



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS REFRIGERANTES R290 E R600A COMO SUBSTITUTOS DO R134A EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE PEQUENA CAPACIDADE

Fernanda Irigon Lima, fernanda.irigon2001@gmail.com.br  
Leandro Ribeiro Alves, leandro.ribeiro2705@gmail.com  
Maria Eduarda Teodoro Dantas, m.eduardatd@gmail.com  
Mateus Viana Silva, mateus\_vianas@yahoo.com.br  
Arthur Sassi Figueira, d202210292@uftm.edu.br  
Guilherme Azevedo Oliveira, guilherme\_esd@hotmail.com

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Departamento de Engenharia Mecânica,

**Resumo.** O presente artigo trata do desempenho dos fluidos refrigerantes alternativos R290 e R600a usados para substituir o hidrofluorcarboneto (HFC) R134a em uma aplicação de refrigeração de pequena capacidade. A substituição foi realizada em um sistema de refrigeração de capacidade nominal 0,25 kW, de modo que não houvesse mudanças nos componentes básicos do ciclo, ou seja, apenas recolhimento do fluido refrigerante original e substituição pelo alternativo. Os testes foram realizados usando um evaporador à água, em temperatura controlada de 9 °C, em condição de estado estacionário e para 3 diferentes níveis de modulação da válvula de expansão (EEV), possibilitando assim a realização de uma análise termodinâmica completa. O uso dos hidrocarbonetos, que possuem um potencial de aquecimento global (GWP) baixo e potencial de depleção de ozônio (ODP) zero, garantiu uma operação aceitável do sistema de refrigeração com uma capacidade de refrigeração superior ao sistema original com R134a. Por fim, o uso do refrigerante R290 resultou nos valores máximos de EER, sendo em média de 1,44, em comparação com o sistema original com R134a, com média de 1,2, indicando que este hidrocarboneto tem potencial para substituir o R134a em algumas aplicações.

**Palavras-chave:** refrigeração, R290, R134a, R600a, drop-in e GWP

**Abstract.** This paper focuses on the performance of the R290 and R600a refrigerants used to replace the hydrofluorocarbon (HFC) R134a in a small capacity refrigeration application. The original system provides a nominal refrigeration capacity of 0.25 kW. The substitution of R134a with the alternative fluid (R290) represented a direct operation; there were no changes in the basic components of the cycle during the tests. The tests were conducted using a water evaporator, at a controlled temperature of 9°C, in steady state condition and for three different levels of modulation of the expansion valve (EEV), thus enabling a complete thermodynamic analysis. The use of the hydrocarbon, which has a low global warming potential (GWP) and zero ozone-depleting potential (ODP), ensured an acceptable operation of the refrigeration system with a refrigeration capacity higher than the original system with R134a. Finally, the use of the R290 refrigerant resulted in the maximum EER values, averaging 1.44, compared to the original system with R134a, which had an average of 1.2, indicating that this hydrocarbon has potential to replace R134a in some applications.

**Keywords:** refrigeration, R290, R134a, R600a, drop-in and GWP

### 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1930, os clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) têm sido amplamente utilizados em refrigeração devido às suas boas propriedades termodinâmicas e por não serem tóxicos e inflamáveis como outros gases usados em sistemas de compressão de vapor. No entanto, comprovou-se que essa classe de gases possui alto ODP (potencial de destruição do ozônio), que é a medida de sua capacidade relativa de destruir o ozônio estratosférico. Devido a isso, os protocolos de Montreal (1987) e Kyoto (1997) estabeleceram metas para a extinção desses gases.

Alguns fluidos surgiram como candidatos para substituir os CFCs, como os Hidrofluorcarbonetos (HFCs) e alguns HCFCs. Esses fluidos são caracterizados pela substituição total dos átomos de cloro por hidrogênio, mantendo as boas propriedades termodinâmicas, baixa inflamabilidade e toxicidade e tornando-os menos prejudiciais à destruição de ozônio.

No entanto, pesquisas indicam que os refrigerantes HFCs, como o R134a, têm alto GWP (Potencial de Aquecimento Global), índice que revela o quanto o gás intensifica o efeito estufa. Uma nova geração de refrigerantes surgiu nos últimos anos para eliminar também os fluidos com alto GWP. Os refrigerantes R290, R600a, R1234yf e R513a são exemplos de fluidos que podem substituir o R134a (HFC) em algumas aplicações. Pesquisas atuais e tendências da indústria mostram que os HCFCs e HFCs serão gradualmente substituídos por misturas de HFCs ou por refrigerantes naturais (Halder e Roy, 2020).

A regulação de gases fluorados (F-gases) e a diretiva de ar-condicionado veicular (MAC) da União Europeia apoiaram o desenvolvimento de refrigerantes de baixo GWP (Mota-Babiloni e Makhnatch, 2021). Alguns destes terão potencial para aplicações mais amplas, no entanto, apresentam eficiência relativamente menor nos sistemas existentes e têm custos elevados. Em geral, fluidos naturais como, hidrocarbonetos (HCs), amônia (R717) e dióxido de carbono (R744) são refrigerantes que possuem zero ODP e também têm um GWP muito baixo. Além disso, essas substâncias naturais são encontradas abundantemente na natureza, colaborando para garantir sua competitividade no mercado global. Hidrocarbonetos tendem a ser menos amplamente disponíveis e a amônia é obtida de fornecedores especializados. Nos últimos anos, estudos comparando o desempenho de refrigerantes sintéticos e naturais em várias aplicações foram publicados. Apesar de esforços consideráveis para melhorar as propriedades térmicas dos fluidos alternativos e para desenvolver novos designs ou estratégias de controle para os sistemas, em alguns casos, podem ser encontrados resultados experimentais inconsistentes (Bouzhghiba e Géczi, 2022).

O trabalho atual visa contribuir com dados experimentais de um sistema de refrigeração de baixa capacidade para o conhecimento sobre o uso de refrigerantes alternativos. Inicialmente foi usado o fluido R134a como fluido de trabalho, e depois o HFC foi substituído pelos refrigerantes R290 e R600a no sistema. A instalação experimental fornece instrumentação e estratégias de controle para avaliar o comportamento do sistema operando com ambos os fluidos em termos de capacidade refrigerante e EER.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada experimental utilizada na pesquisa pode ser visualizada na Fig.1, localizado no Laboratório de Energia e Fenômenos de Transporte da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (LEFT/Engenharia Mecânica/UFTM). O conhecimento prévio sobre os limites de operação da instalação experimental foi um fator considerado antes de aplicar a metodologia drop-in (que consistiu em apenas retirar o fluido refrigerante original do equipamento e substituí-lo pelo alternativo). A bancada experimental é equipada para suportar diferentes fluidos refrigerantes e instrumentada para a determinação da capacidade de refrigeração e eficiência em diferentes condições.

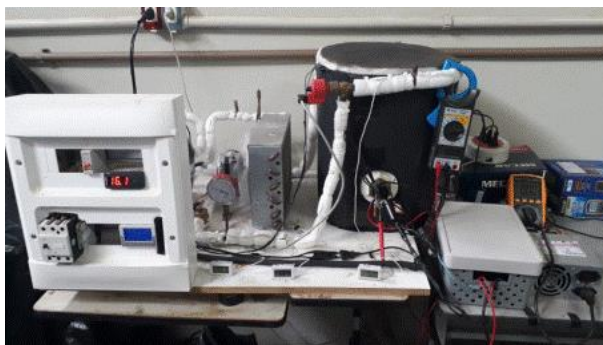


Figura 1. Foto da bancada experimental (Dos autores, 2024)

### 2.1. Bancada experimental

O equipamento experimental é composto por um compressor alternativo hermético de potência 1/4HP, um condensador a ar forçado, uma válvula de expansão do tipo eletrônica responsável por controlar a expansão do fluido, garantindo a entrada de fluido refrigerante líquido no evaporador e permitindo ajustes na abertura para operar em diversas condições de temperatura e capacidade frigorífica. O evaporador do sistema consiste em uma mistura de água e álcool, na qual uma serpentina fica imersa. Dentro da tubulação passa o fluido refrigerante. Para minimizar perdas térmicas, o tanque é isolado. A carga térmica no evaporador é exercida por uma resistência elétrica imersa no banho e sua potência é controlada por um sistema PID, a fim de manter a temperatura do banho térmico constante. Na Fig.2 é possível notar sensores de temperatura ao longo da bancada, eles ficam localizados nos pontos verdes indicados e no banho. A pressão de alta (pontos 2 e 3) e de baixa (pontos 4 e 1) do sistema também foram medidas experimentalmente.

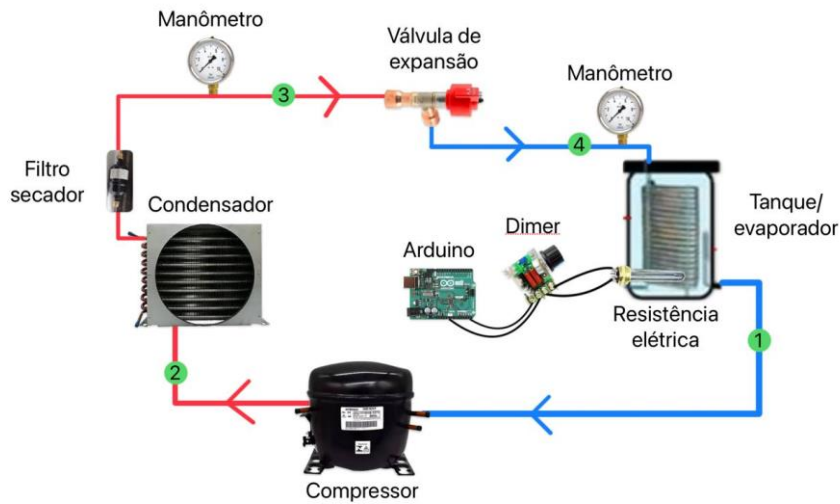


Figura 2. Representação esquemática da bancada experimental (Dos autores, 2024)

Antes de cada teste, a temperatura do banho de set-point e a abertura da válvula são pré-definidas, permitindo o teste nas condições estabelecidas.

Desenvolveu-se um controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para manter constante a temperatura do banho. Esse sistema ajusta a tensão enviada a uma resistência elétrica, baseando-se na temperatura medida no interior do banho térmico. O controle PID ajusta a resposta com base em três constantes:

- Proporcional ( $K_p$ ): responde proporcionalmente ao desvio da temperatura desejada, acelerando a resposta do sistema.
- Derivativa ( $K_d$ ): atua sobre a variação do desvio, reduzindo o overshoot e o tempo de assentamento.
- Integral ( $K_i$ ): soma os erros acumulados, eliminando o erro permanente.

Para o sistema implementado e testado anteriormente em trabalhos passados os valores determinados empiricamente para as constantes foram de  $K_p=300$ ,  $K_d=280$  e  $K_i=0.02$ , e o tempo médio para atingir o regime permanente foi de 40 minutos (Spagnollo, *et al.*, 2022).

## 2.2. Metodologia

A capacidade de refrigeração foi calculada pelo balanço energético no reservatório térmico/evaporador. Quando a temperatura é mantida constante, assume-se que a energia elétrica fornecida é equivalente à capacidade frigorífica do sistema, refletindo a eficácia do controle ao manter as condições estabelecidas. Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, Eq. (1), para condição de regime permanente, com base na consideração de que o reservatório térmico é um sistema com uma massa constante de solução líquida. Considerando o reservatório como perfeitamente isolado termicamente, as perdas térmicas foram negligenciadas e a capacidade de refrigeração é equivalente ao trabalho elétrico da resistência:

$$\dot{Q}_{EV} = \dot{W}_{EL} = U_{RES} \cdot i_{RES} \quad (1)$$

Na equação (1),  $\dot{Q}_{EV}$  representa a capacidade de refrigeração (kW),  $U_{RES}$  (kV) e  $i_{RES}$  (A) são a tensão e a corrente elétrica medidas na resistência.

O consumo de energia no compressor foi medido da mesma forma e calculado da seguinte maneira:

$$\dot{W}_{CP} = U_{CP} \cdot i_{CP} \quad (2)$$

Onde  $\dot{W}_{CP}$  representa o consumo de energia (kW),  $U_{CP}$  (kV) e  $i_{CP}$  (A) são a tensão elétrica e a corrente medida no compressor. A razão de eficiência energética (EER) foi calculada como a razão entre a capacidade de refrigeração e a potência requerida no compressor (Eq. 3):

$$EER = \frac{\dot{Q}_{EV}}{\dot{W}_{CP}} \quad (3)$$

Foram realizadas 4 repetições de cada ensaio, sendo que cada fluido foi avaliado nas seguintes condições de operação: 3 diferentes aberturas de válvula (20%, 60% e 100%) e temperatura de banho de 9°C. Para efeito de comparação entre as diferentes condições e fluidos, foram consideradas as médias das 4 repetições.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados representam a média de 4 testes repetidos para a mesma condição. As condições estabelecidas de teste estão na tabela 1. Para melhor visualização dos resultados e como havia repetibilidade entre os testes, para os gráficos e tabelas adotou-se a média entre as 4 repetições para cada condição de abertura de válvula e de fluido utilizado.

Tabela 1. Eficiência Energética de Refrigerantes em Diferentes Configurações de Abertura da Válvula de Expansão (Dos Autores, 2024)

Razão de Eficiência Energética (EER)			
Abertura de válvula	R134a	R290	R600a
20%	1,20	1,44	0,88
60%	1,31	1,30	1,06
100%	0,82	0,72	0,66

Os resultados da Tab. 1 mostram que o R290 obteve o melhor desempenho em termos de eficiência na condição de menor abertura de válvula (20%), com um valor de 1,44. Isso indica uma maior eficiência em regimes de baixa carga térmica. O R290 se destaca por sua capacidade de transferir calor de forma mais eficaz, mesmo quando o fluxo de refrigerante é reduzido, o que provavelmente contribui para sua alta eficiência energética, especialmente em aberturas menores da válvula de expansão (Bouzghiba e Géczi, 2022). Essa alta eficiência em baixas cargas térmicas torna o R290 ideal para aplicações que não exigem constantemente altas capacidades de refrigeração, como sistemas de refrigeração de pequena escala ou equipamentos domésticos. Por outro lado, o R600a, apresentando os menores valores de EER, sugere uma eficiência energética inferior quando comparado aos outros refrigerantes no sistema avaliado.

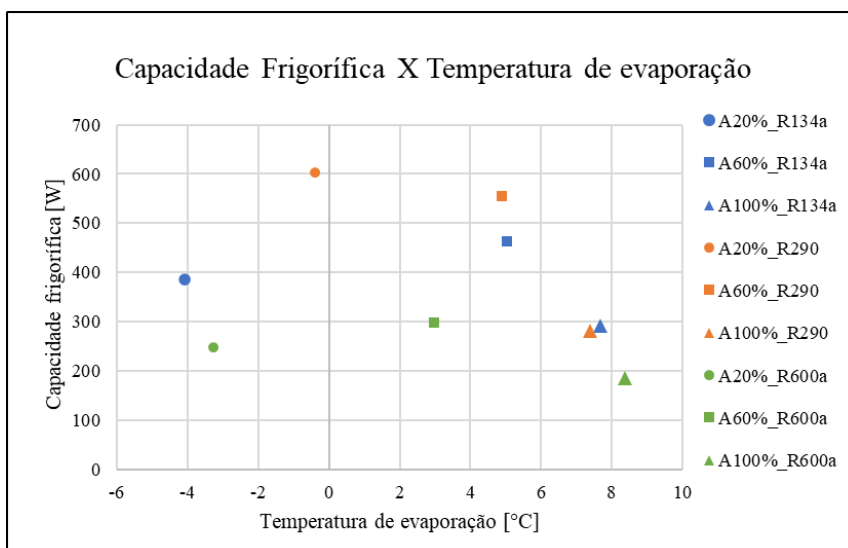


Figura 3. Gráfico de Comparação da Capacidade Frigorífica dos Refrigerantes (Dos Autores, 2024)

Na Figura 3 é possível notar que nas aberturas de 20% e 60% da válvula, o R290 supera significativamente o R134a em termos de capacidade térmica e opera eficazmente em uma temperatura de evaporação mais elevada. Isso sugere uma transferência de calor mais eficiente em algumas cargas térmicas, tornando o R290 um substituto potencial para sistemas já instalados. Já na abertura de 100% da válvula, o R290 quase iguala a capacidade térmica do R134a, demonstrando sua viabilidade de substituição também nessa faixa de trabalho, embora com uma ligeira redução na eficiência.

O R600a, apesar de apresentar uma menor eficiência energética, ele exige baixas pressões operacionais, o que reduz o desgaste do sistema, tornando-o ideal para aplicações domésticas onde a eficiência energética não é a única consideração.

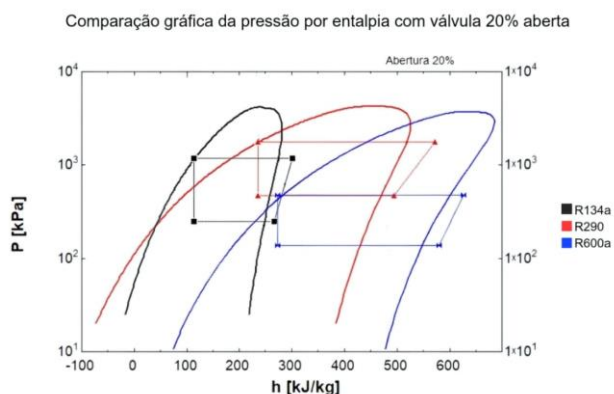


Figura 4. Gráficos para comparação do ciclo de refrigeração para válvula de expansão aberta 20% (Dos Autores, 2024)

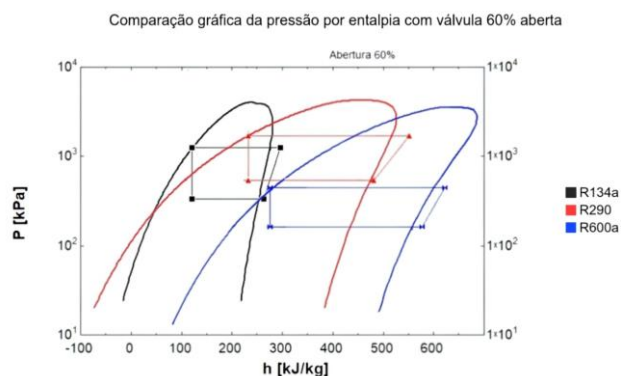


Figura 5. Gráficos para comparação do ciclo de refrigeração para válvula de expansão aberta 60% (Dos Autores, 2024)

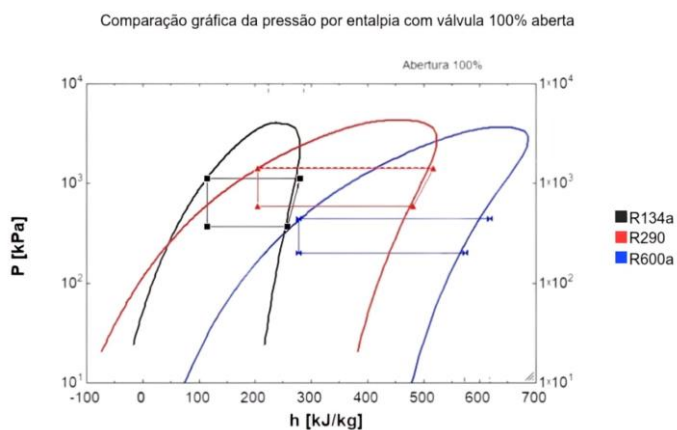


Figura 6. Gráfico para comparação do ciclo de refrigeração para válvula de expansão aberta 100% (Dos Autores, 2024)

As Figuras 4, 5 e 6 mostram uma comparação das propriedades termodinâmicas dos refrigerantes utilizados neste trabalho, em termos de diagrama pressão-entalpia, baseado no estado de referência da ASHRAE. Pode-se observar que ambos os fluidos têm uma faixa de aplicação similar, sendo o R290 e o R600a fluidos com uma maior faixa de aplicação. O R290 apresenta pressões mais altas para temperaturas de evaporação similares, já o R600a trabalha em faixas de pressões mais baixas, o que resulta em menos esforço no aparelho compressor.

Também pode ser visto que, em condições similares, o R290 e o R600a possuem um calor latente maior que o R134a, indicando um potencial de transferência de calor que pode melhorar a eficiência dos sistemas térmicos onde esse refrigerante pode ser aplicado, esse efeito já foi perceptível no fluido R290 quando foram comparados os valores de EER.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisadas as capacidades frigoríficas e eficiência de um sistema de refrigeração operando com R134a e seus substitutos, visando um menor impacto ambiental. No estudo, foi utilizado o mesmo equipamento para os três fluidos, apenas foi realizada a troca de fluido para que o mesmo sistema fosse comparado operando com fluidos distintos.

Ao analisar os resultados da pesquisa, nota-se que o fluido R600a foi o que apresentou as menores eficiências quando comparado ao R134a para a mesma faixa de aplicação. A eficiência do sistema com o fluido R600a foi 61% abaixo do R290 e 73% abaixo do R134a. O sistema, com fluido R290, também atendeu a mesma faixa de aplicação do R134a, porém com eficiência superior. Outra vantagem desse fluido é o menor índice de GWP em relação ao R134a e ele teve uma eficiência energética em média 20% acima dos valores de EER do R134a.

A principal conclusão deste trabalho é que foi possível trabalhar com os fluidos alternativos, na mesma faixa de aplicação e com uma potência frigorífica aproximada e até melhor, em algumas condições, sem a troca do compressor e com vantagens ambientais quando comparados aos R134a. Além disso, esses valores foram coletados utilizando-se o mesmo compressor que foi projetado para o fluido R134a, e uma troca de compressor poderia melhorar ainda mais a eficiência do sistema.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) pelo apoio financeiro que tornou possível a realização desta pesquisa. A contribuição destas instituições foi fundamental para o desenvolvimento e sucesso deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Bouzghiba, H. e Géczi, G., 2022. “Comparative Analysis of the Environmental Load of Natural Refrigerant (R290)”. *Journal of Central European Green Innovation*, 22(10)
- Du, Y., Wu, J., Che, W., e Li, J., 2019. “Experimental study on electronic expansion valve failure of a R290 room air conditioner during heating-defrosting process”. In *Applied Thermal Engineering*, 20(167)
- Mota-Babiloni, A. e Makhnatch, P., 2021. “Predictions of European refrigerants place on the market following F-gas regulation restrictions”. In *International Journal of Refrigeration*, 21(127), p. 101–110
- Roy, Z. e Halder, G., 2020. “Replacement of Halogenated Refrigerants Towards Sustainable Cooling system: a Review”. In *Chemical Engineering Journal Advances*, 20(3).
- Spagnollo, M. P., Alves, L. R., Marques, V. A. da S., e Oliveira, G. A., 2022. “Implementação de um controle PID de temperatura em uma bancada experimental de refrigeração”. In *Conjecturas*, 22(8), p. 163–186.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.