

### INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO COP DE CICLOS DE REFRIGERAÇÃO COM HIDROCARBONETOS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE R1270, R290 E R600a

**Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior<sup>1</sup>;**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/7353332474621022>

**João Lucas Araujo Rodrigues<sup>2</sup>;**

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/2507467174226667>

**Cleiton Rubens Formiga Barbosa<sup>3</sup>;**

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/8673332414572221>

**Wertson da Silva Resende<sup>4</sup>;**

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/7019247555052826>

**Edilson Marinho da Silva Junior<sup>5</sup>;**

<sup>5</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/5756262238802260>

**Arthur Souza Lyra<sup>6</sup>;**

<sup>6</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/2507467174226667>

**Thiago da Silva André<sup>7</sup>;**

<sup>7</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/4001624102117533>

**Rafael Matos de Souza<sup>8</sup>.**

<sup>8</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<http://lattes.cnpq.br/2516264409112362>

**RESUMO:** A crescente demanda por sistemas de refrigeração energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado a adoção de fluidos refrigerantes naturais, entre os quais os hidrocarbonetos se destacam por apresentarem potencial de aquecimento global (GWP) reduzido, potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) nulo e elevada eficiência termodinâmica. Nesse contexto, este estudo realiza uma análise comparativa da performance de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor operando com propileno (R1270), propano (R290) e isobutano (R600a), avaliando a influência individual de parâmetros operacionais sobre o coeficiente de performance (COP). As simulações foram conduzidas no software CoolPack, adotando-se um ciclo de referência e variando sistematicamente temperatura de condensação, temperatura de evaporação, graus de superaquecimento e subresfriamento, quedas de pressão no evaporador, condensador e nas linhas de sucção, líquido e descarga, além da eficiência isoentrópica do compressor. Os resultados indicam que a temperatura de evaporação, a temperatura de condensação e a eficiência isoentrópica constituem os parâmetros de maior impacto sobre o COP, enquanto as perdas de carga e os graus térmicos exercem influência moderada no desempenho global. A análise comparativa mostra que os refrigerantes (R1270, R290 e R600a) seguem padrões de resposta semelhantes, porém com pequenas variações numéricas no COP, o que reforça a importância da seleção adequada do refrigerante conforme as condições de operação. Esses achados evidenciam a sensibilidade do ciclo às condições operacionais e contribuem para o desenvolvimento de soluções frigoríficas mais eficientes e alinhadas às exigências ambientais contemporâneas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Refrigerantes hidrocarbonetos. Ciclo de compressão de vapor. Simulação termodinâmica. Coeficiente de performance (COP). Sustentabilidade ambiental.

### **INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS ON THE COP OF REFRIGERATION CYCLES WITH HYDROCARBONS: A COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN R1270, R290 AND R600a**

**ABSTRACT:** The growing demand for energy-efficient and environmentally sustainable refrigeration systems has driven the adoption of natural refrigerants, among which hydrocarbons stand out for their reduced global warming potential (GWP), zero ozone depletion potential (ODP), and high thermodynamic efficiency. In this context, this study performs a comparative analysis of the performance of a vapor compression refrigeration cycle operating with propylene (R1270), propane (R290), and isobutane (R600a), evaluating the individual influence of operational parameters on the coefficient of performance (COP). The simulations were conducted using CoolPack software, adopting a reference cycle and systematically varying condensation temperature, evaporation temperature, degrees of superheating and subcooling, pressure drops in the evaporator, condenser, and suction, liquid, and discharge lines, as well as the isentropic efficiency of the compressor. The

results indicate that evaporation temperature, condensation temperature, and isentropic efficiency are the parameters with the greatest impact on COP, while pressure drops and thermal degrees exert a moderate influence on overall performance. Comparative analysis shows that the refrigerants (R1270, R290, and R600a) follow similar response patterns, but with small numerical variations in COP, which reinforces the importance of selecting the appropriate refrigerant according to operating conditions. These findings highlight the sensitivity of the cycle to operating conditions and contribute to the development of more efficient refrigeration solutions aligned with contemporary environmental requirements.

**KEY-WORDS:** Hydrocarbon refrigerants. Vapor compression cycle. Thermodynamic simulation. Coefficient of performance (COP). Environmental sustainability.

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor desempenham papel fundamental em aplicações domésticas, comerciais e industriais, sendo essenciais para conservação de alimentos, climatização e diversos processos produtivos. Durante décadas, esses sistemas utilizaram predominantemente refrigerantes sintéticos, como CFCs, HCFCs e HFCs, cuja ampla difusão ocorreu devido às suas propriedades termodinâmicas favoráveis. Entretanto, estudos recentes evidenciaram que muitos desses compostos apresentam elevado potencial de aquecimento global (GWP) e, em alguns casos, potencial de destruição da camada de ozônio (ODP), contribuindo para impactos ambientais significativos (ZHANG et al., 2021; RAJAN; JAIN, 2022).

A partir desse cenário, acordos internacionais como o Protocolo de Montreal e a Emenda de Kigali impulsionaram a substituição de refrigerantes sintéticos por alternativas naturais de menor impacto climático. Entre essas alternativas, os hidrocarbonetos — como o propano (R290), o isobutano (R600a) e o propileno (R1270) — têm se destacado por apresentarem ODP nulo, GWP reduzido e desempenho termodinâmico competitivo, além de crescente aceitação em sistemas frigoríficos modernos (LI et al., 2023; SINGH; KUMAR, 2024).

Com o avanço do uso desses fluidos, torna-se essencial compreender como variáveis operacionais influenciam o comportamento termodinâmico dos ciclos de refrigeração. A simulação computacional tem se mostrado uma ferramenta eficaz para esse propósito, permitindo avaliar de forma controlada o efeito de parâmetros como temperaturas de evaporação e condensação, graus térmicos, quedas de pressão e eficiência isoentrópica do compressor. Estudos recentes destacam que análises paramétricas são fundamentais para otimizar o coeficiente de performance (COP) e orientar o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e sustentáveis (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023).

Nesse contexto, o presente trabalho investiga, por meio do software CoolPack, a influência de variáveis operacionais no desempenho energético de um ciclo de refrigeração utilizando os hidrocarbonetos R1270, R290 e R600a, contribuindo para o aprimoramento de estratégias de projeto e operação de sistemas frigoríficos baseados em refrigerantes naturais.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor operando com os hidrocarbonetos R1270, R290 e R600a, por meio de simulações termodinâmicas no software CoolPack. Busca-se avaliar a influência individual de parâmetros operacionais — como temperaturas de evaporação e condensação, graus de superaquecimento e subresfriamento, quedas de pressão em componentes e tubulações e eficiência isoentrópica do compressor — sobre o coeficiente de performance (COP), identificando as variáveis de maior impacto e a resposta de cada refrigerante às condições de operação.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na simulação termodinâmica de ciclos de refrigeração por compressão de vapor utilizando os hidrocarbonetos propileno (R1270), propano (R290) e isobutano (R600a) como fluidos refrigerantes. As simulações foram realizadas no software CoolPack, ferramenta amplamente utilizada em pesquisas acadêmicas e industriais por sua precisão na representação de propriedades termodinâmicas, processos de compressão, expansão e trocas térmicas em sistemas frigoríficos (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023).

Inicialmente, foi estabelecido um ciclo de referência (Figura 1) representativo de aplicações de refrigeração operando em condições típicas de temperatura de evaporação elevada, conforme recomendações técnicas presentes na literatura especializada e em normas de projeto. A partir desse ciclo base, procedeu-se à variação sistemática de dez parâmetros operacionais selecionados por sua relevância no desempenho energético de sistemas de compressão de vapor (ÇENGEL; BOLES, 2013; RAJAN; JAIN, 2022).

Os parâmetros operacionais da Tabela 1, objeto desse estudo foram: (i) temperatura de evaporação; (ii) temperatura de condensação; (iii) grau de superaquecimento; (iv) grau de subresfriamento; (v) queda de pressão no evaporador; (vi) queda de pressão no condensador; (vii) queda de pressão na linha de sucção; (viii) queda de pressão na linha de líquido; (ix) queda de pressão na linha de descarga; e (x) eficiência isoentrópica do compressor. Para cada variável, definiu-se um intervalo de operação e incrementos constantes, permitindo avaliar isoladamente o efeito de cada parâmetro sobre o coeficiente de performance (COP) e sobre o comportamento termodinâmico do ciclo.

Essa abordagem paramétrica possibilita identificar a sensibilidade do ciclo às condições operacionais e comparar a resposta dos três hidrocarbonetos sob as mesmas variações, conforme recomendado em estudos recentes sobre simulação de sistemas frigoríficos com refrigerantes naturais (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023; SINGH; KUMAR, 2024).

Os resultados foram obtidos diretamente das rotinas de cálculo do CoolPack, assegurando consistência termodinâmica e reprodutibilidade. A comparação entre o ciclo de referência e os ciclos modificados permitiu quantificar o impacto individual de cada variável, contribuindo para uma compreensão aprofundada do comportamento dos refrigerantes R1270, R290 e R600a e para o desenvolvimento de estratégias de operação mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

**Tabela 1.** Ciclo frigorífico de referência e parâmetros para simulação no Coolpack.

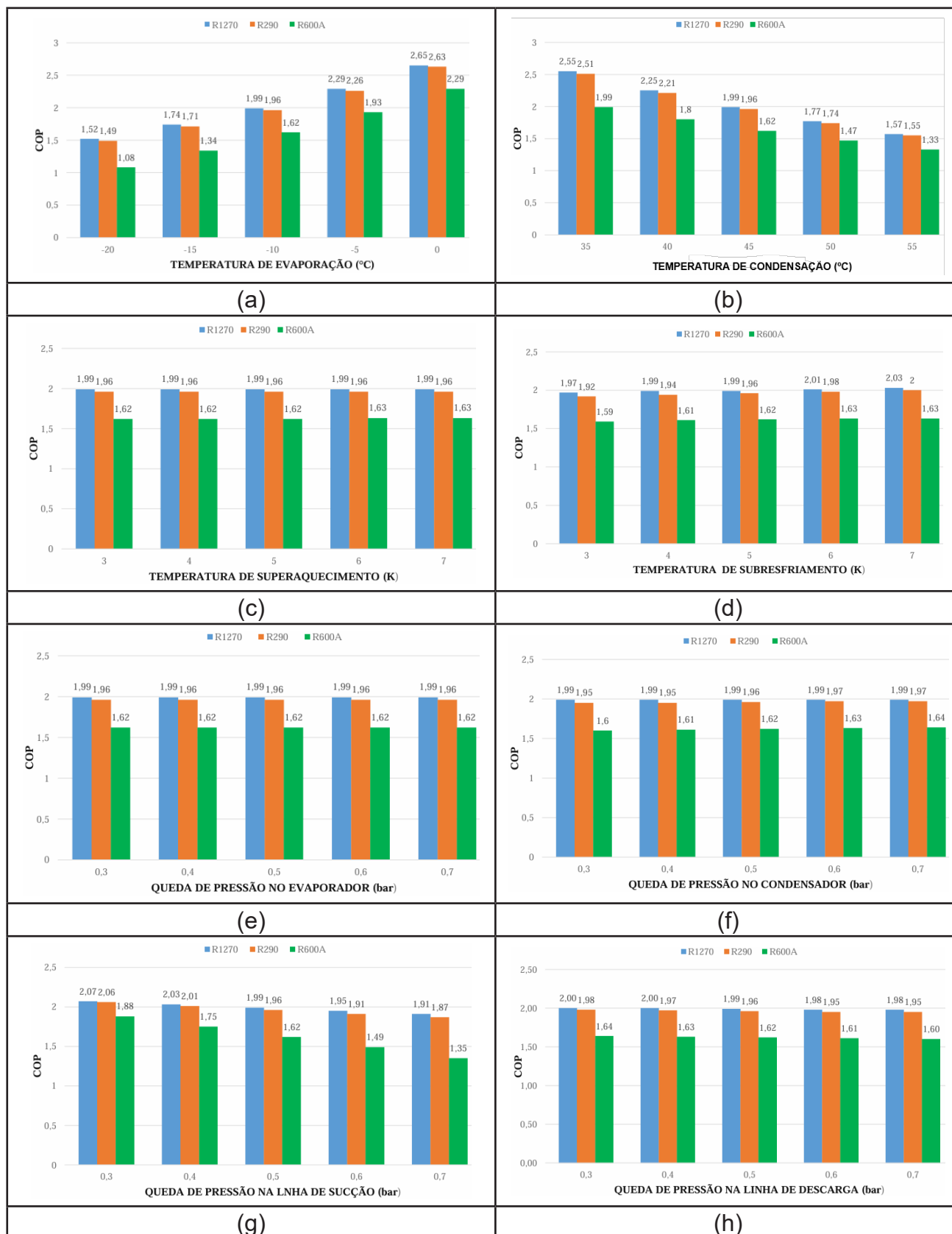
| PARÂMETRO DO CICLO FRIGORÍFICO              | CICLO DE REFERÊNCIA | INCREMENTOS |             |
|---------------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|
|                                             |                     | POSITIVOS   | NEGATIVOS   |
| Temperatura de evaporação (°C)              | -10,0               | +5 e +10    | -5 e -10    |
| Temperatura de condensação (°C)             | 45,0                | +5 e +10    | -5 e -10    |
| Superaquecimento (K)                        | 5,0                 | +1 e +2     | -1 e -2     |
| Subresfriamento (K)                         | 5,0                 | +1 e +2     | -1 e -2     |
| Queda de pressão no evaporador (bar)        | 0,5                 | +0,1 e +0,2 | -0,1 e -0,2 |
| Queda de pressão no condensador (bar)       | 0,5                 | +0,1 e +0,2 | -0,1 e -0,2 |
| Queda de pressão na linha de sucção (bar)   | 0,5                 | +0,1 e +0,2 | -0,1 e -0,2 |
| Queda de pressão na linha de líquido (bar)  | 0,5                 | +0,1 e +0,2 | -0,1 e -0,2 |
| Queda de pressão na linha de descarga (bar) | 0,5                 | +0,1 e +0,2 | -0,1 e -0,2 |
| Eficiência isoentrópica do compressor (%)   | 60                  | +5 e +10    | -5 e -10    |

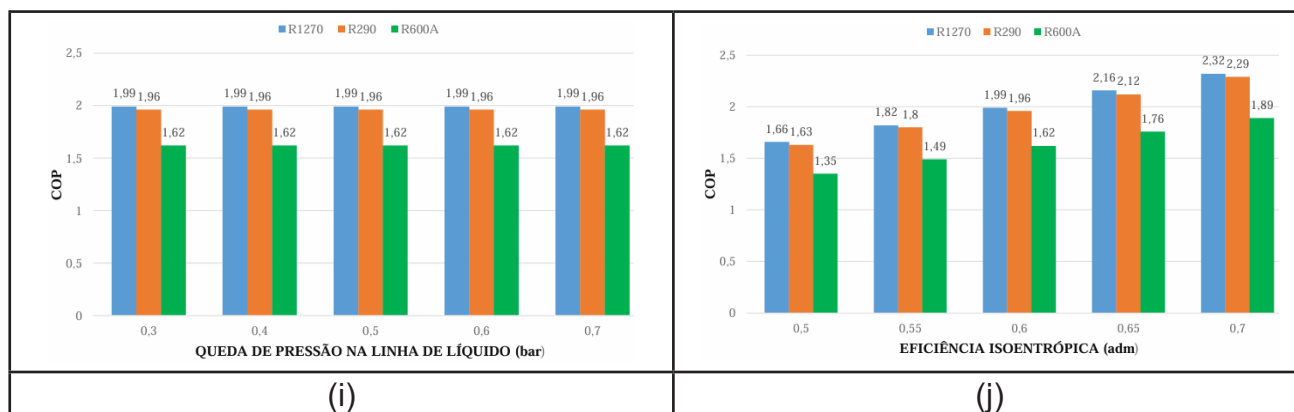
Fonte: Autores, 2026.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações realizadas no software CoolPack, foram elaboradas tabelas que apresentam a influência de cada parâmetro operacional sobre o desempenho dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor com refrigerantes hidrocarbonetos R1270, R290, R600A. O Quadro 1 reuni os valores do coeficiente de performance (COP), considerando a variação individual dos parâmetros operacionais listados na Tabela 1.

**Quadro 1.** Influência dos parâmetros operacionais no COP dos ciclos de refrigeração com hidrocarbonetos: (a) temperatura de evaporação (b) temperatura de condensação (c) superaquecimento (d) subresfriamento (e)  $\Delta P$  no evaporador (f)  $\Delta P$  no condensador (g)  $\Delta P$  na linha de sucção (h)  $\Delta P$  na linha de descarga (i)  $\Delta P$  na linha de líquido (j) eficiência isoentrópica do compressor





Fonte: Autores, 2026.

A análise dos ciclos simulados no CoolPack evidencia que o desempenho termodinâmico dos sistemas de refrigeração operando com os hidrocarbonetos R1270, R290 e R600a é fortemente condicionado pelas variáveis operacionais impostas ao ciclo. Os resultados mostram que o aumento da temperatura de evaporação promove elevação do coeficiente de performance (COP) e do calor absorvido no evaporador ( $Q_e$ ), acompanhado de redução do trabalho específico de compressão ( $W$ ) e do calor rejeitado no condensador ( $Q_c$ ).

Esse comportamento decorre da diminuição da razão de compressão e da maior disponibilidade de entalpia útil no evaporador, tendência amplamente documentada em estudos recentes sobre refrigerantes naturais (SINGH; KUMAR, 2024; LI et al., 2023).

Em contraste, a elevação da temperatura de condensação reduz o COP e  $Q_e$ , ao mesmo tempo em que aumenta  $W$  e  $Q_c$ , resultado da maior pressão de descarga e do incremento das irreversibilidades no processo de compressão. A literatura confirma que temperaturas de condensação mais elevadas constituem um dos fatores mais críticos para a penalização energética de sistemas que utilizam hidrocarbonetos, devido ao aumento significativo da razão de compressão (ZHANG et al., 2021; RAJAN; JAIN, 2022).

O superaquecimento apresentou efeito dual: embora aumente  $Q_e$  e  $Q_c$ , reduz o COP em função do acréscimo no trabalho de compressão e da menor eficiência isentrópica associada a maiores temperaturas de sucção. Estudos recentes indicam que níveis excessivos de superaquecimento deslocam o ciclo para regiões de maior irreversibilidade, devendo ser mantidos em valores moderados para evitar perdas de eficiência (LIU; WANG, 2023; ZHANG et al., 2021).

O sub-resfriamento, por sua vez, mostrou-se um dos parâmetros mais favoráveis ao desempenho energético. O aumento do sub-resfriamento elevou COP,  $Q_e$  e  $Q_c$  sem alterar significativamente o trabalho de compressão, uma vez que amplia a fração de líquido efetivamente evaporado e reduz a formação de vapor-flash após a válvula de expansão. A literatura destaca o sub-resfriamento como uma das estratégias mais eficazes para otimização energética em sistemas com refrigerantes naturais (ARORA; KAUSHIK, 2021;



SINGH; KUMAR, 2024).

As análises referentes às quedas de pressão no evaporador, condensador e linhas de sucção, líquido e descarga reforçam esse padrão geral: condições que reduzem a razão de compressão ou aumentam a fração de líquido útil no evaporador tendem a elevar o COP, enquanto condições que ampliam irreversibilidades — como perdas de carga elevadas — reduzem o desempenho global. A eficiência isoentrópica do compressor também se mostrou determinante, sendo um dos parâmetros de maior impacto sobre o COP, conforme amplamente relatado em estudos recentes (LI et al., 2023; SINGH; KUMAR, 2024).

De forma geral, os resultados demonstram que os três hidrocarbonetos (R1270, R290 e R600a) apresentam tendências de comportamento semelhantes, porém com pequenas variações numéricas no COP, o que reforça a importância da seleção adequada do refrigerante conforme as condições de operação.

Em síntese, os dados simulados e a literatura convergem para a conclusão de que R1270, R290 e R600a apresentam excelente desempenho termodinâmico quando operados com evaporação elevada, condensação reduzida, superaquecimento moderado e sub-resfriamento ampliado — condições que maximizam o COP e reduzem o consumo energético do ciclo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nas simulações realizadas no CoolPack demonstram de forma consistente que o desempenho termodinâmico dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor utilizando os hidrocarbonetos R1270, R290 e R600a é fortemente influenciado pelas condições operacionais impostas ao sistema.

A análise integrada evidencia que temperaturas de evaporação mais elevadas e níveis adequados de subresfriamento constituem os fatores mais favoráveis ao aumento do coeficiente de performance (COP), uma vez que reduzem a razão de compressão e ampliam a fração de líquido efetivamente evaporado.

Esses achados estão em consonância com estudos recentes que destacam o bom desempenho dos hidrocarbonetos em condições de operação que minimizam irreversibilidades e maximizam a entalpia útil no evaporador (SINGH; KUMAR, 2024; LI et al., 2023).

Por outro lado, verificou-se que temperaturas de condensação elevadas e superaquecimento excessivo tendem a penalizar significativamente a eficiência energética do ciclo, devido ao aumento da pressão de descarga e ao incremento do trabalho específico de compressão. A literatura confirma que tais condições ampliam as irreversibilidades associadas ao processo de compressão e deslocam o ciclo para regiões de menor eficiência (ZHANG et al., 2021; RAJAN; JAIN, 2022).



Os resultados também reforçam que o subresfriamento é uma das estratégias mais eficazes para otimização energética em sistemas que utilizam hidrocarbonetos, pois aumenta o COP sem impactar de forma significativa o trabalho de compressão, corroborando análises recentes sobre refrigerantes naturais (ARORA; KAUSHIK, 2021; LIU; WANG, 2023).

Em contrapartida, o superaquecimento, embora necessário para garantir a segurança operacional do compressor, deve ser mantido em níveis moderados, uma vez que incrementos excessivos ampliam as perdas de eficiência.

De modo geral, os dados simulados indicam que os três hidrocarbonetos apresentam comportamento termodinâmico semelhante, com pequenas variações numéricas no COP, o que reforça a importância da seleção adequada do refrigerante conforme as condições de operação e o perfil de aplicação.

A convergência entre os resultados obtidos e a literatura internacional confirma a robustez da abordagem metodológica adotada e evidencia o potencial dos hidrocarbonetos como alternativas energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Conclui-se, portanto, que a compreensão aprofundada dos efeitos dos parâmetros operacionais sobre o ciclo de compressão de vapor é essencial para o desenvolvimento de estratégias de otimização, contribuindo para a melhoria da eficiência energética, redução de custos operacionais e promoção de sistemas de refrigeração mais sustentáveis e alinhados às exigências ambientais contemporâneas.

## REFERÊNCIAS

- ARORA, A.; KAUSHIK, S. C. **Energy and exergy analysis of natural refrigerants in vapor compression systems**. Energy, v. 236, 2021.
- BANSAL, P.; KIM, Y. **Performance evaluation of natural refrigerants in vapor compression systems: A review**. International Journal of Refrigeration, v. 131, 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 8. ed. New York: McGraw Hill, 2013.
- KUMAR, P.; SINGH, R. **Energy optimization strategies for vapor compression refrigeration systems using natural refrigerants**. Applied Thermal Engineering, v. 215, 2022.
- LI, X. et al. **Performance assessment of natural refrigerants in vapor compression systems: A comprehensive review**. Energy Conversion and Management, v. 285, 2023.
- LIU, Y.; WANG, H. **Thermodynamic performance of hydrocarbon refrigerants under variable operating conditions**. Applied Thermal Engineering, v. 221, 2023.
- RAJAN, A.; JAIN, V. **Environmental implications of synthetic refrigerants and the transition toward low GWP alternatives**. Journal of Cleaner Production, v. 362, 2022.
- SINGH, R.; KUMAR, P. **Thermodynamic evaluation of hydrocarbon refrigerants in va-**

**por compression cycles under variable operating conditions.** Applied Thermal Engineering, v. 235, 2024.

ZHANG, Y. et al. **Advances in natural refrigerants for sustainable refrigeration systems:** A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 150, 2021.