

Análise experimental e desenvolvimento numérico de correlações empíricas para o desempenho energético de um protótipo de refrigeração

Stiven Gutemberg Figueira Rolim¹, Jullyene Stephanie Santos Barbosa², Paulo Rafael Costa Silva³, Alvaro Antonio Ochoa Villa⁴, Sérgio da Silva Franco⁵, Kilvio Alessandro Ferraz⁶, José Ângelo Peixoto da Costa⁷, Gustavo de Novaes Pires Leite⁸, Noelle D'Emery Gomes Silva⁹

¹CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. sgfr@discente.ifpe.edu.br

²CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. jssb@discente.ifpe.edu.br

³CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. prcs@discente.ifpe.edu.br

⁴CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. ochoaalvaro@recife.ifpe.edu.br

⁵CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. sergiofranco@recife.ifpe.edu.br

⁶CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. kilvioferraz@recife.ifpe.edu.br

⁷CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. angelocosta@recife.ifpe.edu.br

⁸CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. gustavonovaes@recife.ifpe.edu.br

⁹CACSEM, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. noellesilva@recife.ifpe.edu.br

Resumo

O presente trabalho visa a análise experimental energética de um protótipo de refrigeração por compressão mecânica de pequeno porte com o intuito de verificar a eficiência energética considerando diversas condições de operação. O sistema de refrigeração tem uma capacidade nominal de aproximadamente 1 kW e utiliza o fluido R404A como refrigerante de trabalho, apresenta uma unidade condensadora com compressor hermético e um evaporador tube in tube. A metodologia experimental abrangeu seis ensaios com duas condições de superaquecimento (5°C e 8°C) e três aberturas de válvula (60%, 80% e 100%), visando avaliar a eficiência energética através do EER (Energy Efficiency Ratio) e do COP (Coefficient of Performance). Correlações empíricas foram desenvolvidas através do método da regressão linear múltipla, utilizando grandezas térmicas (temperatura de sucção, temperatura da solução de etilenoglicol e temperatura de descarga) e elétricas (corrente elétrica, tensão e fator de potência). Os resultados mostraram que a capacidade de refrigeração seguiu um comportamento cíclico devido à histerese do sistema e ao setpoint de -3°C, com um consumo médio de aproximadamente 1,5 kWh. As correlações empíricas provaram ser eficazes na determinação do comportamento do sistema de refrigeração, apresentando erros relativos menores que 3% quando comparadas aos valores calculados. Este estudo propõe um procedimento inovador que pode ser aplicado para melhorar a eficiência energética de sistemas de refrigeração, oferecendo benefícios operacionais, funcionais e redução de custos.

Palavras-chave: Superaquecimento; Refrigeração; EER; COP;

Abstract

The present work aims to analyze the experimental energy of a small mechanical compression refrigeration prototype to verify energy efficiency by considering different operating conditions. The refrigeration system has a nominal capacity of approximately 1 kW and uses R404A fluid as the working refrigerant; it features a condensing unit with a hermetic compressor and a tube-in-tube evaporator. The experimental methodology covered six tests with two superheating conditions (5°C and 8°C) and three valve openings (60%, 80%, and 100%), aiming to assess the energy efficiency through the EER (Energy Efficiency Ratio) and COP (Coefficient of Performance). Empirical correlations were developed using the multiple linear regression method: thermal (suction temperature, ethylene glycol solution temperature, and discharge temperature) and electrical (electric current, voltage, and power factor) quantities. The results showed that the refrigeration capacity followed a cyclical behavior due to the system hysteresis and the setpoint of -3°C, with an average consumption of approximately 1.5 kWh. Empirical correlations proved to be effective in determining the behavior of the refrigeration system, presenting relative errors of less than 3% when compared to calculated values. This study proposes an innovative procedure that can be applied to improve the energy efficiency of refrigeration systems, offering operational and functional benefits and cost reduction.

Keywords: Superheating; Refrigeration; EER; COP.

1. Introdução

A refrigeração em si desempenha um papel crucial em muitos aspectos, seja na medicina para conservação de vacinas, indústria alimentícia para preservação de alimentos, para uso industrial ou até mesmo para conforto humano em residenciais ou comerciais. Logo, é uma utilização usual do nosso meio e de custo elevado, seja pelo consumo dos refrigeradores ou da tarifa de energia elétrica. Portanto, é notável que se deseja uma economia dos consumidores desses sistemas de refrigeração. Como por exemplo, a utilização do superaquecimento ideal para sistemas de refrigeração é uma alternativa que pode aumentar a eficiência energética do refrigerador e, portanto, aumentar a economia e otimizar o desempenho dos sistemas [1].

Para alcançar a eficiência máxima do sistema, é essencial que o superaquecimento permaneça dentro da faixa de operação adequada. Portanto, um controle eficaz que mantenha o superaquecimento dentro dessa faixa ideal tem sido objeto de estudos e comparações. Diversos fatores podem influenciar o deslocamento do superaquecimento para fora da faixa de trabalho desejada, levando à realização de simulações com diferentes configurações para avaliação e estudo do melhor controle disponível [2]. Portanto, um controle eficaz aumenta a estabilidade do processo de refrigeração diante de perturbações e prolonga o tempo de operação nominal do sistema [3], [4]. Nos sistemas de refrigeração, a Razão de Eficiência Energética (ERR) é comumente utilizada como métrica para avaliar a eficiência após alterações no controle ou na carga do fluido refrigerante [5]. Essa razão é calculada como a relação entre a capacidade de refrigeração e o total de energia consumida.

Uma forma de aprimoramento de controle em sistemas de refrigeração é a caracterização da operação de forma simplificada através de correlações que permitam prever o comportamento desses sistemas. Uma forma aplicada é a utilização de regressão múltipla seja linear [6], [7] ou não linear [8]. Esta técnica expande a regressão linear simples, que considera apenas uma variável independente, permitindo a análise simultânea de múltiplos fatores que podem influenciar a variável de interesse [9].

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um procedimento e estratégia de operação eficiente para aumentar o COP e EER através da modificação otimizada do superaquecimento e da abertura da válvula eletrônica. Portanto, este trabalho tem por novidade principal a identificação de estratégias eficazes para melhorar a eficiência energética de sistemas de refrigeração, proporcionando benefícios em termos de operação e funcionalidade, o que levará à redução de custos e operação.

2. Metodologia

Nesta seção será abordado o aparato e procedimento experimental, instrumentos e sensores utilizados, parâmetros coletados, assim como a metodologia de desenvolvimento das correlações empíricas. Este estudo foi direcionado à investigação do desempenho energético de um protótipo de refrigeração de ciclo por compressão de vapor. A escolha deste tipo de metodologia está vinculada à sua relevância prática e à possibilidade de replicação em sistemas industriais.

2.1. Aparato Experimental

Foi desenvolvido um protótipo de sistema de refrigeração de ciclo por compressão mecânica, Figura 1.



Figura 1. Protótipo de experimental de refrigeração. Fonte: elaboração própria.

Este protótipo possui os seguintes componentes principais, tais como: compressor, condensador, válvula de expansão, evaporadora tube in tube, resistência e bombas hidráulicas. O sistema utiliza o R-404A como fluido refrigerante e possui capacidade nominal aproximada de 1,00 kW. Além disso, o protótipo possui um circuito secundário, onde escoa uma solução de etilenoglicol a 50%, dimensionado com o objetivo de simular um sistema de fluido gelado para sistemas de refrigeração. Este circuito possui bombas, reservatório e resistências elétricas para simular a carga térmica do sistema. O protótipo foi projetado e equipado com instrumentação para a medição de diversos parâmetros, tais como: temperaturas, pressões, corrente elétrica, tensão, fator de potência, consumo energético, vazão da solução de etilenoglicol e umidade relativa. Todos esses dados são monitorados por meio de um sistema supervisão automatizado. A figura indica os principais

componentes utilizados no sistema com funções específicas:

1. Monitor 20”;
2. Tanque de água gelada;
3. Trocador de Calor Tube-in-Tube: indispensável na troca térmica entre os fluidos;
4. Condensador: Responsável pela dissipação do calor absorvido do sistema;
5. Placa de Arduino Uno
6. Painel de Controle - Supervisório;
7. Dispositivo de Expansão Eletrônica: Controla a quantidade de fluido refrigerante que entra no evaporador;
8. Compressor: Fundamental para a compressão do fluido refrigerante;
9. Eletrobomba de 34W: Garante a circulação do fluido secundário;
10. Resistências Elétricas: Simulam cargas térmicas para testes.

2.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental desenvolvido para a execução dos testes apresenta os seguintes passos:

- i. Inicialmente é dado o Start no sistema de refrigeração, onde é acionado o compressor para dar início ao processo comprimindo o fluido refrigerante, e, portanto, iniciar o processo de refrigeração, onde o sistema passará pelo período transiente até chegar a atingir o setpoint de operação (-3°C), sem carga térmica,
- ii. Seguidamente, após atingir o setpoint, é acionada a carga térmica, os dados de consumo obtidos, com duração de 2 horas de monitoramento e uma histerese de 5°C .
- iii. Finalmente, ao atingir -3°C , o circuito desliga novamente, onde será iniciado o processo de religamento do compressor devido ao aumento da temperatura do setpoint (atingir um valor de 2°C), e dessa forma, fazer o processo cíclico de refrigeração, ligando e desligando dentro os vales da histerese e o setpoint estabelecido.

A tabela 1, detalha as condições gerais de operação do experimento.

Tabela 1. Parâmetros de operação.

| Variáveis | Valores | Justificativa |
|----------------------|---|-----------------------------------|
| SetPoint de Operação | -3°C | Definição da Temperatura desejada |
| Histerese | 5°C | Diferencial de Temperatura |
| Superaquecimento | $5^{\circ}\text{C} / 8^{\circ}\text{C}$ | Variação do Superaquecimento |
| Abertura de Válvula | 60%/80%/100% | Variação de Abertura de Válvula |

| | | |
|-------------------------|---------|-------------------------------|
| Tempo Total de Operação | 3 Horas | Tempo de execução dos ensaios |
| Tempo com Carga Térmica | 2 Horas | Tempo de coleta dos dados |

Fonte: elaboração própria.

A figura 2 mostra os ensaios executados neste estudo.

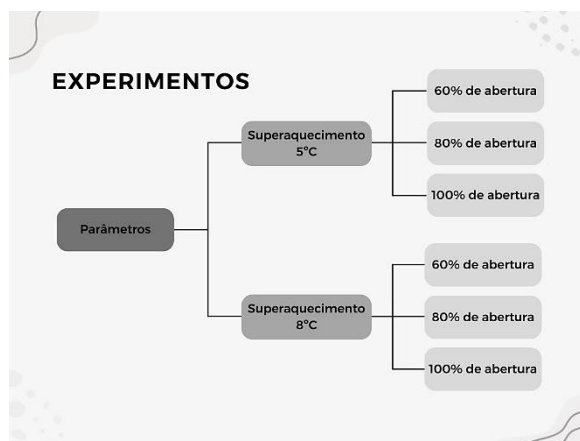


Figura 2. Fluxograma dos ensaios executados. Fonte: elaboração própria.

Baseado na figura 2, pode-se visualizar que o estudo considerou 6 ensaios gerais, variando as condições de operação com o superaquecimento do protótipo (5°C e 8°C) e a abertura da válvula de expansão eletrônica (60%, 80% e 100%).

2.3. Aquisição dos dados

Os instrumentos utilizados para medição dos valores de temperatura, pressão, umidade e valores elétricos, estão vinculados ao sistema supervisório do protótipo de refrigeração, são registrados automaticamente pelo Sitrad. Todas as especificações dos sensores e instrumentos foram extraídas do trabalho de [4].

A vazão é calculada por um código computacional e cada interação é registrada a cada 10 segundos em L por minuto através de uma placa Arduino Uno.

A tabela 2 mostra as incertezas das grandezas físicas

Tabela 2. Incertezas das grandezas físicas do experimento.

| Variáveis | Valores |
|---|--|
| Temperatura (-10° a 100°C) | $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ |
| Pressão de sucção | $\pm 21\text{kPa}$ |
| Pressão de descarga | $\pm 55\text{kPa}$ |
| Superaquecimento | $(90-214\text{ kPa}) \pm 2^{\circ}\text{C} / (214\text{ kPa}-483\text{kPa}) \pm 1^{\circ}\text{C}$ |
| Massa | $\pm 0,2\text{kg}$ |

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Consumo energético | $\pm 5\text{W.h}$ |
| Corrente elétrica | $(0 - 10\text{A}) \pm 0,05\text{A}$ |

Fonte: [4]

2.4. Determinação do COP e EER

O Coeficiente de Performance (COP) é utilizado para avaliar a eficiência do protótipo de refrigeração, definida como a relação entre a capacidade de remoção de calor do equipamento (energia útil) e a potência necessária pelo compressor (energia consumida) [3]

A eficiência energética do sistema de refrigeração, representada pela razão de eficiência energética (EER), pode ser determinada pela relação entre a capacidade de refrigeração e o consumo total de energia [10], [11]. Segundo Setiyo et al. [11], esta abordagem oferece uma maneira de avaliar o desempenho energético do sistema de refrigeração. O EER é a razão entre a capacidade de refrigeração em BTUs por hora e a energia elétrica consumida em watts.

As equações 1 até 4 foram utilizadas para determinar o COP e o EER:

$$Q_{ev} = \dot{m}_1 \cdot \Delta H \quad (1)$$

$$COP_{elet} = \frac{Q_{ev}}{P_{\text{útil}}} \quad (2)$$

$$COP_{Term} = \frac{Q_{ev}}{\dot{m}_2 \cdot (h_{descarga} - h_{sucção\ evap})} \quad (3)$$

$$EER = \frac{Q_{ev} \cdot \text{tempo} \cdot FT}{E_{\text{útil}}} \quad (4)$$

Onde:

FT: Fator de conversão de kW a Btu/hr (3,413)

\dot{m}_1 : Vazão Mássica

COP – Coeficiente de Performance

Q_{ev} : Calor do evaporador

$P_{\text{útil}}$: Potência útil

$E_{\text{útil}}$: Energia útil

ΔH : Variação das entalpias

2.5. Modelagem Estatística dos Dados

O desenvolvimento das correlações empíricas foi realizado através de uma análise linear múltipla considerando grandezas independentes (X) e um parâmetro dependente (Y) [12]–[15].

O modelo matemático básico da regressão linear múltipla é representado pela equação 7:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \epsilon \quad (7)$$

Onde Y é a variável dependente, $X_1 \dots X_n$ são as variáveis independentes, β_0 é o intercepto, $\beta_1 \dots \beta_n$

Os parâmetros das análises estatísticas de regressão, foram escolhidos levando em consideração a facilidade de medição direta das grandezas no protótipo de refrigeração, tabela 3.

Foram selecionados o COP e o EER como parâmetros dependentes, e considerando parâmetros térmicos e elétricos como independentes. Todas as análises foram realizadas com 95% de confiabilidade estatística.

Tabela 3. Parâmetros escolhidos.

| Parâmetros selecionados | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Térmicos | Elétricos |
| Temperatura de Sucção do evaporador | Corrente |
| Temperatura de solução do Cooler | Tensão |
| Temperatura de descarga | Fator de Potência |

Fonte: elaboração própria.

A figura 3 mostra o fluxograma de desenvolvimento das correlações empíricas no protótipo de refrigeração.



Figura 3. Fluxograma de desenvolvimento das correlações empíricas. Fonte: elaboração própria.

Para avaliar o desempenho das correlações, foram utilizadas as seguintes métricas, tais como: R^2 (Coeficiente de determinação), F de significância, p-valor da hipótese ANOVA e coeficientes de regressão para cada parâmetro escolhido. Foi analisado as superfícies de tendência, envolvendo a análise de variância e o teste F. A variação total é decomposta em duas partes: uma explicada pela regressão e outra não explicada, representada pelos resíduos. Utilizou-se, uma tabela da distribuição F com os graus de liberdade do numerador e denominador para se determinar o valor de F crítico. Porém, foi utilizado, o valor diretamente a partir do valor-p (α) conforme o valor de F observado, usando a função pf (), equação 8, entretanto.

$$Valor_p = 1 - pf(F_{observado}, df1 = (nc - 1), df2 = n - nc) \quad (8)$$

Finalmente, foi calculado o COP e o EER estimado, assim como o erro relativo em relação ao calculado pelas correlações empíricas.

3. Análise e discussão dos Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais relacionado com o protótipo de refrigeração, através de os seguintes itens:

- *Comportamento energético do protótipo de refrigeração considerando as temperaturas, pressões de alta e baixa, potência ativa e consumo real;*
- *Análise comparativa do COP e EER em regime dinâmico através dos dados experimentais e obtidos pelas correlações empíricas;*

3.1. Comportamento energético do protótipo de refrigeração

A figura 5 mostra o comportamento das temperaturas (sucção, descarga, linha de líquido e ambiente) ao longo do período de operação do protótipo de refrigeração considerando um superaquecimento 5°C e abertura da válvula eletrônica de 60%.

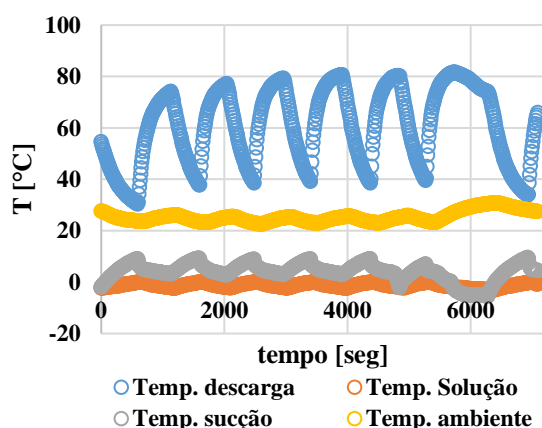


Figura 5. Temperatura do protótipo de refrigeração. Fonte: elaboração própria.

Pode ser observado, Figura 5, que o sistema apresenta um comportamento cíclico, on e off, ao longo do período de operação, em função do setpoint de operação. Durante o período (on), do protótipo a temperatura de descarga aumenta o valor, e, pelo contrário, a temperatura de sucção tende a diminuir até atingir o setpoint estabelecido (-3°C), onde o sistema será desligado (off), e as temperaturas apresentam um comportamento inverso, ou seja, a temperatura de descarga tende a diminuir (resfriar), e a temperatura de sucção aumenta, tentando entrar em equilíbrio com o sistema. Pode também, ser verificado que a temperatura ambiente (laboratório) tende a ficar constante ao longo do processo, com o intuito de evitar interferir no comportamento do sistema. Este processo cíclico está relacionado com a compressão do fluido refrigerante para atender uma demanda energética

vinculada ao setpoint da máquina. Este tipo de fenômeno também é verificado através do comportamento das pressões do protótipo, Figura 6, onde, ao igual que nas temperaturas de descarga e sucção, foram afetadas com a ligação do protótipo (sistema de compressão), pressão de descarga aumenta com a compressão do fluido refrigerante e, a pressão de sucção, tende a diminuir com o intuito de atender baixar a temperatura de evaporação até o setpoint do sistema para atender a capacidade de refrigeração.

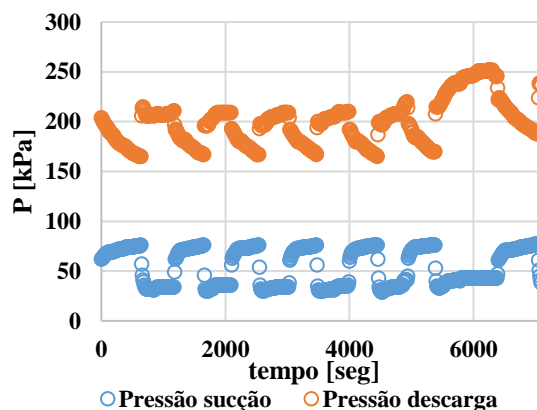


Figura 6. Pressão de operação do protótipo de refrigeração. Fonte: elaboração própria.

A Figura 7 mostra o comportamento da capacidade de refrigeração ao longo do período de operação do protótipo de refrigeração. É possível observar que o comportamento da capacidade de refrigeração é similar ao comportamento das temperaturas e pressões de operação do protótipo de refrigeração, ou seja, um processo cíclico, onde os valores máximos estão relacionados com a capacidade de refrigeração quando o sistema atinge o setpoint estabelecido (-3°C) com valor máximo de 1,6 kW, aproximadamente, e, por outro lado, o valor mínimo quando o compressor está a ponto de ser acionado em função do aumento da temperatura de evaporação, e há uma queda da capacidade de refrigeração, com valor aproximado de 0,2 kW.

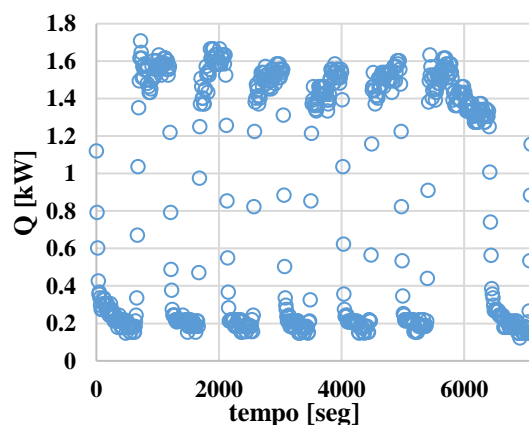


Figura 7. Comportamento da capacidade de refrigeração do protótipo. Fonte: elaboração própria.

A Figura 8 mostra a energia ativa média consumida pelo protótipo de refrigeração, com valor médio de 1,5 kWh. Este valor reflete a quantidade de energia elétrica utilizada para manter o sistema em operação.

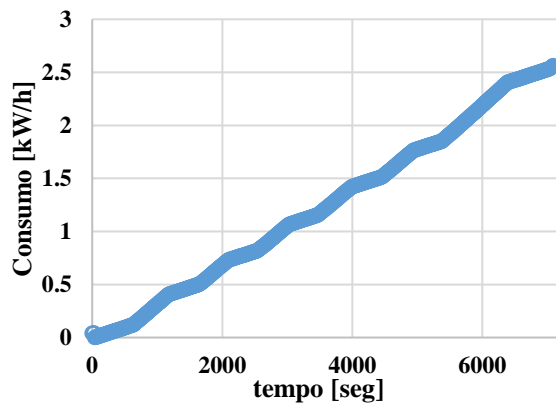


Figura 8. Energia consumida pelo sistema. Fonte: elaboração própria.

A potência ativa média do sistema foi de 1,5 kW/h, aproximadamente.

3.2. Análise comparativa do COP e EER

As correlações empíricas desenvolvidas têm como objetivo prever o comportamento geral do protótipo de refrigeração em função de parâmetros diretamente medidos, tais como, temperaturas, e grandezas elétricas que possam representar o controle estimado do sistema.

A figura 9 mostra a comparação do perfil do COP em função da correlação empírica considerando os parâmetros térmicos.

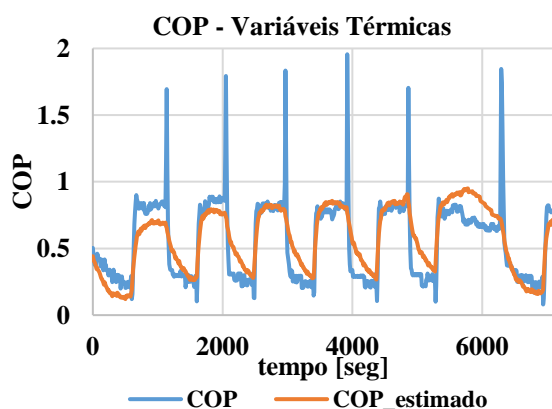


Figura 9. Perfis do COP em função dos valores estimados e calculados utilizando as grandezas térmicas. Fonte: elaboração própria.

Ao longo da figura 9, observa-se um bom ajuste da correlação empírica com os parâmetros térmicos (temperaturas de sucção, descarga e de linha de líquido), grandezas que podem ser facilmente medidas com sensores de temperatura. Isso poderia possibilitar um controle mais simplificado na otimização da eficiência do sistema de refrigeração, considerando exclusivamente essas variáveis diretamente medidas.

A figura 10 mostra a comparação do perfil do COP em função da correlação empírica considerando os parâmetros elétricos.

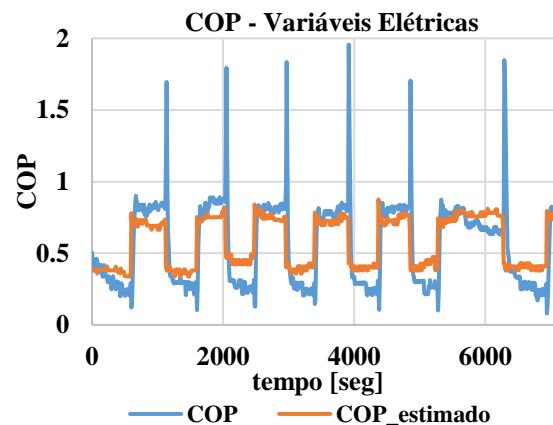


Figura 10. Perfis do COP em função dos valores estimados e calculados utilizando as grandezas elétricas. Fonte: elaboração própria.

É possível observar que há picos em cada ciclo (on-off) na curva do COP experimental, ocorrendo em um período muito curto de tempo (menor que 60 segundos), devido à inércia elétrica do sistema, histerese no sistema, entre outros fatores. No entanto, esse tipo de pico não é interpretado pela curva estimada com base na regressão multivariada, que ajusta para o conjunto total da amostra. Isso faz com que esses valores não sejam inseridos na correlação, resultando em um erro residual maior nesses períodos. Contudo, considerando que, na maior parte do tempo, a operação da máquina ocorre dentro do ciclo (COP entre 0,2 e 0,7), as correlações permitem prever com coerência o COP final no processo de refrigeração do protótipo analisado.

As figuras 11 e 12 mostram a comparação dos perfis do EER em função da correlação empírica considerando os parâmetros térmicos e elétricos, respectivamente.

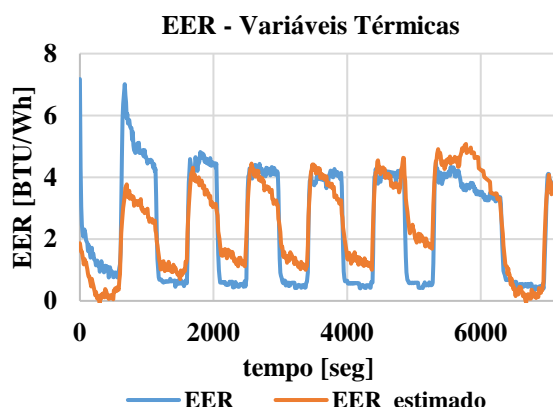


Figura 11. Perfis do EER em função dos valores estimados e calculados utilizando as grandezas térmicas. Fonte: elaboração própria.

No caso das correlações do EER o comportamento é mais ajustado para a operação do protótipo de refrigeração, com certa divergência ao início dos primeira hora de análise, em função da estabilidade da operação. Esta divergência é maior com a correlação empírica a partir dos parâmetros térmicos, que apresentam uma maior inércia de resposta, e de menor divergência com os parâmetros elétricos. Porém, ambas as correlações conseguem estimar o comportamento geral do EER do protótipo de refrigeração, a partir de parâmetros simples de medição.

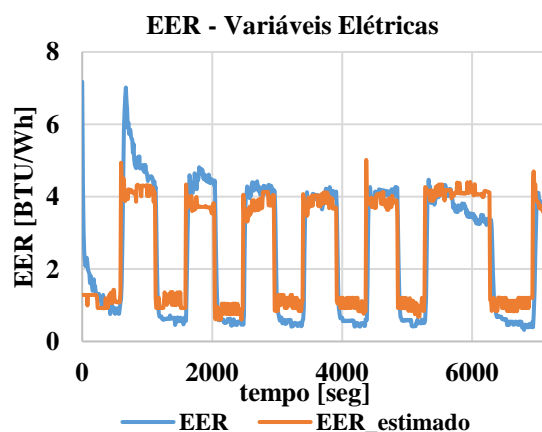


Figura 12. Perfis do EER em função dos valores estimados e calculados utilizando as grandezas elétricas. Fonte: elaboração própria.

As tabelas 4 e 5 mostram os valores médios do COP e EER calculados e obtidos através das correlações empíricas desenvolvidas pela de regressão linear múltipla (equações 1 e 2). Os COP e EER médio estimado e o erro percentual foram os valores encontrados após verificação das variáveis independentes (X_n) térmicas e elétricas e sua influência na determinação do COP e EER (Y).

Tabela 4. Valores médios do COP.

| Parâmetro Térmico | Parâmetro Elétrico |
|----------------------------|---------------------------|
| COP médio calculado: 0,557 | |
| COP médio estimado: 0,571 | COP médio estimado: 0,576 |
| Erro Relativo: 2,54% | Erro Relativo: 3,28% |

Fonte: elaboração própria.

Os erros relativos giram em torno de 3,00% na estimativa do COP utilizando as grandezas térmicas e as grandezas elétricas. Por outro lado, para o EER, os erros relativos ficaram em torno de 2,00% utilizando as grandezas térmicas e de 3,00 para as grandezas elétricas.

Tabela 5. Valores médios do EER.

| Parâmetro Térmico | Parâmetro Elétrico |
|---------------------------|--------------------------|
| EER médio calculado: 2,46 | |
| EER médio estimado: 2,50 | EER médio estimado: 2,53 |
| Erro Relativo: 1,472% | Erro Relativo: 2,68% |

Fonte: elaboração própria.

Assim, é possível concluir que as correlações empíricas desenvolvidas por meio da regressão linear múltipla permitem estimar adequadamente o processo de refrigeração do protótipo, mesmo considerando diversas perturbações no sistema, como variações no superaquecimento e abertura da válvula, com boa concordância. Essa metodologia pode ser aplicada a outros sistemas de refrigeração comerciais e industriais, permitindo a adequação dos controles operacionais com base em grandezas térmicas e elétricas para determinar as melhores condições de eficiência energética por meio do COP e EER.

4. Conclusão

Este estudo apresentou a análise da performance de um protótipo de refrigeração de pequeno porte e o desenvolvimento de correlações empíricas em função de variáveis de medição direta. Dentre as principais conclusões, tem-se:

- ✓ O controle do superaquecimento dentro da faixa de operação adequada foi essencial para atingir a máxima eficiência do sistema;
- ✓ As correlações empíricas desenvolvidas através da regressão linear múltipla se mostraram eficazes na estimativa do comportamento do sistema de refrigeração do

protótipo através do COP e EER, já que os erros relativos foram menores ao 3%, quando comparadas aos valores calculados;

- ✓ A utilização de grandezas térmicas e elétricas nas correlações empíricas demonstrou uma boa capacidade de prever o comportamento do protótipo sob diversas condições de operação, incluindo variações no superaquecimento e na abertura da válvula. Isso indica que a metodologia empregada pode ser aplicada a outros sistemas de refrigeração comerciais e industriais;
- ✓ O procedimento implementado neste estudo pode ser utilizado para melhorar a eficiência energética de sistemas de refrigeração, pois a caracterização simplificada da operação por meio de correlações empíricas oferece benefícios em termos de operação, funcionalidade e redução de custos operacionais.

5. Agradecimentos

O primeiro e segundo autor agradecem ao CNPq pelas bolsas PIBIC. O quarto e quinto autor agradecem ao CNPq pelas Bolsas de Produtividade 3303417/2022-6 e 303200/2023-5. Todos os autores agradecem à empresa *Fullgauge* e ao IFPE pelo apoio no desenvolvimento deste projeto. Os autores agradecem também ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa - Universal 402323/2016-5.

6. Referências

- [1] G. Lychnos and Z. Tamainot-Telto, "Prototype of hybrid refrigeration system using refrigerant R723," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, pp. 95–106, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.103.
- [2] W. L. Luyben, "Control of compression refrigeration processes with superheat or saturated boiling," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 138, no. February, pp. 97–110, 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.03.005.
- [3] S. S. . Franco *et al.*, "Análise experimental do desempenho de um protótipo de refrigeração por compressão mecânica para conservação de alimentos através do uso de dispositivos de expansão Termostática e eletrônica," in *CONBRAVA ANAIS 2019*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 1–23.
- [4] S. F. . Silva, J. R. . Henríquez, A. A. V. . Ochoa, J. A. P. . da Costa, and K. A. Ferraz, "Thermal analysis and development of PID control for electronic expansion device of vapor compression refrigeration systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 206, no. January, p. 118130, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118130.
- [5] Á. Andrade, Á. Restrepo, and J. E. Tibaquirá, "EER or Fcsp: A performance analysis of fixed and variable air conditioning at different cooling thermal conditions," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 537–545, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2020.12.041.
- [6] J. C. P. França, T. F. do N. Melo, and T. M. Vargas, "Modelo de regressão linear múltipla e aplicações / Multiple linear regression model and applications," *Brazilian J. Dev.*, vol. 7, no. 7, pp. 74294–74313, 2021, doi: 10.34117/bjdv7n7-555.
- [7] S. K. Park, H. J. Moon, K. C. Min, C. Hwang, and S. Kim, "Application of a multiple linear regression and an artificial neural network model for the heating performance analysis and hourly prediction of a large-scale ground source heat pump system," *Energy Build.*, vol. 165, pp. 206–215, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.029.
- [8] M. Marčiukaitis, I. Žutautaitė, L. Martišauskas, B. Jokšas, G. Gecevičius, and A. Sfetsos, "Non-linear regression model for wind turbine power curve," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 732–741, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.06.039.
- [9] F. S. Suzuki *et al.*, "Multivariate linear regression analysis to evaluate multiple-set performance in active and inactive individuals," *Motriz. Rev. Educ. Fis.*, vol. 25, no. 2, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1590/s1980-6574201900010008.
- [10] F. J. S. Velasco, F. Illán-Gómez, and J. R. García-Cascales, "Energy efficiency evaluation of the use of R513A as a drop-in replacement for R134a in a water chiller with a minichannel condenser for air-conditioning applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 182, no. June 2020, p. 115915, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115915.
- [11] M. Setiyo, B. C. Purnomo, B. Waluyo, D. R. B. Syaka, and N. Hamidi, "Refrigeration effect and energy efficiency ratio (EER) calculation of 1/2 cycle refrigeration system on LPG-fueled vehicles," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 403, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/403/1/012087.
- [12] P. Shine, T. Scully, J. Upton, and M. D. Murphy, "Multiple linear regression modelling of on-farm direct water and electricity consumption on pasture based dairy farms," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 148, no. December 2017, pp. 337–346, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.02.020.
- [13] C. Fan and Y. Ding, "Cooling load prediction and optimal operation of HVAC systems using a multiple nonlinear regression model," *Energy Build.*, vol. 197, pp. 7–17, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.043.

- [14] J. C. Bruno, A. Coronas, and M. Puig-arnavat, “Analysis and parameter identification for characteristic equations of single- and double-effect absorption chillers by means of multivariable regression ` tres pour les e ´ quations L ´ analyse et l ´ identification des paramet ´ ristiques des machines a ´,” vol. 33, pp. 70–78, 2010, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.08.005.
- [15] P. Marti-Puig, A. Blanco-M, J. J. Cárdenas, J. Cusidó, and J. Solé-Casals, “Effects of the pre-processing algorithms in fault diagnosis of wind turbines,” *Environ. Model. Softw.*, no. February 2017, pp. 119–128, 2018, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.05.002.