

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA UTILIZANDO R744/R134a

Marcus Vinícius Almeida Queiroz, Universidade Federal de Uberlândia, engmarcusalm@ufu.br

Luís Manoel de Paiva Souza, Universidade Federal de Uberlândia, luisman@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho, Universidade Federal de Uberlândia, bandarra@ufu.br

Resumo. Alguns dos fatores de maior relevância na seleção de fluidos de trabalho é o comportamento no ciclo termodinâmico e também qual é o impacto desse fluido no meio ambiente. Alguns autores são enfáticos ao dizer que o uso de fluidos naturais é a melhor saída ao setor HVACR.

Este trabalho apresenta resultados experimentais de um sistema subcrítico em cascata utilizado em refrigeração comercial com capacidade de 10 kW com evaporação a -30°C e condensação a 40°C . Os sistemas cascata utilizam dois fluidos distintos, sendo um no lado de baixa temperatura e um no lado de alta temperatura. Os fluidos utilizados nesta pesquisa são o R744 no lado de baixa temperatura e o R134a no lado de alta temperatura.

Os resultados experimentais mostram que é possível a utilização desse tipo de sistema em refrigeração comercial e que ao utilizar o R744 que é um fluido natural de excelentes propriedades termodinâmicas, para a faixa de trabalho utilizada, o mesmo apresenta valores de COP superiores aos fluidos utilizados até então como o R22 e o R404A. O COP do sistema de alta por utilizar o R134a também apresenta bons resultados, juntamente com o COP do sistema em geral.

Palavras chave: R744, R134a, COP, fluidos naturais, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o US Department of Energy, 15% do consumo de energia elétrica dos Estados Unidos, está relacionado à refrigeração e ar condicionados. Tal dado de consumo para o Brasil não é encontrado na literatura, ou em dados do Ministério de Minas e Energia, mas em países com temperaturas mais elevadas, como esse, tal consumo tende a ser maior. Visto que a demanda por energia elétrica deve aumentar em 70% até 2035 em nível global, a busca por melhores eficiências energéticas em sistemas de refrigeração deve ser constante.

Além da questão energética, avalia-se também a questão do dano ao meio ambiente que o fluido refrigerante gera. Tal avaliação do impacto ambiental pode ser feita a partir de índices como o GWP (Global Warming Potential), relacionado ao potencial de aquecimento global e o ODP (Ozone Depletion Potential), quanto à destruição da camada de ozônio.

2. IMPACTO AMBIENTAL DOS FLUIDOS REFRIGERANTES

As capacidades de refrigeração bem como as propriedades termodinâmicas do sistema são diretamente ligadas ao fluido de trabalho. Os fluidos classificados como CFCs e HCFCs, estão com seu tempo de uso contado, visto que no Protocolo de Montreal dispôs-se que os gases CFCs estão banidos desde 1996 e os HCFCs devem ser banidos de novos equipamentos em 2020 na Europa, e no Brasil a previsão é para que em 2040 estes estejam banidos. Tal ação é devida pelo potencial de reação destes gases com o ozônio, levando a destruição da camada de ozônio. Os HFCs e fluidos naturais são os melhores candidatos para tal substituição.

A destruição da camada de ozônio é um dos fatores que contribuem para o aquecimento global, e este associado ao aumento das emissões de gases que contribuem para o efeito estufa montam um cenário que se não controlado levará ao desequilíbrio do ecossistema. A avaliação quantitativa deste impacto relacionado ao efeito estufa pode ser dada pelo GWP, definido como a massa de CO_2 que produziria o mesmo impacto líquido sobre o aquecimento global como a liberação de uma única unidade (kg) do componente dado à atmosfera.

O Protocolo de Quioto estabelece metas obrigatórias de emissões de gases de efeito estufa, que convergem à proibição de lançamentos evitáveis de refrigerantes HFC e PFC. Estas restrições estão forçando a mudança para uma quarta geração de refrigerantes com valores de GWP e ODP dentro das especificações. Para tal, uma das propostas do trabalho é analisar experimentalmente outros fluidos, passíveis de substituir tais refrigerantes que com o tempo, devem sair do cenário da refrigeração.

Para quantificação dos valores de GWP e ODP dos fluidos mais comumente utilizados no setor comercial de refrigeração, e dos analisados neste trabalho, segue a Tab. (1). O fluido refrigerante ideal é aquele que possui excelentes propriedades térmicas, valores reduzidos de GWP e ODP nulo. Este é o candidato para redução da degradação do meio ambiente e garantia da boa performance energética de um sistema de refrigeração.

Tabela 1. Classes de refrigerantes e seus potenciais impactos ambientais.

Classe	Sigla	ODP	GWP 100 anos	Vida na atmosfera (anos)	Exemplo
Clorofluorcarbonos Saturados	CFC	0,6-1	4750-14400	45-1700	R11 e R12
Hidroclorofluorcarbonos Saturados	HCFC	0,02-0,11	77-2310	1,3-17,9	R22 e R141b
Hidrofluorcarbonos Saturados	HFC	-	124-14800	1,4-270	R134a e R404A
Refrigerantes Naturais	-	-	0-20	-	R744 e R290

Avaliando os valores de GWP e ODP dos fluidos, o R134a é um HFC com 0 (zero) de ODP e GWP de 1300, enquanto o R744 possui ODP nulo e GWP de 1. Partindo para os fluidos tradicionais, o R22 possui ODP de 0.05 e GWP de 1700 enquanto o ODP do R404A é nulo e o GWP é 3300. Logo, pode-se observar que o valor de ODP para os fluidos utilizados no sistema cascata proposto são nulos, e se comparados os valores de GWP do R134a com o do R22, proporcionalmente, este é 76.5% menor. Enquanto a mesma comparação com o R404A leva este valor para 39.4%.

3. ESTADO DA ARTE

Andrea Chesi *et al.* (2013), fizeram uma análise experimental do ciclo de compressão de R744 em paralelo com o sistema em configuração de tanque de evaporação flash, pois pela literatura modificações no ciclo permitem alcançar melhores resultados. Os resultados obtidos sugerem que os fatores mais relevantes para um bom funcionamento, seriam baixas perdas de pressão ao longo da tubulação, um bom isolamento (em especial do lado de baixa temperatura) e um melhor projeto de separador. Os autores concluíram que a melhoria de COP foi limitada em 10% visto que a separação no tanque é ineficiente resultando na queda de desempenho do sistema.

Sachdeva *et al.* (2014), mostram que para um sistema de refrigeração em cascata, trabalhando com R744 como fluido de trabalho no circuito de baixa temperatura, enquanto R717, R290, R1270, R404A e R12 são os refrigerantes em circuito de alta temperatura. Para tal, as curvas de desempenho de R717, R290, R1270 e R404A são comparadas com R12 para encontrar seu substituto mais próximo. Conclui-se que o R404A é o que possui maior custo enquanto o de menor custo é o R717. Como o R290 é um refrigerante de alta pressão e temperatura, este exige um sistema com compressor e evaporador maiores que os necessários para os outros refrigerantes, logo seu custo é mais alto de equipamento e a operação tem custo equiparado ao do R404A. O R1270 tem características similares ao propano, podendo esse ser facilmente substituído pelo propileno. Os resultados mostram que a amônia é o melhor refrigerante para operar na linha de alta temperatura, por possuir as menores temperaturas e pressão de operação, aliadas ao melhor COP no trocador de calor.

Dubey *et al.* (2014), utilizaram o refrigerante natural R1270 em cascata com R744 em um sistema de refrigeração transcrito. Os resultados da análise mostram melhor desempenho térmico do ciclo transcrito do que quando comparado ao sistema cascata operando na condição subcrítica e também melhor do que o ciclo transcrito NO₂ / CO₂.

4. PLANTA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

O aparato experimental corresponde a um equipamento com capacidade de 10,47 kW, esse sistema de refrigeração subcrítico em cascata opera segundo o ciclo de compressão do vapor. Este ciclo utiliza dois fluidos distintos, sendo que o ciclo de baixa temperatura tem capacidade máxima de 4,11 kW e utiliza R744, o ciclo de alta temperatura tem capacidade de 6,36 kW e utiliza R134a. A junção entre os dois ciclos é realizada através de um trocador de calor a placas, conhecido na literatura como “condensador cascata”, nesse trocador ocorre a condensação do R744 e a evaporação do R134a.

No ciclo de baixa temperatura o R744 deixa o compressor no estado de vapor a alta pressão e temperatura, entra então no condensador cascata, onde condensa trocando calor com o R134a e em seguida é armazenado em um tanque de líquido. Ao deixar o tanque de líquido em direção à válvula de expansão o mesmo passa por um medidor de vazão tipo Coriolis, entra então na válvula de expansão saindo então da válvula troca calor no evaporador e retorna a sucção do compressor, passando antes em um trocador de calor intermediário, aumentando assim seu superaquecimento.

No ciclo de alta temperatura o R134a evapora no trocador de calor, é succionado pelo compressor, comprimido, condensado em um condensador a ar de onde é armazenado em um taque de liquido antes de seguir para a válvula de expansão e assim completar o ciclo. A faixa de operação do sistema é evaporação do R744 a -30°C e condensação do R134a a 40°C.

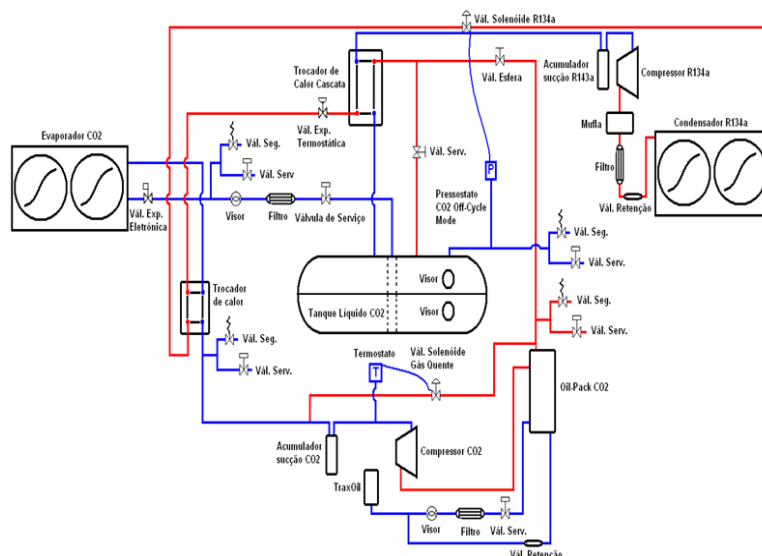


Figura 1. Diagrama da tensão versus frequência a 303 K

Na Fig. (1) é apresentado um diagrama esquemático do sistema, onde é possível visualizar todos os equipamentos e a posição dos mesmos. O sistema está devidamente instrumentado de forma que é possível medir valores de pressão e temperatura de vários pontos de interesse, bem como a potência consumida pelos compressores, e a partir das medidas calcularem os valores de variáveis de interesse tais como, COP do sistema, COP do R744, COP do R134a, capacidade frigorífica entre outros.

A metodologia empregada nesse trabalho é a superfície de resposta (MSR). Através dessa metodologia é possível analisar o impacto das variáveis f (frequência do compressor) e A_{vee} (abertura da válvula de expansão eletrônica), a fim de buscar a melhor condição de operação do sistema, e dessa forma avaliar o COP, capacidade de refrigeração e demais parâmetros do sistema. Os testes experimentais são realizados de forma aleatória e de acordo com uma planilha desenvolvida pelo software Statistica. Essa planilha de testes é alimentada com parâmetros pré-determinados experimentalmente, esses parâmetros são chamados de limites de operação.

Segundo Calado e Montgomery (2003) usam-se superfícies de resposta quando as variáveis de resposta são influenciadas por variáveis independentes e o objetivo é otimizar essas repostas.

Os parâmetros variáveis no experimento são a frequência do compressor de R744 e a abertura da válvula eletrônica do R744, de posse desses parâmetros foi realizado o planejamento experimental tendo como limites os valores apresentados na Tab. (2).

Tabela 2 - Limites dos parâmetros.

Frequência	AVEE
45	70
50	80
55	90

Na Fig. (2.a) é apresentada a superfície de resposta para o COP do R744, em função da frequência do compressor e da AVEE. Observa-se que os valores do COP são elevados, fato esse explicado pelas propriedades termodinâmicas do R744 que são excelentes para transferência de calor. Os limites para o COP do R744, como observado na figura, são COP máximo de 9,395 para uma frequência de 55 Hz e AVEE de 90% com uma capacidade de refrigeração de 3,9 kW e uma vazão de 0,012 kg/s, como pode ser observado na Fig. (2.a).

O COP mínimo obtido foi de 4,483 para frequência de 55 Hz e AVEE de 70%, essa diminuição do COP é devido ao fechamento da válvula, haja vista que a frequência é a mesma, diminuindo assim a vazão mássica, que nesse caso foi 0,0088 kg/s, como ocorre a redução da vazão consequentemente ocorre a redução do efeito frigorífico, como pode ser observado a capacidade de refrigeração para essas condições foi de 2,434 kW.

Na Fig. (2.b) é apresentada a capacidade de refrigeração do R744, observa-se que o valor máximo obtido foi de 4,396, para uma frequência de 50 Hz e AVEE de 94,14% com vazão mássica de 0,0199 kg/s, indicando que o parâmetro de maior influência no sistema é a AVEE. A diminuição da frequência acarreta uma diminuição da potência consumida

pelo compressor, aumentando assim o valor do COP. De acordo com esse pressuposto, espera-se COP elevado para baixas frequências, inferiores a 50 Hz, porém, observa-se uma queda na capacidade de refrigeração, tornando assim o COP baixo. A menor capacidade de refrigeração foi de 2,211 para vazão de 0,0063, frequência de 50 Hz e AVEE 65,86%, portanto a restrição à capacidade de refrigeração foi dada pela abertura da válvula, diminuindo a vazão mássica.

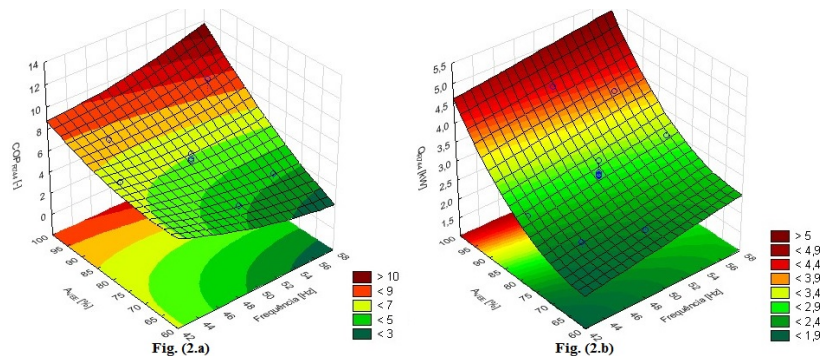


Figura 2. (a) COP_{R744} em função da abertura da válvula e frequência. (b) Capacidade de refrigeração em função da abertura da válvula e frequência.

A capacidade de refrigeração do R134a, nesse sistema em cascata, apresenta valores maiores que a capacidade de refrigeração do R744, isso ocorre porque a unidade de R134a, ou unidade condensadora deve suportar a capacidade de refrigeração do sistema de baixa temperatura, ou seja, do R744 e ainda a potência de compressão do R744. Portanto a capacidade de refrigeração do R134a apresentou valores superiores àquelas apresentadas pelo R744. A capacidade de refrigeração do R134a obteve sua capacidade máxima de 5,177, sendo no mesmo ponto experimental para a maior capacidade de refrigeração do R744 e consequentemente do sistema.

Na Fig. (3.a) é apresentado o COP do R134a em função da frequência e AVEE do R744, é possível analisar a combinação dos dois sistemas ser realizada através de um trocador de calor cascata, de modo que a evaporação do R134a se dá com a condensação do R744, dessa forma, os parâmetros do R744 influenciam diretamente o sistema de R134a. O COP do R134a não apresenta grandes variações assim como o do R744, o sistema de R134a trabalha de forma estável, até mesmo porque o mesmo não sofre interferências nos seus parâmetros, ou seja, o compressor de R134a opera sempre a 60 Hz, e o dispositivo de expansão é uma válvula termostática. Sendo assim, a função do R134a é condensar o R744, portanto os valores do COP do R134a apesar de baixos, ficando na média dos testes em torno de 1,42, o mesmo irá influenciar diretamente no COP do sistema como pode ser observado na Fig. (3.b).

A Fig. (3.b) apresenta o COP do sistema, ou seja, é a capacidade de refrigeração do sistema pelas potências consumidas pelos compressores de R744 e R134a. Observa-se que o COP máximo não ultrapassou 1,293, esse COP é o ponto em que os dois sistemas apresentaram COP maiores e também maior capacidade de refrigeração.

O COP mínimo para o sistema foi de 0,7428, esse valor corresponde a um COP do R744 de 5,028, do R134a de 1,101 e capacidade de refrigeração de 2,263 kW. Esse COP corresponde ao ponto experimental onde o compressor do R744 opera com uma frequência de 45 Hz com uma AVEE de 70%. A justificativa para o COP do sistema apresentar baixo valor está associado a elevado consumo dos compressores com a baixa capacidade de refrigeração, mostrando que para baixas frequências tanto o COP como a capacidade de refrigeração são penalizados.

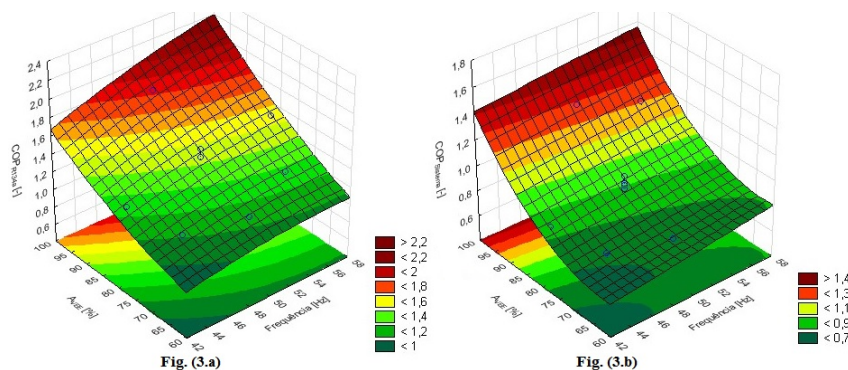


Figura 3. (a) COP_{R134a} em função da abertura da válvula e frequência. (b) $COP_{sistema}$ em função da abertura da válvula e frequência.

5. CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados mostram que é possível a substituição de fluidos até então utilizados no setor comercial, como é o caso do R22 e do R404A, ao utilizar o R744, além de obter vantagens termodinâmicas no sistema contribuirmos positivamente para o efeito estufa, uma vez que o R744 não contribui para a destruição da camada de ozônio e é referência em relação ao aquecimento global.

Os resultados para os valores de COP e capacidade de refrigeração apresentados são satisfatórios do ponto de vista comercial, embora os sistemas envolvendo aplicações de R744 encontrem certa resistência, devido a alguns parâmetros de operação, como é o caso das pressões no ciclo de R744, a tendência à utilização dos fluidos naturais em sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado no Brasil e no mundo é crescente. Cada dia mais empresas buscam de formas seguras a substituição de elementos degradantes da atmosfera e contribuintes ao efeito estufa.

Portanto ao utilizarmos fluidos naturais, ou no momento de baixo impacto ambiental, estamos buscando uma nova era no setor de refrigeração e ar condicionado, visando não só o crescimento do setor, mas também mostrando que é possível a utilização desses fluidos, desde que respeitado seus limites de aplicações e normas pertinentes à sua utilização.

6. REFERÊNCIAS

- Calado, V.; Montgomery, C.D., 2003, “Planejamento de experimento usando o statistica.”, 1 ed. Rio de Janeiro, E-papers Serviços Editoriais, 260.
- Chesi, A., Esposito, F., Ferrara, G., Ferrari, L., 2013, “Experimental analysis of R744 parallel compression cycle.” *Applied Energy* 135, pp. 274–285.
- Dubey, A., Kumar, S., Agrawal, G., 2014, “Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂/propylene (R744–R1270) cascade system for cooling and heating applications”, *Energy Conversion and Management* 86, pp. 774–783.
- Sachdeva, G., Jain, V., Kachhwaha, S., 2014, “Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants”, *A World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering* 8, No:3.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPQ e ao programa de pós-graduação da Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio financeiro.

8. ABSTRACT

Some of the most relevant factors in the selection of refrigerant fluids is the behavior in the thermodynamic cycle and also what is the impact of this fluid in the environment. Some authors are emphatic in saying that the use of natural fluids is the best solution to the HVACR industry. This paper presents experimental results of a subcritical cascade system used in commercial refrigeration with 10 kW capacity with evaporation and condensation at -30 ° C to 40 ° C. The cascade systems use two different fluids, one in the low-temperature side and one on the high temperature side. The fluids used in this study are R744 at the low temperature side and R134a in the high temperature side. The experimental results shows that it is possible to use such a system in commercial refrigeration and that when using the R744 which is a natural fluid of excellent thermodynamic properties for the working range used, it shows COP values as better as fluids like R22 and R404A. The high temperature system COP using R134a also gives good results, along with the system COP.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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