

SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE CICLOS DE REFRIGERAÇÃO COM AMÔNIA (R717): INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Cleiton Rubens Formiga Barbosa¹;

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

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

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior²;

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

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

Wertson da Silva Resende³;

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

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

Arthur Souza Lyra⁴;

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

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

Edilson Marinho da Silva Junior⁵;

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

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

Thiago da Silva André⁶.

⁶Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

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

RESUMO: A crescente demanda por sistemas de refrigeração energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o uso de fluidos refrigerantes naturais, entre os quais a amônia (R717) se destaca por apresentar potencial de aquecimento global (GWP) igual a zero e potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) nulo, além de elevada eficiência termodinâmica. Nesse contexto, este estudo analisa, por meio de simulação termodinâmica, a influência de parâmetros operacionais no desempenho energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor utilizando R717. As

simulações foram realizadas no software CoolPack, adotando-se um ciclo de referência e variando sistematicamente temperatura de condensação, temperatura de evaporação, superaquecimento, subresfriamento, quedas de pressão no condensador, evaporador e linhas de sucção, líquido e descarga, bem como a eficiência isentrópica do compressor. Os resultados indicam que a temperatura de evaporação, a temperatura de condensação e a eficiência isentrópica constituem os parâmetros de maior impacto sobre o coeficiente de performance (COP), podendo elevá-lo em até 13% e reduzir o trabalho específico do compressor em até 43,112 kJ/kg. Esses achados evidenciam a sensibilidade do ciclo às condições operacionais e reforçam a importância da análise paramétrica para a otimização de sistemas de refrigeração com amônia, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e alinhadas às exigências ambientais contemporâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Amônia (R717). Ciclo de compressão de vapor. Simulação termodinâmica. Coeficiente de performance (COP). Sustentabilidade ambiental.

THERMODYNAMIC SIMULATION OF AMMONIA (R717) REFRIGERATION CYCLES: INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS ON ENERGY PERFORMANCE

ABSTRACT: The growing demand for energy-efficient and environmentally sustainable refrigeration systems has driven the use of natural refrigerants, among which ammonia (R717) stands out for having a global warming potential (GWP) of zero and a zero ozone depletion potential (ODP), in addition to high thermodynamic efficiency. In this context, this study analyzes, through thermodynamic simulation, the influence of operational parameters on the energy performance of a vapor compression refrigeration cycle using R717. The simulations were performed using CoolPack software, adopting a reference cycle and systematically varying condensation temperature, evaporation temperature, superheat, subcooling, pressure drops in the condenser, evaporator, 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 the coefficient of performance (COP), potentially increasing it by up to 13% and reducing the specific work of the compressor by up to 43,112 kJ/kg. These findings highlight the cycle's sensitivity to operating conditions and reinforce the importance of parametric analysis for optimizing ammonia refrigeration systems, contributing to the development of more efficient solutions aligned with contemporary environmental requirements.

KEY-WORDS: Ammonia (R717). Vapor compression cycle. Thermodynamic simulation. Coefficient of performance (COP). Environmental sustainability.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração e climatização constituem elementos fundamentais para a conservação de alimentos, estabilidade térmica de ambientes, processos industriais e diversas aplicações críticas em setores como saúde, logística e manufatura. Historicamente, o desenvolvimento dessas tecnologias esteve associado ao uso de fluidos refrigerantes sintéticos, como CFCs, HCFCs e HFCs, amplamente empregados devido às suas propriedades termodinâmicas favoráveis e facilidade de aplicação.

Contudo, evidências científicas acumuladas nas últimas décadas demonstraram que tais substâncias apresentam elevado potencial de aquecimento global (GWP) e, em muitos casos, significativo potencial de destruição da camada de ozônio (ODP), contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas e para a degradação ambiental (ZHANG et al., 2021; RAJAN; JAIN, 2022).

Em resposta a esse cenário, acordos internacionais como o Protocolo de Montreal e a Emenda de Kigali impulsionaram a transição para tecnologias de refrigeração ambientalmente sustentáveis, estimulando o uso de refrigerantes naturais, como dióxido de carbono (R744), hidrocarbonetos (R290, R600a) e, especialmente, a amônia (R717), que apresenta $GWP = 0$, $ODP = 0$, elevada eficiência energética e excelente desempenho termodinâmico (LI et al., 2023).

A crescente adoção de refrigerantes naturais tem ampliado a necessidade de compreender, com maior profundidade, o comportamento termodinâmico dos ciclos de refrigeração que os utilizam. Nesse contexto, a simulação computacional emerge como ferramenta indispensável para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, permitindo avaliar, de forma sistemática e controlada, a influência de parâmetros operacionais como temperaturas de evaporação e condensação, graus de superaquecimento e sub-resfriamento, quedas de pressão e eficiência isentrópica do compressor.

Estudos recentes publicados em bases como ScienceDirect, Scopus e Web of Science demonstram que a modelagem e simulação são fundamentais para otimizar o coeficiente de performance (COP), reduzir o consumo energético e orientar o projeto de sistemas frigoríficos de alto desempenho, especialmente aqueles baseados em refrigerantes naturais (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023).

A simulação termodinâmica permite ainda a análise de cenários operacionais que seriam inviáveis ou economicamente custosos de reproduzir experimentalmente, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais robustos, seguros e energeticamente eficientes.

Além disso, possibilita a identificação de condições ótimas de operação, auxiliando no dimensionamento de componentes, na avaliação de estratégias de controle e na redução de impactos ambientais associados ao consumo energético. Nesse cenário, o presente trabalho realiza uma investigação detalhada, por meio do software CoolPack,

sobre a influência de variáveis operacionais no desempenho energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor utilizando amônia (R717). Os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento de estratégias de projeto e operação, reforçando o papel da simulação computacional como instrumento científico central para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes, sustentáveis e alinhados às exigências ambientais contemporâneas.

OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi analisar, por meio de simulação termodinâmica no software CoolPack, a influência de parâmetros operacionais — incluindo temperaturas de evaporação e condensação, graus de superaquecimento e sub-resfriamento, quedas de pressão nos principais componentes e eficiência isentrópica do compressor — sobre o desempenho energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor utilizando amônia (R717). Buscou-se quantificar o impacto dessas variáveis no coeficiente de performance (COP) e no trabalho específico do compressor, de modo a identificar condições operacionais que maximizem a eficiência do sistema e contribuam para o desenvolvimento de soluções de refrigeração mais sustentáveis, alinhadas às demandas contemporâneas por redução de consumo energético e mitigação de impactos ambientais.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na simulação termodinâmica de ciclos de refrigeração por compressão de vapor, utilizando a amônia (R717) como fluido refrigerante. As simulações foram conduzidas no software CoolPack, amplamente empregado em pesquisas acadêmicas e industriais para modelagem de sistemas frigoríficos devido à sua confiabilidade na representação de propriedades termodinâmicas e processos de compressão, expansão e troca térmica (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023).

Inicialmente, definiu-se um ciclo de referência representativo de aplicações de refrigeração operando com temperaturas de evaporação elevadas, conforme diretrizes técnicas e valores recomendados em normas e literatura especializada. A partir desse ciclo base, foram realizadas variações sistemáticas em dez parâmetros operacionais, selecionados por sua relevância no desempenho energético de sistemas de refrigeração por compressão de vapor (ÇENGEL; BOLES, 2013; RAJAN; JAIN, 2022).

Os parâmetros operacionais foram: (i) temperatura de evaporação; (ii) temperatura de condensação; (iii) grau de superaquecimento; (iv) grau de sub-resfriamento; (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; (x) eficiência isentrópica do compressor. Para cada parâmetro, estabeleceu-se um intervalo de variação e incrementos constantes, permitindo a análise isolada de

seus efeitos sobre o coeficiente de performance (COP) e sobre o trabalho específico do compressor.

Essa abordagem paramétrica possibilita identificar a sensibilidade do ciclo às condições operacionais, além de fornecer subsídios para otimização energética, conforme recomendado em estudos recentes sobre simulação de sistemas frigoríficos com refrigerantes naturais (ZHANG et al., 2021; LI et al., 2023). Os resultados foram obtidos diretamente das rotinas de cálculo do CoolPack, garantindo consistência termodinâmica e reprodutibilidade.

A análise comparativa entre o ciclo de referência e os ciclos modificados permitiu quantificar o impacto individual de cada variável, contribuindo para a compreensão aprofundada do comportamento do ciclo de compressão de vapor com amônia e para o desenvolvimento de estratégias de operação mais eficientes e 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)	5,0	+2 e +4	-2 e -4
Temperatura de condensação (°C)	50,0	+2 e +4	-2 e -4
Superaquecimento (K)	7,0	+1 e +2	-1 e -2
Subresfriamento (K)	7,0	+1 e +2	-1 e -2
Queda de pressão no evaporador (bar)	1,0	+0,2 e +0,4	-0,2 e -0,4
Queda de pressão no condensador (bar)	1,0	+0,2 e +0,4	-0,2 e -0,4
Queda de pressão na linha de sucção (bar)	1,0	+0,2 e +0,4	-0,2 e -0,4
Queda de pressão na linha de líquido (bar)	1,0	+0,2 e +0,4	-0,2 e -0,4
Queda de pressão na linha de descarga (bar)	1,0	+0,2 e +0,4	-0,2 e -0,4
Eficiência isoentrópica do compressor (%)	65	+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 termodinâmico dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor utilizando R717 (amônia). O Quadro 1 reuni os valores simulados dos fluxos energéticos — calor absorvido no evaporador (Q_e), calor rejeitado no condensador (Q_c) e trabalho de compressão (W) — além do coeficiente de performance (COP), considerando a variação individual dos parâmetros operacionais listados na Tabela 1.

Quadro 1. Influência dos parâmetros operacionais nos fluxos de energia e coeficiente de performance do ciclo frigorífico de referência com R717 (Amônia)

(a)					(b)					
Ciclo	Temperatura de evaporação (°C)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	Ciclo	Temperatura de condensação (°C)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	W (kJ/kg)
1	9	1072,356	1453,232	2,82	1	59	1048,008	1504,344	2,30	456,337
2	7	1070,272	1474,292	2,65	2	57	1058,085	1500,366	2,39	442,281
3	5	1068,130	1496,344	2,49	3	55	1068,130	1496,344	2,49	428,213
4	3	1065,930	1519,497	2,35	4	53	1078,147	1492,283	2,60	414,137
5	1	1063,672	1543,883	2,22	5	51	1088,139	1488,191	2,72	400,053

(c)					(d)					
Ciclo	Superaquecimento(K)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	Ciclo	Sub-resfriamento (K)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	W (kJ/kg)
1	9	1073,423	1505,581	2,48	1	9	1077,812	1506,025	2,52	428,213
2	8	1070,782	1500,972	2,49	2	8	1072,976	1501,190	2,51	428,213
3	7	1068,130	1496,344	2,49	3	7	1068,130	1496,344	2,49	428,213
4	6	1065,468	1491,695	2,50	4	6	1063,273	1491,897	2,48	428,213
5	5	1062,794	1487,027	2,51	5	5	1058,406	1486,619	2,47	428,213

(e)					(f)					
Ciclo	Queda de pressão no evaporador (Bar)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	Ciclo	Queda de pressão no condensador (Bar)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	W (kJ/kg)
1	1,4	1068,130	1496,344	2,49	1	1,4	1071,607	1499,820	2,50	428,213
2	1,2	1068,130	1496,344	2,49	2	1,2	1069,863	1498,076	2,50	428,213
3	1,0	1068,130	1496,344	2,49	3	1,0	1068,130	1496,344	2,49	428,213
4	0,8	1068,130	1496,344	2,49	4	0,8	1066,408	1494,621	2,49	428,213
5	0,6	1068,130	1496,344	2,49	5	0,6	1064,695	1492,909	2,49	428,213

(g)					(h)					
Ciclo	Queda de pressão da linha de sucção (Bar)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	Ciclo	Queda de pressão da linha de líquido (Bar)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	W (kJ/kg)
1	1,4	1068,130	1526,623	2,33	1	1,4	1068,130	1496,344	2,49	428,213
2	1,2	1068,130	1511,016	2,41	2	1,2	1068,130	1496,344	2,49	428,213
3	1,0	1068,130	1496,344	2,49	3	1,0	1068,130	1496,344	2,49	428,213
4	0,8	1068,130	1482,508	2,58	4	0,8	1068,130	1496,344	2,49	428,213
5	0,6	1068,130	1469,428	2,66	5	0,6	1068,130	1496,344	2,49	428,213

(i)					(j)					
Ciclo	Queda de pressão da linha de descarga (Bar)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	Ciclo	Eficiência isentrópica (%)	Q _e (kJ/kg)	Q _c (kJ/kg)	COP	W (kJ/kg)
1	1,4	1068,130	1501,160	2,47	1	0,75	1068,130	1439,248	2,88	371,118
2	1,2	1068,130	1498,759	2,48	2	0,70	1068,130	1465,757	2,69	397,627
3	1,0	1068,130	1496,344	2,49	3	0,65	1068,130	1496,344	2,49	428,213
4	0,8	1068,130	1493,912	2,51	4	0,60	1068,130	1532,028	2,30	463,898
5	0,6	1068,130	1491,463	2,52	5	0,55	1068,130	1574,200	2,11	506,070

Fonte: Autores, 2026.

A análise integrada dos ciclos simulados no CoolPack do Quadro 1 – (a), (b), (c) e (d) evidencia que o desempenho termodinâmico dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor com R717 é fortemente influenciado pelas condições operacionais impostas ao ciclo. Os resultados mostram que o aumento da temperatura de evaporação promove elevação do COP e do calor absorvido no evaporador (Q_e), acompanhada de redução do trabalho 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, em consonância com estudos recentes que destacam a eficiência superior do R717 em condições de evaporação mais elevadas (ARORA; KAUSHIK, 2021; KUMAR; SINGH, 2022).

Em sentido oposto, o aumento da temperatura de condensação reduz o COP e Q_e , ao mesmo tempo em que eleva W e Q_c , resultado da maior pressão de descarga e do aumento das irreversibilidades no processo de compressão. A literatura confirma que a condensação em temperaturas mais altas é um dos fatores mais críticos para a penalização energética de sistemas com amônia (BANSAL; KIM, 2021; LIU; WANG, 2023).

O superaquecimento apresenta efeito misto: embora aumente Q_e e Q_c , reduz o COP devido ao incremento do trabalho de compressão e à menor eficiência isentrópica do compressor. Estudos recentes reforçam que o superaquecimento excessivo desloca o ciclo para regiões de maior irreversibilidade, devendo ser mantido em níveis moderados para evitar perdas de eficiência (ZHANG et al., 2021; LIU; WANG, 2023).

Por outro lado, o subresfriamento mostra-se o parâmetro mais favorável à eficiência energética: eleva COP, Q_e e Q_c sem alterar significativamente o trabalho de compressão, pois aumenta a fração de líquido efetivamente evaporado e reduz a formação de vapor-flash após a expansão. A literatura confirma que o subresfriamento é uma das estratégias mais eficazes para otimização energética em sistemas com R717 (ARORA; KAUSHIK, 2021; KUMAR; SINGH, 2022).

No Quadro 1 – (e), (f), (g), (h), (i) e (j), que incluem variações adicionais de parâmetros operacionais, reforçam esses padrões gerais: condições que reduzem a razão de compressão ou ampliam a fração de líquido útil no evaporador tendem a aumentar o COP, enquanto condições que elevam a pressão de descarga ou ampliam irreversibilidades reduzem o desempenho global. Assim, os resultados demonstram que a eficiência dos ciclos com amônia depende do equilíbrio entre evaporação, condensação, superaquecimento e subresfriamento, sendo estes dois últimos fundamentais para a estabilidade operacional e a segurança do compressor.

Em síntese, os dados simulados e a literatura convergem para a conclusão de que o R717 apresenta excelente desempenho termodinâmico quando operado com evaporação elevada, condensação reduzida, superaquecimento moderado e subresfriamento ampliado, condições que maximizam o COP e minimizam o consumo energético do ciclo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nas simulações realizadas no CoolPack, sintetizados no Quadro 1, demonstram de forma consistente que o desempenho termodinâmico dos ciclos de refrigeração por compressão de vapor com R717 é fortemente condicionado pelos parâmetros operacionais que definem as condições de evaporação, condensação, superaquecimento e subresfriamento.

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), ao passo que temperaturas de condensação elevadas e superaquecimento excessivo tendem a penalizar significativamente a eficiência energética do ciclo.

Esses achados convergem com a literatura recente, que destaca a elevada sensibilidade do R717 à razão de compressão e às irreversibilidades associadas aos processos de compressão e expansão (ARORA; KAUSHIK, 2021; BANSAL; KIM, 2021).

Os resultados também confirmam que o subresfriamento é uma das estratégias mais eficazes para otimização energética, pois aumenta a fração de líquido útil no evaporador sem impactar o trabalho de compressão, corroborando estudos que apontam o subresfriamento como parâmetro crítico para maximização do COP em sistemas industriais com amônia (KUMAR; SINGH, 2022; LIU; WANG, 2023).

Por outro lado, o superaquecimento, embora necessário para proteger o compressor, deve ser mantido em níveis moderados, uma vez que incrementos excessivos ampliam a irreversibilidade do processo e reduzem a eficiência global do ciclo, conforme demonstrado em análises paramétricas recentes (ZHANG et al., 2021).

De modo geral, os resultados obtidos reforçam que a operação eficiente de sistemas de refrigeração com R717 depende do equilíbrio entre os parâmetros operacionais, sendo essencial a adoção de estratégias de controle que minimizem a razão de compressão e maximizem a utilização da entalpia útil no evaporador.

A convergência entre os dados simulados e a literatura internacional confirma a robustez do modelo termodinâmico utilizado e evidencia o potencial do R717 como refrigerante de alta eficiência energética e baixo impacto ambiental, especialmente em aplicações industriais que demandam elevada confiabilidade e desempenho.

Assim, conclui-se que a compreensão aprofundada dos efeitos dos parâmetros operacionais sobre o ciclo de compressão de vapor é fundamental 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.

REFERÊNCIAS

ARORA, R.; KAUSHIK, S. C. **Energy and exergy analysis of ammonia-based vapor compression refrigeration systems**. Energy Conversion and Management, v. 228, p. 113671, 2021.

BANSAL, P.; KIM, K. **Thermodynamic performance of R717 vapor compression systems under varying operating conditions**. International Journal of Refrigeration, v. 124, p. 1-12, 2021.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

KUMAR, R.; SINGH, A. **Parametric analysis of ammonia vapor compression refrigeration cycles**: Effect of evaporator and condenser temperatures on COP and compressor work. *Applied Thermal Engineering*, v. 215, p. 118980, 2022.

LIU, Y.; WANG, X. **Performance assessment of R717 refrigeration systems**: Influence of evaporation and condensation temperatures. *Energy Reports*, v. 9, p. 1452 1464, 2023.

LI, X. et al. **Environmental and energy performance of natural refrigerants in vapor compression systems**: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, v. 286, 2023.

MIRANDA, J. C. **Fundamentos de Refrigeração e Ar-Condicionado**. São Paulo: Érica, 2017.

RAJAN, A.; JAIN, S. **Natural refrigerants and their role in sustainable cooling technologies**: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 379, 2022.

RIFFAT, S. B.; et al. **Refrigeration systems and applications**: A review. *Applied Thermal Engineering*, v. 16, n. 5, 1996.

SALVADOR, R. **Refrigeração Industrial**: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre: Bookman, 2022.

SILVA, A. C. **Refrigeração e Climatização**: Fundamentos e Aplicações Industriais. Natal: UFRN, 2016.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

ZHANG, Y. et al. **Performance assessment of ammonia-based refrigeration cycles under different operating conditions**. *International Journal of Refrigeration*, v. 131, 2021.

ZHANG, H. et al. **Thermodynamic optimization of ammonia vapor compression cycles using parametric simulation**. *Journal of Cleaner Production*, v. 315, p. 128234, 2021.