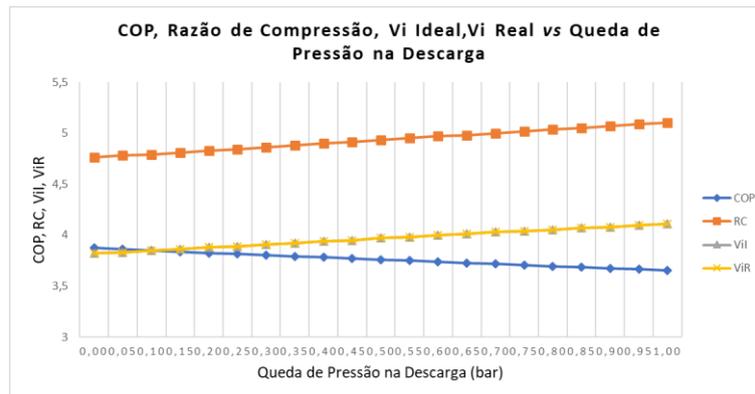


Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

Este fenômeno ocorre devido ao aumento da pressão na descarga do compressor para superar a queda de pressão na linha com o intuito de manter o fluxo de refrigerante no ciclo frigorífico. Então, o compressor comprimirá o gás com uma pressão acima da pressão da linha de descarga e resultará num aumento da potência do eixo.

A Figura 17 representa graficamente a variação do COP, razão de compressão e razão de volume (real e ideal) em função da queda de pressão na descarga.

Fig. 17 – COP, razão de compressão, Vi ideal, Vi real vs Queda de pressão na descarga



Fonte: Elaborado pelo autor com dados obtidos da ferramenta Coolware (2018).

A capacidade frigorífica não varia significativamente, podendo ser considerada constante. O COP é reduzido à medida que a queda de pressão na descarga aumenta devido ao maior aumento da potência do eixo, como mostrado na Figura 16, do que a redução da capacidade frigorífica, como mostrado na Figura 15. A razão de compressão e razão de volume (real e ideal) aumentam à medida que a queda de pressão aumenta devido ao acréscimo de pressão na pressão de descarga do compressor para garantir o fluxo do refrigerante.

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e apresentados, estudou-se o efeito de vários fatores no rendimento do sistema. Conclui-se que um aumento na temperatura do fluido na sucção (superaquecimento útil) de 10 °C em relação à temperatura de saturação impacta em uma redução de 2,27% na capacidade frigorífica do sistema, deste modo, deve-se operar o sistema em temperaturas próximas à de saturação, garantindo a evaporação do fluido de operação. Um aumento de temperatura do vapor fora do evaporador (superaquecimento NU) impacta em redução da capacidade frigorífica do sistema na ordem de 4,5%, quando a temperatura está a 10 °C acima da temperatura de saturação. As duas formas de superaquecimento citadas anteriormente impactam negativamente na potência de eixo do sistema. O subresfriamento do líquido condensado impacta positivamente na capacidade frigorífica do sistema; apresentando um aumento de 13% quando o fluido sofre um subresfriamento em temperaturas da ordem de 30 °C em relação à temperatura de saturação, sem, no entanto, impactar em alterações na potência do eixo. A queda de pressão na linha de sucção do sistema impacta de maneira negativa na capacidade frigorífica do sistema, apresentando uma redução de aproximadamente 2,3% quando a queda de pressão é da ordem de 0,05 bar. A queda de pressão na linha de descarga, em nível de aproximadamente 0,05 bar, não impacta de sobremaneira no

coeficiente de performance do sistema, mas impacta no aumento da potência e eixo em níveis da ordem de 0,3%.

REFERÊNCIAS

AHAMED, J. U.; SAIDUR, R.; MASJUKI, H. H. **A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system.** Disponível em: ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1593–1600

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Refrigeration SI edition** – Atlanta, GA, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Refrigeration SI edition** – Atlanta, GA, 2010.

DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração.** 4. Ed. São Paulo: Hemus, 2004. 884p.

ELECTRICAL ENGINEERING OF INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY (EE IIT). **Refrigeration & air conditioning.** Disponível em: <<https://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/>>. Acesso em: 25 de Outubro de 2018.

KUMBHARA, A.; GULHANE, N.; PANDUREA, S. **Effect of various parameters on working condition of chiller.** In: **International Conference on Recent Advancement in Air Conditioning and Refrigeration**, RAAR 2016, 10-12 November 2016, Bhubaneswar, India. Disponível em: ELSEVIER - Energy Procedia 109 (2017) 479 – 486.

REINDL, D. T. Sequencing & control of compressors. **ASHRAE Journal**, Atlanta, p.14-29, Nov 2013.

STOECKER, W. F. **Industrial refrigeration handbook.** 1. Ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 689p.

STOSIC, N.; SMITH, I.; KOVACEVIC, A. **Screw compressor – mathematical modelling and performance calculation.** 1. Ed. London: Springer-Verlag, 2005. 138p.