

## “INOVAÇÃO TECNOLÓGICA: Os novos rumos da Engenharia Mecânica e Industrial.”

### ELIMINAÇÃO DO R22, RETROFIT E NOVOS FLUIDOS REFRIGERANTES COM BAIXO GWP – ESTUDO COMPARATIVO COM OS FLUIDOS REFRIGERANTES R-444B E R-454C

Carlos Henrique Moreira Braga <sup>(1)</sup> (carlosbraga@ufmg.br), Luiz Machado <sup>(1)</sup> (luizm@ufmg.br), Gabriela Cunha Bezerra <sup>(1)</sup> (gabacunha@hotmail.com), Juan José Garcia Pabon<sup>(2)</sup> (jjgp@unifei.edu.br), Willian Moreira Duarte <sup>(1)</sup> (willianmoreiraduarte@gmail.com)

<sup>(1)</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

<sup>(2)</sup> Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade federal de Itajubá (UNIFEI)

**RESUMO:** *Os sistemas de climatização possuem grande importância na sociedade contemporânea, sendo necessário, portanto, avaliar seu impacto ambiental e a forma como eles se relacionam com a sustentabilidade do nosso planeta. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o processo de substituição do fluido refrigerante R-22 em sistemas de climatização por fluidos refrigerantes alternativos com baixos valores de GWP devido à grande quantidade de sistemas que ainda o utilizam, sobretudo em países em desenvolvimento, como o Brasil. De modo a permitir uma comparação efetiva entre os fluidos refrigerantes, foi elaborada uma metodologia para mensurar a capacidade de resfriamento, o coeficiente de performance e as taxas de transferência de calor em sistemas de climatização utilizando os fluidos R-22, R-444B e R-454C. Os resultados apresentam reduções médias entre 8,8% e 17,6% na capacidade de resfriamento e entre 6,8% e 8,8% no coeficiente de performance. Considerando o aspecto ecológico, com a utilização de fluidos que não agredem a camada de ozônio e com baixo impacto sobre o efeito estufa, o presente estudo demonstra a viabilidade do retrofit do R-22.*

**PALAVRAS-CHAVE:** FLUIDOS REFRIGERANTES, RETROFIT, R-22, R-444B, R-454C.

### ELIMINATION OF R22, RETROFIT AND NEW REFRIGERANT FLUIDS WITH LOW GWP – COMPARATIVE STUDY WITH REFRIGERANT FLUIDS R-444B AND R-454C

**ABSTRACT:** *Air conditioning systems are of great importance in contemporary society, and it is therefore necessary to evaluate their environmental impact and the way in which they relate to the sustainability of our planet. The present work aims to evaluate the process of replacing R-22 refrigerant in air conditioning systems by alternative refrigerants with low GWP values due to the large number of systems that still use it, especially in developing countries, such as Brazil. To allow an effective comparison between the refrigerants, a methodology was developed to measure, the cooling capacity, the coefficient of performance and heat transfer rates of air conditioning systems using the fluids R-22, R-444B and R-454C. The results show average reductions between 8.8% and 17.6% in the cooling capacity and between 6.8% and 8.8% in the coefficient of performance. Considering the ecological aspect, with the use of refrigerants that do not harm the ozone layer and with a low impact on the greenhouse effect, the present study demonstrates the viability of the retrofit of the R-22.*

**KEYWORDS:** REFRIGERANT FLUIDS, RETROFIT, R-22, R-444B, R-454C.

#### DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração e climatização fazem parte do dia-a-dia de grande parte da população mundial desde o início do século XX, quando Willis Carrier desenvolveu a primeira unidade condicionadora de ar nos padrões atuais. Como grande parte das tecnologias desenvolvidas até os dias atuais, as tecnologias de refrigeração têm sido aperfeiçoadas ou modificadas desde então pelos mais diversos motivos, indo desde a redução de espaço ocupado pelos componentes do sistema (como os trocadores de calor compactos, por exemplo), passando pela otimização da eficiência energética e indo até o tipo de fluido refrigerante utilizado, levando em conta seu impacto ambiental, caracterizado pelos respectivos valores de ODP (*Ozone Depletion Potential*) ou GWP (*Global Warming Potential*) do fluido refrigerante. No que diz respeito a este último aspecto, os fluidos refrigerantes possuem extrema relevância em diversos aspectos inerentes aos sistemas de refrigeração e climatização por compressão a vapor por ditarem as características destes sistemas. Por este motivo, os fluidos refrigerantes foram, provavelmente, os itens mais avaliados e testados desde o advento desse tipo de tecnologia.

A maior dificuldade em encontrar um consenso a respeito de qual é o melhor tipo de fluido refrigerante a ser utilizado para uma dada aplicação reside no fato de cada tipo apresentar qualidades e defeitos significativos. Neste sentido, cronologicamente, foram empregados compostos inorgânicos, hidrocarbonetos, compostos halocarbônicos e misturas, cada um com suas vantagens e desvantagens intrínsecas.

O presente trabalho foi realizado com o intuito de analisar tecnicamente e comercialmente a viabilidade de uma solução para um grande problema para o qual seria necessária a implementação de mudanças normativas e legislativas significativas. Atualmente, é necessária maior preocupação por parte de projetistas e instaladores do setor com relação ao assunto, devido, sobretudo, à falta de alternativas econômica e financeiramente viáveis à utilização de novos fluidos refrigerantes e/ou processos. Algumas das implicações imediatas desta situação são o despejo de gases poluentes na atmosfera, um crime ambiental, e a estagnação tecnológica do setor, mantendo o mercado brasileiro muito atrás de outros mercados mais desenvolvidos.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar os fluidos R-444B e R-454C como opções de retrofit para o R-22, um HCFC extremamente presente nos sistemas de refrigeração e climatização, avaliando a viabilidade técnica e operacional desta alteração em equipamentos existentes. Foram definidos alguns parâmetros para classificação, avaliação e comparação de diferentes fluidos refrigerantes para aplicações de climatização, levando-se em conta suas propriedades físicas, químicas e termodinâmicas.

### 1.1. Análise técnica

Segundo Stoecker (1985), devido às suas excelentes propriedades termodinâmicas, os compostos halocarbônicos e misturas se tornaram os fluidos refrigerantes mais utilizados desde a sua invenção, apresentando, no entanto, um inconveniente que seria descoberto algum tempo depois. Em meados da década de 1970, conceitos relativos ao meio ambiente ganharam grande relevância no meio científico, sobretudo quando associados aos termos “camada de ozônio” ou “efeito estufa”, especialmente após o estabelecimento do Protocolo de Montreal e do Protocolo de Kyoto.

Tendo em vista a ação de pesquisadores, como os ganhadores do prêmio Nobel de Química Molina e Rowland (1974), várias tecnologias consagradas tiveram que ser revistas devido à não conformidade com alguns parâmetros estabelecidos a favor da sustentabilidade, inclusive no que diz respeito aos sistemas de refrigeração e climatização.

No que tange ao âmbito desses conceitos, alguns dos grandes “vilões” da atualidade são os refrigeradores e equipamentos de ar condicionado, sobretudo aqueles que utilizam fluidos refrigerantes derivados de CFC’s (clorofluorcarbonetos) ou HCFC’s (hidroclorofluorcarbonetos ou clorofluorcarbonetos hidrogenados), tal como o R-22, ainda muito utilizado em países em desenvolvimento, como o Brasil.

Embora já existam fluidos refrigerantes à base de HFC (hidrofluorcarbonetos), considerados como “ecologicamente corretos” e consolidados e difundidos no mercado (tal como o R-410A, por exemplo), a sua utilização ainda apresenta alguns problemas, entre os quais se destacam o alto nível de GWP e os níveis de pressão de trabalho consideravelmente superiores aos de outros fluidos refrigerantes, conforme será apresentado e discutido posteriormente no presente trabalho.

Um grande problema associado à adesão ao Protocolo de Montreal diz respeito à destinação dos equipamentos projetados para funcionarem com CFC’s ou HCFC’s, tendo em vista que, com a iminente descontinuação desses fluidos refrigerantes no mercado, eles não possuiriam mais serventia. Desta forma, portanto, é razoável supor que esses equipamentos seriam descartados ou vendidos como sucata (ainda que apresentassem bom estado de conservação e de funcionamento).

O maior inconveniente desta situação é que uma grande parcela dos sistemas de refrigeração e climatização instalados atualmente utiliza HCFC’s. Além disso, grandes empresas possuem estoques de equipamentos usados esporadicamente e que, conseqüentemente, possuem uma grande vida útil operando com fluidos refrigerantes HCFC’s. Por fim, é importante acrescentar que ainda hoje são comercializados equipamentos que utilizam HCFC’s como fluido refrigerante.

Desta forma, considerando a meta estabelecida pelo Protocolo de Montreal para eliminação global de pelo menos 67,5% do consumo de HCFC’s no país até o ano de 2025, e o conseqüente

aumento esperado do preço do produto no mercado ao longo deste período devido à relação de oferta e demanda, é necessário viabilizar alternativas para a substituição desses fluidos refrigerantes sem que, no entanto, isto implique na inutilidade dos equipamentos que os utilizam.

Fluidos refrigerantes alternativos já foram estudados como alternativa ao R-22. Em seu estudo, Ankit *et al.* (2015), encontrou um desempenho semelhante entre o R-444B e o R-22, sobretudo para temperaturas ambiente variando de 35°C a 52°C. Quando comparado ao R-407C (um fluido já consolidado no mercado), por exemplo, o R-444B, um HFO (hidrofluorolefina) se mostrou 5% mais eficiente na maior parte da faixa de operação.

Elgendy *et al.* (2015) realizou um estudo experimental com o R-438A e obteve resultados relativamente satisfatórios, com grande compatibilidade entre os níveis de pressão com o R-22, obtenção de temperaturas de descarga inferiores em comparação com R-22 e a possibilidade de drop-in nas plantas existentes sem necessidade de grandes intervenções.

Choudhari e Sapali (2017) estudaram o R-290 com substituto do R-22 para diferentes temperaturas de evaporação e temperatura de condensação constante. Foram observadas melhorias em alguns dos parâmetros, como menor temperatura de descarga e menor vazão mássica do fluido refrigerante, com resultados de COP muito próximos.

## 1.2. Análise mercadológica

O mercado de fluidos refrigerantes mudou drasticamente desde o Protocolo de Montreal, em 1987 e o Protocolo de Kyoto, em 1997. O primeiro, em particular, causou um impacto significativo neste mercado, obrigando os países signatários a abolirem gradativamente a utilização de HCFC's (entre os quais, inclui-se o R-22).

É importante ressaltar que na época da assinatura do referido tratado não havia alternativas para substituição direta desses fluidos, motivo pelo qual foram estabelecidos prazos relativamente longos para os países em desenvolvimento. No entanto, com a síntese de fluidos refrigerantes com características extremamente similares em praticamente todos os aspectos (com níveis de ODP iguais a zero) que permitem o retrofit de equipamentos existentes, pode-se esperar uma redução dos prazos para a retirada de HCFC's de circulação pelos seguintes fatores:

a) Os países desenvolvidos não utilizam mais HCFC's, de modo que a produção desses gases já deixou de ser tão interessante aos fabricantes de fluidos refrigerantes, tendo em vista a sua restrição de comercialização somente para o grupo de países em desenvolvimento.

b) Por haver fluidos refrigerantes substitutos diretos com características equivalentes e ecologicamente corretos, é natural supor que os fabricantes de fluidos refrigerantes se dediquem mais à fabricação desses novos fluidos do que dos antigos. Desta forma, é natural supor que a oferta

reduzida de HCFC's comece a elevar o preço destes fluidos no mercado com o tempo. Em contrapartida, também é natural supor que a oferta e demanda crescente por fluidos refrigerantes ecologicamente corretos reduza o preço destes fluidos no mercado com o tempo, até que os preços dos dois tipos de fluido se igualem e não faça mais sentido, portanto, optar pela aquisição de HCFC's.

c) De maneira geral, o processo de aquisição de HCFC's é cada vez mais burocrático e regulamentado, de modo que, além de limitar os possíveis compradores, as exigências tendem a se tornar mais restritivas, sobretudo devido ao fato da manipulação indevida desses fluidos se configurar como crime ambiental passível de multas elevadas e até mesmo prisão.

d) Por fim, novos fluidos têm sido desenvolvidos para retrofit direto em equipamentos existentes que utilizam HCFC's (e até mesmo HFC's), que, além de serem ecologicamente corretos (ODP iguais a zero e GWP até 90% inferiores aos fluidos refrigerantes convencionais) proporcionam o funcionamento dos equipamentos com eficiência (ou COP) superiores aos obtidos com os fluidos atuais, se constituindo, portanto, como uma ótima opção para retrofit em todos os aspectos. Alguns dos fabricantes de fluidos refrigerantes mais conceituados no mercado têm apostado nesta tendência, como os novos fluidos refrigerantes R-449A e R-32 (entre outros), cujos resultados têm se mostrado bastante promissores.

## 2. METODOLOGIA

Primeiramente, é necessário conhecer a composição de cada um dos fluidos refrigerantes considerados no presente estudo, a saber: R-22, R-407C, R-444B e R-454C. A composição dos fluidos (em base mássica) é apresentada na Tabela 1.

**TABELA 1.** Composição dos fluidos usados nas simulações

Fluido	Composição (Base mássica)
R-22	Puro ( $\text{CHClF}_2$ )
R-407C	23,0% de R-32, 25,0% de R-125 e 52,0% de R-134a
R-444B	41,5% de R-32, 10,0% de R-152a e 48,5% de R-1234ze(E)
R-454C	21,5% de R-32 e 78,5% de R-1234yf

Fonte: ASHRAE (2017) e Mota-Babiloni *et al.* (2017).

Uma vez apresentados os fluidos refrigerantes em estudo, bem como as substâncias que os compõe, é importante apresentar algumas das propriedades que os credenciam como alternativas ao retrofit do R-22, particularmente a sua classificação quanto ao tipo de fluido, aos valores de ODP e GWP e aos tipos de óleo lubrificante possíveis de serem utilizados, o que viabilizaria operações do

tipo *drop-in* em sistemas existentes, por exemplo. Essas propriedades foram extraídas de fontes diversas, majoritariamente no Handbook Fundamentals, da ASHRAE, e dos sites e catálogos dos fabricantes dos fluidos refrigerantes, e compiladas na Tabela 2, apresentada a seguir.

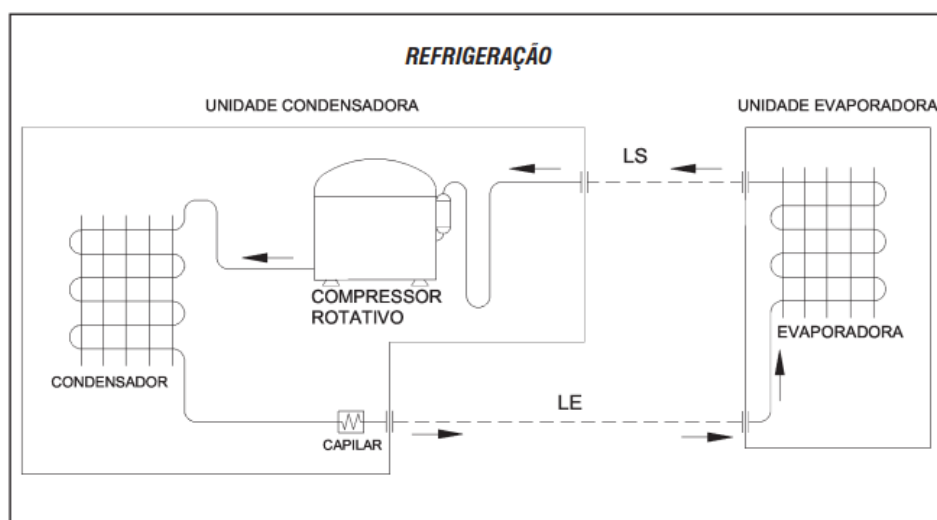
**TABELA 2.** Resumo das propriedades gerais dos fluidos considerados nas simulações

Características	R-22	R-407C	R-444B	R-454C
Classificação	HCFC	HFC	HFO	HFO
ODP	0,034	0	0	0
GWP	1.760	1.620	295	148
Óleo Lubrificante	AB ou OM	POE	POE	POE

Fonte: Autor.

Destaca-se que, embora o R-407C já tenha se consolidado no mercado como uma alternativa ao R-22 e tenha sido considerado no presente estudo, sua presença é meramente ilustrativa, uma vez que o seu valor de GWP é consideravelmente elevado e, portanto, representaria um impeditivo com relação à premissa de retrofit para reduzir o impacto ambiental.

De modo a permitir uma análise consistente em condições viáveis operacionalmente e economicamente, foi realizada a análise de um sistema de climatização do tipo mini-split convencional com cada um dos quatro fluidos refrigerantes previamente mencionados. Este sistema é constituído, basicamente, por dois trocadores de calor (unidades evaporadora e condensadora), um dispositivo de expansão (ou capilar) e um compressor. O esquema geral do sistema pode ser visualizado na Figura 1, na qual são representados os principais componentes do sistema.



**FIGURA 1.** Representação de sistema do tipo mini-split. Fonte: MIDEA, 2020.

Neste estudo avaliou-se o impacto da substituição do R-22 na taxa de transferência de calor, na capacidade de refrigeração e na eficiência do sistema. Para tal foi adotado um modelo termodinâmico e correlações de transferência que serão descritos a seguir. Apesar de em alguns trabalhos as correlações mencionadas estarem acopladas ao modelo matemático (Minetto, 2011), neste trabalho elas foram estudadas de forma separada.

## 2.1. Modelo termodinâmico

As considerações utilizadas na elaboração do modelo são:

- Nenhum trabalho é realizado no fluido refrigerante ou pelo fluido refrigerante no evaporador, condensador ou no dispositivo de expansão:
- As variações de energias cinética e potencial são desprezíveis em todas as etapas do ciclo.
- Todas as etapas do ciclo ocorrem em regime permanente.
- As perdas nos trocadores e nas tubulações são desprezadas.
- O dispositivo de expansão é adiabático e, portanto, isentálpico.
- Superaquecimento e sub-resfriamento são constantes.

De acordo com Rasmussen e Jakobsen (2000), há diversas formas de modelar um compressor, sendo algumas mais simples e outras mais detalhadas. Os modelos mais sofisticados ou caixa branca (Yang *et al.*, 2013, Duarte *et al.*, 2019, Meramveliotakis *et al.*, 2022) demandam diversos parâmetros e detalhes geométricos que não costumam ser fornecidos por fabricantes de compressores herméticos. O modelo de compressor adotado em modelos de um sistema completo de refrigeração completo geralmente é simples, ou modelo caixa preta, como os apresentados por Duarte (2018), Paulino (2019) e Paula *et al.* (2021). A vazão mássica que circula pelos componentes do sistema é imposta pelo compressor e pode ser calculada pela expressão (Koury *et al.*, 2001, Duarte *et al.*, 2021), conforme Equação 1:

$$\dot{m} = \rho v N \eta_{vol} \quad (1)$$

sendo  $\rho$  a massa específica do fluido refrigerante na aspiração do compressor,  $v$  a cilindrada do compressor,  $N$  a rotação do compressor e  $\eta_{vol}$  o rendimento volumétrico deste componente. O rendimento isentrópico do compressor é definido por Boles e Çengel (2013) conforme Equação 2:



$$\eta_{IS} = \frac{h_{2S} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

sendo  $h$  a entalpia específica e os subscritos 1, 2 e 2S representam os estados do fluido refrigerante na entrada do compressor, na saída do compressor e na saída do compressor caso o processo de compressão fosse isentrópico, respectivamente. Finalmente, a potência consumida pelo compressor é dada por (Rabelo *et al.*, 2019), conforme Equação 3:

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}(h_{2S} - h_1)}{\eta_g} \quad (3)$$

sendo  $\eta_g$  o rendimento global do compressor. A capacidade de refrigeração, a capacidade de refrigeração específica e o COP são dados por (Boles e Çengel, 2013), conforme Equações 4 a 6:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

$$q = h_1 - h_4 \quad (5)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (6)$$

sendo o subscrito 4 referente ao estado do fluido refrigerante na entrada do evaporador. Os valores dos parâmetros usados nas simulações são apresentados na Tabela 3.

**TABELA 3.** Parâmetros de referência usados nas simulações

Parâmetro	Valor
Temperatura de evaporação	280 K
Temperatura de condensação	325 K
Grau de sub-resfriamento	10 K
Grau de superaquecimento	10 K
Cilindrada do compressor	25 cm <sup>3</sup>
Rotação do compressor	3500 rpm
Rendimento volumétrico	70%
Rendimento isentrópico	70%
Rendimento global	70%

Fonte: Autor.



Para encontrar as propriedades termodinâmicas necessárias nas Equações 1 a 6 foi utilizado a biblioteca CoolProp (Bell *et al.*, 2014). Primeiramente, calcula-se a pressão de evaporação usando a temperatura de evaporação e título de vapor de 100%. A temperatura na aspiração do compressor pode-se ser obtida adicionando o superaquecimento a temperatura de evaporação. Utilizando pressão e temperatura na aspiração do compressor calcula-se a massa específica, entalpia específica e entropia específica. O próximo passo consiste em calcular o valor de  $h_{2s}$ , porém utilizando o par de propriedades entropia e pressão o CoolProp não permite calcular o valor de entalpia para os fluidos refrigerantes do tipo *blend* (misturas), como o R-444B e o R-454C. Foi então elaborado uma sub-rotina usando o método da Secante descrito em detalhes por Chapra e Canale (2016) de tal forma que a partir de entradas de entalpia e pressão encontra-se valores de entropia e o valor de entalpia é corrigido até que a entropia obtida seja igual a entropia na entrada do compressor. Em seguida encontra-se o valor de  $h_2$  usando a Equação 2 e obtém-se a temperatura de saída do compressor usando o CoolProp. Em seguida, calcula-se a pressões de condensação usando a temperatura de evaporação e título de vapor de 0%. A temperatura de saída do condensador é obtida subtraindo o sub-resfriamento da temperatura de condensação. Finalmente calcula-se a entalpia no dispositivo de expansão usando pressão e temperatura. De posse de todas as propriedades termodinâmicas as variáveis das Equações 1 a 6 são avaliadas.

## 2.2. Correlações de transferência de calor

Para as regiões onde há escoamento monofásico o coeficiente convectivo ( $H$ ) pode ser calculado pela correlação de Dittus e Boelter (ASHRAE, 2017), conforme Equação 7:

$$H = 0.023Re^{0.8}Pr^n k/D \quad (7)$$

sendo  $Re$ ,  $Pr$ ,  $k$ ,  $D$  os números de Reynolds e de Prandtl e a condutividade térmica do fluido refrigerante e o diâmetro do tubo. O expoente  $n$  vale 0,4 se o fluido estiver sendo aquecido e 0,3 se estiver sendo resfriado.

Para escolha de uma correlação para ebulição foi considerado o trabalho de Shah (2022a), que comparou correlações resultados experimentais de fluidos puros e misturas. Para utilização da correlação proposta por Shah (2022a) é necessário conhecer a tensão superficial do fluido. Porém ainda não há resultados experimentais na literatura para o R-444B e o CoolProp (Bell, *et al.* 2014) não permite avaliar esta propriedade. Segundo Shah (2022a), uma das melhores correlações para fluidos refrigerantes é a correlação de Liu e Winterton (1991), que não leva em consideração a tensão superficial. Segundo Liu e Winterton (1991), o coeficiente convectivo é dado pelas Equações 8 a 10:

$$H = \sqrt{(FH_l)^2 + (SH_{nb})^2} \quad (8)$$

$$S = (1 + 0.055F^{0.1}Re_l^{0.16})^{-1} \quad (9)$$

$$F = (1 + xPr_l(\rho_l/\rho_v - 1))^{0.35} \quad (10)$$

Nessas equações,  $H_l$  é calculado usando a Equação 7 com as propriedades do líquido saturado,  $H_{nb}$  é calculado usando a equação proposta por Cooper (1984),  $x$  é o título de vapor e os subscritos  $l$  e  $v$  indicam as propriedades do líquido e do vapor saturado respectivamente.

Shah (2022b) avaliou correlações e resultados experimentais de transferência de calor durante a condensação em dutos de fluidos puros e misturas, muitas delas requerendo, no entanto, o conhecimento da tensão superficial do fluido. Dentre as melhores correlações avaliadas por ele que não são função da tensão superficial está a correlação de Shah (1979) dada pela Equação 11:

$$H = H_l \left[ (1 - x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76}(1 - x)^{0.04}}{P_r^{0.38}} \right] \quad (11)$$

sendo  $H_l$  calculado usando a Equação 7 e  $P_r$  é a pressão reduzida do fluido refrigerante.

### 3. RESULTADOS

No modelo elaborado, foram realizadas simulações com diferentes temperaturas de evaporação e condensação para cada um dos fluidos. A Figura 2 apresenta a relação entre a capacidade de resfriamento e as temperaturas de evaporação e condensação.

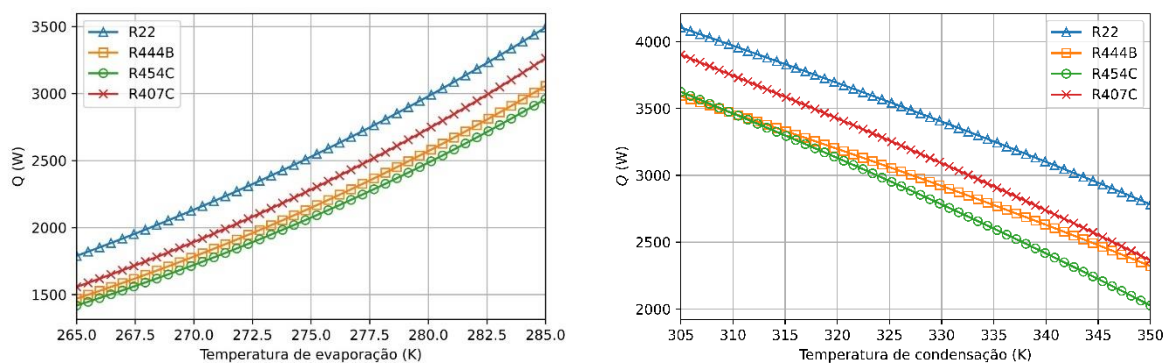


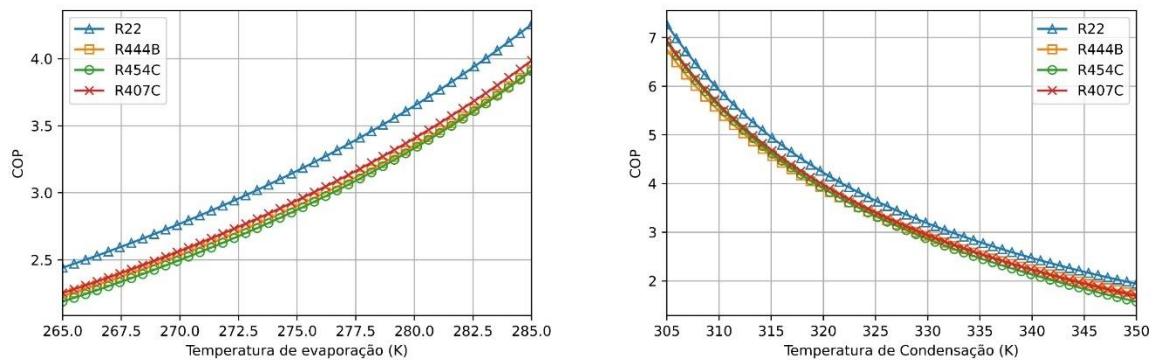
FIGURA 2. Capacidade de refrigeração em função das temperaturas de evaporação e condensação.

Fonte: Autor.

A análise da Figura 2 permite constatar que, para dada temperatura de evaporação, os fluidos R-444B, R-454C e R-407C apresentam capacidade de refrigeração consideravelmente inferior à do R-22. O R-407C (redução média de 9,3%) é o que apresenta desempenho mais próximo neste aspecto, seguido do R-444B (redução média de 14,8%) e do R-454C (redução média de 17,7%).

É possível observar também que, para dada temperatura de condensação, os fluidos R-444B, R-454C e R-407C apresentam capacidade de refrigeração consideravelmente inferior à do R-22. O R-407C (redução média de 8,8%) é o que apresenta desempenho mais próximo neste aspecto, seguido do R-444B (redução média de 14,0%) e do R-454C (redução média de 17,6%).

É possível observar, ainda, que, com o aumento da temperatura de condensação, a diferença entre a capacidade de refrigeração do R-22 e do R-444B é ligeiramente reduzida, enquanto a diferença entre a capacidade de refrigeração do R-22 e do R-454C é consideravelmente aumentada, indicando que este fluido refrigerante não seria adequado para aplicações de temperaturas médias e altas. Contudo, se por um lado as capacidades de refrigeração dos fluidos R-444B, R-454C e o R-407C são consideravelmente reduzidas quando comparadas à capacidade de refrigeração do R-22, as variações do COP são bem menos significativas, conforme pode ser observado na Figura 3, que ilustra a relação entre os valores de COP e as temperaturas de evaporação e condensação para os três fluidos

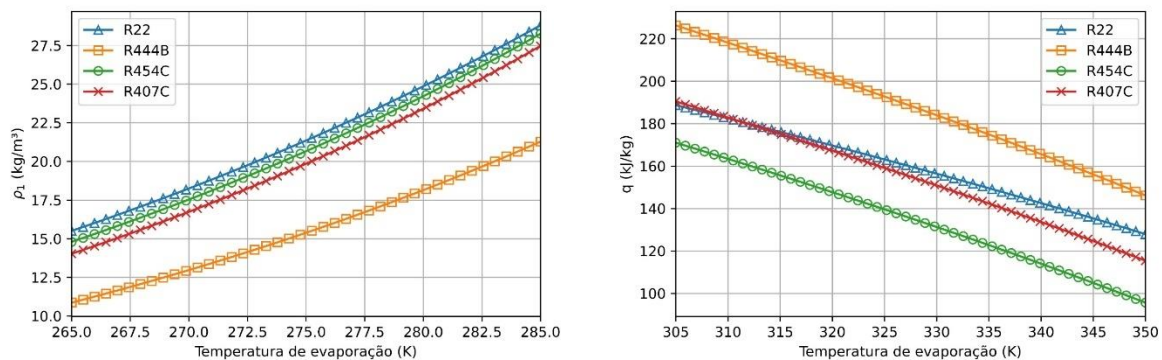


**FIGURA 3.** COP em função das temperaturas de evaporação e condensação. Fonte: Autor.

Embora os fluidos R-444B, R-454C e R-407C possuam valores de capacidade de refrigeração inferiores ao R-22, eles também possuem valores de consumo inferiores, de modo que a diferença entre os valores de COP é relativamente baixa (com reduções médias de 8,2%, 8,8% e 6,8%, respectivamente). Além disso, tal como a capacidade de refrigeração, o COP também é elevado com o aumento da temperatura de evaporação e reduzido com o aumento da temperatura de condensação.

Ante ao exposto, observa-se que, embora, em uma primeira análise, possa ser considerado que haja um “prejuízo” considerável quando considerados os fluidos refrigerantes “ecologicamente corretos”, a relação de capacidade de refrigeração *versus* consumo elétrico entre os fluidos se apresenta dentro de patamares potencialmente aceitáveis (inferiores a 10%).

Outras propriedades de interesse são a massa específica e o efeito de refrigeração, que podem ser observados na Figura 4.



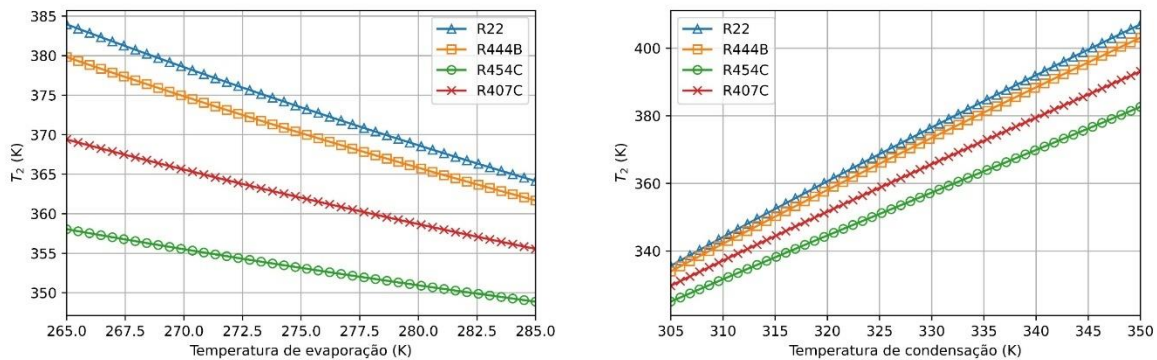
**FIGURA 4.** Massa específica e efeito de refrigeração em função da temperatura de evaporação.

Fonte: Autor.

Os resultados revelam informações muito importantes a respeito dos fluidos refrigerantes. Primeiramente, é possível observar que os fluidos refrigerantes R-22, R-444B e R-407C apresentam massa específicas muito próximas em diferentes temperaturas de evaporação, enquanto o R-454C apresenta valores consideravelmente inferiores (cerca de 24,4%) aos demais fluidos, indicando, portanto, valores proporcionalmente inferiores de vazão mássica para as mesmas condições do fluido refrigerante no sistema. Entretanto, o efeito de refrigeração do R-454C é consideravelmente superior aos demais (cerca de 23,8% considerando a média dos demais fluidos refrigerantes), justificando os valores encontrados para a capacidade de refrigeração. Em outras palavras, há dois efeitos “antagônicos” no comportamento do sistema com o R-454C, que apresenta um ótimo efeito de refrigeração, mas com uma vazão mássica consideravelmente inferior, limitando, portanto, a capacidade de refrigeração do sistema quando utilizando este fluido refrigerante.

Outro aspecto de grande importância para a comparação entre o desempenho dos fluidos refrigerantes diz respeito à temperatura de descarga. A Figura 5 ilustra o comportamento desta variável em função das temperaturas de evaporação e condensação. É possível observar que os fluidos R-22 e R-444B apresentam valores muito próximos (com diferença média de 3,3 K), enquanto o R-407C e o R-454C (principalmente) apresentam valores de temperatura de descarga

consideravelmente inferiores para os mesmos valores de temperaturas de evaporação e condensação (com reduções médias de 11,5 K e 20,4 K, respectivamente). Isto representa uma vantagem em médio e longo prazo, uma vez que temperaturas de descarga mais baixas tendem a aumentar a vida útil dos componentes do sistema (particularmente do compressor).



**FIGURA 5.** Temperatura de descarga em função das temperaturas de evaporação e condensação.

Fonte: Autor.

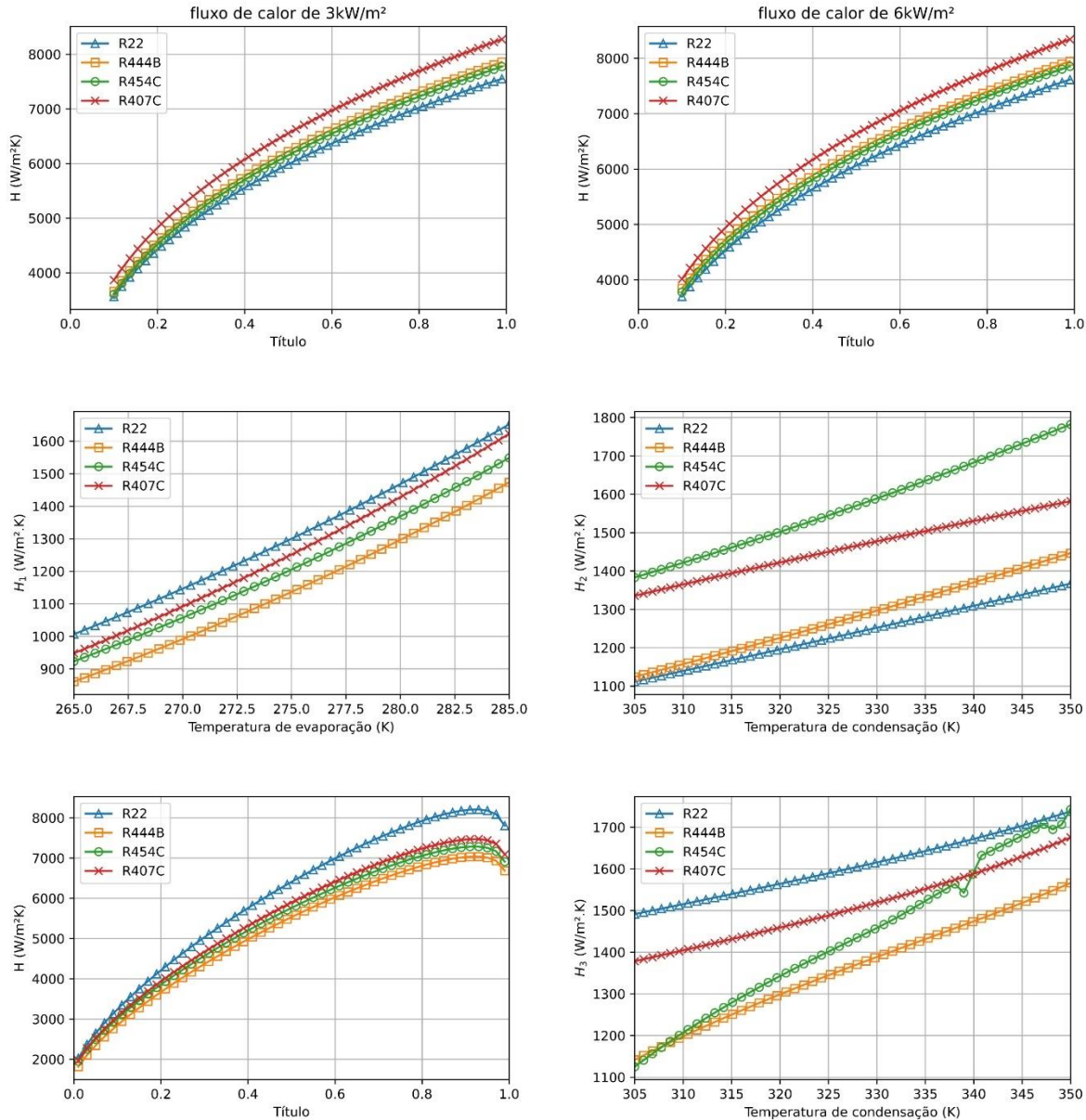
Por fim, é possível analisar os valores de coeficiente convectivo em diferentes pontos do circuito frigorífero para determinadas faixas de temperaturas de evaporação e condensação, bem como para diferentes valores de título para cada um dos fluidos refrigerantes, conforme pode ser observado na Figura 6.

É possível observar que os valores de coeficiente de convecção apresentam comportamento heterogêneo entre os fluidos refrigerantes nos diversos pontos do ciclo termodinâmico. Na região de evaporação, por exemplo, o R-22 apresenta valores um pouco inferiores aos demais fluidos para os diferentes valores de fluxo de calor simulados (que apresentam o mesmo aspecto, diga-se de passagem). Na região de sucção do compressor, no entanto, a situação se inverte e o R-22 apresenta valores de coeficiente de convecção levemente superiores aos demais fluidos refrigerantes em estudo. Na região de descarga do compressor, a situação se inverte novamente e o R-22 volta a apresentar valores de coeficiente de convecção inferiores aos demais fluidos, com destaque ao R-454C, que apresenta valores médios cerca de 27,5% superiores aos do R-22. Prosseguindo a análise, o R-22 apresenta valores de coeficiente de convecção levemente superiores na região de condensação (particularmente em regiões de títulos mais elevados), com o mesmo ocorrendo na região de sub-resfriamento.

Como adendo, é possível observar que o comportamento do coeficiente convectivo do R-454C apresenta um comportamento um pouco instável na região de sub-resfriamento, próximo às



temperaturas de condensação de 340 K e 350 K, decorrente, provavelmente, de um desvio de convergência dentro do erro estabelecido no processo de iteração.



**FIGURA 6.** Valores de coeficiente convectivo em função de temperaturas e título. Fonte: Autor.

Em linhas gerais, observa-se no presente trabalho que os valores de capacidade de resfriamento ( $\dot{Q}_F$ ) e do COP do sistema são reduzidos quando utilizados os fluidos R-444B e R-454C, de modo que a carga térmica deve ser cuidadosamente observada em uma aplicação de retrofit de modo a avaliar se o sistema existente continuará sendo suficiente para condicionar adequadamente o ambiente.

Os resultados obtidos previamente correspondem às expectativas iniciais do estudo, considerando, sobretudo, o estudo de Panato *et al.* (2017), em que, para as condições operacionais do estudo em questão, haveria uma redução de 9,3% do COP. Naturalmente, existem particularidades entre os métodos, como a utilização de circuitos auxiliares para evaporação e condensação do fluido refrigerante e válvula de expansão eletrônica no estudo de Panato *et al.* (2017), enquanto o presente estudo se embasa em equipamentos de aplicação mais prática, com evaporação e condensação a ar e capilares.

Desta forma, a despeito da redução da capacidade de refrigeração e do COP, é possível constatar a viabilidade operacional do retrofit do R-22 pelos fluidos R-444B e R-454C em sistemas de climatização do tipo mini-split convencionais existentes.

É possível que o retrofit entre os fluidos refrigerantes possa ser realizado para qualquer tipo de sistema de baixa e média temperaturas, tais como multi-split do tipo package (self-contained, rooftop, etc).

Por fim, no que diz respeito à manutenção dos sistemas, a utilização do R-444B ou do R-454C representa um facilitador, tendo em vista que uma vez realizado o processo de retrofit, a recarga de fluido refrigerante pode ser realizada normalmente por qualquer técnico habilitado. Menores temperaturas de descarga e potência do compressor também contribuem para a menor ocorrência de problemas e aumento da vida útil dos sistemas, sendo mais um ponto positivo neste aspecto.

#### 4. CONCLUSÕES

A análise dos sistemas de refrigeração e climatização é de grande relevância no contexto da questão ecológica do planeta e da sustentabilidade. Pode-se dizer que, direta ou indiretamente, eles estão presentes na vida de mais de 7 bilhões de pessoas. Diante de tamanho alcance, é natural que esses sistemas impactem não só a vida humana, mas também a de inúmeras outras espécies. Atualmente, existe o consenso de que as tecnologias humanas podem afetar significativamente a natureza da Terra, incluindo recursos naturais, ecossistemas e até mesmo o clima.

Concomitantemente à sustentabilidade, o conceito de retrofit também tem se apresentado como uma forte tendência. Em se tratando de sistemas de refrigeração e climatização, algumas soluções que aliam esses termos têm ganhado cada vez mais destaque em artigos, fóruns, revistas e demais veículos de comunicação, entre as quais se destacam novas tecnologias de fluidos refrigerantes, como novos HFC's e HFO's.

De modo a permitir uma análise teoricamente embasada e comprovada do ponto de vista prático do processo de retrofit, o presente trabalho consistiu na comparação do desempenho de um sistema utilizando o R-22 e três outros fluidos refrigerantes alternativos, o R-444B, o R-454C e o R-



407C, considerados mais adequados do ponto de vista ecológico (embora tal análise seja somente parcialmente válida para o R-407C, cujo valor de GWP é muito elevado).

A metodologia em questão foi avaliada sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo e se mostrou válida para a comparação de diferentes fluidos refrigerantes funcionando em sistemas de climatização de expansão direta do tipo mini-split.

Os resultados mostraram que os fluidos refrigerantes R-444B, R-454C e R-407C possuem desempenhos relativamente próximos ao do R-22, tanto no que diz respeito aos parâmetros “primários”, como capacidade de resfriamento (com redução média entre 8,8% e 17,6%) e COP (com redução média entre 6,8% e 8,8%), quanto no que diz respeito aos parâmetros “secundários”, como temperatura de descarga (com redução média entre 3,3 K e 20,4 K) e valores de coeficientes convectivos (que apresentaram diferentes comportamentos nas diferentes regiões do ciclo frigorígeno), se apresentando, portanto, como alternativas tecnicamente e economicamente viáveis para seu retrofit.

É importante ressaltar que a metodologia prática desenvolvida neste estudo pode ser estendida ao estudo de retrofit de qualquer sistema de refrigeração ou climatização de expansão direta com condensador remoto.

## REFERÊNCIAS

ANKIT SETHI, ELIZABET VERA BECERRA, SAMUEL F. YANA MOTTA, MARK W. SPATZ. Low GWP R22 replacement for air conditioning in high ambient conditions, International Journal of Refrigeration, Volume 57, 2015.

ASHRAE, ASHRAE Handbook. Fundamentals, SI ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, v. 2017, 2017.

BELL, Ian H. et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. Industrial & engineering chemistry research, v. 53, n. 6, p. 2498-2508, 2014.

BOLES, M.; ÇENGEL, Y. Termodinâmica. 7ª edição. São Paulo: AMGH Editora, p. 6-7, 2013.

ÇENGEL, YUNUS A., BOLES, MICHAEL A., Termodinâmica. Mc Graw Hill, 2006. 740p.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. Métodos Numéricos para Engenharia-7ª Edição. McGraw Hill Brasil, 2016.

CHOUDHARI, C.S.; SAPALI, S.N.. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems, Energy Procedia, Volume 109, 2017.

COOPER, M. G. Saturation Nucleate Pool Boiling: A Simple Correlation, Department of Engineering Science. Oxford University, England, v. 86, p. 785-793, 1984.

DUARTE, Willian M. Numeric model of a direct expansion solar assisted heat pump water heater operating with low GWP refrigerants (R1234yf, R290, R600a and R744) for replacement of R134a. Tese de Doutorado, UFMG. 2018.

DUARTE, Willian Moreira et al. Nonisentropic Phenomenological Model of a Reciprocating Compressor. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 27, n. 04, p. 1950039, 2019.

DUARTE, Willian M. et al. Feasibility of solar-geothermal hybrid source heat pump for producing domestic hot water in hot climates. International Journal of Refrigeration, v. 124, p. 184-196, 2021.

ELGENDY, E.; HASSANAIN, M.; FATOUH, M. Assessment of R-438A as a retrofit refrigerant for R-22 in direct expansion water chiller. International Journal of Refrigeration, v.50, p.127-136, 2015.

KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; ISMAIL, K. A. R. Numerical simulation of a variable speed refrigeration system. International journal of refrigeration, v. 24, n. 2, p. 192-200, 2001.

LIU, Z.; WINTERTON, R. H. S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation. International journal of heat and mass transfer, v. 34, n. 11, p. 2759-2766, 1991.

MERAMVELIOTAKIS, George; KOSMADAKIS, George; KARELLAS, Sotirios. Methods based on a semi-empirical model for simulating scroll compressors with HFC and HFO refrigerants. Open Research Europe, v. 1, n. 148, p. 148, 2022.

MIDEA. Manual técnico de instalação, operação e manutenção Linha Liva, 2022.

MINETTO, Silvia. Theoretical and experimental analysis of a CO<sub>2</sub> heat pump for domestic hot water. International journal of refrigeration, v. 34, n. 3, p. 742-751, 2011.

MOTA-BABILONI, Adrián et al. Refrigerant R32 as lower GWP working fluid in residential air conditioning systems in Europe and the USA. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 1031-1042, 2017.

MOLINA, M. J., ROWLAN. F. S., 1974. Stratospheric sink for chlorofluorometanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone. Nature 249, 810-812.

PANATO, Victor H., PORTO, Matheus P, BANDARRA FILHO, Enio P. Experimental performance of an R-22-based refrigeration system for use with R-1270, R-438A, R-404A and R-134a, 2017.

PAULA, Cleison H. et al. Energetic, Exergetic, Environmental, and Economic Assessment of a Cascade Refrigeration System Operating with Four Different Ecological Refrigerant Pairs. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 29, n. 03, p. 2150025, 2021.

PAULINO, Tiago F. Experimental and theoretical study of the dynamic response of a small size CO<sub>2</sub> direct expansion solar assisted heat pump. Tese de Doutorado, UFMG. 2019.

RABELO, Sabrina N. et al. Economic analysis and design optimization of a direct expansion solar assisted heat pump. Solar Energy, v. 188, p. 164-174, 2019.

RASMUSSEN, Bjarne D., JAKOBSEN, Arne. Review of compressor models and performance characterizing variables, 2000. International Compressor Engineering Conference. Paper 1429.

SHAH, Mirza M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. International Journal of heat and mass transfer, v. 22, n. 4, p. 547-556, 1979.

SHAH, Mirza M. New general correlation for heat transfer during saturated boiling in mini and macro channels. International Journal of Refrigeration, v. 137, p. 103-116, 2022a.

SHAH, Mirza M. Improved correlation for heat transfer during condensation in mini and macro channels. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 194, p. 123069, 2022b.

STOECKER, W. F., JONES, J. W., Refrigeração e Ar Condicionado. McGraw Hill, 1985. 481p.

YANG, Bin, BRADSHAW, Craig R., GROLL, Eckhard A. Modeling of a semi-hermetic CO<sub>2</sub> reciprocating compressor including lubrication submodels for piston rings and bearings. International journal of refrigeration, v. 36, n. 7, p. 1925-1937, 2013.