

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO CASCATA SUBCRÍTICO COM
R-513A/CO₂

Marcella Carvalho Agostinho – marcella_agostinho@hotmail.com
Marcus Vinícius Almeida Queiroz – engmarcusalmeida@hotmail.com
Victor Machado Martins – victormmartins4005@hotmail.com
Arthur Heleno Pontes Antunes – arthur.antunes@ufu.br
Enio Pedone Bandarra Filho - bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, www.ufu.br

R1 – Sistemas, Equipamentos e Componentes

Resumo. Este trabalho apresenta uma investigação experimental de um sistema cascata subcrítico utilizando o par de refrigerantes R-513A / R744, como opção para sistemas de expansão direta convencionais instalados em supermercados, que normalmente operam com refrigerantes halogenados como o R22. O aparato experimental é composto por dois ciclos de refrigeração, um ciclo de baixa temperatura, constituído por um compressor alternativo de velocidade variável para R744 e uma válvula de expansão eletrônica, que promove a evaporação direta do R744 dentro de uma câmara fria, a fim de manter a temperatura interna do ar constante. Já o ciclo de alta temperatura é formado por um compressor alternativo operando com R-513A, válvula de expansão eletrônica e um condensador arrefecido a ar. Um trocador de calor a placas que atua como condensador para o R744 e como evaporador para o R-513A, completando a configuração do sistema. Realizaram-se ensaios variando o grau de superaquecimento do R744 entre 5 e 15K, além das frequências de operação dos compressores de ambos os ciclos. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema cascata operando com o par R513A/R744 é uma possível alternativa para a faixa de aplicação ensaiada, além de propiciar uma redução no impacto ambiental, visto que o sistema em estudo utiliza uma carga de refrigerante sintético menor do que os sistemas de expansão direta convencionais.

Palavras-chave: Refrigeração, Cascata, R744, R-513A.

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência das mudanças climáticas no cenário mundial, a preocupação com as consequências de problemas ambientais como o aquecimento global e a degradação da camada de ozônio tem impulsionado o setor de refrigeração e ar condicionado a buscar alternativas para a redução de emissões nocivas ao clima, especialmente no que diz respeito ao uso dos fluidos refrigerantes.

A partir do Protocolo de Montreal (1987) foram desenvolvidas diversas alternativas para a diminuição do impacto ambiental visando à substituição dos gases CFC (clorofluorcarbono) e HCFC (hidroclorofluorcarbono), que prejudicam a camada de ozônio por opções com ODP (Ozone Depletion Potential ou Potencial de Destruição do Ozônio) nulo.

Dessa forma, os HFCs (hidrofluorcarbonos) surgiram como substitutos diretos dos CFCs e HCFCs. Ainda que os HFCs possuam um potencial de destruição da camada de ozônio nulo, estes fluidos contribuem significativamente para o aumento da temperatura do planeta, devido ao seu elevado potencial de aquecimento global (GWP).

Com a adoção do Protocolo de Kyoto (1997) o objetivo de reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GWP) incluiu a família HFCs, sendo este reforçado pela adoção da emenda de Kigali (2016) a qual define um cronograma de redução da produção e consumo dos HFCs até um patamar mínimo.

Para atender a esses acordos ambientais, a indústria de refrigeração segue lançando novas soluções adequadas a esse cenário, apresentando como resultado uma nova geração de fluidos refrigerantes, os HFOs (hidrofluorolefinas) caracterizados por possuir ODP nulo e baixo GWP. Os mesmos podem ser utilizados puros ou como misturas HFO/HFC, como exemplo, o R-513A utilizado no presente trabalho.

Nesse mesmo sentido de não contribuir para a redução da camada de ozônio e incremento do efeito estufa, fluidos naturais como os hidrocarbonetos e dióxido de carbono são tidos como possíveis soluções, com ODP = 0 e GWP muito baixo.

A avaliação quantitativa deste impacto relacionado ao efeito estufa pode ser dada pelo GWP100a definido como a massa de CO₂ que produziria o mesmo impacto por 100 anos, sobre o aquecimento global com a liberação de uma única unidade (kg) do componente dado à atmosfera (Molina e Rowland, 1974).

O fluido refrigerante R22 amplamente utilizado pelo setor comercial no Brasil, especificamente em supermercados, possui ODP = 0,055 e GWP100a = 1810 apresentando um grande impacto sobre o aumento do aquecimento global. O R744 tem um valor ODP igual a zero e GWP100a unitário, sendo uma boa opção em termos ambientais, além disso possui um grande potencial para aplicações em supermercados, apesar das elevadas pressões de trabalho. O R134a é um HFC com ODP nulo e, de acordo com IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2007), o valor do

GWP em 100 anos para este refrigerante equivale a 1300, calculado de acordo com o AR5 (Assessment Relatório 5) do IPCC. Enquanto, segundo a mesma fonte, o R-513A (HFO/HFC) possui ODP = 0 e GWP100a = 573.

Muitas obras fazem referência ao uso do R744 no setor de refrigeração. Em 1990, o professor norueguês Gustav Lorentzen afirmou que a solução para os problemas ambientais seria encontrada a partir da utilização dos fluidos de trabalho naturais, sendo um dos primeiros a trabalhar com amônia e CO₂. A partir desse momento muitos outros autores têm estudado extensivamente tais aplicações.

Montagner e Melo (2011) analisaram, experimentalmente, ciclos termodinâmicos de R744 para refrigeração comercial. O efeito da carga de refrigerante e do tipo de dispositivo de expansão (tubo capilar ou válvula termostática) foram analisados, os resultados obtidos demonstraram que o desempenho do sistema depende de ambos os parâmetros. A válvula termostática promove um melhor controle das condições de evaporação, isto é, a temperatura de evaporação e o grau de superaquecimento atingiram valores ótimos.

Silva et al. (2012) realizaram um trabalho experimental relacionado com a eficiência energética em dois diferentes sistemas usados em aplicações em supermercados. Os sistemas consistem em um ciclo em cascata subcrítico com os pares R744 / R404A e R744 / R22. Os resultados mostraram uma redução no consumo de energia, 13-24 %, quando se compara o sistema em cascata aos sistemas de expansão direta. Outro fato importante analisado pelos autores está relacionado à carga dos sistemas. O sistema em cascata utiliza 32 kg de CO₂ e 15 kg de R404A, enquanto o sistema de expansão direta utiliza 125 kg de R404A e 115 kg de R-22. A quantidade de refrigerante influencia o custo final da operação, uma vez que se deve ter em conta a substituição do fluido no sistema.

Lee et al. (2006) analisaram um sistema em cascata R744-R717, do ponto de vista termodinâmico a fim de determinar a temperatura de condensação ótima de R744 no circuito de baixa temperatura. As exigências das normas ambientais são melhor atendidas utilizando refrigerantes naturais tanto no ciclo de baixa temperatura como no de alta temperatura.

Messineo (2011) também utiliza o par R744-R717 em cascata, para comparar o desempenho de um sistema de refrigeração com baixas temperaturas de evaporação (-30 °C ÷ -50 °C) utilizando R404A em dois estágios. Conclui-se que por questões energéticas, ambientais e de segurança, o sistema cascata é uma boa alternativa ao sistema utilizando o fluido sintético R404A.

Sachdeva et al. (2014) concluíram, em trabalho numérico, que para um sistema de refrigeração em cascata operando com R744 no ciclo de baixa temperatura e no ciclo de alta temperatura os fluidos: R717, R404A, R290, R1270, R12, o que apresenta valores mais altos de COP é o R717, enquanto o R404A possui o pior COP dentre os fluidos analisados.

Sánchez et al. (2017) em um trabalho experimental analisaram o consumo de energia de um sistema em cascata direto e indireto. Comparando um sistema cascata operando com R744 / R134a com os ciclos de baixa e alta temperatura em expansão direta e o mesmo par operando em um sistema indireto (usando um loop de fluido secundário para atender o ciclo de temperatura média e expansão direta para os gabinetes de baixa temperatura). Concluiu-se que todos os sistemas analisados podem manter as temperaturas do produto, e o consumo de energia aumenta de um sistema direto em cascata para um sistema em cascata indireto usando uma mistura de propileno-glicol / água (40% vol.) como fluido secundário, entre 3,0 e 14,0% e usando o Temper-20®, entre -0,3 a 11,1%.

O objetivo deste estudo experimental é avaliar o desempenho do sistema em cascata subcrítico utilizando o par R744 / R-513A a partir de testes realizados no aparato experimental existente no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-Nano) da Universidade Federal de Uberlândia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental é composto por um compressor alternativo de velocidade variável para o R744 e uma válvula de expansão eletrônica que permite a evaporação direta do CO₂ no interior de uma câmara fria de dimensões 2,3m x 2,6m x 2,5m, assegurando que a temperatura interna do ar seja mantida estável. Dessa forma, o R744 deixa o compressor no estado de vapor superaquecido, é condensado e posteriormente armazenado em um tanque de líquido. Após deixar o tanque de líquido, o fluido passa por um medidor de vazão tipo Coriolis e em sequência pela válvula de expansão eletrônica, expandindo-se diretamente na unidade evaporadora. Após sua expansão, o R744 encontra-se no estado superaquecido, apesar disso, o seu grau de superaquecimento é aumentado ainda mais ao atravessar um trocador de calor intermediário. O ciclo é concluído com o R744 retornando à sucção do compressor.

O ciclo de alta temperatura é constituído basicamente por um compressor alternativo de velocidade variável para o R-513A, uma válvula de expansão eletrônica e um condensador arrefecido a ar. Um trocador de calor de placas planas, que opera como condensador para o R744, serve também como evaporador para o sistema de R-513A, sendo assim a interface entre os ciclos de baixa e alta temperatura completando a configuração do sistema. A bancada experimental é ilustrada conforme a Fig. 1 e seu diagrama esquemático é apresentado de acordo com a Fig. 2.

Três parâmetros básicos podem ser manipulados no sistema: o grau de superaquecimento do R744, a frequência de operação dos compressores de R744 e R-513A e a carga térmica dentro da câmara fria. Um banco de resistências elétricas é localizado dentro da câmara fria e dissipa 1,5 ou 3,0 kW de potência, permitindo assim a simulação da carga térmica do sistema. Os compressores do sistema operam com frequência variável na faixa de 35 a 65 Hz.



Figura 1 - Bancada experimental

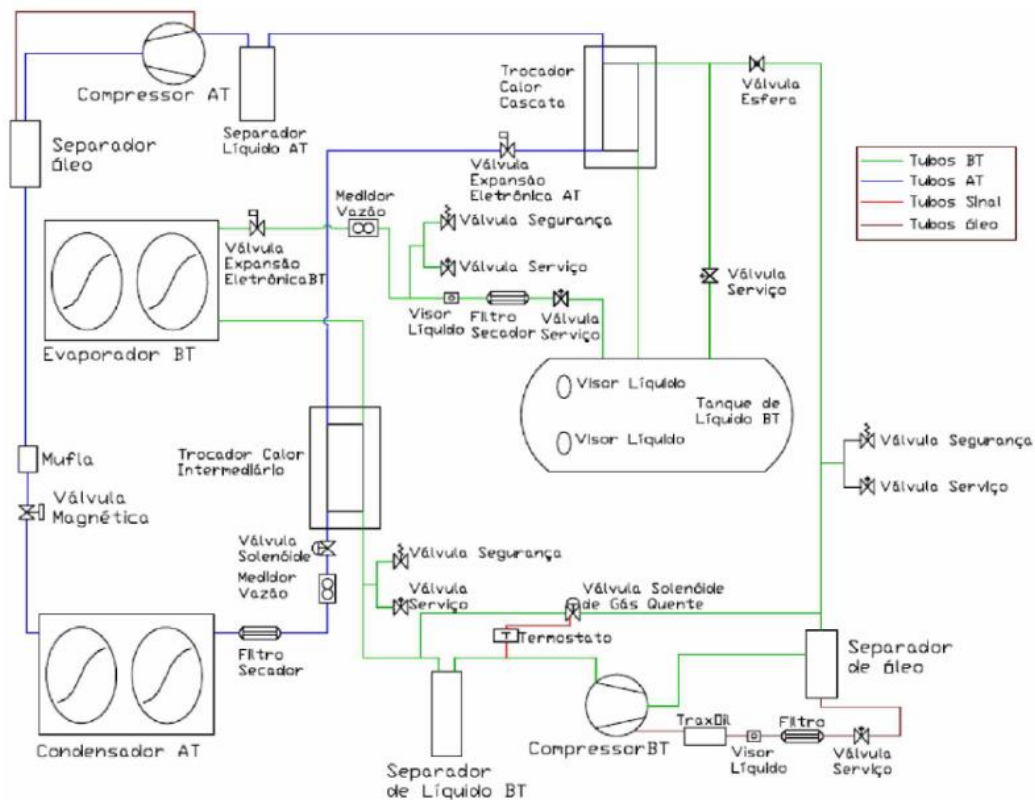


Figura 2 - Diagrama esquemático da bancada experimental

O sistema foi instrumentado de modo a possibilitar a medição de propriedades como temperatura e pressão em diversos pontos de interesse, bem como as vazões mássicas de ambos os fluidos e a potência consumida pelos compressores. A partir do conhecimento destes parâmetros, pode-se estimar os valores de variáveis de interesse tais como, coeficiente de performance (COP) do R744, COP do sistema e capacidade de refrigeração. O diagrama da Fig. 3 representa o sistema simplificado com alguns pontos de instrumentação, nos quais são tomadas medidas de vazão, pressão e temperatura.

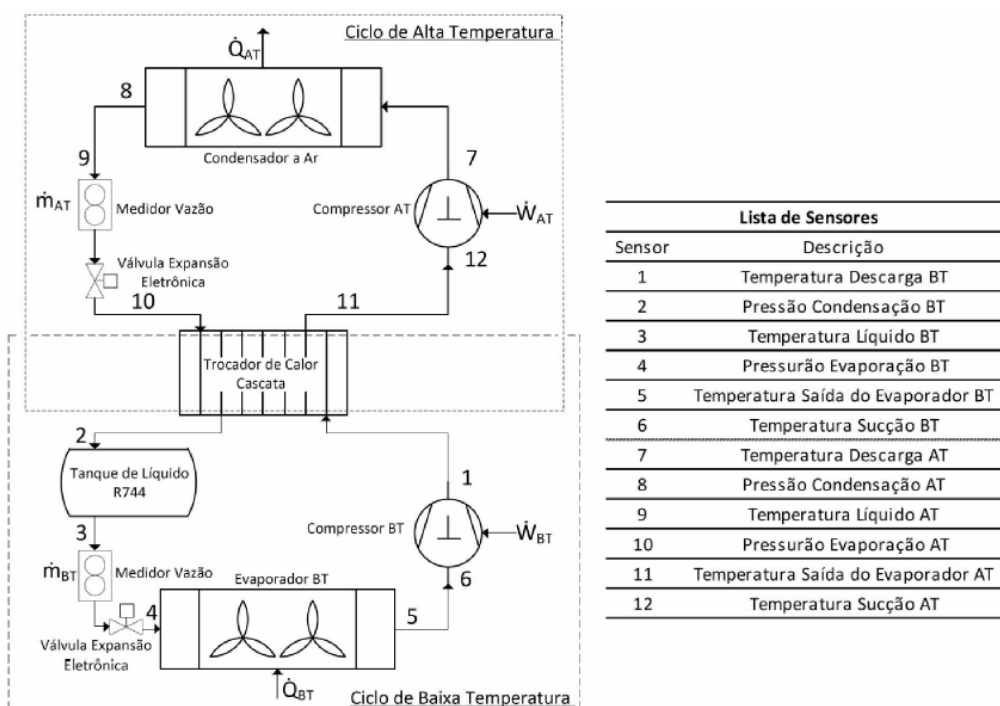


Figura 3 - Representação do sistema cascata básico com principais pontos de instrumentação

Com o objetivo de determinar os limites operacionais do sistema e avaliar o desempenho do mesmo, foram realizados testes nos quais a frequência de alimentação dos compressores dos sistemas de baixa e alta temperatura e o grau de superaquecimento do R744 foram manipulados.

A alteração da frequência de alimentação de cada compressor foi feita por meio de um inversor de frequência, possibilitando a execução de testes nas condições 50, 55, 60 e 65 Hz. A manutenção do grau de superaquecimento do sistema de R744 em valores fixos de 5, 10 e 15 K foi alcançada através do controle da pressão na saída do evaporador, modulando a abertura da válvula de expansão eletrônica.

Todos os testes foram realizados em condição de regime permanente com duração média de cinco horas cada.

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, calcula-se a taxa de evaporação (\dot{Q}_{R744}) conforme apresenta a Eq. 1, considera-se que este seja um processo de escoamento em regime permanente e que o volume de controle seja o volume ocupado pelo R744 no evaporador.

$$\dot{Q}_{R744} = \dot{m}_{R744}(\Delta h_{evap}) \quad (1)$$

Para determinação do estado termodinâmico do refrigerante em cada ponto de interesse do ciclo, foram utilizados transdutores de pressão piezoresistivo (com incerteza de medição de 25 kPa) e detectores de temperatura de resistência PT-100 (com incerteza de medida de 0,15 °C). Dois medidores de fluxo Coriolis permitiram a medição da vazão mássica (\dot{m}) de refrigerante nos circuitos de R744 e R513A, com incerteza de medição de 0,0015 kg/s. O consumo de energia pelos compressores foi medido e os dados têm uma incerteza de 0,003 kW.

Os cálculos dos valores de COP foram realizados para o sistema isolado de R744 e para o sistema cascata operando com o par R744 / R513A. O COP é dado pela relação entre a taxa de refrigeração e a potência líquida que deve ser fornecida ao sistema.

A Equação 2 refere-se ao COP do sistema isolado de R744, sendo assim, a potência líquida consumida (\dot{W}) refere-se apenas ao consumo do compressor do mesmo refrigerante.

$$COP_{R744} = \frac{\dot{Q}_{R744}}{\dot{W}_{R744}} \quad (2)$$

O COP para o sistema em cascata (R744 / R-513A) é calculado conforme a Eq. 3. Como era esperado, para o sistema combinado a potência líquida consumida representa o consumo dos compressores dos ciclos de baixa e alta temperatura.

$$COP_{R744} = \frac{\dot{Q}_{R744}}{\dot{W}_{R744} + \dot{W}_{R513A}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS

Foi realizado um total de trinta e um testes para análise do sistema cascata operando com o fluido R-513A no ciclo de alta temperatura (AT) e R744 no ciclo de baixa temperatura (BT). A resistência elétrica dentro da câmara fria foi mantida constante, dissipando 3,0 kW e três parâmetros foram alterados durante os testes: o grau de superaquecimento (SH) do ciclo com R744 (5, 10 e 15K), o valor da frequência de operação do compressor de R744 (50, 55 e 60Hz) e o valor da frequência de operação do ciclo com R-513A (50, 55, 60 e 65Hz). Algumas combinações de parâmetros operacionais não foram possíveis à realização e apresentação de resultados por atingir os limites de trabalho do sistema ao atingir valores de pressões de operação acima dos limites definidos como seguros.

A Figura 4 apresenta os valores da potência consumida pelo compressor de R744 para cada combinação de frequências de operação dos ciclos de baixa e alta temperatura. Nota-se que, mantendo fixa a frequência do compressor de R-513A o consumo do compressor de R744 eleva-se com o aumento de sua frequência e consequente rotação. Pode ainda ser observado, que aumentando a frequência do compressor de R513A o sistema de baixa temperatura experimenta temperaturas de condensação mais baixas, reduzindo o consumo do compressor de CO₂. Fato dado pela redução da taxa de compressão em que o compressor de baixa temperatura trabalha. Os valores de potência consumida pelo compressor de AT são observados pela Fig. 5. A mesma proporcionalidade do consumo com o aumento da frequência de operação verificada para o compressor de R744 não pode ser estabelecida para o compressor de R-513A, visto que o consumo deste é relacionado a temperatura de condensação e a frequência de operação.

É notável que o compressor de R744 tem o consumo de energia menor do que o compressor de R-513A, isto ocorre devido ao baixo volume específico do R744. Tais propriedades do R744 também levam a redução das dimensões dos equipamentos, justificando o tamanho reduzido do compressor de R744 comparado ao compressor dimensionado para outros fluidos. Pode ser observado também que a taxa de compressão de trabalho do fluido de baixa temperatura, é menor comparada ao de alta temperatura, e.g. no teste com 60 Hz em AT e BT, 5K de SH, a taxa de compressão de BT era de 1,55 ($P_{cond} = 27,7$ bar e $P_{evap} = 17,8$ bar), enquanto para AT a taxa encontrava-se em 6,18 ($P_{cond} = 9,9$ bar e $P_{evap} = 1,6$ bar).

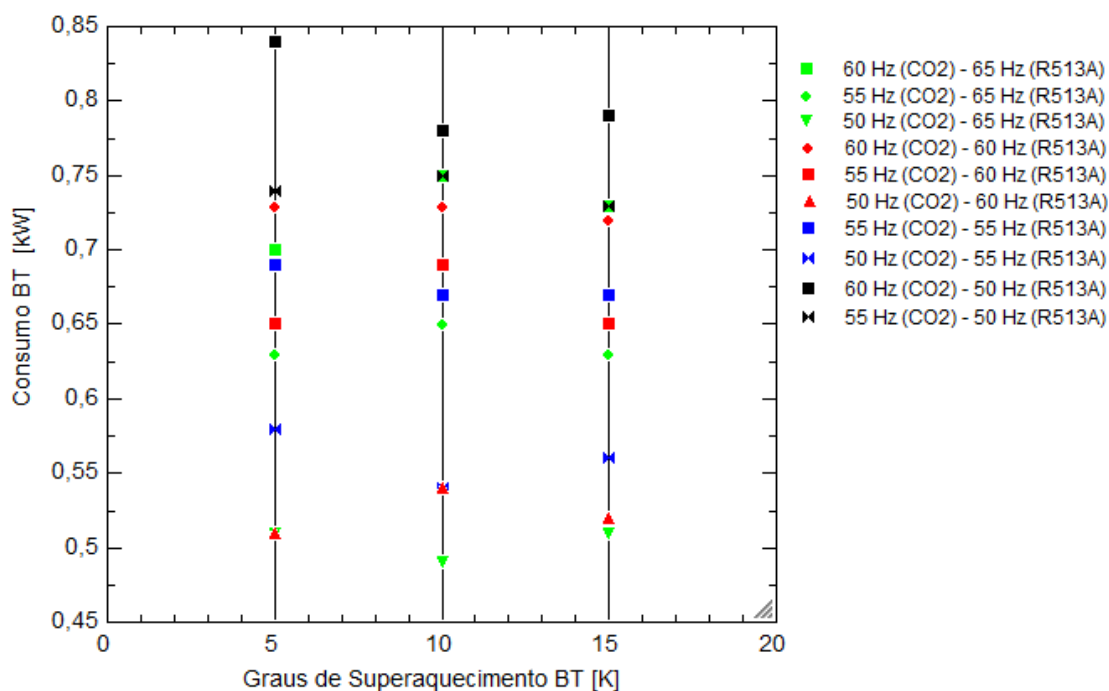


Figura 4. Potência consumida pelo compressor de BT para diferentes frequências de operação e graus de superaquecimento

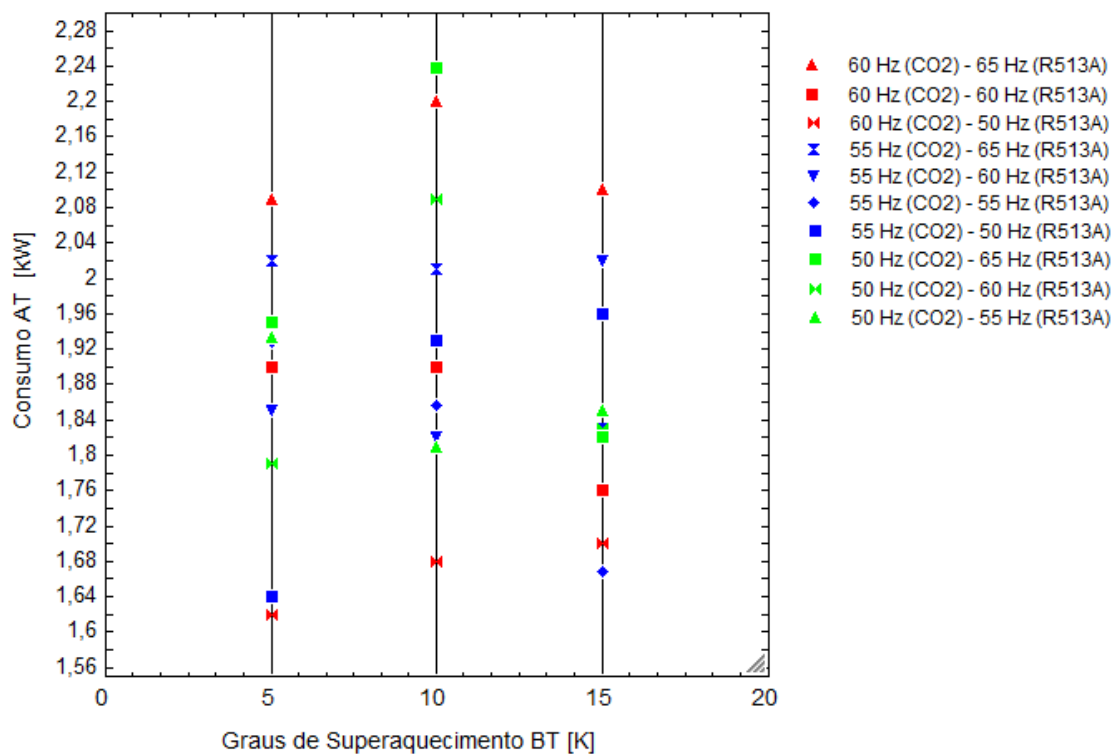


Figura 5. Potência consumida pelo compressor de AT para diferentes frequências de operação e graus de superaquecimento

Os valores de COP do sistema cascata relacionados à capacidade de refrigeração podem ser observados de acordo com a Fig. 6. Nota-se que os maiores valores de COP são atribuídos aos ensaios em que a frequência do compressor de R513A foi mantida em 60 Hz, aliados a um grau de superaquecimento do ciclo de baixa temperatura conforme pode ser observado na Fig. 7. Observou-se um máximo valor para o COP de 1,75 com o sistema operando a 55 Hz no compressor de R744 com superaquecimento ajustado de 10K e o compressor de R513A em 60 Hz, e um valor mínimo de 1,23 para a condição de 60 Hz R744, 65 Hz R513A e SH de 15K.

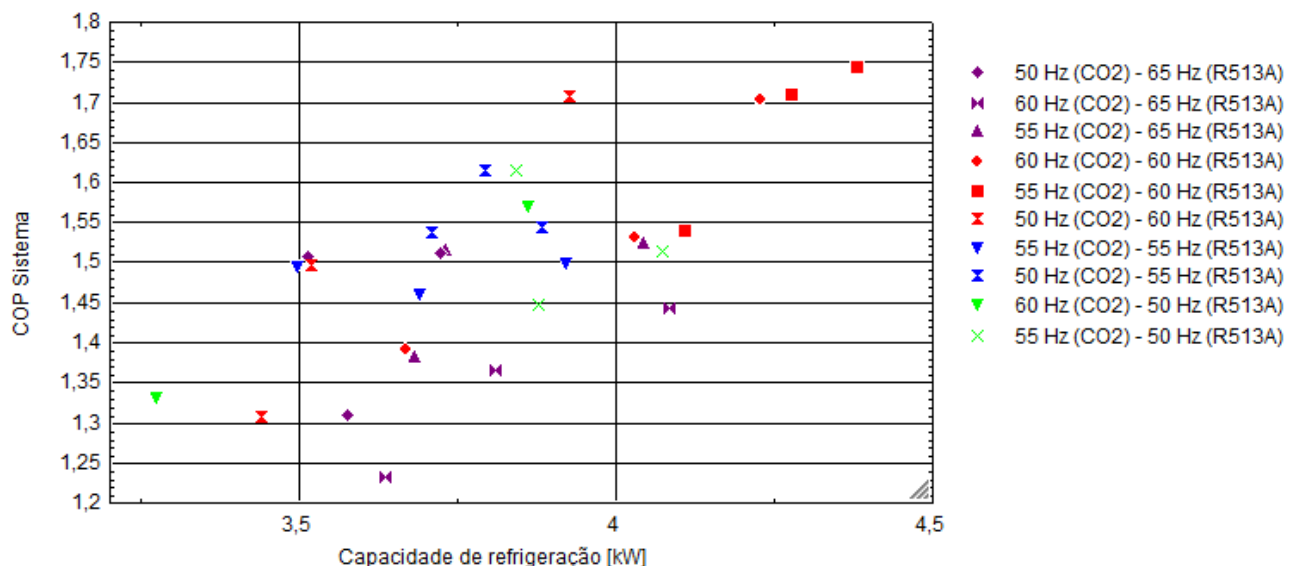


Figura 6. Comportamento da capacidade frigorífica de acordo com os valores de COP do sistema cascata com R-513A

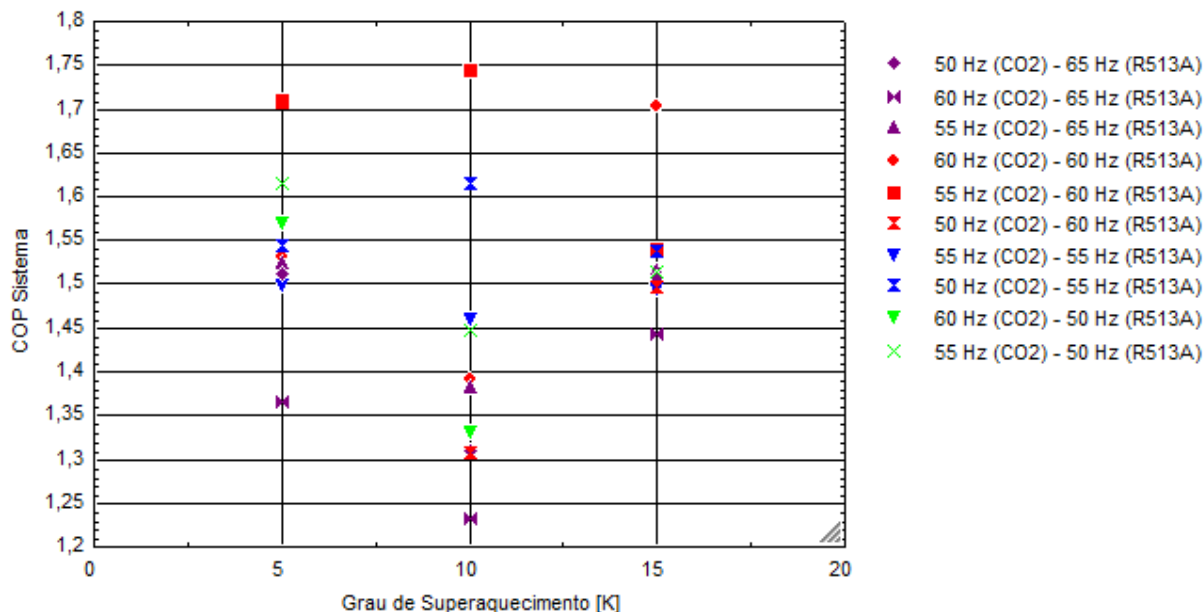


Figura 7. Valores do COP do sistema relacionados ao grau de superaquecimento do ciclo de baixa temperatura

Os valores da capacidade de refrigeração situaram-se na faixa entre 2,82 kW e 4,38 kW, em que a capacidade frigorífica mais elevada, ocorreu para a frequência de 55 Hz no compressor de R744 com superaquecimento ajustado de 10K e o compressor de R-513A operando a 60 Hz, o mesmo ponto de operação em que se obteve o maior COP do sistema cascata.

De acordo com a Fig.8 observa-se o comportamento da temperatura do ar no interior da câmara fria para as diversas combinações de frequências de operação dos dois compressores e do valor de superaquecimento ajustado, sendo o menor valor -17,0 °C e a temperatura mais alta -1,8 °C. A partir deste mesmo gráfico, pode-se determinar um ponto de operação para o sistema em função do valor desejado da temperatura do ar no interior da câmara fria. Percebe-se que com menores graus de superaquecimento obtêm-se os menores valores para a temperatura do ar dentro da câmara fria. Em relação às frequências de operação dos compressores, verifica-se que mantendo fixa a frequência do compressor de R-513A, menores temperaturas do ar são atingidas quanto maior a frequência de operação do compressor de R744.

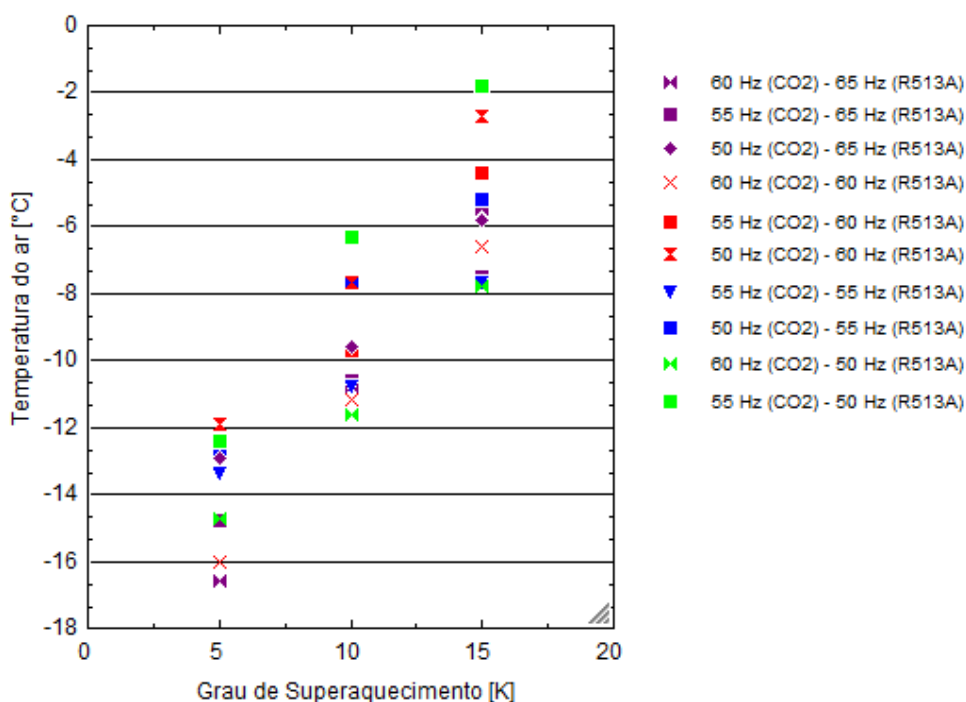


Figura 8. Comportamento da temperatura do ar no interior da câmara fria em função das frequências de operação e do grau de superaquecimento

4. CONCLUSÕES

No intuito de contribuir para a melhoria dos processos de refrigeração em termos de sustentabilidade e eficiência energética, esta avaliação experimental analisa o desempenho de um sistema em cascata subcrítico utilizando o par de R744 / R-513A a partir dos ensaios realizados na bancada experimental existente no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia.

Os resultados aqui apresentados são importantes, pois mostram os limites de operação de um sistema de refrigeração operando com R-513A no ciclo AT que originalmente foi projetado para o R-134a e que aceita a metodologia de drop-in.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os valores de capacidade de refrigeração foi estabelecida entre 2,82 kW e 4,38 kW, demonstrando a aplicabilidade deste sistema em cascata operando em condições de carga térmica variável. Essa flexibilidade operacional é verificada também a partir dos valores de temperatura do ar dentro da câmara fria, sendo o menor valor -17,0 °C e o valor máximo de -1,8 °C.

A avaliação do sistema mostra que maiores valores de COP foram obtidos através de combinações de frequência de ambos os compressores e grau de superaquecimento do ciclo BT, não estabelecendo um padrão na variação desses parâmetros com o seu valor. O COP máximo foi igual a 1,75 e o valor mínimo foi de 1,23 para o par R744 / R-513A.

Dessa forma, para determinar o grau de superaquecimento e a frequência utilizada nos compressores de BT e AT deve-se avaliar além da capacidade de refrigeração a temperatura desejada do ar no interior da câmara fria.

Os resultados alcançados demonstram que o sistema cascata R513A/R744 é uma possível alternativa para a faixa de aplicação ensaiada além de propiciar uma redução no impacto ambiental, visto que o sistema em estudo utiliza uma carga de refrigerante sintético menor do que os sistemas de expansão direta convencionais, além de possuir um GWP muito menor que o original. Em trabalhos futuros, realizar-se-á uma nova bateria de testes com o objetivo de comparar o desempenho do R-513A com o par de refrigerantes do sistema original R744/R134a.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio dado à pesquisa pela FAPEMIG, CAPES e CNPq. Além dos órgãos de fomento, estendem o agradecimento às empresas CAREL, BITZER, RAC e CHEMOURS.

5 REFERÊNCIAS

- Molina, M.J., Rowland, F.S. Stratospheric sink for chlorofluorometanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 1974, pp. 810–812
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment.*
- Montagner, G.P., Melo, C., 2011, Experimental evaluation of CO₂ cycles under different expansion strategies. *International Congress Refrigeration.*
- Silva, A., Bandarra Filho, E.P., Antunes, A.H.P. 2012. Comparison of a R744 cascade refrigeration system with R404A and R22 conventional systems for supermarkets, *Applied Thermal Engineering*, vol. 41, pp 30-35.
- Lee, T.S., Liu, C.H., Chen, T.W., 2006. Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, pp 1100-1108.
- Antonio Messineo, 2012. R744-R717 Cascade Refrigeration System: Performance Evaluation compared with a HFC Two-Stage System. *Energy Procedia*, vol. 14, pp 56-65.
- Gulshan Sachdeva, Vaibhav Jain, S. S. Kachhwaha, 2014. Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 8, No 3.
- Sánchez, D., Llopis, R., Cabello, R., Catalán-Gil, J., Nebot-Andrés, L., 2017. “Conversion of a direct to an indirect commercial (HFC134a/CO₂) cascade refrigeration system: Energy impact analysis.” *International Journal of Refrigeration*. V. 73, p. 183–199.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A SUBCRITICAL REFRIGERATION CASCADE SYSTEM WITH R-513A/CO₂

Abstract. *This experimental study evaluates the performance of a cascade system in subcritical operation using the pair R744 / R-513A, as an option to conventional systems in supermarkets, which commonly use halogenated fluid such as R22. The experimental bench consists of two refrigeration cycles. The low temperature cycle is formed by R744 reciprocating variable speed compressor and an electronic expansion valve that promotes direct evaporation of the CO₂ inside a cold room to maintain the internal air temperature stable. The high-temperature cycle consists of a reciprocating compressor for R-513A, an electronic expansion valve, and an air-cooled condenser. A plate heat exchanger, which is at the same time, the condenser for the R744 and evaporator to R-513A completes the bench. The tests were performed and three parameters were manipulated: The superheating degree of the R744 (5-15 K) and the compressors operation*

frequencies of both cycles, in order to obtain the operational limits of the system and the performance through the parameters: air temperature inside the cold room, capacity cooling, COP, compressors consumption. The obtained results demonstrating the R-513A/R744 cascade system is a possible alternative at the application range, besides its assures a reduction of environmental impact, since the analyzed system use a lower charge of synthetic refrigerant than the conventional direct expansion systems.

Keywords: *Refrigeration, Cascade, R744, R513A.*