

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES

Gislaine Ferreira Marçal¹, Eloi Martins Grossi Pires¹, Tiago Mendes¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina, Brasil (gislaine.ferreira@ufvjm.edu.)

Resumo: Sistemas de refrigeração desempenham papel essencial em indústrias variadas e no setor de transportes, exigindo monitoramento rigoroso e otimização contínua. A deterioração de componentes compromete a eficiência energética, eleva despesas operacionais e encurta a durabilidade dos equipamentos. Detectar falhas precocemente é vital para assegurar operação estável, elevar o rendimento termodinâmico e mitigar efeitos ambientais pelo consumo de energia. Este estudo apresenta um modelo computacional para simular um ciclo de refrigeração típico – com compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador –, incorporando dados reais de múltiplas condições operacionais. O foco é reproduzir estados normais e com falhas graduais em componentes, avaliando os efeitos no desempenho integral e auxiliando no diagnóstico e na manutenção proativa. Baseado em princípios termodinâmicos e de transferência térmica, o modelo considera interações entre elementos. Simulações testaram variações em parâmetros de entrada (temperatura, pressão, fluxos em geral) e introduziram degradações crescentes, emulando cenários reais. Métricas como Coeficiente de Performance (COP) e gasto energético foram analisadas, com validação termodinâmica. Testes experimentais futuros poderão atestar a robustez das simulações. O modelo quantifica o prejuízo por degradação em cada parte, revela padrões diagnósticos e gera "assinaturas" de degradação para ferramentas de detecção e otimização. Resultados indicam queda acentuada no COP com o agravamento das degradações. A proposta surge como recurso valioso para prevenção, identificação de irregularidades e suporte decisório em manutenção, fomentando eficiência em refrigeração, corte de custos e sustentabilidade ambiental. Há viabilidade para integração em sistemas de monitoramento online.

Palavras-chave: Refrigeração, Degradação em Componentes, Simulação Termodinâmica, Detecção de Anomalias, Otimização Energética.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração abrangem a maioria das aplicações industriais e comerciais, com atuação fundamental na conservação de alimentos, processos industriais e climatização. Nas últimas décadas, observa-se um aumento significativo da demanda por esses sistemas, impulsionado pela expansão do setor alimentício e pela crescente necessidade de ambientes climatizados. Por isso, os equipamentos de refrigeração tornaram-se grandes consumidores de eletricidade, destacando a importância de melhorias continuamente a eficiência energética desse sistema.

Nesse cenário, torna-se indispensável a obtenção de maior controle operacional sobre o funcionamento dos equipamentos utilizados, permitindo operar com máxima eficiência em diferentes condições de operação. O desempenho energético de um sistema de refrigeração necessita do seu estado de funcionamento em que se encontra os seus principais

componentes, tais como compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. Durante a operação, esses componentes podem sofrer diferentes degradações, como incrustações, desgaste mecânico, perda de eficiência, o que pode resultar e colocar em risco a sua capacidade de refrigeração e aumentar o consumo energético.

Com isso, é válido o desenvolvimento de modelos computacionais com objetivo de representar o comportamento operacional dos sistemas em diferentes cenários, para analisar o desempenho e os efeitos da degradação que ocorrem em seus componentes no equilíbrio termodinâmico do ciclo frigorífico. Além disso, a comparação entre os resultados obtidos nas simulações possibilita a identificar padrões de degradações e aprovar estratégias de diagnósticos e manutenção preditiva.

Diante desse contexto, esse trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo computacional de um sistema de refrigeração por compressão de vapor

e investigar os efeitos do aumento de degradação em seus componentes. Foram considerados diferentes níveis de degradação aplicados individualmente e de forma combinada ao compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. As simulações foram realizadas utilizando o software GNU Octave com biblioteca CoolProp Eaton et al. (2023) e Bell et al. (2014), possibilitando determinar o ponto de equilíbrio operacional do sistema e analisar os indicadores de desempenho associados ao funcionamento do ciclo frigorífico.

MATERIAL E MÉTODOS

Um sistema básico de refrigeração por compressão de vapor consiste em um compressor, um condensador, um dispositivo de expansão e um evaporador. Esses componentes são conectados em um circuito fechado por meio de tubulações, sujeitos à transferência de calor com o ambiente (Fig. 1).

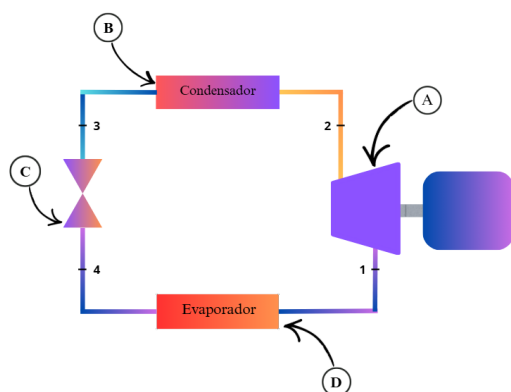


Figura 1. Layout simplificado de um sistema básico de refrigeração: A) Compressor/Motor Elétrico; B) Condensador; C) Válvula de Expansão; D) Evaporador. Fonte: Autores.

No ponto 1, o fluido refrigerante entra no compressor em estado de vapor superaquecido, após sair do evaporador, onde o calor é absorvido a pressão constante. No ponto 2, o fluido refrigerante sai do compressor em estado de vapor superaquecido, a alta pressão e alta temperatura, e entra no condensador, onde o calor é rejeitado a pressão constante. No ponto 3, o fluido refrigerante sai do condensador como um líquido sub-resfriado e entra na válvula de expansão, onde se expande de forma isentálpica.

Neste trabalho, os dados empregados na modelagem dos componentes do sistema de refrigeração foram obtidos a partir de catálogos técnicos dos respectivos fabricantes. Dentre os principais parâmetros, destacam-se:

- Deslocamento volumétrico do compressor ($\dot{V}_{desl}$);
- Eficiências isentálpica (η_{isent}), e volumétrica (η_{vol}) do compressor em função da relação de pressão (RP);
- Capacidades do condensador e do evaporador por unidade de diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), em função da taxa de fluxo de ar dos ventiladores;
- Vazão máxima de massa do refrigerante ($\dot{m}_{fmax}$), fornecido por um dispositivo de expansão.

O sistema de refrigeração modelado corresponde a uma instalação com uma capacidade de refrigeração de 96,5kW, utilizando como fluido refrigerante o HCFC-22. Para a determinação da carga térmica de refrigeração e o dimensionamento do sistema de refrigeração, foram adotadas as seguintes condições operacionais: temperatura ambiente de $32,0^{\circ}\text{C}$, temperatura de armazenamento do produto de $-2,0^{\circ}\text{C}$ (correspondente à temperatura da câmara frigorífica) e umidade relativa de 85%.

De acordo com Ommen e Elmegaard (2012), conhecendo-se as características operacionais de cada componente, é possível desenvolver um modelo matemático para determinar o equilíbrio operacional do sistema (ponto de equilíbrio) para qualquer carga do sistema e/ou condição ambiente. Portanto, a influência que um componente tem sobre os outros e sobre todo o sistema pode ser analisada e seu desempenho quando trabalham juntos pode ser quantificado adequadamente. As equações utilizadas para modelar cada componente de um sistema de refrigeração são descritas abaixo. Estas equações baseiam-se no princípio da conservação da massa e na primeira lei da termodinâmica. Para a análise energética, são tidas em conta as seguintes considerações:

- Estado estacionário;
- Não há perdas de calor, exceto no compressor (o processo de compressão não é isentrópico) e na válvula;
- A variação dos componentes cinéticos e potenciais da energia e da exergia é insignificante;
- Os índices numéricos estão relacionados aos pontos de estado mostrados na Figura 1.

A aplicação do princípio da conservação da massa e da primeira lei da termodinâmica no evaporador



resulta na capacidade de resfriamento ($\dot{Q}_{evp}$), conforme mostrado na Eq. (1).

$$\dot{Q}_{evp} = \dot{m}_f \cdot (h_1 - h_4) \quad (1)$$

Onde: $\dot{m}_f$ e a vazão mássica do refrigerante, h é a entalpia específica.

Richardson et al. (2002) afirmam que o comportamento de um evaporador pode ser razoavelmente representado usando sua capacidade de evaporação por unidade de diferença de temperatura (C_{evp}), conforme mostrado na Eq. (2), uma vez que seu coeficiente de transferência de calor geral não é normalmente fornecido pelos fabricantes.

$$\dot{Q}_{evp} = C_{evp} \cdot (T_{AEE} - T_{evp}) \quad (2)$$

Onde: T_{AEE} é a temperatura do ar na entrada do evaporador (em geral, é a temperatura de armazenamento do produto), T_{evp} é a temperatura de evaporação. A potência de compressão ($\dot{W}_{cmp}$) é dada pela Eq. (3).

$$\dot{W}_{cmp} = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_1) \quad (3)$$

De acordo com Oliveira Jr. (2013), as eficiências volumétricas (η_{vol}) e isentrópica (η_{isent}) podem ser calculadas em função da razão de pressão (RP), conforme mostrado na Eq. (4). P_{cnd} e P_{evp} são a pressão de condensação e a pressão de evaporação, respectivamente, que são determinadas em função da temperatura de condensação (T_{cnd}) e da temperatura de evaporação (T_{evp}). A eficiência volumétrica do compressor é dada pela Eq. (5); os coeficientes desta equação são determinados por um processo de regressão, utilizando dados do manual do componente. A eficiência isentrópica é dada pela Eq. (6), que é obtida a partir de curvas típicas de compressores de refrigeração (Oliveira Jr., 2013).

$$RP = \frac{P_{cnd}}{P_{evp}} \quad (4)$$

$$\eta_{vol} = a \cdot RP^2 + b \cdot RP + c \quad (5)$$

$$\eta_{isent} = d \cdot RP^2 + e \cdot RP + f \quad (6)$$

Onde: a, b, c, d, e, f : são coeficientes de polinômios de segundo grau. Utilizando o deslocamento volumétrico ($\dot{V}_{desl}$), também obtido a partir dos dados do catálogo do compressor e com o volume específico na sua sucção (v_s), é possível determinar a taxa de fluxo mássico do refrigerante do compressor ($\dot{m}_f$), conforme mostrado na Eq. (7).

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{V}_{desl} \cdot \eta_{vol}}{v_s} \quad (7)$$

Utilizando a eficiência mecânica ($\eta_{mec} = 0,90$) e a eficiência elétrica ($\eta_{elet} = 0,90$), é possível determinar a potência real consumida pelo compressor ($\dot{W}_{elet}$) (Eq. 8).

$$\dot{W}_{elet} = \frac{\dot{W}_{cmp}}{\eta_{mec} \cdot \eta_{elet} \cdot \eta_{isent}} \quad (8)$$

O fluxo de calor rejeitado pelo condensador ($\dot{Q}_{cnd}$) foi calculado utilizando os princípios de conservação de massa e energia, resultantes da Eq. (9).

$$\dot{Q}_{cnd} = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_3) \quad (9)$$

Com a mesma metodologia adotada na modelagem do evaporador, a capacidade do condensador por unidade de diferença de temperatura (C_{cnd}) foi usada para modelar este componente (Richardson et al. 2002), conforme mostrado na Eq. (10).

$$\dot{Q}_{cnd} = C_{cnd} \cdot (T_{cnd} - T_{AEC}) \quad (10)$$

Onde: T_{AEC} é a temperatura do ar na entrada do condensador (sendo a temperatura ambiente) e T_{cnd} é a Temperatura de condensação.

O dispositivo de expansão utilizado para o sistema modelado neste trabalho foi uma válvula de expansão termostática; o processo no dispositivo de expansão pode ser considerado isentálpico. Utilizando dados normalmente fornecidos pelo fabricante, foi possível determinar a característica do coeficiente da válvula (K_a), que representa o produto da área do orifício da válvula pelo seu coeficiente de descarga, em função da temperatura de vaporização (Eq. (11)). Vazão máxima de massa do refrigerante ($\dot{m}_{fmax}$) fornecido pela válvula, sujeito a uma diferença de pressão ($P_{cnd} - P_{evp}$), ocorre quando está completamente aberto e pode ser determinado utilizando a Eq. (12).

O coeficiente Ka e a vazão máxima do refrigerante, juntamente com a Eq. (13), podem ser usados para simular o funcionamento da válvula em qualquer outra condição. O superaquecimento dinâmico, $DTSA_{OS}$, e o superaquecimento estático, $DTSA_{SS}$, são estados definidos para a temperatura de evaporação de 0°C e tensão da mola, de acordo com o manual do fabricante da válvula termostática (Mendes et al., 2020).

$$Ka = g \cdot T_{evp}^2 + h \cdot T_{evp} + i \quad (11)$$

$$\dot{m}_{fmax} = Ka \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_3 \cdot (P_{cnd} - P_{evp})} \quad (12)$$

$$DTSA = \left(\frac{\dot{m}_{fmax}}{\dot{m}_f} \right) \cdot DTSA_{OS} + DTSA_{SS} \quad (13)$$

Onde: ρ_3 é a densidade do refrigerante na entrada da válvula, $DTSA$ é a superaquecimento operacional, $DTSA_{OS}$ é o superaquecimento dinâmico e $DTSA_{SS}$ é o superaquecimento estático. Por fim, o coeficiente de desempenho (COP) do sistema de refrigeração é dado pela Eq. (14).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evp}}{\dot{W}_{cmp}} \quad (14)$$

As equações listadas acima são utilizadas para simular o comportamento dos componentes do sistema quando operando em conjunto. O sistema não linear de equações obtido através da modelagem matemática dos componentes foi resolvido no GNU Octave (Eaton et al., 2023), utilizando a biblioteca CoolProp (Bell et al., 2014) para propriedades termofísicas do refrigerante, utilizando o método de bissecção para temperaturas de condensação e evaporação, superaquecimento e sub-resfriamento. Para cada condição considerada, a solução do sistema formada pelas equações determinantes de cada componente corresponde a uma condição de equilíbrio do sistema, que corresponde a um ponto em que o sistema pode ser considerado como operando em um estado estacionário, o que é considerado um regime quase estático.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As degradações dos componentes do sistema de refrigeração foram inseridas ao modelo computacional por meio de fatores adimensionais

aplicados diretamente aos modelos matemáticos de cada elemento do ciclo frigorífico. Essa abordagem permitiu simular, de forma controlada, perdas progressivas de desempenho associadas ao envelhecimento e às degradações operacionais dos componentes.

Os fatores, representados por $DegCmp$, $DegCnd$, $DegVlv$ e $DegEvp$, assumem valor unitário para componentes em condição ideal e valores inferiores a 1 para representar diferentes níveis de degradação. Nos cenários analisados neste estudo, a degradação foi aplicada de forma individual ou combinada aos principais componentes do sistema, mantendo-se os demais em condições nominais, o que possibilitou isolar e analisar o impacto específico de cada elemento sobre o desempenho global.

Inicialmente, avaliou-se a degradação do condensador, mantendo o compressor, a válvula de expansão e o evaporador em condição ideal ($DegCmp = DegVlv = DegEvp = 1$). Para a degradação do condensador foi preciso a implementação da redução gradual do parâmetro $DegCnd$, com valores variando aproximadamente entre 0,99 (condição quase ideal) e 0,70 (condição mais severa). Essa variação representa a diminuição da eficiência de troca térmica associada a fenômenos reais como incrustações, acúmulo de sujeira, corrosão ou obstruções parciais.

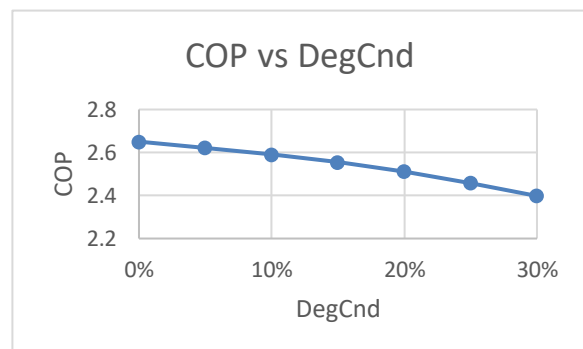


Figura 2: Relação Entre o COP e o nível de Degradação do Condensador ($DegCnd$). Fonte: Autores.

Para cada nível de degradação, foram simuladas diferentes condições operacionais variando-se a temperatura interna do ambiente refrigerado entre 20°C e -10°C , mantendo-se a temperatura externa constante em 32°C . De modo complementar, realizou-se a variação da temperatura externa entre 38°C e 8°C , mantendo-se a temperatura interna constante em -2°C . Em cada ponto de operação, o modelo recalculou iterativamente as propriedades termodinâmicas do fluido refrigerante, as pressões de



evaporação e condensação, as vazões mássicas, a potência do compressor e o Coeficiente de Performance (COP), assegurando fechamento rigoroso dos balanços de energia.

A Figura 2 evidencia que à medida que a degradação aumenta, o COP (coeficiente de performance) diminui de forma praticamente linear. Partindo da condição em que o condensador está no estado nominal sem degradação ($DegCnd = 1$), o sistema apresenta um COP máximo cerca de 2,65 nessa situação (sem degradação nos demais componentes). Conforme a degradação do condensador aumenta representado pela redução do parâmetro $DegCnd$ até 0,70, provoca uma diminuição progressiva do COP do sistema de refrigeração, dessa forma o COP cai gradualmente para aproximadamente 2,39. Esse comportamento está diretamente associado à redução da capacidade de troca térmica do condensador, que passa a rejeitar calor de forma menos eficiente para o ambiente externo. Os resultados obtidos demonstram que a $DegCnd$ tem grande influência no desempenho do sistema mesmo quando os demais componentes são mantidos em condições ideais.

Além do condensador, também foram avaliadas as degradações individuais da válvula de expansão e do evaporador. No caso da válvula expansão, manteve-se o compressor, o condensador e o evaporador em condições nominais ($DegCmp = DegCnd = DegEvp = 1$). De forma análoga, a degradação do evaporador foi analisada preservando-se o compressor, a válvula de expansão e o condensador em condição ideal ($DegCmp = DegVlv = DegCnd = 1$).

A consistência termodinâmica do modelo foi verificada por meio do balanço energético global do sistema, que apresentou erros da ordem de 10^{-14} kW, indicando elevada precisão numérica. Essa abordagem permitiu isolar o efeito da degradação de cada componente sobre o desempenho global do sistema, evidenciando como a redução da capacidade de rejeição de calor desloca os pontos do ciclo termodinâmico, eleva as pressões de condensação e aumenta o consumo energético, resultando em diminuição progressiva do COP.

Os resultados que foram obtidos evidenciam o impacto significativo da degradação progressiva dos componentes sobre o desempenho global do sistema de refrigeração. As simulações realizadas sob condições normais de operação e diferentes níveis de degradação individual permitiram analisar, de forma detalhada, a contribuição específica de cada componente para a eficiência energética do sistema.

3.2. Combinações de Degradação dos Componentes

Além das análises de degradação individual, foram avaliados cenários com degradações combinadas entre dois componentes, visando representar

condições mais próximas da operação real do sistema. Foram considerados casos de degradação simultânea do $DegCmpCnd$, $DegCmpVlv$, $DegCmpEvp$, bem como $DegCndEvp$, $DegCndVlv$ etc.

Na simulação da degradação conjunta do compressor e do evaporador ($DegCmpEvp$), o condensador e a válvula de expansão foram mantidos em condições nominais ($DegCnd$, $DegVlv = 1$). Nesses cenários, os fatores de degradação do compressor ($DegCmp$) e do evaporador ($DegEvp$) foram reduzidos simultaneamente e de forma sincronizada, assumindo o mesmo valor em cada simulação.

Há também casos de degradação combinada aplicada simultaneamente ao condensador e à válvula de expansão ($DegCndVlv$), mantendo-se o compressor e o evaporador em condições ideais ($DegCmp = DegEvp = 1$). A degradação do condensador foi representada pela redução de sua eficiência de troca térmica, enquanto a degradação da válvula de expansão foi modelada por meio de perdas no controle da vazão mássica do fluido refrigerante. Essa combinação representa situações reais de operação nas quais limitações térmicas no condensador coexistem com falhas no dispositivo de expansão, permitindo avaliar a interação entre o aumento da pressão de condensação e as variações no regime de alimentação do evaporador.

De forma complementar, as simulações com degradação simultânea do condensador e do evaporador representam a perda global de eficiência térmica nos dois principais trocadores de calor do sistema. A redução do fator $DegEvp$ está associada à diminuição da eficiência na absorção de calor no evaporador, fenômeno típico de sistemas submetidos a incrustações ou acúmulo de sujeira nas superfícies de troca térmica. Essa degradação conjunta afeta ambos os extremos do ciclo frigorífico, provocando deslocamentos significativos nas pressões de condensação e evaporação, reduzindo a capacidade de refrigeração e exigindo maior potência do compressor para manter o sistema em operação. Como consequência, observa-se uma diminuição expressiva do Coeficiente de Performance (COP) e um aumento do consumo energético, mesmo quando o compressor opera em condição ideal.

Contudo, a combinação de degradação $DegVlvEvp$ reúne cenários nos quais a válvula de expansão e o evaporador foram degradados simultaneamente, mantendo-se o compressor e o condensador em condições ideais ($DegCmp = DegCnd = 1$). Essa configuração evidenciou o impacto combinado do controle inadequado da vazão mássica e da redução da eficiência de troca térmica na estabilidade e o desempenho do sistema.

3.3. Combinações Triplas de Degradação

As combinações de degradação DegCmpCndVlv, DegCmpCndEvp, DegCmpVlvEvp e DegCndVlvEvp correspondem a cenários com degradação simultânea de três componentes do sistema, mantendo-se apenas um componente em condição nominal. Em cada uma dessas situações, os fatores de degradação dos componentes envolvidos foram reduzidos de forma conjunta, representando estágios avançados de envelhecimento do sistema, nas quais múltiplas falhas coexistem e interagem entre si.

Esses cenários permitem avaliar efeitos fortemente não lineares sobre o comportamento do ciclo frigorífico, uma vez que a degradação simultânea de três componentes intensifica as perdas energéticas, altera significativamente os níveis de pressão e temperatura e reduz drasticamente o COP. Além disso, essas simulações são fundamentais para a identificação de padrões complexos de degradação, nos quais os efeitos individuais tornam-se difíceis de distinguir. Assim, os resultados obtidos são particularmente relevantes para o desenvolvimento de métodos avançados de diagnóstico, capazes de identificar falhas múltiplas a partir de indicadores operacionais globais.

3.4. Degradação Global do Sistema

O cenário DegCmpCndVlvEvp representa a condição mais crítica avaliada neste estudo, no qual todos os componentes do sistema de refrigeração foram degradados simultaneamente. Nessa configuração, os fatores DegCmp, DegCnd, DegVlv e DegEvp foram reduzidos progressivamente, simulando um sistema em estágio avançado de envelhecimento, caracterizado por perdas mecânicas, térmicas e de controle de vazão ocorrendo de forma simultânea.

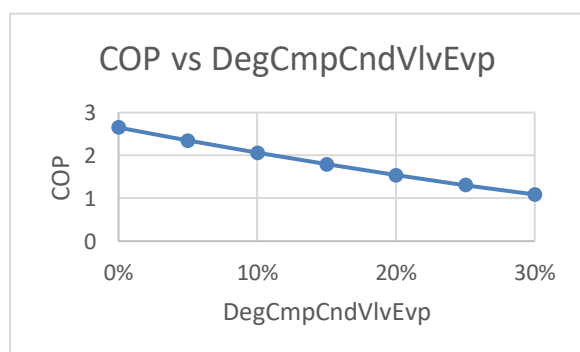


Figura 3: Relação entre o COP e os Componentes do Sistema de Refrigeração com Degradações Global do Sistema. Fonte: Autores.

Esse conjunto de simulações permite identificar os limites operacionais do sistema e os padrões extremos de degradação que resultam em severa perda de desempenho energético e instabilidade

operacional. Os resultados obtidos nesse cenário servem como referência para a caracterização de assinaturas globais de falha, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de diagnóstico preditivo e tomada de decisão em manutenção.

Na Fig. 3, observa-se a variação do coeficiente de desempenho (COP) em função do nível de degradação dos componentes do sistema, variando de 0% a 30%. Nota-se que o COP se comporta de maneira decrescente à medida que a degradação aumenta. Na condição inicial de 0%, o sistema evidencia que à medida que os fatores de degradação são reduzidos progressivamente o COP diminui de forma progressiva, atingindo valores próximos de 1,1 em 30% de degradação. Esse comportamento evidencia que a degradação simultânea de todos os componentes impacta de maneira acumulativa e significativa o desempenho energético do sistema. Dessa forma, a degradação global do sistema representa um cenário crítico de operação, no qual o sistema se aproxima de seus limites operacionais, apresentando não apenas baixa eficiência, mas potencial instabilidade.

De forma geral, as simulações com degradações combinadas evidenciaram que os efeitos observados individualmente não se somam de maneira linear, mas interagem entre si, potencializando as perdas de desempenho. Combinações envolvendo os trocadores de calor e o compressor resultaram nas maiores reduções do COP e nos maiores aumentos do consumo energético, decorrentes do acoplamento entre a perda de eficiência térmica e o aumento do trabalho de compressão.

Nos cenários com degradação simultânea da válvula de expansão e dos trocadores de calor, observaram-se alterações mais pronunciadas na estabilidade do ciclo, com variações no superaquecimento, deslocamento das pressões de operação e maior sensibilidade a perturbações nas condições de carga. O cenário de degradação global sintetiza os comportamentos observados nos casos individuais e combinados, configurando-se como referência para a identificação de padrões extremos de falha e para a validação de estratégias de diagnóstico e manutenção preditiva baseadas em múltiplas variáveis operacionais.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível concluir que a degradação dos componentes altera significativamente o comportamento do ciclo frigorífico, impactando o comportamento do sistema como pressões de operação, vazão mássica do refrigerante, potência de



compressão e coeficiente de desempenho (COP). Notou-se que as degradações ligadas aos trocadores de calor e ao compressor apresentam impactos mais expressivo sobre o consumo energético e sobre a eficiência global do sistema.

Para a realização das análises, foi desenvolvido matematicamente um sistema de refrigeração hipotético utilizando o software GNU Octave, utilizando a biblioteca CoolProp para propriedades termodinâmicas do refrigerante. O modelo computacional mostrou-se uma ferramenta adequada para a simulação da instalação, apresentando resultados satisfatórios e condições operacionais que descrevem com boa proximidade o funcionamento de um sistema de refrigeração real. Além disso, o modelo demonstrou ser robusto e versátil, permitindo a avaliação do desempenho do sistema em diferentes condições de operação, como variações na temperatura ambiente e na temperatura interna da câmara frigorífica, bem como possibilitando a substituição do fluido refrigerante, uma vez que os componentes estão devidamente caracterizados por meio de equações e parâmetros termodinâmicos.

A partir desse modelo, foi aplicada a metodologia de diagnóstico termo econômico, na qual foram inseridas anomalias matematicamente representadas para avaliar seus efeitos nos fluxos energéticos associados à potência elétrica consumida e a capacidade frigorífica do sistema. A análise desses efeitos permite, em um sistema monitorado, identificar o componente degradado ou, ao menos, restringir o diagnóstico a um conjunto provável de componentes com falha, além de avaliar o impacto dessas anomalias sobre o coeficiente de desempenho do sistema.

Além das degradações individuais, os estudos com degradação combinada demonstram que os resultados das falhas não são exclusivamente complementares, mas apresentam interações complexas que podem reforçar as perdas de desempenho do sistema. Nesses cenários, verificou-se maior instabilidade operacional, especialmente quando as degradações envolvem simultaneamente a válvula de expansão e os trocadores de calor, resultando em variações mais pronunciadas no superaquecimento e maior sensibilidade do sistema às condições ambientais e à carga térmica.

Os cenários com degradação simultânea de múltiplos componentes também evidenciaram maior instabilidade operacional, especialmente quando associados à válvula de expansão e aos trocadores de calor. Nessas condições, observam-se variações mais pronunciadas no superaquecimento e maior sensibilidade do sistema às condições ambientais e de carga térmica, o que pode comprometer a eficiência e a confiabilidade do funcionamento do sistema

frigorífico. As variações permitiram estabelecer padrões característicos associados a diferentes tipos de falhas, indicando que a análise dessas grandezas pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz para a identificação de componentes degradados em sistemas monitorados

Assim, desse modo o modelo desenvolvido constitui uma abordagem eficaz para o monitoramento do desempenho e detecção de anomalias com diferentes condições de degradação. O modelo computacional desenvolvido apresenta grande potencial como ferramenta de apoio de análise de falhas, acompanhamento do desempenho energético e desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva em sistemas frigoríficos.

REFERÊNCIAS

- Bell, I. H. et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 6, p. 2498-2508, 2014. DOI: 10.1021/ie4033999.
- Eaton, J. W.; Bateman, D.; Hauberg, S. GNU Octave version 9.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations. [S. l.]: GNU Project, 2023. Disponível em: <https://octave.org/doc/v9.2.0/>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- Mendes, T., Venturini, O.J., Da Silva, J.A.M., Orozco, D.J.R. and Pirani, M.J. "Disaggregation models for the thermoeconomic diagnosis of a vapor compression refrigeration system. *Energy*, 2020.
- Oliveira Jr., S.: Exergy: Production, Cost and Renewability. Springer-Verlag, London (2013).
- Ommen, T., Elmegarrd, B. "Numerical model for thermoeconomic diagnosis in commercial transcritical/subcritical booster refrigeration systems". *Energy Conv. Manag.*, Vol. 60, pp. 161-169, 2012.
- Richardson, D. H., Jiang, H., Lindsay D. & Radermacher, R., 2002. "Optimization of Vapor Compression Systems via Simulation. Proceedings of the 2002 International Refrigeration and Air-Conditioning Conference". Purdue University. International Refrigeration and Air Conditioning Conference | School of Mechanical Engineering | Purdue University. Acesso 06 jan. 2026.