

COMPARAÇÃO DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE CO₂, EM CASCATA COM R134a E R404A

Marcus Vinícius Almeida Queiroz - engmarcusalmeyda@hotmail.com

Luís Manoel de Paiva Souza - luismanoel_tap@hotmail.com

Arthur Heleno Pontes Antunes – arthur.antunes@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho - bandarra@mecanica.ufu.br

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

R1 - Práticas e Sistemas: Sistemas de Refrigeração com Halocarbonados, Amônia e Dióxido de Carbono

Resumo. O presente estudo experimental avalia o desempenho de um sistema em cascata subcrítico usando o par R744 / R134a, como alternativa aos sistemas convencionais em expansão direta instalados em supermercados, os quais utilizam R404A, ou ainda R22. O aparato experimental é composto por um compressor alternativo de velocidade variável para o R744 e uma válvula de expansão eletrônica que promove a evaporação direta do CO₂ no interior de uma câmara fria (2,3m x 2,6m x 2,5m) para manter a temperatura interna de ar estável. O ciclo de alta temperatura é constituído por um compressor alternativo para o R134a, uma válvula de expansão termostática e um condensador arrefecido a ar. Um trocador de calor a placas, que é ao mesmo tempo, o condensador do R744 e o evaporador para o sistema de alta temperatura, completa a bancada. Na metodologia adotada, dois parâmetros operacionais foram manipulados: o grau de superaquecimento do R744, 5-20 K, e a frequência de operação do compressor de R744, 40-65 Hz. Com o intuito de contribuir para a melhoria nos processos de refrigeração, tanto quanto à sustentabilidade como em relação à eficiência energética, uma operação de drop-in foi estabelecida no ciclo de alta temperatura, onde a carga do R134a foi substituída pelo R404A. O sistema de refrigeração alternativo (R744 / R404A) foi então, submetido à outra etapa de testes, a qual permitiu a comparação energética entre os pares de refrigerantes. Por meio dos resultados obtidos, estimou-se um máximo COP equivalente a 1,39 e um valor mínimo de 1,06 para o par R744 / R134a. Os valores da capacidade de refrigeração, estabeleceram-se entre 4,09 e 5,79 kW, demonstrando a aplicabilidade desse sistema cascata em condições de carga térmica variável. O valor mínimo da temperatura operativa do ar no interior da câmara foi - 28 °C e o máximo -3,1 °C. Por fim, constatou-se que os resultados obtidos para par R744 / R404A, atenderam à condição de temperatura do ar no interior da câmara fria com valores de COP semelhantes. No entanto, o par R744 / R404A operou em capacidades de refrigeração inferiores, essas se estabeleceram entre 2,16 e 4,15 kW. Tal redução se deve à grande diferença entre os valores de capacidade de refrigeração volumétrica dos dois HFCs em questão, que resulta em problemas de adaptação do R404A ao compressor e ao mecanismo de expansão.

Palavras-chave: Refrigeração, Cascata, R744, R134a, R404A

1. INTRODUÇÃO

A situação climática global leva todos os esforços na área de refrigeração ao desenvolvimento de sistemas que consigam aliar uma boa eficiência energética com a redução do impacto ambiental. Tal impacto é diretamente relacionado ao uso dos refrigerantes HCFC e HFC.

A destruição da camada de ozônio está associada ao uso dos fluidos refrigerantes HCFC's (nos quais se inclui o R22) e HFC's cujo efeito é medido/quantificado através do Índice ODP (Ozone Depletion Potencial) ou Potencial de Destruição do Ozônio. Ainda que os gases HCF's possuam um potencial de destruição da camada de ozônio, ODP = 0 é necessário referir que estes mesmos gases (HFC's) implicam um alto potencial de aquecimento da camada atmosférica, dada a quantidade de CO₂ que decorre da sua produção, ou seja, implicam um potencial de aquecimento global (GWP) ainda mais significativo nalguns casos, com um GWP superior aos dos gases HCFC's. Fluidos naturais como os hidrocarbonetos e dióxido de carbono são tidos como possíveis soluções, com OPD = 0 e GWP, o mais baixo possível, podem ser tidos como possíveis soluções para esta questão.

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 como a liberação de uma única unidade (kg) do componente dado à atmosfera (Molina e Rowland, 1974).

Os fluidos refrigerantes R22 e R404A são amplamente utilizados no setor comercial, especificamente em supermercados. O R22 é um HCFC que tem ODP = 0,055 e GWP100a = 1810 enquanto o R404A é um HFC, com ODP é igual a zero e GWP100a de 3922. Por isso, esses fluidos refrigerantes tem um grande impacto sobre o aumento do aquecimento global. O R744 tem um grande potencial para aplicações em supermercados, apesar de ser um fluido com pressões de trabalho elevadas. Em termos ambientais, o R744 tem um valor ODP igual a zero e GWP100a unitário, sendo por isso, uma boa alternativa para solucionar a questão ambiental. O R134a, assim como o R404A, é um HFC, este tem um ODP nulo e, de acordo com IPCC (2007), o valor do GWP em 100 anos para este refrigerante equivale a 1430, calculado de acordo com o AR4 (Assessment Relatório 4) do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2007).

Existem muitas obras que fazem referência ao uso da refrigeração com fluido de trabalho R744. Em 1994, o professor norueguês Gustav Lorentzen propôs pela primeira vez que o refrigerante R744 fosse utilizado como fluido de trabalho para os ciclos de compressão de vapor. 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. Foi analisado o efeito da carga de refrigerante e do tipo de dispositivo de expansão (tubo capilar ou válvula termostática). Os resultados 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 sobreaquecimento atingiu valores otimizados.

Silva et al. (2012) mostram um trabalho experimental relacionado com a eficiência energética em dois diferentes sistemas utilizados em aplicações de supermercados. Os sistemas consistem de um ciclo em cascata subcrítico R744 / R404A, e também com R744 / R22. Os resultados obtidos pelos autores mostram a redução no consumo de energia, 13-24 %, quando se compara o sistema em cascata aos sistemas de expansão direta. Outro fato importante, enfatizado pelos autores, está relacionado com a carga dos sistemas. O sistema de cascata utiliza 32 kg de CO₂ e 15 kg de R404A, enquanto que o sistema de expansão direta com R404A utiliza 125 kg de R404A e R22 usa 115 kg, respectivamente. A quantidade de refrigerante influencia o custo final da operação, uma vez que 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 mais bem atendidas, utilizando refrigerantes naturais tanto no ciclo de baixa temperatura, como no de alta. Messineo (2011) utiliza este mesmo par de fluidos em cascata, para comparar o desempenho a um sistema de refrigeração para 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), em trabalho numérico mostram que para um sistema de refrigeração em cascata, trabalhando com R744 no circuito de baixa temperatura, R404A entre outros fluidos no circuito de alta temperatura, o que melhor opera apresentando valores mais altos de COP é o R717. O R404A por sua vez, é o que possui o pior COP entre os fluidos analisados (R717, R404A, R290, R1270, R12).

O objetivo deste estudo experimental é avaliar o desempenho do sistema em cascata subcrítico usando o par R744 / R134a, o qual representa o aparato experimental originalmente instalado, e depois, comparar o comportamento do sistema cascata após a substituição do refrigerante R134a pelo R404A, por meio de uma operação tipo drop-in. A opção pelo refrigerante R404A ocorreu devido à sua ampla utilização no setor de refrigeração em supermercados, mesmo este, apresentando valores elevados de GWP.

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 promove a evaporação direta do CO₂ no interior de uma câmara fria (2,3m x 2,6m x 2,5m) para manter a temperatura interna de ar estável. Para tanto, o R744 deixa o compressor no estado de vapor superaquecido, é condensado e, em seguida, armazenado em um tanque de líquido. Ao deixar o tanque de líquido em direção à válvula de expansão eletrônica, o mesmo passa por um medidor de vazão tipo Coriolis, e expande na unidade evaporadora, posteriormente, o R744 superaquecido atravessa um trocador de calor intermediário, aumentando ainda mais o grau de superaquecimento. Por fim, o CO₂ retorna à sucção do compressor. A Fig.1 ilustra a bancada experimental.

O ciclo de alta temperatura é constituído por um compressor alternativo para o R134a, uma válvula de expansão termostática e um condensador arrefecido a ar. Um trocador de calor de placas planas, que é ao mesmo tempo, o condensador do R744 e o evaporador para o sistema de R134a completa a bancada.

Três parâmetros básicos podem ser alterados no sistema, o primeiro o grau de superaquecimento do R744, o segundo a frequência de operação do compressor de R744 e por último, a simulação da carga térmica dentro da câmara fria, realizada por meio de um banco de resistências elétricas, o qual dissipa 1,5 ou 3,0 kW de potência. Apesar das paredes da câmara serem bem isoladas, as trocas de calor por condução nas mesmas, no piso e no teto, além do calor de radiação são inerentes ao processo de evaporação do R744, com isso, a capacidade frigorífica do sistema cascata é superior a 1,5 ou 3,0 kW.

Os compressores do sistema de R134a / R404A operam com frequência variável na faixa de 35 a 65 Hz. A bancada requer uma estratégia de controle segura que é a condição mínima necessária para o armazenamento de R744 na forma líquida. A Fig. 2 refere-se ao diagrama esquemático da mesma.

Para avaliação do desempenho e determinação da operabilidade do sistema cascata, foram realizados testes controlando o grau de superaquecimento do sistema de R744 em valores fixos de 5, 10, 15 ou 20 K. A frequência de alimentação do compressor do sistema de baixa temperatura foi manipulada por meio de um inversor de frequência, possibilitando a execução de testes em seis condições: 40, 45, 50, 55, 60 e 65 Hz.

O sistema foi devidamente instrumentado, tornando possível medir valores de pressão e temperatura de vários pontos de interesse, bem como a potência consumida pelos compressores. A partir do conhecimento destas propriedades, os valores de variáveis de interesse tais como, COP do sistema, COP do R744, capacidade frigorífica, foram estimados.



Figura 1. Bancada Experimental

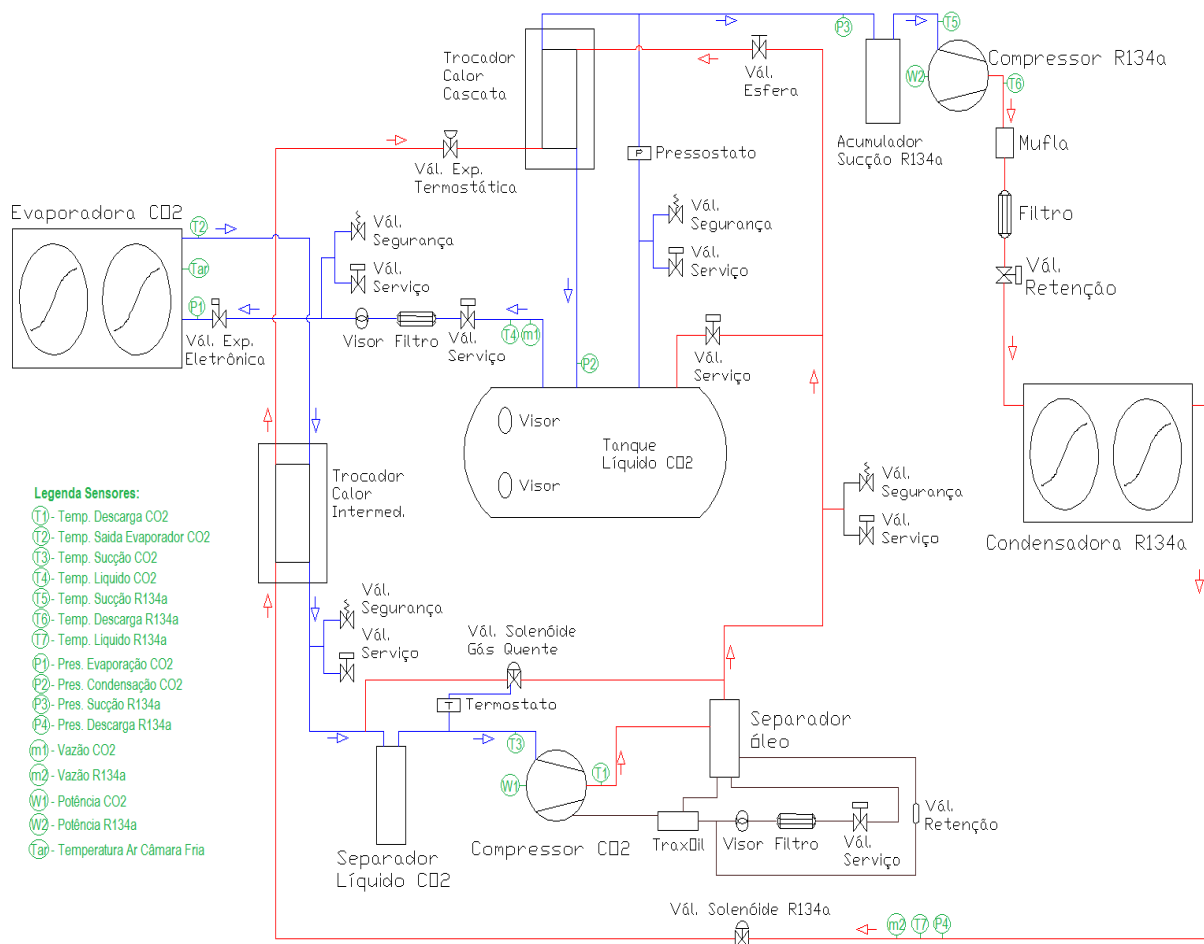


Figura 2. Diagrama Esquemático da Bancada Experimental

Os testes foram realizados em condição de regime permanente, estes foram divididos em três etapas e cada teste durou, em média, cinco horas. O controle do grau de superaquecimento foi alcançado por meio do controle da pressão na saída do evaporador, modulando a abertura da válvula de expansão eletrônica.

A capacidade de evaporação foi calculada de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, e é dada pela Eq. 1, considerando a condição de estado estacionário na qual o refrigerante é a única substância presente no volume de controle delimitado pelo evaporador.

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

Transdutores de pressão piezo resistivo (com incerteza de medição de 25 kPa) e detectores de temperatura de resistência a PT-100 (com incerteza de medida de 0,15 °C) foram usadas para medir essas propriedades, permitindo desse modo a determinação do estado termodinâmico do refrigerante em cada ponto de interesse no ciclo de compressão de vapor. Dois medidores de fluxo Coriolis foram usados para medir a taxa de fluxo de massa de refrigerante no circuito de R744 e R134a, 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 de cascata. O COP é a relação entre a capacidade de arrefecimento e o consumo de energia pelo compressor, a Eq. 2 ilustra esse parâmetro para o R744.

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

O COP para o sistema de cascata é avaliado pela Eq. 3.

$$COP_{Sistema} = \dot{Q}_{R744} / (\dot{W}_{R744} + \dot{W}_{R134a/R404A}) \quad (3)$$

Além da proposta de estudar a performance energética do ciclo de refrigeração em cascata sob diversas condições de operação, é também objetivo desse trabalho, estabelecer uma comparação entre o funcionamento do ciclo cascata original (R744 / R134a) e o ciclo cascata alternativo (R744 / R404A). Para tanto, realizou-se o drop-in direto do fluido R404A no ciclo de alta temperatura, substituindo a carga de R134a pelo novo fluido, mantendo o mesmo compressor e óleo lubrificante, assim como os trocadores de calor e componentes originais.

Nestas condições, o novo refrigerante deve proporcionar valores de capacidades de refrigeração e temperaturas do ar no interior da câmara, semelhantes aos valores obtidos pelo sistema original, respeitando assim, o que seriam as condições de projeto de uma câmara fria para estocagem em uma aplicação comercial. O COP proporcionado pelo novo par de refrigerantes, torna-se uma consequência, e seus valores serão comparados à performance do par de fluidos original.

No entanto, existe uma grande diferença entre os valores de capacidade de refrigeração volumétrica dos dois fluidos em questão. Este parâmetro permite a previsão das dimensões dos mecanismos de deslocamento necessários de um compressor, para um determinado refrigerante e em uma específica condição de operação.

A Fig. 3 mostra a variação desta capacidade com a temperatura de evaporação para diferentes fluidos refrigerantes. Este parâmetro é uma medida da capacidade de refrigeração por unidade de volume de passagem de refrigerante pelo compressor. É uma propriedade do refrigerante e do ponto de funcionamento do sistema.

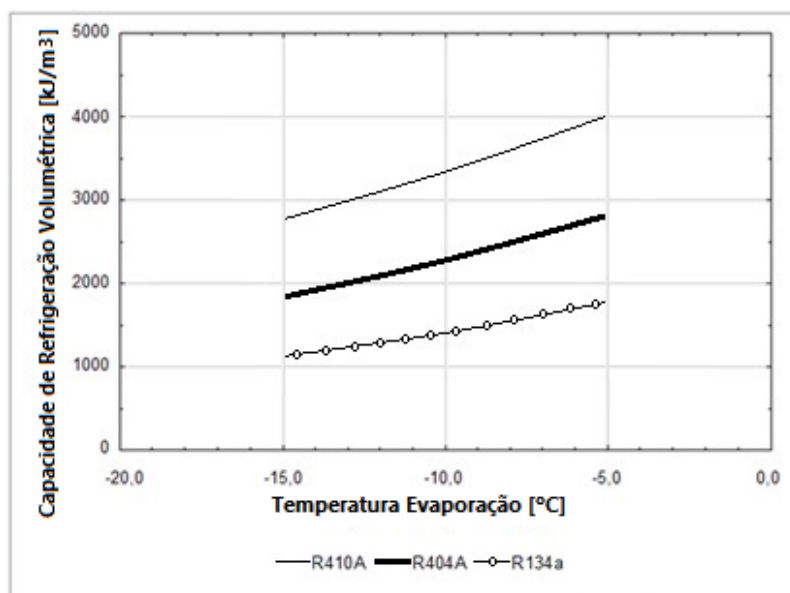


Figura 3. Capacidade de refrigeração volumétrica relativa a diferentes classes de refrigerantes. Valores estimados a 40°C de temperatura de condensação, 0 °C de subresfriamento e 5 °C de superaquecimento

Como pode ser observada, a capacidade de refrigeração volumétrica diminui com a redução dos valores da temperatura de evaporação. Isso se deve, principalmente, à diminuição da densidade do vapor em temperaturas reduzidas. Logo, é facilmente entendido que o compressor necessário para um ciclo operando com o fluido R404A deverá ser sempre menor do que o compressor necessário para o fluido R134a em rotação fixa.

O R404A afasta-se da referência em termos de capacidade, este fato o torna impróprio para trabalhar à mesma rotação do sistema original. Assim, com o intuito de melhor adaptar o sistema de refrigeração ao fluido R404A, uma ação de retrofit foi realizada. Para tanto, um inversor de frequência foi instalado e permitiu a redução da velocidade do compressor do ciclo de alta temperatura. Esta estratégia permite que o sistema alternativo alcance maiores valores de capacidade de refrigeração e menores temperaturas do ar no interior da câmara fria, aproximando as condições de carga térmica aos valores do sistema original.

3. RESULTADOS

A primeira etapa de resultados refere-se unicamente à análise do sistema cascata original que opera com o fluido R134a no ciclo de alta temperatura (AT) e R744 no ciclo de baixa temperatura (BT). Um total de vinte quatro testes foi realizado com a resistência elétrica dentro da câmara fria dissipando 1,5 kW e dois parâmetros básicos foram alterados durante esses testes: o valor do grau de superaquecimento (SH) do ciclo com R744 e o valor da frequência de operação do compressor de R744.

A Fig. 4 apresenta valores da potência consumida por cada compressor. É evidente que o compressor de R744 tem o consumo de energia menor do que o compressor de R134a, isto ocorre devido à alta densidade de vapor do R744, mesmo com os pistões deslocando um elevado volume no processo. Tais propriedades do R744 também são a causa de um compressor de dimensões reduzidas.

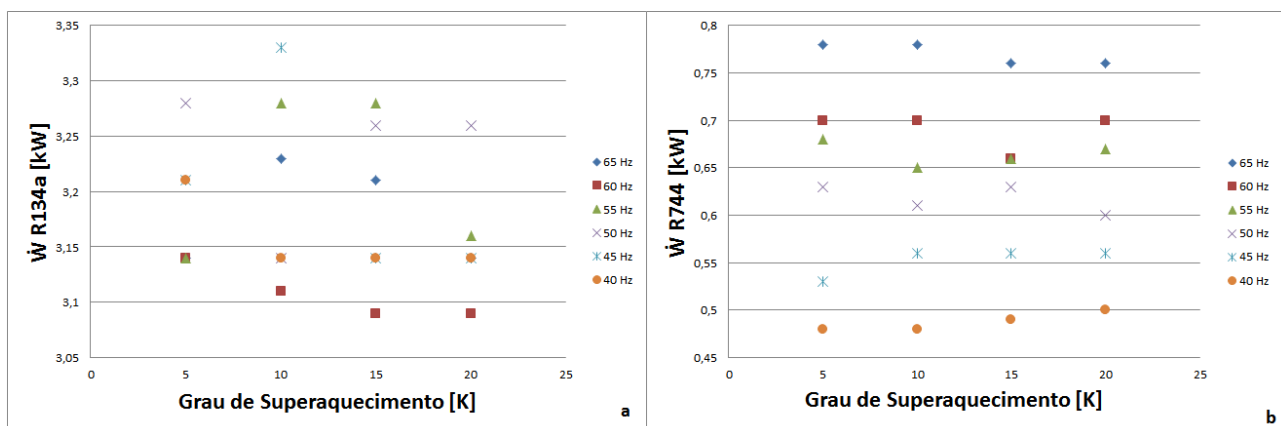


Figura 4. Potência consumida pelos compressores de AT (a) e BT (b), para diferentes frequências de operação e graus de superaquecimento

O consumo do compressor de R744 aumenta com o incremento de sua frequência e consequente rotação (Fig. 4a), enquanto tal proporcionalidade não pode ser observada pelo consumo do compressor de R134a (Fig. 4b). Outro fator que confirma o menor consumo do sistema R744 é a razão de compressão de aproximadamente 2:1. No caso do compressor de R134a, esta razão em alguns chega a ser de 10:1.

A Fig. 5 ilustra os valores de COP relacionados com os valores de capacidade frigorífica.

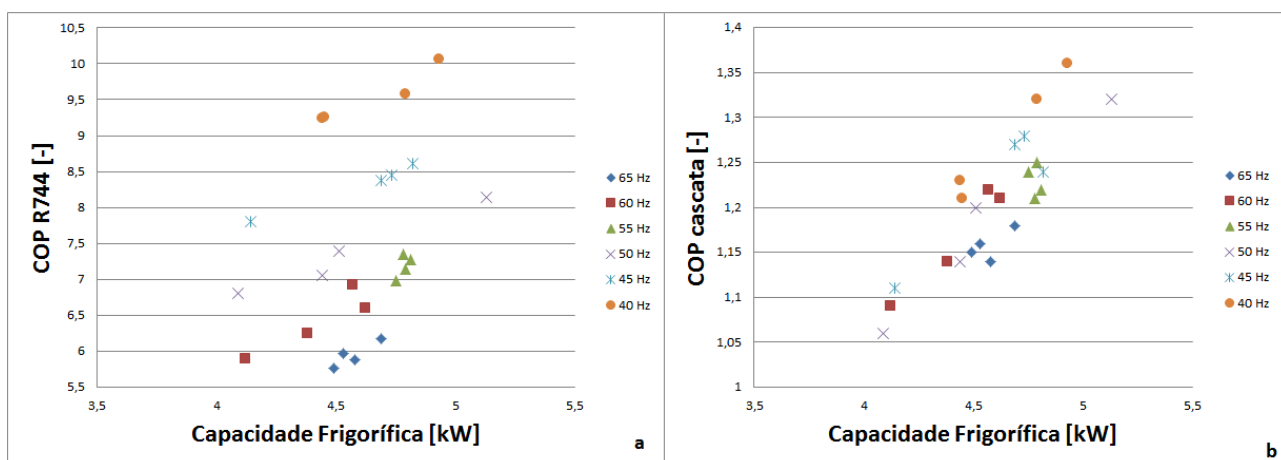


Figura 5. Comportamento da capacidade frigorífica de acordo com os valores de COP do ciclo de R744 isolado (a) e COP do sistema cascata com R134a (b)

Nota-se que o comportamento do COP foi fisicamente consistente, os ensaios a 40 Hz obtiveram os maiores COPs do ciclo isolado de R744, entre esses 10,07. Os testes a 65 Hz equivalem aos piores desempenhos.

A capacidade de refrigeração mais elevada ocorreu para a frequência de 50 Hz operando com superaquecimento de 15 K, 5,13 kW. Os valores do COP do sistema cascata (Fig. 5b) seguem a mesma tendência de proporcionalidade do COP para o ciclo isolado de R744 (Fig. 5a). O maior valor deste equivale a 1,36, operando a 40 Hz e 15 K de superaquecimento. O menor COP obtido do sistema foi de 1,06 para condição de 60 Hz e 20 K de superaquecimento.

De acordo com a Fig. 6, pode-se determinar um ponto de operação desejado, a partir da temperatura que se deseja ter dentro da câmara fria. Percebe-se que com maiores frequências e menores graus de superaquecimento, obtém-se as menores temperaturas do ar.

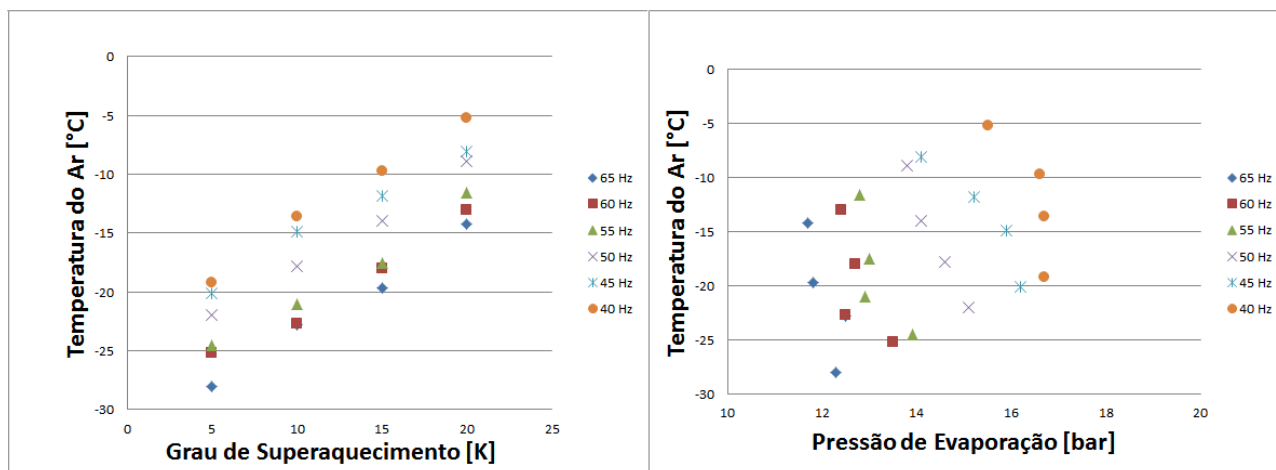


Figura 6. Comportamento da temperatura do ar dentro da câmara fria para diversas frequências de operação em função do grau de superaquecimento (a) e em função da pressão de evaporação do R744 (b)

Os valores da capacidade de refrigeração, estabeleceram-se entre 4,09 e 5,13 kW, demonstrando a aplicabilidade desse sistema cascata em condições de carga térmica variável. O valor mínimo da temperatura operativa do ar no interior da câmara foi - 28 °C e o máximo -5,2 °C.

Os dados experimentais de Sanz-Kock et al. (2014) foram utilizados como parâmetros de comparação para os valores de desempenho encontrados neste trabalho. Eles avaliaram experimentalmente, um sistema em cascata R744 / R134a para refrigeração comercial. O aparato experimental utilizado operou em diferentes condições e tem capacidade de refrigeração inferior quando comparado aos dados de Messineo (2012), no entanto, os comportamentos dos principais parâmetros termodinâmicos foram semelhantes. Os autores estimaram valores para o COP do sistema em cascata entre 1,05 e 1,65. Os valores de capacidades de refrigeração foram de 7,5 kW a 4,5 kW.

A segunda etapa de resultados refere-se à análise comparativa entre o sistema cascata original e o sistema alternativo, que opera com o fluido R404A no ciclo de alta temperatura (AT) e R744 no ciclo de baixa temperatura (BT). Um número restrito de testes foi realizado e quatro parâmetros básicos foram alterados durante esses testes: o valor do grau de superaquecimento do ciclo com R744, o valor da frequência de operação dos compressores de R744 e R404A, e por último a potência dissipada pela resistência elétrica dentro da câmara fria. Realizou-se um total de dezenove testes com a resistência elétrica dissipando 1,5 kW e cinco testes com esta a 3,0 kW. Testes com a resistência em 3,0 kW e R134a foram realizados previamente.

A Tab. 1 permite uma comparação entre os sistemas estudados, essa se refere a seis testes experimentais, onde o compressor de R744 operou em frequência nominal de 65 Hz.

Tabela 1– Comparação entre os pares de refrigerantes, resultados obtidos na condição em que compressor de R744 operou em frequência nominal de 65 Hz e grau de superaquecimento de 5 K

Systems	$\dot{W}_{Res}$ [kW]	$T_{EV BT}$ [°C]	$T_{CD BT}$ [°C]	$T_{D BT}$ [°C]	$T_{L BT}$ [°C]	$\dot{m}_{BT}$ [kg/s]	$\dot{W}_{BT}$ [kW]	$\dot{W}_{AT}$ [kW]	f_{AT} [Hz]	T_{AR} [°C]	$\dot{Q}_{SIS}$ [kW]	COP_{SIS} [-]
R744/R134a	1,5	-34,40	-8,93	103,5	-9,00	0,0171	0,780	3,14	60,00	-28,0	4,49	1,15
R744/R404A	1,5	-35,95	-23,90	84,3	-23,95	0,0076	0,430	2,40	60,00	-28,0	2,25	0,79
R744/R404A	1,5	-33,59	-13,95	100,0	-14,00	0,0105	0,610	2,30	35,00	-26,0	2,88	0,99
R744/R134a	3,0	-23,72	-3,73	83,8	-3,78	0,0230	0,865	3,31	60,00	-17,2	5,79	1,39
R744/R404A	3,0	-27,08	-14,67	71,5	-14,72	0,0125	0,540	2,95	60,00	-19,2	3,46	0,99
R744/R404A	3,0	-25,74	-6,86	86,3	-6,91	0,0155	0,730	2,60	35,00	-17,3	4,03	1,21

O primeiro teste refere-se ao par de refrigerantes original (R744 / R134a), nota-se que o compressor do ciclo de alta temperatura funcionou com 60 Hz e que a temperatura do ar no interior da câmara estabilizou-se em -28 °C. O segundo teste, que foi realizado após a operação do drop-in, atendeu à condição de temperatura do ar no interior da câmara fria, -28°C, no entanto, o par R744 / R404A apresenta um valor de capacidade de refrigeração 50 % inferior ao sistema original.

O inversor de frequência instalado no compressor do ciclo de alta temperatura, permitiu a realização do terceiro teste da Tabela 1, em que o sistema com R404A operou abaixo da velocidade nominal (60 Hz), em uma frequência mínima de 35 Hz, tornando possível incrementar o valor da capacidade de refrigeração, 2,88 kW. Nesta condição, o COP do sistema alternativo equivale a 86 % do COP do par R744 / R134a para uma temperatura de operação da câmara fria similar, -26 °C.

A capacidade de refrigeração reduzida é consequência da grande diferença entre os valores de capacidade de refrigeração volumétrica dos dois HFCs. Pode-se, ainda, observar na Tabela 1, que a vazão mássica do R744 em par com o R134a é bem maior comparada a de R744 trabalhando com R404A. Além disso, o valor da temperatura de líquido do segundo teste (- 23,95 °C) é muito baixo se comparada ao valor do sistema original (- 9,00 °C). Ao se reduzir a frequência, a temperatura de líquido eleva-se em 9,95 °C e a vazão aumenta em 38 %, no entanto, não é suficiente para promover uma condição de evaporação compatível ao sistema original. Tal comparação pode ser observada na Fig. 7b, onde é visto que a capacidade de refrigeração para todas as condições testadas, com resistência elétrica em 1,5 kW, não conseguem atingir pontos similares de operação para as devidas temperaturas do ar na câmara fria.

Com o aumento da carga térmica dentro da câmara fria, vemos que esta tendência de aumento de vazão do R744 continua, e a temperatura de líquido se aproxima à do sistema original. Entretanto, mesmo com o aumento da carga térmica e redução de frequência, a capacidade de refrigeração não se aproxima a do sistema R744 / R134a, operando com apenas 70 % da capacidade do sistema original, enquanto o COP fica 13% menor.

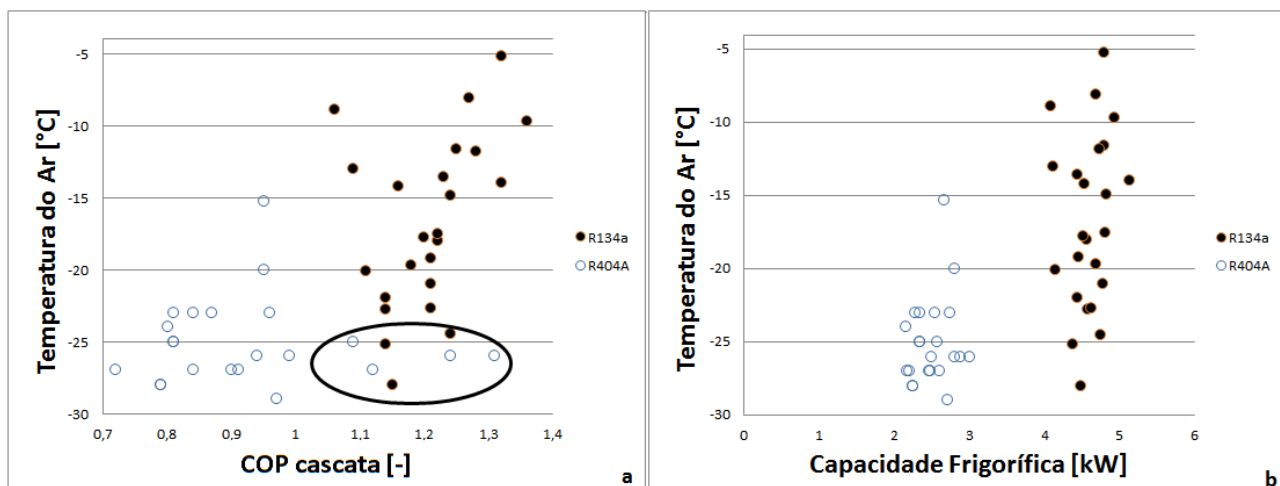


Figura 7. Comportamento do COP (a) e capacidade frigorífica (b) para diversos pontos de operação em função da temperatura do ar dentro da câmara fria

Observa-se na região demarcada da Fig. 7a, que para aquele setor de testes, estabelece-se uma compatibilidade entre a temperatura do ar na câmara e o COP para ambos os sistemas. O par contendo R404A consegue atingir os melhores COPs (1,31), estes ocorrem quando as frequências do compressor operam em 35 e 40 Hz. No entanto, por mais que as condições de COP e temperatura operativa sejam compatíveis, a capacidade de refrigeração do sistema com R404A é reduzida em toda faixa analisada, Fig. 7b.

A Fig. 8b, possibilita a comparação de performance energética dos dois pares de refrigerantes, é notável a supremacia do sistema cascata R744 / R134a. Os testes foram realizados para quatro níveis de grau de superaquecimento, indicados ao lado direito de cada ponto experimental. Os mesmos valores de frequência de operação dos compressores foram mantidos, ou seja, 60 Hz para o ciclo de alta temperatura (R134a e R404A) e 65 Hz para o ciclo de baixa temperatura (R744). Percebe-se que nem no ponto com maior capacidade frigorífica do R404A a 3,0 kW, este se aproxima da menor capacidade atingida pelo R134a a 1,5 kW. Na Fig. 8a, pode ser visto pontos de COP do R404A, a 10 e 15 K, próximos dos valores de R134a para uma mesma carga térmica (3,0 kW), contudo estes apresentam menores temperaturas do ar dentro da câmara fria.

Sachdeva et al. (2014) mostram que para um sistema cascata de R744 / R404A, podem ser obtidos pontos ótimos de COP, tanto para o sistema de baixa temperatura como para o sistema cascata a partir de uma temperatura de condensação do R744. Em seu modelo, o qual opera em valores de temperatura de evaporação -23 °C e capacidade de refrigeração 66,67 kW, obteve-se que para a temperatura de 7 °C na condensação de R744, tem-se o melhor COP para o sistema, 1,005 conforme a Fig. 9b. Enquanto o melhor COP para o sistema de baixa temperatura isolado, é de 3,6 com temperatura de condensação em 2 °C, este assim observado na Fig. 9a.

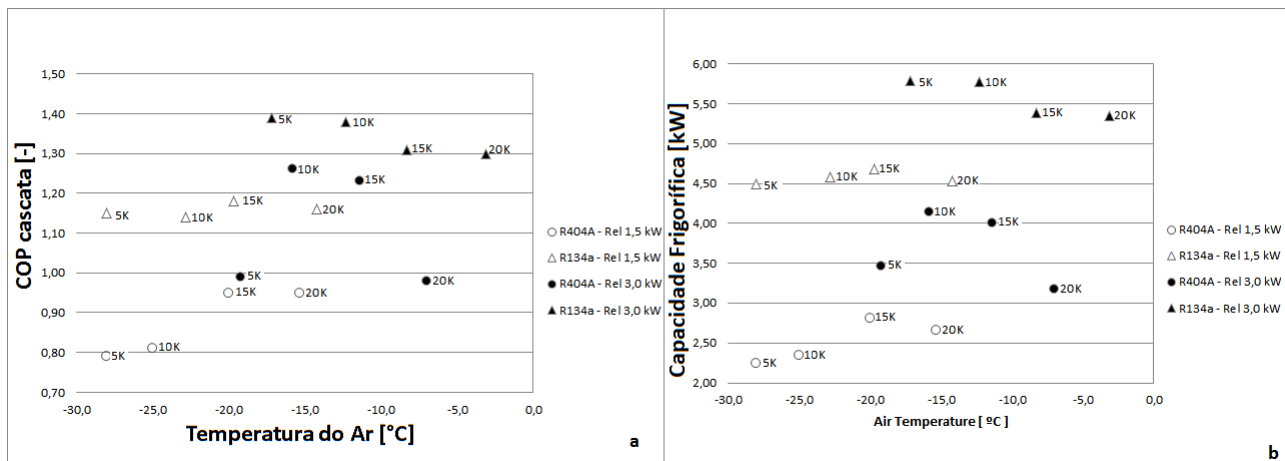


Figura 8. Temperatura do ar no interior da câmara fria, em função do COP (a) e capacidade de refrigeração (b) para o grau superaquecimento variando de 5 a 20 K

Comparando tais resultados, pode-se observar a tendência mostrada por Sachdeva et al. (2014), de queda do COP do sistema de baixa temperatura, a medida que a temperatura de condensação aumenta, tal comportamento é explicado visto que quanto maior a temperatura de condensação, menor a capacidade de refrigeração, logo menor o COP. A faixa de valores do COP de R744 para o sistema experimental é maior do que o modelo apresentado pelos autores citados, visto que a faixa de temperatura de condensação de R744 experimental ($-26^{\circ}\text{C} < T_{CDT} < -19^{\circ}\text{C}$) é bem menor que no modelo ($2^{\circ}\text{C} < T_{CDT} < 12^{\circ}\text{C}$).

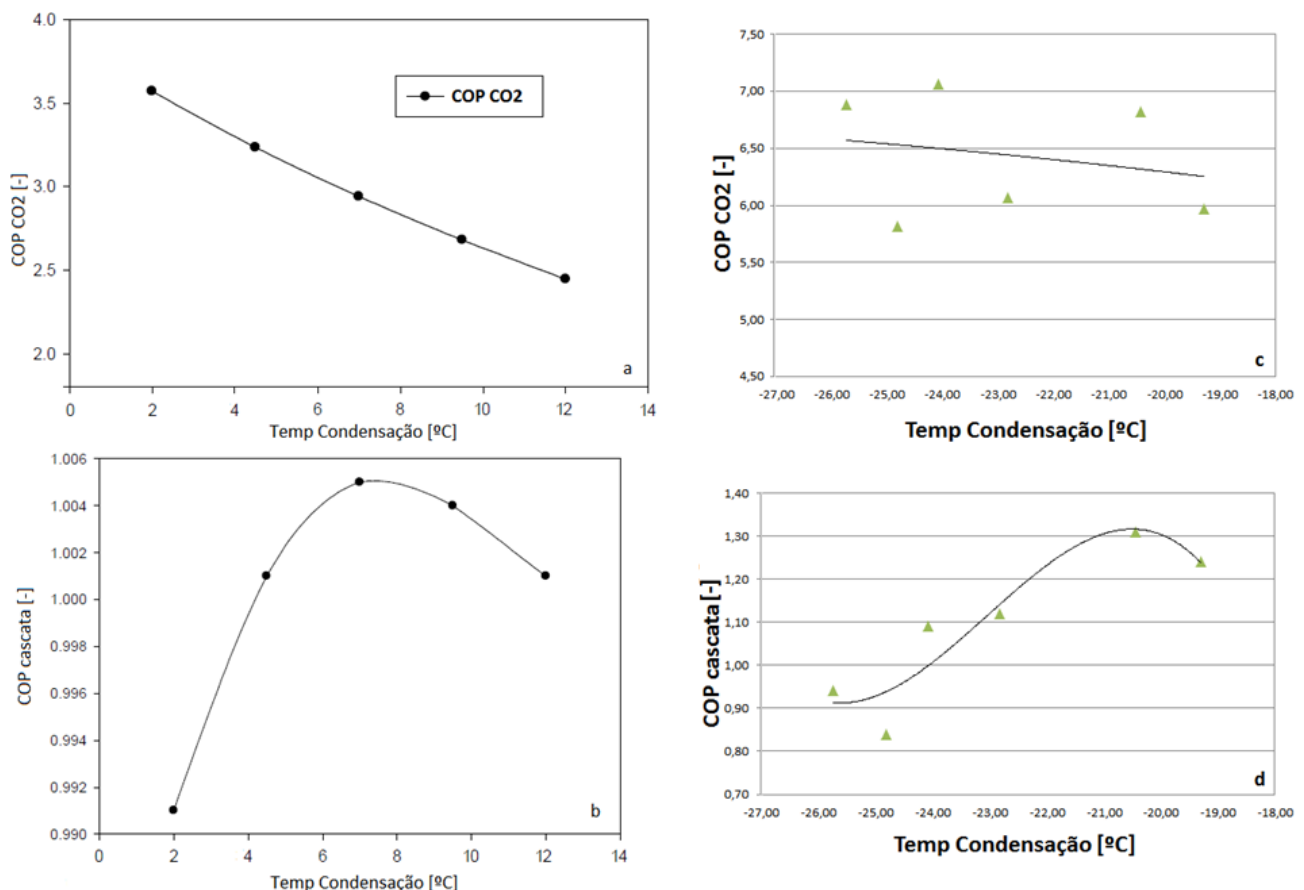


Figura 9. COP de R744 e do sistema cascata em função da temperatura de condensação de R744, obtidas por Sachdeva et. al. (a) e (b) e obtidas no presente trabalho experimental (c) e (d).

O sistema cascata possui um comportamento diferente do sistema de baixa temperatura isolado, o qual pode ser visto na Fig. 9b e 9d, no qual uma temperatura ótima de condensação pode ser determinada, a fim de que o COP do sistema cascata seja máximo. A Fig. 9b revela que o maior COP (1,007) do sistema é obtido com a temperatura de 7 °C,

enquanto que para o sistema experimental, o maior COP obtido foi de 1,31 com temperatura de condensação de -20,4 °C. Vale ressaltar que as pressões de condensação do trabalho experimental são bem menores do que as avaliadas por Sachdeva et. al. em vosso trabalho, as quais trabalham em torno de 50 bar.

Em trabalhos futuros, a modificação do mecanismo de expansão do R404A será realizada para permitir que o R744 condense em temperaturas mais elevadas, e com isso, alcance maior valores de capacidade de refrigeração.

4. CONCLUSÃO

A fim de contribuir para a melhoria dos processos de refrigeração, bem como a sustentabilidade e eficiência energética, este estudo experimental avaliou o desempenho de um sistema em cascata subcrítico utilizando o par de R744 / R134a, que representa o aparato experimental original instalado. Num segundo passo, após a substituição do R134a pelo R404A, através de uma operação de drop-in, uma comparação experimental foi realizada entre o comportamento do sistema original e o novo par de refrigerantes.

Durante os primeiros resultados, observou-se que os valores de capacidade de arrefecimento foi estabelecida entre 4,09 e 5,79 kW, demonstrando a aplicabilidade deste sistema em cascata funcionando nas condições de carga térmica variável. O valor mínimo da temperatura de funcionamento do ar dentro da câmara fria foi de - 28 ° C e o valor máximo desse parâmetro é de -3,1 °C.

A avaliação do sistema inicial demonstrou que os valores mais elevados foram obtidos COP nas frequências mais baixas de funcionamento do compressor de BT, e estes valores em relação aos sistemas de expansão direta com HFC ou HCFC são geralmente mais baixos. O COP máximo foi igual a 1,39 e o valor mínimo foi de 1,06 para o par R744 / R134a.

Além disso, os valores de capacidade de arrefecimento foram semelhantes para os 24 ensaios, no entanto, a temperatura desejada do ar no interior da câmara deve ser também avaliada para então, determinar o grau de sobreaquecimento e a frequência utilizada no compressor de BT.

Na sequência, uma operação de drop-in foi estabelecida no ciclo AT, em que a carga de R134a foi substituída por R404A. Além disso, o compressor do ciclo AT parou de operar a 60 Hz e começou a funcionar com uma velocidade variável. Através da segunda etapa (24 testes) verificou-se que os resultados obtidos para o par R744 / R404A participou da condição de temperatura do ar no interior da câmara fria, com valores COP similares do par original. No entanto, para o par R744 / R404A operando, a capacidade de refrigeração é muito mais baixa, estes valores foram estabelecida entre 2,16 e 4,15 kW. Esta redução é devido à grande diferença entre a capacidade de refrigeração volumétrica de ambos os HFCs, o que resulta em problemas de adaptação de R404A para os dispositivos do ciclo de alta temperatura, como o compressor e a válvula de expansão.

Finalmente, os resultados confirmaram que o sistema de cascata de R744 / R134a é superior ao do sistema alternativo (R744 / R404A). A operação drop-in direta é ineficiente neste caso, porque apenas quatro condições de teste dos 24 realizados foram compatíveis com o sistema original, e mesmo assim os valores de capacidade de refrigeração foram reduzidos.

Para trabalhos futuros, a modificação do dispositivo de expansão do ciclo AT (R404A) será executada para permitir que a condensação de R744 a temperaturas mais elevadas e, por conseguinte, alcançar valores de capacidade de arrefecimento mais elevadas. Além disso, outros refrigerantes serão avaliados no ciclo AT, a fim de encontrar o melhor par de refrigerantes para o intervalo de aplicação original.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro dado à pesquisa pela CAPES, CNPq, FAPEMIG e também pelo apoio técnico fornecido pelo engenheiro Alessandro da Silva, Bitzer Scroll (EUA) e Roberto Possebon Junior, Carel (Brasil).

5. REFERÊNCIAS

- M.J. Molina, F.S. Rowan. 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 Mecha-*

tronics Engineering, vol. 8, No 3.

Sanz-Kock, C., Llopis, R., Sanchez, D., Cabello, R., Torrella, E., 2014. Experimental evaluation of a R134a/CO₂ cascade refrigeration plant. Applied Thermal Engineering, vol. 73, pp 39-48.

CO₂ REFRIGERATION COMPARISON, IN CASCADE WITH R134a AND R404A

Abstract. This study evaluates the performance of a cascade system in subcritical operation using the pair R744 / R134, as an option to conventional systems in supermarkets, which usually uses R404A, or R22. The experimental apparatus consists of a variable speed reciprocating compressor for R744 and an electronic expansion valve that promotes direct evaporation of the CO₂ inside a cold room (2.3m x 2.6m x 2.5m) to maintain the internal air temperature stable. The high-temperature cycle consists of a reciprocating compressor for R134a, a thermostatic 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 R134a completes the setup. Two parameters were manipulated: The superheating degree of the R744, 5-20 K, and the R744 compressor operation frequency, 40-65 Hz. In order to contribute to the improvement of the cooling processes, mainly about the sustainability and energy efficiency, a drop-in has been made at the high-temperature cycle, whose R134a load has been replaced by R404A. The alternative cooling system (R744 / R404A) was subjected to two stages of tests which allowed the energy comparison between the two refrigerant sets. Through the obtained results, it was estimated maximum COP equivalent to 1.39 and a minimum value of 1.06 for the R744 / R134a pair, demonstrating the applicability of this cascade system of variable thermal load conditions, the values of capacity cooling, settled between 4.09 and 5.79 kW. The minimum value of the air temperature within the cold room was - 28 °C and -3.1 °C the maximum. Finally, it was found that the results obtained for R744 / R404A pair attended the air temperature condition inside the cold room with similar COP values. However, R744 / R404A pair operated at lower refrigeration capacities, these settled between 2.16 and 4.15 kW. This reduction is due to the large difference between the volumetric cooling capacity values of these HFCs in question, resulting in adaptation problems of the R404A to the compressor and the expansion mechanism.

Keywords: Refrigeration, Cascade, R744, R134a, R404A