



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

Análise da eficiência exergética e potencial de aquecimento global (GWP) de diferentes tipos de refrigerantes em um sistema de refrigeração VRF

André Guidelli Camilo dos Santos, Luciano Fernando dos Santos Rossi

RESUMO

O impacto ambiental dos fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de ar condicionado tem aumentado as discussões para encontrar refrigerantes substitutos para os processos convencionais. Desta forma, neste trabalho propõem-se fazer uma análise da eficiência exergética de um ciclo de refrigeração VRF adaptado de Yildiz (2015), com diferentes tipos de refrigerantes, a fim de discutir a escolha de seu refrigerante, com a perspectiva de sua eficiência exergética, assim como do seu impacto ambiental. Para tal objetivo, o sistema em estudo foi descrito através de um modelo matemático para a análise exergética, sendo sua solução, originariamente para o fluido R410A, estendida para outros fluidos de refrigeração de interesse. Os dados dos fluidos foram obtidos do programa REFPROP. Constatou-se que o fluido R290 não atingiu valores de pressão e temperatura factíveis ao ciclo, e que as eficiências energéticas foram praticamente iguais para todos os fluidos testados. Os fluidos HFO obtiveram eficiências exergéticas similares ao R410A. Os fluidos R459A, R454B e R446A foram sugeridos como substitutos ao R410A, pois apresentaram valores de parâmetros de maior eficiência e de menor GWP, além de caracterizarem-se por um nível de segurança mais elevado.

Palavras-chave: VRF. Eficiência exergética. Refrigerantes alternativos. R410A.

ABSTRACT

The environmental impact of refrigerants used in air conditioning systems has increased the discussions to find substitute refrigerants for conventional processes. In this work, an analysis of the exergetic efficiency of a VRF refrigeration cycle adapted from Yildiz (2015) is proposed, with different types of refrigerants, in order to discuss about the choice of its refrigerant, with the prospect of its exergetic efficiency, as well its environmental impact. For such purpose, the system under study was constructed through a mathematical model for an exergetic analysis, its solution, originally for the R410A fluid, being extended to other cooling fluids of interest. Fluid data were obtained from the REFPROP program. It was found that R290 fluid did not reach cycle-feasible pressure and temperature values, and that the energy efficiencies were practically the same for all tested fluids. HFO fluids obtained exergetic efficiencies similar to R410A. The R459A, R454B and R446A fluids were suggested as substitutes for R410A, as they presented higher efficiency values and lower GWP, in addition to being characterized by a higher level of safety.

Keywords: VRF. Exergy efficiency. Alternative Refrigerant. R410A.

1 INTRODUÇÃO

Hoje, muito se procura projetar sistemas de ar condicionado com maior eficiência energética e que proporcionem maiores vantagens termoeconômicas, principalmente pelo cenário da demanda por energia

elétrica no mundo. E neste quesito, um dos ciclos de condicionamento de ar que mais têm se destacado no mercado é o sistema VRF.

O ciclo de refrigeração presente no sistema VRF, ou Vazão de Refrigerante Variável, em português, é categorizado como multi-split pelo fato de uma única unidade condensadora estar conectada a várias evaporadoras.

Aynur (2010) explica que o ciclo interno percorrido pelo fluido refrigerante consiste de um ciclo onde se varia a vazão mássica de refrigerante de acordo com a carga térmica dos ambientes internos, com a ajuda de um compressor de velocidade variável e válvulas de expansão eletrônicas na entrada de cada unidade interna, mantendo assim a zona refrigerada na temperatura escolhida. Desta forma, o sistema VRF “pode responder ativamente às flutuações nas condições de carga espacial” (AYNUR, 2010).

O estudo da eficiência energética é baseado na primeira lei da termodinâmica. Porém, conforme Ahamed et al. (2010), apenas a primeira lei não provê informações sobre como, onde e a quantidade de irreversibilidades que é gerada no ciclo. Entendendo a exergia como uma propriedade que avalia a máxima capacidade que uma determinada quantidade de matéria ou fluxo detém para causar mudanças (MORAN et al., 2013), a abordagem exérgica traz essas informações, determinando quais os locais onde esta capacidade é perdida por ineficiências do sistema. Por ser baseada em ambas primeira e segunda leis da termodinâmica, pode “fornecer uma visão maior e mais profunda do processo, assim como novas ideias não exploradas para melhorias” (AHAMED et al., 2010).

O objeto da análise exérgica, a exergia, é nada mais do que a disponibilidade de energia que um sistema ainda possui com relação ao estado morto, sendo este um estado de repouso termofísico em relação às vizinhanças, ou simplesmente em outras palavras, a exergia é o máximo trabalho que pode ser extraído de um sistema (MORAN et al., 2013).

Um dos aspectos que alteram a performance de um sistema é o fluido refrigerante selecionado. Identificar o melhor refrigerante é uma tarefa que pode aprimorar a eficiência e a economia de energia (GOETZLER et al., 2014), porém a escolha do refrigerante não pode andar desacompanhada de discussões sobre os impactos ambientais que os refrigerantes produzem. Os refrigerantes R-12 e R-22 foram os mais utilizados em sistemas de ar condicionado, porém de acordo com o protocolo de Montreal, ambos têm alto potencial para o aquecimento global e, por isso, devem ser substituídos (PADILLA, 2010).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 EXERGIA

MORAN et al (2013) dizem que a eficiência pode ser definida como o trabalho máximo teórico que um sistema pode desenvolver com relação ao estado morto, em que se encontra em equilíbrio com sua vizinhança

Nos termos da primeira e segunda lei da termodinâmica, fazendo um balanço de energia que representa estes dois estados, SANTOS (2018) demonstra que a taxa de exergia envolta em um volume de controle pode ser descrita como na equação 2.1.

$$\dot{\left. \frac{dA}{dt} \right|_{cv}} = \int_{\xi} \left(1 - \frac{T_o}{T_s} \right) q_s d\xi - \left(\dot{W} - p_o \frac{dV}{dt} \right) + \sum_i \dot{m}_i a_{f,i} - \sum_e \dot{m}_e a_{f,e} - I \quad (2.1)$$

Onde A é a exergia do sistema, t é o tempo, T_o e P_o são a temperatura e pressão da vizinhança, respectivamente, T_s é a temperatura do volume de controle ξ onde q_s é a taxa de transferência de calor. W é a taxa de trabalho exercido pelo sistema, V é o volume, m é vazão mássica, a_f é a exergia de escoamento atravessando o volume de controle e I é a taxa de destruição de exergia.

Em uma observação mais profunda, a equação (2.1) tem sua importância por expressar com clareza os modos através dos quais a exergia pode ser alterada no sistema. Desta forma, ela pode ser reescrita nos termos da equação (2.2).

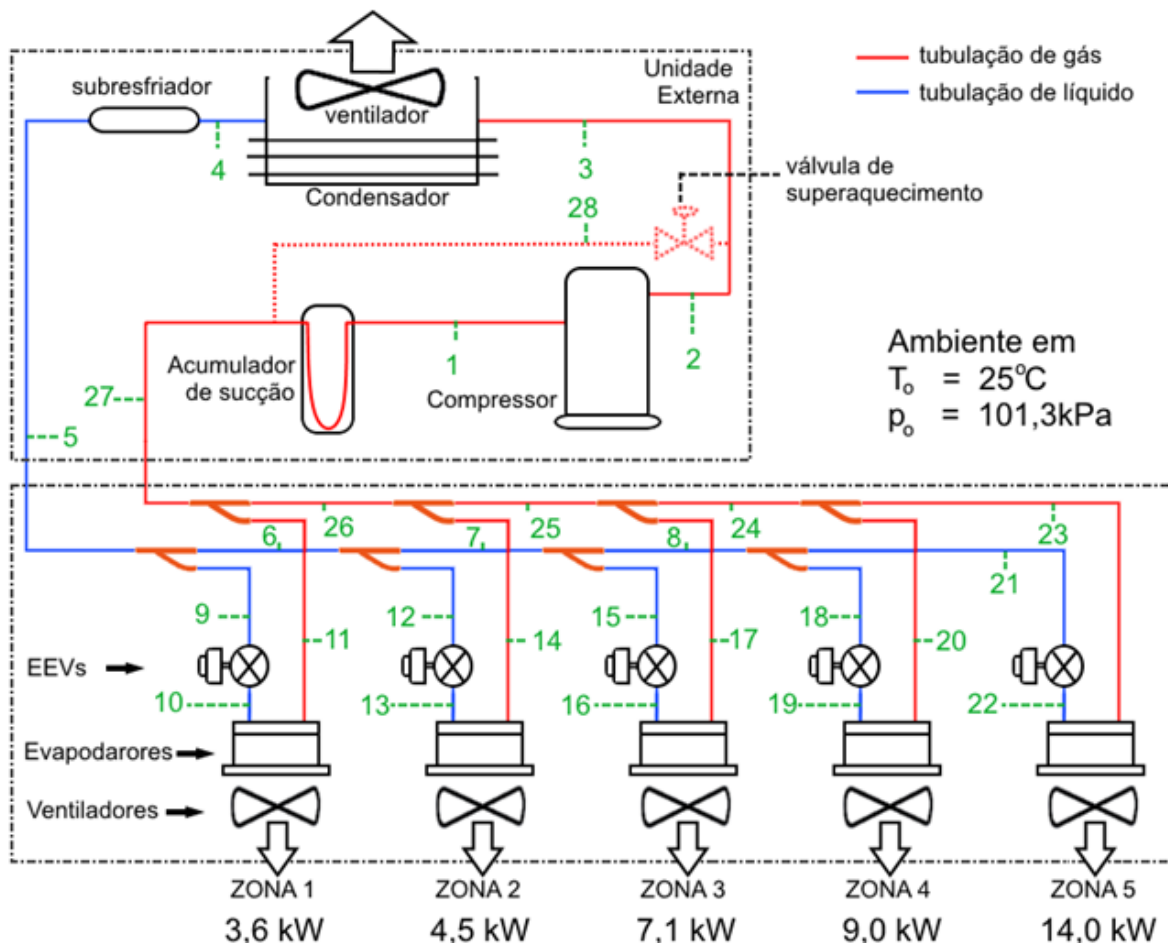
$$\dot{\left. \frac{dA}{dt} \right|_{cv}} = \dot{A}_q|_{cv} - \dot{A}_w|_{cv} + \dot{A}_m|_{cv} - \dot{A}_{des}|_{cv} \quad (2.2)$$

Onde \dot{A}_q é a exergia associada à transferência de calor, \dot{A}_w representa a exergia associada às interações de trabalho, \dot{A}_m é a exergia associada ao transporte de massa através das fronteiras do volume de controle, e \dot{A}_{des} é a taxa de exergia destruída pelas irreversibilidades do sistema.

2.2 CICLO DE RESFRIAMENTO VRF A SER ESTUDADO

A fim de cumprir os objetivos deste projeto, um ciclo de estudo foi adaptado de Yildiz (2015) para ser feita uma análise exérgica do mesmo, mantendo alguns de seus dados iniciais e a metodologia. O fluido utilizado pelo ciclo será mantido como sendo o R410A. Desta forma, serão analisados 28 pontos de interesse no sistema, que podem ser vistos por sua representação esquemática do sistema na Figura 2.1 .

Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..1** – Esquemático do ciclo de refrigeração VRF analisado neste projeto.



Fonte: Adaptado de Yildiz (2015)

2.3 ESCOLHA DOS REFRIGERANTES A SEREM ESTUDADOS

O Instituto de Ar Condicionado, Aquecimento e Refrigeração (AHRI) lançou um programa de pesquisa cooperativa com a indústria para “identificar e avaliar refrigerantes alternativos promissores” (AMRANE, 2017), que foi intitulado Programa de Avaliação de Refrigerantes Alternativos (AREP).

Neste programa, assim como por Goetzler et al. (2014), foi identificado que para o fluido R410A não existem atualmente alternativas viáveis na classificação A1 (vide **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) de segurança., porém foram identificados diversos fluidos alternativos na classificação A2L, que indica uma leve inflamabilidade.

Goetzler et al. (2014) indicam que fluidos naturais como o propano entraram novamente em discussão para aplicações específicas, pois a natureza inflamável está sendo questionada como elemento excludente destes fluidos, pois eles possuem baixos níveis de GWP e possuem uma eficiência relativamente boa se comparado ao R410A, assim como verificado pelo HFC R32. Portanto, estes dois fluidos (propano e R32) serão testados no ciclo VRF do

presente trabalho.

Adicionalmente, o AHRI colocou em sua linha de pesquisa, na denominada Fase II de seus projetos, refrigerantes HFO que potencialmente serão os substitutos do R410A nas próximas décadas (AMRANE, 2017). Desta forma, estes fluidos também serão testados no ciclo VRF do presente trabalho. Suas propriedades serão obtidas do programa REFPROP, em sua versão 9.1, que permite a inserção manual de novas misturas de refrigerantes.

A Tabela 1 resume a escolha dos refrigerantes e suas principais características, baseadas nas discussões deste capítulo.

É importante ressaltar que novos refrigerantes estão surgindo e que a seleção dos refrigerantes em estudo neste trabalho está limitada à base de dados do programa REFPROP, sendo que os fluidos terão suas misturas simuladas, de forma a prover os dados necessários para resolver o ciclo, podendo ocasionar em erros nos valores de pressão de saturação de vapor e líquido de até 15%.

Tabela 1 – Características dos Fluidos refrigerantes selecionados

Nome ASHRAE	Composição (% Massa)	Grupo de Segurança	GWP (100 anos)
R410A	R32/R125 (50/50)	A1	2088
R32	CH ₂ F ₂	A2	677
R290	C ₃ H ₈	A3	3
R452B	R32/R125/R1234yf (67/7/26)	A2L	676
R454B	R32/R1234yf (68,9/31,1)	A2L	467
R459A	R32/1234yf/1234ze(E) (68/26/6)	A2L	461
R446A	R32/R1234ze(E)/R600 (68/29/3)	A2L	460
R447A	R32/R1234ze(E)/R125 (68/28,5/3,5)	A2L	572
HPR2A ¹	R-32/134a/1234ze(E) (76/6/18)	A2L	600

¹Ainda não possui nome oficial da ASHRAE.

Fonte: Adaptado de Bitzer (2014), Goetzler et al. (2014) e Amrane (2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 SOLUÇÃO DO CICLO PARA O REFRIGERANTE R410A

O ciclo foi resolvido para todos os refrigerantes conforme descrito nos capítulos anteriores. Os resultados para o fluido principal podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do ciclo VRF para o refrigerante R410A

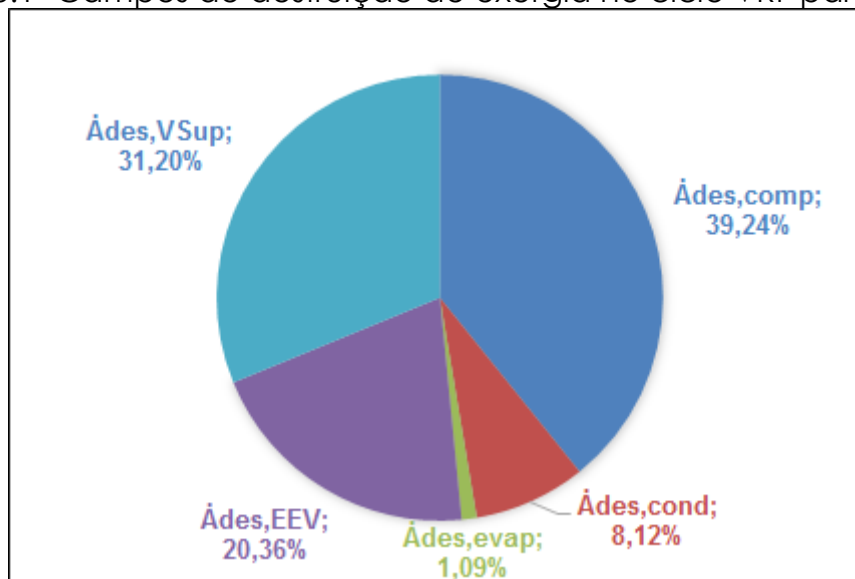
T _{comp}	P _{alta}	P _{baixa}	ṁ [kg/s]	COP	η _{ciclo}	Ā _{des,total}	E
84,05°C	3070,6kPa	1086,6kPa	0,3624 kg/s	2,56	36,11%	6,79kJ	66,15%

Fonte: Autoria Propria

Pode-se observar que os resultados foram muito semelhantes aos obtidos por Yildiz (2015), confirmando que o ciclo está resolvido corretamente em seus pontos termodinâmicos. Observa-se que mesmo com as considerações

propostas a eficiência do ciclo é baixa, pois foram considerados os trabalhos necessários para os evaporadores e o condensador. Uma análise mais apurada da exergia pode ser obtida através dos campos de destruição, conforme mostra a Figura 3.1:

Figura 3.1- Campos de destruição de exergia no ciclo VRF para R410A.



Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que o campo que é mais responsável pela destruição da exergia é o compressor. Isto pode ser explicado porque foi adotado um rendimento isentrópico relativamente conservador de 75%, o que inclui as perdas de calor ao ambiente. Na prática, estas perdas podem ser atenuadas ao se desenvolverem métodos de isolamento ou que mitiguem esta troca de calor, fazendo com que a eficiência do compressor seja mais elevada.

Pode-se notar que as válvulas de expansão (de superaquecimento e expansão eletrônica), quando somadas, são as maiores responsáveis pela destruição da disponibilidade de energia (exergia), com mais de 50% do total. Em especial, a válvula de superaquecimento é um elemento que em muitas análises energéticas é desconsiderado, porém neste ciclo pode-se demonstrar que para uma análise exergética ela se faz um componente de grande impacto nos resultados.

Quanto ao condensador, pode-se pensar na implantação de aletas com maior eficiência em troca térmica, mantendo assim uma maior disponibilidade de energia no sistema. Os evaporadores, por sua vez, são os componentes que menos contribuem para a destruição de exergia no ciclo.

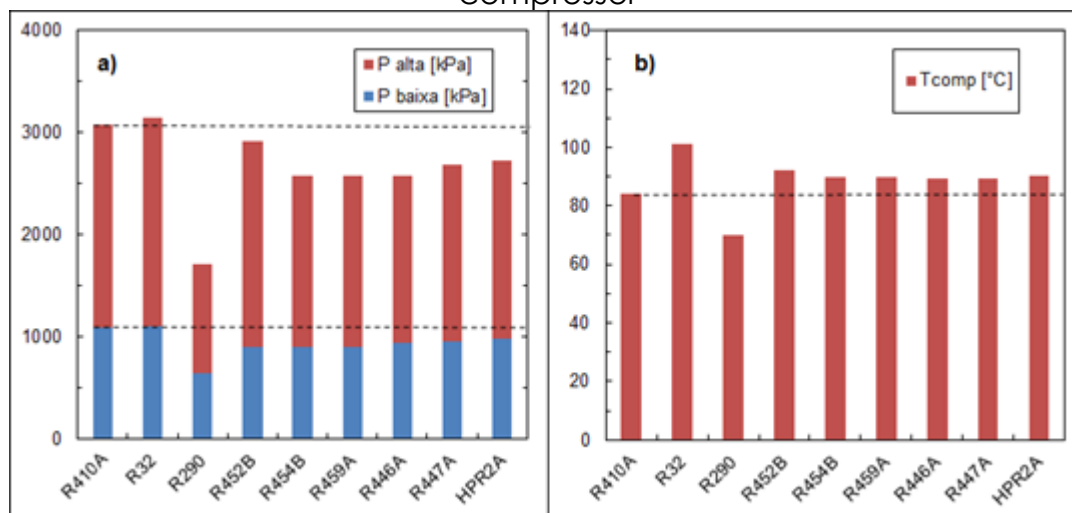
3.2 SOLUÇÃO PARA DEMAIS REFRIGERANTES

O Ciclo VRF em estudo também foi resolvido para os demais refrigerantes, e de forma comparativa os resultados serão apresentados e discutidos. Pode-se observar pela que as pressões dos fluidos R32 e R452B foram as mais próximas em relação ao R410A. Os outros fluídos atingiram patamares de pressão

relativamente aceitáveis para o funcionamento do sistema sem maiores alterações. Porém apenas o fluido R290 obteve patamares de pressões distantes ao R410A em relação aos demais refrigerantes.

Um valor que merece atenção, mas não é preocupante para este ciclo foi o obtido pelo R32, de 101,08°C, pois existindo flutuações na temperatura este valor pode chegar aos valores máximos admitidos para o compressor. Os demais refrigerantes obtiveram valores de descarga acima daquele para o R410A, porém valores relativamente aceitáveis.

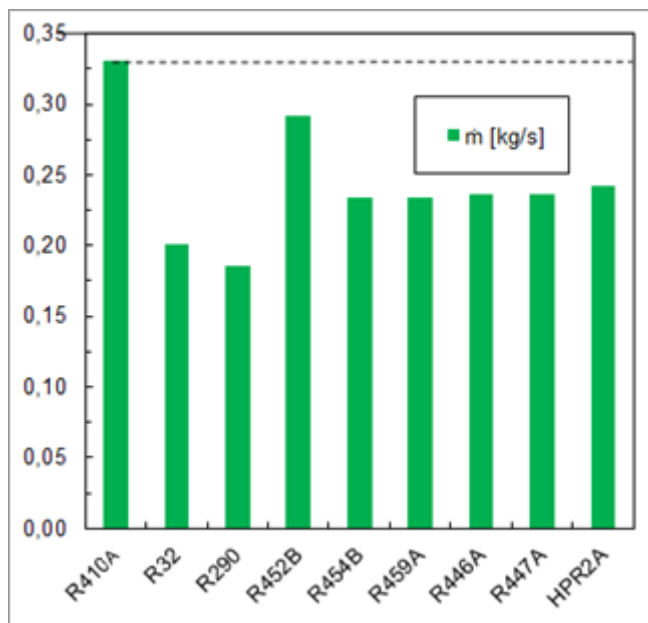
Figura 3.2- a) Pressões alta e baixa do ciclo b) Temperatura na descarga do compressor



Fonte: Autoria Própria.

A vazão mássica é representada pela Figura 3.3. Pode-se observar que o comportamento da vazão mássica acompanha o comportamento das pressões do sistema representado na Figura 3.2-a). Portanto, da mesma forma, o fluido R452B seria mais adequado ao ciclo se comparado aos outros refrigerantes, caso o compressor não fosse de velocidade variável. Porém como este não é o caso, o compressor se adaptará aos valores de vazão dos outros fluidos.

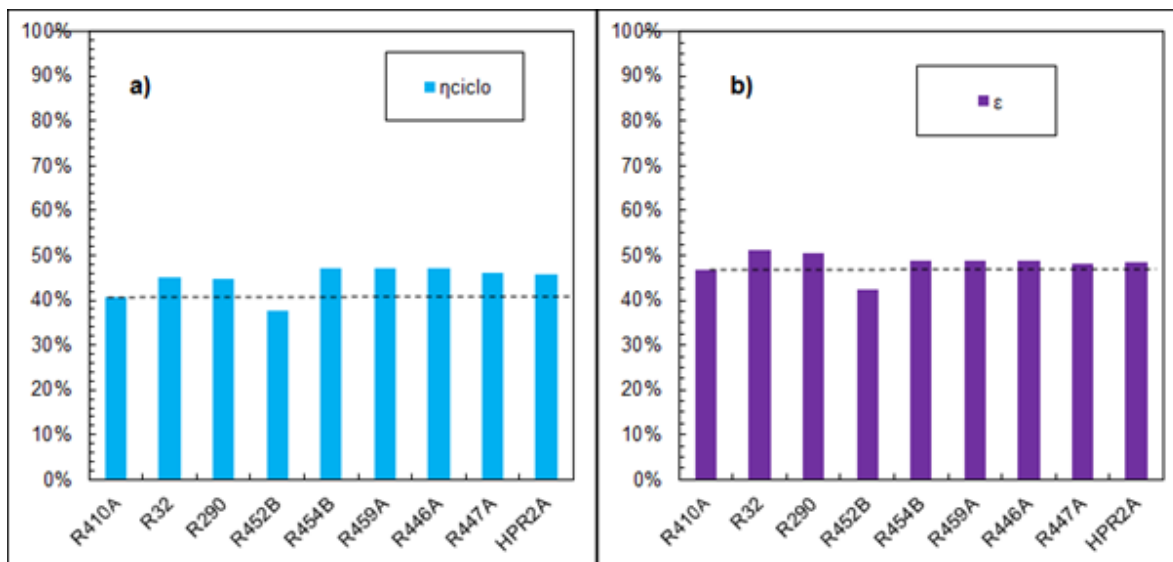
Figura 3.3 – vazões mássicas do ciclo no compressor



Fonte: Autoria Própria

Da Figura 3.4-a) é possível observar que todas as eficiências dos ciclos foram relativamente parecidas. Observa-se, também, que apenas o refrigerante R452B obteve um valor menor quando comparado ao R410A. O valor de eficiência para os fluidos R32 e R290 se encontrou mais elevado porque a razão entre suas pressões de alta e baixa é menor, o que beneficia o trabalho necessário ao compressor.

Figura 3.4- eficiências: a) energéticas do ciclo b) exergéticas do ciclo



Fonte: Autoria Própria

Porém pode-se observar pela Figura 3.4-b) que todos os refrigerantes HFO obtiveram valores muito similares ao R410A, mostrando que se forem dados como substitutos do R410A, a exergia seria, de modo prático, igualmente aproveitada no ciclo.

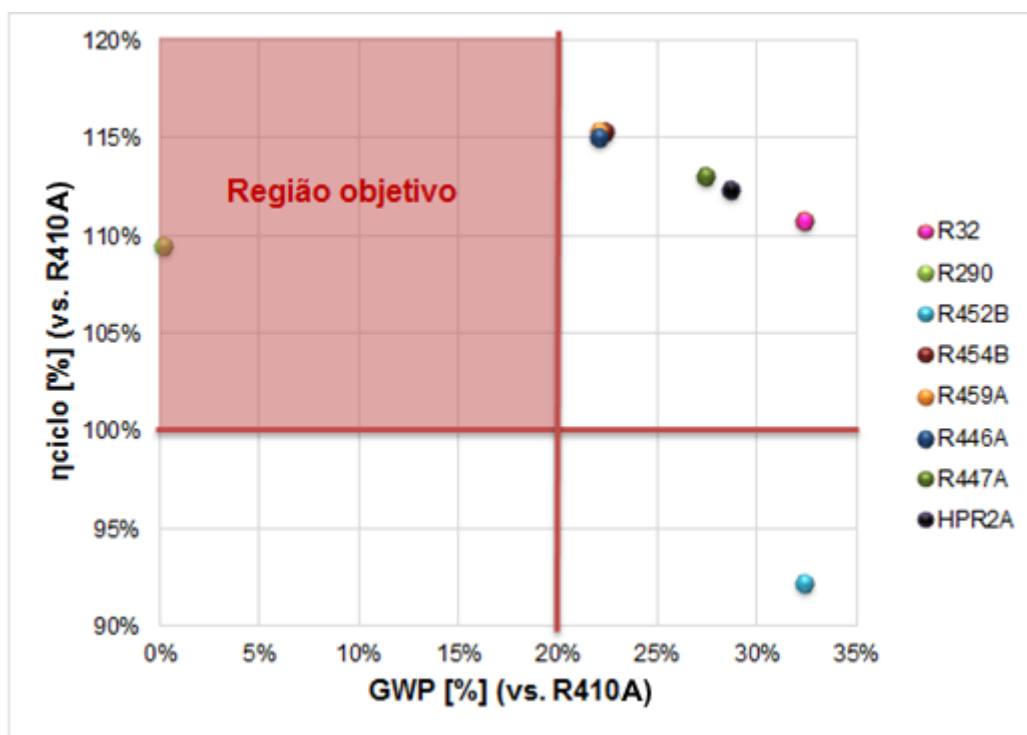
3.3 SUGESTÃO DE REFRIGERANTE SUBSTITUTO AO R410A

3.3.1 Refrigerante substituto quanto ao GWP e eficiência do ciclo

Olhando-se apenas para os parâmetros operacionais, não há uma real necessidade de substituição do R410A, pois as eficiências dos ciclos foram relativamente parecidas. Mas de acordo com a análise no capítulo 2.3, pela quantidade de GWP do R410A faz-se necessário essa substituição.

Porém, para não manter estes estudos como únicos parâmetros isolados, É necessária uma última análise para se encontrar um valor desejado de fluido substituto, onde espera-se que ele tenha uma eficiência do ciclo maior que o R410A e um valor de GWP abaixo de 20%, sendo esta a meta para o Brasil de redução até 2045. Os valores foram colocados juntos em um gráfico, mostrado na Figura 3.5, a seguir.

Figura 3.5 – Eficiência do ciclo e GWP dos demais refrigerantes comparados ao R410A



Fonte: Autoria Própria

A Figura 3.5 mostra que o fluido que atingiu a região objetivo foi o propano (R290), porém nas seções anteriores observou-se que o mesmo não atingiu patamares de pressões que o configurasse como um refrigerante substituto ao R410A.

3.3.2 Refrigerante substituto quanto ao grupo de segurança ASHRAE

Outro aspecto está relacionado aos níveis de segurança. Esta é uma análise mais complicada de se aprofundar, pois seus parâmetros envolvem a instalação física em que o ciclo de refrigeração será instalado, envolvendo condições do sistema de refrigeração como um todo, o que foge do escopo do trabalho.

Mas para instalações comerciais em geral, a classificação nos níveis de segurança A2L indica que a é aceitável. Isto desconfigura os refrigerantes R32 e R290 como substitutos ao R410A. O R290 em especial é um fluido altamente inflamável, o que o coloca como viável em aplicações muito restritas, mas não para a proposta deste trabalho.

4.3.3 Análise global da sugestão para um refrigerante substituto ao R410A

Seguindo as análises deste capítulo, as melhores sugestões para o fluido refrigerante serão os fluidos R459A, R454B e R446A, pois os três alcançaram valores muito próximos à região objetivo, além de se encontrarem em um nível de segurança aceitável (Grupo A2L). Porém, os demais refrigerantes HFO também são substitutos viáveis à substituição do R410A, apesar de neste ciclo obterem valores menos esperados que os três fluidos supramencionados, uma vez que promovem uma redução significativa quanto aos níveis de GWP e obtiveram um valor de eficiência relativamente próximo aquele apresentado pelo R410A.

5 CONCLUSÕES

- Os valores do ciclo foram obtidos para o refrigerante R410A e ficaram em conformidade com os valores do artigo base, validando os resultados.
- A solução do ciclo foi expandida para outros fluidos refrigerantes, cujas propriedades foram obtidas do REFPROP, e observou-se que apenas o fluido R290 obteve valores de pressão e temperatura relativamente distantes ao R410A, quando comparado aos demais refrigerantes.
- Os valores da eficiência energética obtido com todos os refrigerantes foram relativamente parecidos, apesar da diferença entre suas composições.
- Os valores da eficiência exergética obtido com os refrigerantes HFO foi relativamente igual ao obtido com o R410A. Os fluidos R32 e R290 obtiveram maiores valores, indicando que a disponibilidade de energia foi melhor aproveitada no ciclo.
- Os refrigerantes R459A, R454B e R446A apresentam valores de eficiência energética e exergética do ciclo, GWP e níveis de segurança mais próximos ao esperado como objetivo, sendo estes recomendados para a substituição do R410A para este ciclo proposto.

Os demais refrigerantes HFO também se mostraram potenciais substitutos do R410A, sendo assim são dignos de se notar que para outras condições estes poderiam ser escolhidos como um substituto ao R410A.

REFERÊNCIAS

AHAMED, J. U. et al., **A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, p. 1593-1600, 2010.

AMRANE, K. **Everything You Need to Know About the Coming Changes in the Global, Federal, and State Refrigerant Landscape**. In: 12th IEA Heat Pump Conference. 2017,

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

Rotterdam, Holanda. Disponível em: <<https://hpc2017.org/wp-content/uploads/2017/06/PO.02.pdf>> Acesso em: 13 jun. 18.

AYNUR, T. N. **Variable refrigerant flow systems: A review**. Energy and Buildings Vol. 42, p. 1106-1112, 2010.

BITZER, **Refrigerant Report 18**, 2014. DISPONÍVEL EM: <https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-501-18.pdf> Acesso em: 15 jun. 18.

GOETZLER, W., et al., **Research & Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants**. Burlington: U.S Department of Energy, 2014. (Nota Técnica).

MORAN, J. M., et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PADILLA, M., **EXERGY ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF A VARIABLE REFRIGERANT FLOW (VRF) AIR CONDITIONING SYSTEM**. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. Vol. 19, p. 57-68, 2010.

SANTOS, André Guidelli Camilo dos. **Análise da eficiência exergética de um sistema de refrigeração VRF com diferentes tipos de refrigerantes**. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

YILDIZ, A. et al., **Determination of the economical optimum insulation thickness for VRF (variable refrigerant flow) systems**. Energy, Vol. 89, p. 835-844, 2015.