

APLICAÇÃO DO CO₂ (R744) EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO TIPO CASCATA QUE OPERAM COM
EJETOR – UMA REVISÃO

Frank Wiliam Adolfo Blanco Ojeda – frank_blanco@ufu.br

David Fernando Marcucci Pico – dmarcucci@ufu.br

Luz Elena Peñaranda Chenche – elenap_chenche@ufu.br

Enio Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica,

R4 Aplicações Industriais e Especiais

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma revisão dos arranjos propostos na literatura sobre a aplicação do ejedor em sistemas de refrigeração em cascata que operam com R744. No artigo é apresentado o ciclo de refrigeração cascata convencional e as configurações que utilizam o ejedor como dispositivo de expansão, tais como: sistema de refrigeração em cascata e híbridos. Os resultados encontrados na literatura indicam que o uso do ejedor aumenta o desempenho dos sistemas de refrigeração em cascata devido ao aproveitamento da energia cinética no processo de expansão, elevando a pressão de sucção do compressor e conseqüentemente reduzindo o consumo de energia no mesmo. Entretanto, foi observado uma quantidade de trabalhos experimentais insuficientes na literatura para avaliar a viabilização prática e potencializar a utilização sistemas de refrigeração.*

Palavras-chave: *Ejedor, Refrigeração, Cascata, Híbrido, R744.*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração têm impacto significativo no meio ambiente através das emissões diretas e indiretas. As emissões diretas ocorrem pelo vazamento do fluido refrigerante e as emissões indiretas ocorrem pela geração de gases de efeito estufa que são produzidos durante a geração de energia. Por tanto, nas últimas décadas foram estudados os fluidos refrigerantes sintéticos, tais como: clorofluorocarbonetos (CFC's), hidroclorofluorocarbonetos (HCFC's) e hidrofluorocarbonetos (HFC's), esses refrigerantes causam problemas ambientais associados ao aquecimento global e à degradação da camada de ozônio. Conseqüentemente, é necessário a redução e comercialização dessas substâncias para interromper as mudanças climáticas. Além disso, trazer modificações nos equipamentos novos e já existentes.

Como medida de prevenção e conservação do meio ambiente a União Europeia aprovou o Regulamento (UE) N.º 517/2014 do Parlamento Europeu (REGULATION (EU) N.º 517/2014, 2014), também conhecida como *F-gas*, que estabelece etapas para contenção, uso, recuperação e destruição dos gases fluorados. Além disso, a regulamentação impõe os limites de comercialização e condições de utilização deste tipo de substâncias. Por outro lado, em janeiro do ano 2019 entrou em vigor a Emenda de Kigali, surgindo para corrigir o problema decorrente do Protocolo de Montreal, provendo uma solução devido aos gases de efeito estufa que são produzidos pelos HFC's. A Emenda de Kigali foi aprovada mundialmente por 197 países incluindo o Brasil, trazendo uma contribuição significativa para desacelerar o aquecimento global e a mudança climática, introduzindo etapas de redução global na produção e consumo dos HFC's (Polonara et al. 2017).

Após das medidas impostas pela Emenda de Kigali, o setor da refrigeração e os centros de pesquisa uniram forças com o intuito de procurar novas alternativas com sistemas que atinjam alta eficiência energética combinado com a redução do impacto ambiental, voltando assim ao uso de refrigerantes naturais, tais como propano (R290), amônia (R717) e dióxido de carbono (CO₂). Esses fluidos estão sendo altamente impulsionados pela indústria e centros de pesquisa para substituir os fluidos refrigerantes convencionais, devido a que serem fluidos ecológicos e não geram danos no meio ambiente. Nesse sentido, nos trabalhos do cientista Lorentzen, (1994a) e Lorentzen, (1994b) sugeriu a utilização do dióxido de carbono (R744) como fluido refrigerante, por ser um fluido natural com *Ozone Depletion Potencial* (ODP) nulo e *Global Warming Potential* (GWP) unitário, atóxico e não inflamável, além disso é de baixo custo em comparação aos refrigerantes sintéticos.

A atração para o uso do R744 em sistemas modernos é baseada em suas propriedades termofísicas: baixa viscosidade, alta condutividade térmica e a alta massa específica na fase vapor. Essas propriedades levam a intensificar a transferência de calor nos evaporadores, condensadores e os resfriadores a gás, permitindo assim a utilização de componentes de menor tamanho em relação aos CFC's e HCFC's (ASHRAE, 2018). Além disso, o R744 apresenta principais vantagens como: alta solubilidade com os lubrificantes e baixo custo em comparação aos fluidos refrigerantes convencionais (Niu e Zhang 2006). O dióxido de carbono é caracterizado pela sua alta pressão a baixas temperaturas e, dependendo da temperatura ambiente o sistema pode funcionar em modo transcrito ou subcrítico. Uma maneira de operar o ciclo de refrigeração em

modo subcrítico, é usando o R744 como um fluido secundário em sistemas indiretos ou em aplicações em cascata, em que o R744 é utilizado a baixa temperatura, garantindo a sua operação abaixo do ponto crítico (Llopis et al. 2014).

Os sistemas de refrigeração encontram-se a disposição na maioria dos países industrializados através da disponibilidade elétrica, porém não estão à disposição em diversas áreas de países em desenvolvimento. Por causa disso os pesquisadores se focaram em fontes de energia renováveis, sendo a energia solar estudada porque está disponível na maior parte do mundo (Abdulateef et al. 2009), essa energia solar é captada através de um sistema fotovoltaico. No Brasil, o consumo de energia das aplicações de refrigeração é de 7,6 %, por tanto é necessário incentivar o uso de energia solar no setor da refrigeração.

Nesse sentido, tem sido utilizado sistemas de refrigeração híbridos, no qual o ciclo de baixa temperatura funciona com compressão a vapor e o ciclo alta temperatura funciona por ejeção através do ejetor. O ciclo de ejeção é acionado por uma bomba e um coletor solar que fornece o calor necessário, para subministrar a alta temperatura no ejetor, e assim garantir seu funcionamento ideal. A implementação do ejetor constitui uma vantagem importante nos ciclos de refrigeração. Isso é devido ao aproveitamento de trabalho perdido na expansão dos ciclos de refrigeração convencionais. Esse dispositivo transforma a energia cinética em energia potencial, fornecendo além da expansão uma diminuição de potência no compressor principal quando se tem a configuração de compressão em paralela.

Embora os sistemas de refrigeração que operam com R744 tenham sido extensivamente cobertos na última década, os aprimoramentos associados ao ciclo em cascata foram pouco explorados. Consequentemente, o objetivo deste trabalho é juntar as pesquisas mais recentes em aplicações do ciclo de refrigeração em cascata, com as soluções existentes para a aplicação de ejetores para aumentar a eficiência. A aplicação do ejetor nos ciclos de refrigeração de dois estágios é dividida em ciclos de refrigeração em cascata e híbridos.

2. SISTEMA DE EXPANSÃO COM EJETOR

O ejetor foi inventado por sir Charles Parsons por volta do ano de 1901 e 1910, Esse dispositivo foi utilizado por Maurice Leblanc em um sistema de refrigeração por jato-compressão de vapor para remover o ar do condensador em um motor de vapor (Chunnanond e Aphornratana 2004). Com o passar dos anos, os sistemas de refrigeração por jato-compressão de vapor foram substituídos por sistemas com compressores mecânicos. Desde então a maioria dos esforços se concentraram em sistemas de refrigeração a compressão de vapor (Pounds, 2010). Na atualidade, o desenho do ejetor é relativamente simples e fornece uma operação confiável de baixo custo. Essa vantagem faz com que os ejetores sejam utilizados em processos que exigem vácuo ou em compressão de gases utilizados nos ciclos de refrigeração (McGovern et al. 2012).

O funcionamento do ejetor consiste na expansão do fluido primário que entra a alta pressão e é acelerado pelo bocal a velocidade supersônica. A alta velocidade do fluido primário cria uma diferença de pressão arrastando o fluido secundário que está conectado à saída do evaporador de baixa temperatura. Essa diferença de pressão causa uma compressão do refrigerante evaporado. Após de um determinado comprimento no ejetor ocorre a mistura entre o fluido primário e secundário. Por último, o difusor desacelera o escoamento de mistura e aumenta a pressão na saída no ejetor. Huang et al. (1999) fizeram uma análise unidimensional para cada componente do ejetor e avaliaram o desempenho quando opera em modo crítico, esse modo é favorável em termos de alta taxa de arraste e desempenho do ejetor. Na Fig. 1 é apresentada a vista esquemática do ejetor.

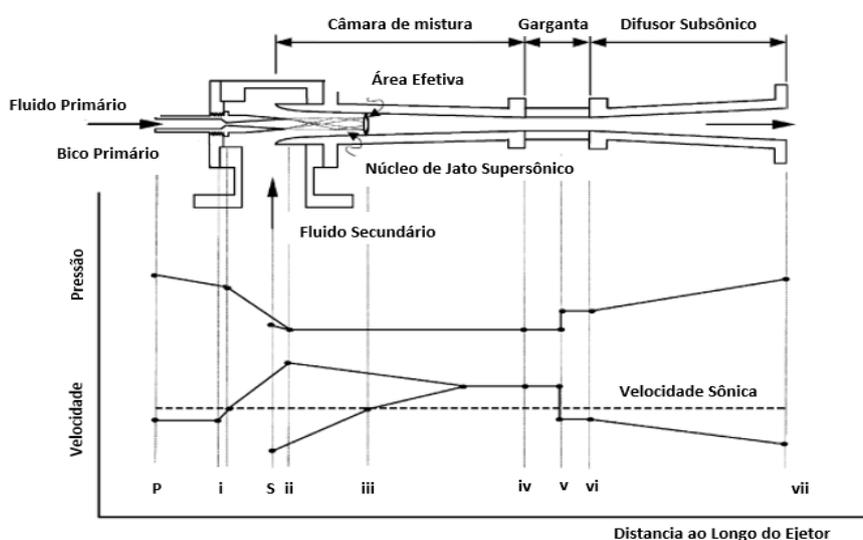


Figura 1. Vista esquemática com a variação de pressão e velocidade do escoamento ao longo do ejetor. (Adaptado de Chunnanond e Aphornratana, 2004)

Existem dois tipos de ejetores, sendo classificados de acordo com a posição do bocal. Esses ejetores são: o ejetor de mistura a pressão constante e o ejetor de mistura com área constante. O corpo do ejetor a pressão constante é caracterizado por ter uma região convergente para garantir a pressão constante nos escoamentos primário e secundário, de modo que a mistura seja realizada a pressão constante antes de entrar na área da garganta. Enquanto o ejetor com área constante os dois escoamentos entram diretamente na região de área constante, porém a mistura não ocorre a pressão constante (Chunnanond e Aphornratana., 2004; Ksayer e Clodic., 2006). Tashtoush et al. (2015) estudaram os efeitos da geometria, para os tipos de ejetor de mistura a pressão e área constante. Os autores concluíram que o ejetor de mistura a pressão constante é melhor que o ejetor de mistura com área constante, devido a que produz uma maior compressão e contrapressão. Uma alta contrapressão ou pressão de condensação causa que as ondas de choque penetrem na seção de mistura e o escoamento será interrompido. Os mesmos autores também observaram que o ejetor de mistura a pressão constante tem uma maior faixa de taxa de arrasto a valores de contrapressão elevados, essas características permitem que o ejetor propicie um maior COP no ciclo de refrigeração em comparação ao ejetor com área constante. Na Fig. 2 (a) e (b) são apresentados os dois tipos de ejetores.

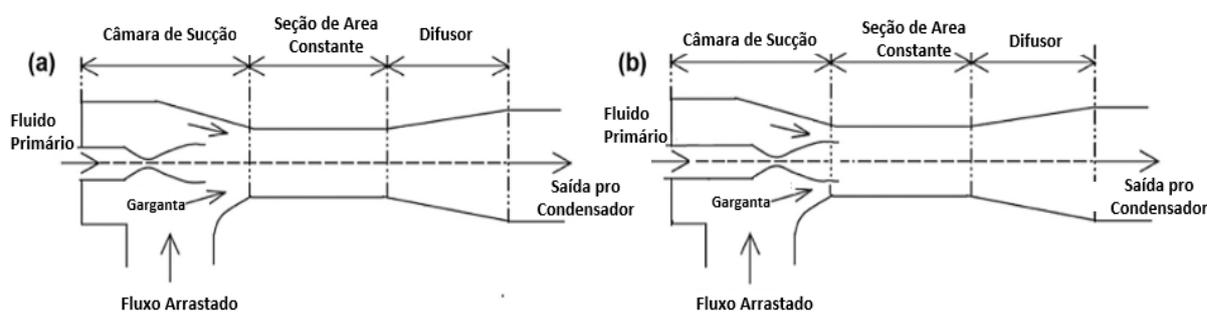


Figura 2. a) Ejetor de mistura a pressão constante e b) ejetor de mistura com área constante. (Adaptado de Tashtoush et al. 2015)

Um dos parâmetros mais estudados no desempenho do ejetor é a geometria do bocal. A geometria do bocal influencia diretamente na taxa de arrasto e na mistura dos escoamentos primário e secundário ao longo do ejetor. Os fatores mais importantes no desempenho do ejetor são: relação de áreas entre o bocal primário e a área constante, posição do bocal de saída e diâmetro do bocal primário (Chen et al. 2017a, 2017b). Além dos já citados, o ângulo do difusor também pode afetar o desempenho do ejetor Elbel, (2011). Além disso, as características de desempenho do ejetor dependem fortemente do tipo de fluido de trabalho e de determinadas condições de funcionamento do sistema de refrigeração (Šarevski e Šarevski, 2016). Liu et., (2012) desenvolveram uma simulação estudando a eficiência do ejetor, obtendo que a eficiência do bocal diminui à medida que a área da garganta se reduz. Os autores também observaram que a temperatura do ar exterior pode influenciar na eficiência do bocal de sucção.

O ejetor constitui uma possibilidade atraente em comparação aos dispositivos de expansão clássicos. Isso pode ser explicado porque aproveita o calor residual do condensador ou resfriador de gás, utilizando a energia que normalmente é desperdiçada nos processos de estrangulamento em uma válvula de expansão (Banasiak e Hafner 2011). Ou seja, o ejetor transforma a energia cinética por energia potencial de pressão, fornecendo, além da expansão, uma parcela de gás na sucção do compressor, diminuindo o consumo de potência do compressor principal em processos de compressão paralela. Nos estudos de Li et al. (2018b) verifica-se que o escoamento do fluido primário e secundário do ejetor aumentam com a elevação da temperatura ambiente, causando que a pressão de sucção do compressor aumente. Consequentemente, o volume específico da entrada do compressor diminui, causando o aumento da vazão mássica do compressor.

Portanto, a implementação do ejetor em sistemas de refrigeração que operam em climas quentes, se mostra altamente vantajoso devido à redução de consumo de potência nos compressores. O R744 quando opera em elevadas temperaturas ambientes ou em modo transcrito, apresenta uma perda significativa de estrangulamento causadas pela expansão do fluido refrigerante à pressão de condensação e evaporação. Por esse motivo, justifica-se implementar o ejetor para a recuperação de trabalho e dessa forma melhorar o COP do sistema (Elbel e Lawrence., 2016). A aplicação do ejetor em sistemas de refrigeração é benéfico pelas seguintes características: aprimoramentos do COP em climas quentes, podendo aumentar de 15 % até 20 % em comparação com os sistemas de compressão paralela (Ksayer e Clodic, 2006). Também apresenta a vantagem de redução de custo e consumo de energia nos sistemas de compressão em comparação com os racks de R744 transcrito, devido à redução do volume de varrido nos compressores. Além disso os sistemas de refrigeração com ejetor contribuem na redução das emissões de efeito estufa por causa do decréscimo de energia no consumo dos compressores. Haida et al. (2016) Analisaram um ejetor na qual é utilizada a técnica de evaporação inundada, fazendo que melhore o coeficiente de transferência de calor. Isso pode ser explicado pelo crescimento da vazão mássica de refrigerante, ocasionando o aumento do COP no sistema de refrigeração. Em conclusão, a recuperação da perda de estrangulamento é um método eficiente para melhorar o desempenho nos ciclos de refrigeração em cascata ou em bombas de calor (Bai et al. 2016).

3. CICLO DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA

Em aplicações onde há uma diferença muito grande entre a temperatura ambiente e o espaço refrigerado, o ciclo de refrigeração simples ou de duplo estágio se tornam insuficientes, fazendo necessário a implementação de um circuito de refrigeração de dois estágios (Nebot-Andrés et al. 2017a). Por isso é utilizado um ciclo de refrigeração em cascata que permite trabalhar com dois fluidos refrigerantes separados, operando com pressões e temperaturas diferentes para cada ciclo. Além disso, permite o uso de quantidades reduzidas de fluidos refrigerantes no ciclo de alta temperatura, minimizando o custo e risco em caso de vazamento (Ouadha et al. 2007). Os sistemas de refrigeração em cascata são usados principalmente em aplicações de clima quente, sempre e quando sejam resolvidos a pressão e segurança operacional (Zhang et al. 2020).

O ciclo de refrigeração em cascata contém dois estágios. Os dois ciclos encontram-se ligados por um trocador de calor colocado no meio, que serve como evaporador para o ciclo superior (ciclo de alta temperatura) e como condensador para o ciclo inferior (ciclo de baixa temperatura). Assumindo que o trocador de calor esteja bem isolado, a transferência de calor do fluido inferior deve ser igual à transferência de calor do fluido superior. No ciclo de refrigeração em cascata é necessário haver uma diferença de temperatura entre os dois fluidos para ocorrer transferência de calor (Çengel e Boles, 2001). A diferença de temperatura é um parâmetro muito importante no estudo do ciclo de refrigeração em cascata, pois desempenha um papel muito importante na decisão do coeficiente de desempenho (COP) (Sachdeva et al. 2014). O valor da diferença de temperatura é refletida no consumo de potência nos compressores do ciclo de alta e baixa temperatura, um equilíbrio razoável para manter o baixo consumo é a utilização de uma diferença de temperatura entre 2,5 °C e 5 °C (Bansal e Jain, 2007). Na Fig. 3 (a), é apresentado o ciclo de refrigeração em cascata operando com R717 e R744 no ciclo de alta e baixa, respectivamente. Na Fig. 3 (b) e Fig. 3 (c) são ilustrados os diagramas temperatura-entropia e pressão-entalpia do ciclo de refrigeração em cascata, com os pontos correspondentes para cada propriedade do ciclo. Basicamente a função principal do ciclo de alta temperatura é manter as condições do R744 operando em modo subcrítico. Ou seja, abaixo da pressão e temperatura do ponto crítico, 73.77 Bar e 30.98 °C, respectivamente.

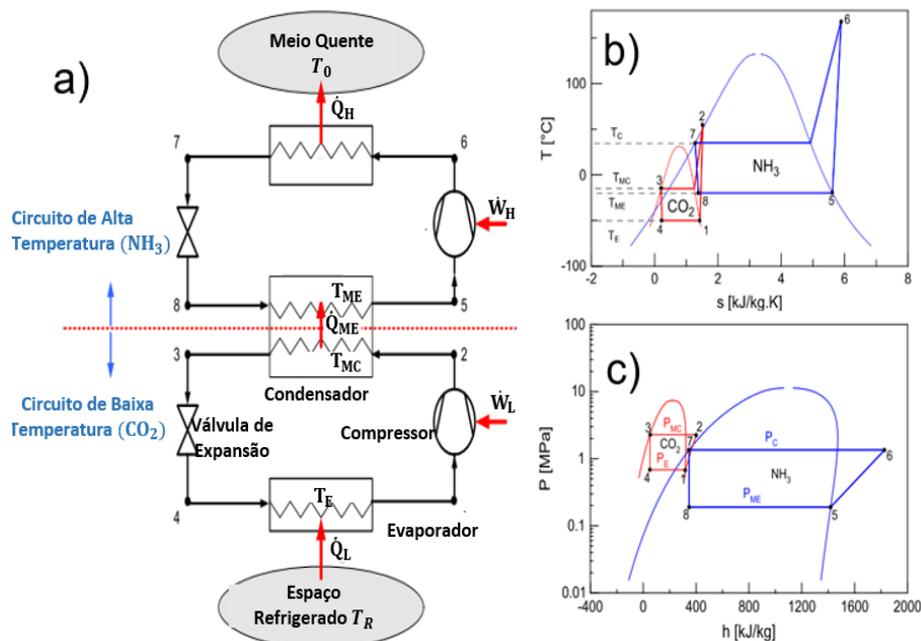


Figura 3. Ciclo de refrigeração operando com R717/R744 a) Ciclo de refrigeração em cascata básico b) ciclo T-s c) ciclo P-h. (Adaptado de Lee et al. 2006).

No ciclo de refrigeração em cascata convencional são estudados os adequados refrigerantes para o ciclo de alta temperatura que proporciona a maior eficiência no ciclo. Os fluidos refrigerantes geralmente utilizados nesse ciclo de refrigeração são: R22, R404A, R290, R717, R1270, R12, R134a. (Kilicarslan e Hosoz, 2010; Sun et al. 2016).

3.1 Aplicação do ejetor em sistemas de refrigeração em cascata.

Na prática as perdas termodinâmicas no ciclo de refrigeração em cascata, degradam o desempenho do sistema. Além disso, os sistemas em cascata consomem uma energia considerável. Nesse sentido é de suma importância melhorar a sua eficiência energética Megdouli et al. (2016). Portanto torna-se atraente o desenvolvimento de um sistema de refrigeração

em cascata com a implementação do ejetor, aproveitando o calor do ciclo de alta temperatura. O ejetor é usado geralmente no ciclo de alta temperatura ou nos dois estágios do ciclo de refrigeração em cascata. Sun e Eames, (1995) realizaram o estudo do sistema em cascata com duplo ejetor no ciclo de alta temperatura, para melhorar o desempenho da carga parcial e desta forma aprimorar a compressão suavizando as flutuações nas condições de trabalho.

Nos ciclos de refrigeração em cascata muita atenção foi dedicada à melhoria do desempenho do sistema. Nesse sentido é de grande importância a seleção de pares de refrigerantes capazes de melhorar o desempenho do sistema. Assim, diversos estudos encontrados na literatura focaram-se no estudo dos fluidos refrigerantes a fim de obter alta eficiência. Além da eficiência, a seleção dos fluidos refrigerantes para sistemas de refrigeração em cascata deve considerar fatores ambientais e custo (Kilicarslan e Hosoz, 2010; Messineo e Panno, 2012). Li et al. (2018b) fizeram a avaliação experimental de um ciclo de refrigeração em cascata com ejetor que opera com R290/R170 e para os ciclos de baixa e alta temperatura, respectivamente. Nos resultados, os autores obtiveram que a implementação do ejetor no ciclo de refrigeração em cascata reduz o consumo em 4,77 % de energia em comparação ao ciclo de refrigeração em cascata convencional. Na Fig. 4 é apresentado o ciclo de refrigeração em cascata que opera com ejetor no ciclo de alta e baixa temperatura com os diagramas pressão-entalpia correspondentes do ciclo de refrigeração.

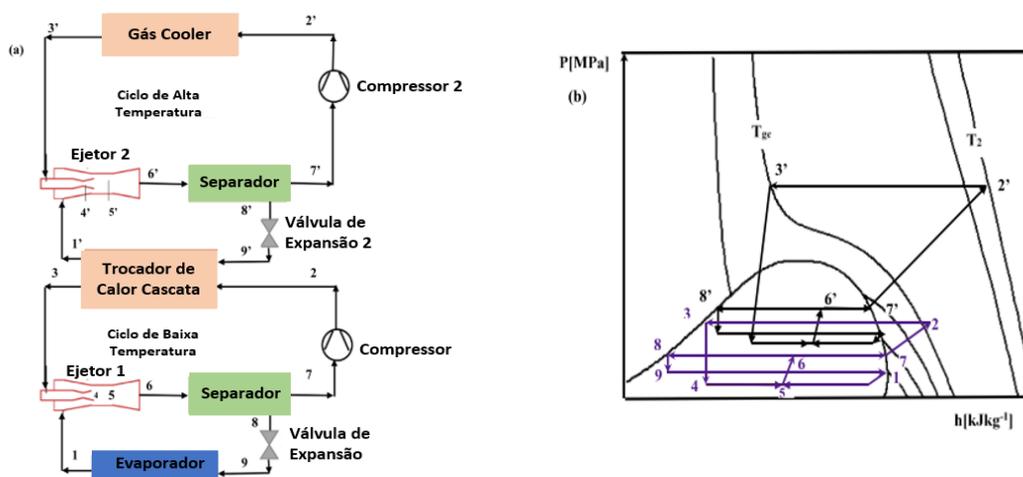


Figura 4. Ciclo de refrigeração a) cascata com ejetor b) ciclo P-h. (Adaptado de Megdouli et al. 2017)

Yari e Mahmoudi, (2011) fizeram a análise do ciclo de refrigeração que opera com R744 trabalhando no modo transcrito e subcrítico, para os ciclos de alta e baixa temperatura, respectivamente. Os mesmos autores observaram ganhos no COP de 17,2 % em comparação ao ciclo em cascata convencional. Isso acontece com o aumento da temperatura de evaporação ou na diminuição da temperatura do resfriador de gases, consequentemente gerando uma menor taxa de compressão reduzindo desta forma o consumo de potência do compressor. Megdouli et al. (2017) simularam em Fortran o sistema refrigeração em cascata que opera com CO₂ e N₂O, no ciclo de alta temperatura e baixa temperatura, respectivamente. Obtendo que o valor ótimo da pressão do resfriador de gás é de 9,6 Mpa com um COP máximo de 1,2, a temperaturas de evaporação e resfriador a gás de -45 °C e 40 °C. Dokandari et al. (2014) analisaram termodinamicamente o sistema de refrigeração em cascata que trabalha com R717 no ciclo de alta temperatura. Os autores obtiveram ganhos no COP de até 7 % em comparação com o ciclo de refrigeração convencional, a temperaturas de evaporação e condensação de -45 °C, 30 °C, respectivamente, com diferença de temperatura no trocador em cascata de 3 °C. Ejemni et al. (2012) analisaram o sistema de refrigeração com uma simulação em Fortran, testando diferentes fluidos refrigerantes no ciclo de alta temperatura. Os autores citados obtiveram o melhor COP testando o R290 no ciclo de alta temperatura, com a implementação do ejetor nos ciclos de alta e baixa temperatura do sistema de refrigeração em cascata, obtendo um COP máximo de 1,8. Megdouli et al. (2016) estudaram teoricamente o ciclo de refrigeração em cascata fazendo análises energéticas e exegéticas. Os autores concluíram que os parâmetros mais significativos no sistema de refrigeração são a pressão e temperatura de saída do gás cooler. Obtendo aumentos de COP de até 37% com uma pressão ideal do gás cooler de 10.4 MPa sobre o ciclo de refrigeração em cascata convencional. O principal motivo para o aprimoramento do COP, é devido à grande temperatura no resfriador de gás que é usado como fluido de trabalho para acionar o ejetor. Golbaten Mofrad. et al. (2020) fizeram simulações no ponto de vista energético e exegético, dos ciclos de refrigeração em cascata e o ciclo de refrigeração em cascata com recuperação de calor. Esses ciclos de refrigeração operam com R744/R744A para o ciclo de alta e baixa temperatura, respectivamente. No análise de exergia os autores obtiveram concluíram que o ciclo de refrigeração em cascata com recuperação de calor aumenta o COP em 7,6 % em comparação ao ciclo em cascata. Li et al. (2018) avaliaram experimentalmente o consumo energético do ciclo de refrigeração que opera com ejetor no ciclo de alta temperatura e com um freezer de temperatura ultrabaixas. Os mesmos autores concluíram que a taxa de arrastamento é insensível à mudança da temperatura ambiente e a contrapressão aumenta com o aumento da temperatura ambiente. Além disso, o consumo do sistema de refrigeração em cascata com ejetor reduz o consumo 4,77%.

3.2 Ciclo de refrigeração híbrido que opera com energia térmica e energia mecânica.

Uma das aplicações dos sistemas de refrigeração em cascata, é a implementação de um sistema híbrido que funciona com energia mecânica no ciclo baixa temperatura e energia térmica no ciclo de alta temperatura. No ciclo de alta temperatura é aproveitado o calor ou energia solar, transformando a energia térmica que provem do gerador, em energia mecânica produzida pelo ejetor. Essa energia é utilizada para providenciar uma redução significativa no consumo de energia do compressor de alta temperatura, devido à implementação do ejetor (Sarbu e Sebarchievici, 2013). No entanto, os problemas associados com refrigeração assistida por energia solar são as seguintes instabilidades ambientais como: a temperatura da água de resfriamento, temperatura do ar, radiação solar e a velocidade do vento (Abdulateef et al. 2009). Esses fatores produzem ganhos instáveis, afetando a operação do ejetor. Uma solução para este problema é a implementação de um sistema de armazenamento (Chen et al. 2013). No entanto o principal problema técnico da refrigeração solar é a alta dependência dos fatores ambientais, como a temperatura do fluido do ciclo de alta, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento (Abdulateef et al. 2009). Além disso, o COP do sistema de refrigeração com ejetor depende fortemente da taxa de arrastamento do ejetor, sendo relativo para os escoamentos de entrada primário e secundário e estado de saída de mistura do ejetor. Outro parâmetro que afeta a taxa de arrastamento são as pressões primárias, secundárias e contrapressão (Yu et al. 2007).

Um parâmetro importante estudado no sistema híbrido de refrigeração é a temperatura de geração. Essa temperatura causa incrementos do COP no sistema de refrigeração, mas ao mesmo tempo ocasiona decrementos na eficiência do coletor com os aumentos da mesma (Vidal et al. 2006). Além disso, outra vantagem que possui o funcionamento do ciclo de alta temperatura por ejeção é o baixo consumo de energia da bomba, em comparação ao ciclo convencional que utiliza compressão a vapor. Para a utilização de ejetores em sistemas de refrigeração em cascata, se devem levar em conta as seguintes propriedades termofísicas do fluido de trabalho de alta temperatura: O calor latente de evaporação, a viscosidade, a condutividade térmica e uma grande faixa de temperatura. Além disso, a pressão no coletor não deve ser muito alta para limitar o consumo de energia na bomba (Besagni et al. 2016). O arranjo do sistema híbrido oferece duas vantagens as quais são: Funcionamento suave do sistema, devido à capacidade do intercooler que pode compensar as flutuações nas condições de trabalho. Outra vantagem acontece quando é utilizado o mesmo fluido refrigerante para os dois ciclos, assim, o intercooler fornece efeitos de equilíbrio intermediário para cada um dos ciclos Sokolov et al. (1990). Por tanto uma direção promissora na melhora dos sistemas de refrigeração em cascata é a aplicação de energia solar, para obter a carga do vapor superaquecido comprimido necessário para a operação do ejetor, sendo essa configuração a direção mais promissora para aumentar a eficiência dos sistemas de resfriamento mecânico combinados com compressão do ejetor (Chen et al. 2019).

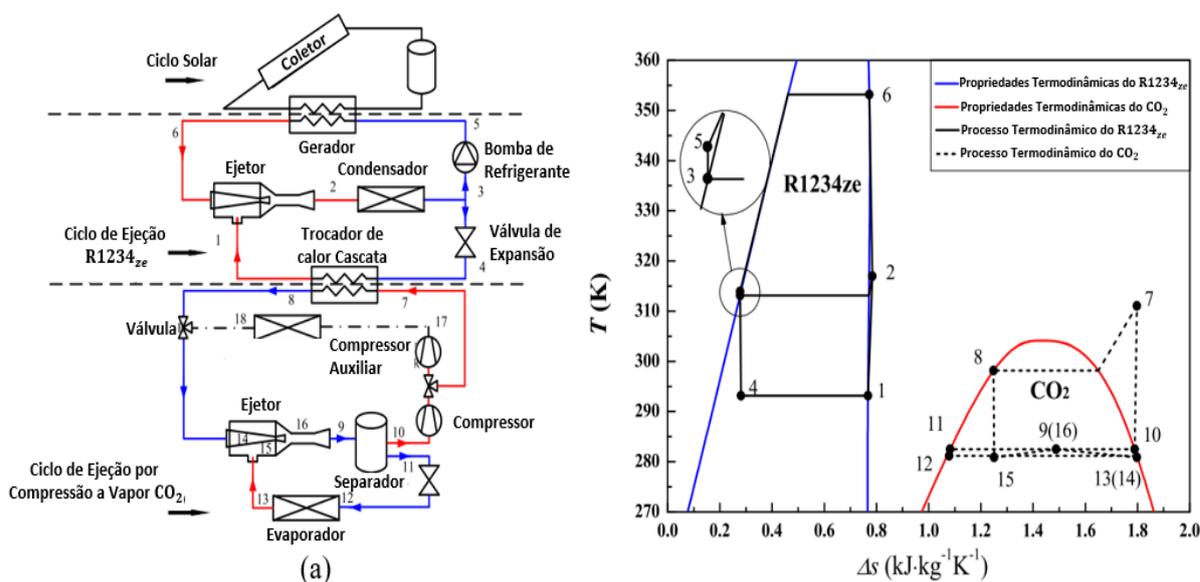


Figura 5. Sistema de refrigeração híbrido com os diagramas T-s corresponde para cada ciclo. (Adaptado de Li et al. 2020)

Huang et al. (2011) analisaram teoricamente por meio de uma simulação o ciclo de refrigeração operando com R601b no ciclo de alta temperatura, obtendo valores de COP de 11.6 a temperaturas de evaporação e condensação de 10 e 21 °C com capacidade frigorífica de 5kW. Petrenko et al. (2011) fizeram a simulação do ciclo de refrigeração em pequena escala que opera com R600 no ciclo de alta temperatura. Os autores estudaram a geometria ideal do ejetor, obtendo um COP de 6.4 a temperaturas de evaporação e condensação de 0 e 20 °C com capacidade frigorífica de 10 kW. Li et al. (2020) analisaram o sistema de refrigeração em cascata que opera com R1234ze no ciclo de alta temperatura e R744 em modo

transcrítico. Os mesmos autores estudaram os efeitos da radiação solar em quatro cidades e desta forma quantificar o efeito da área do coletor solar no consumo de energia no sistema em cascata. Nos resultados obtidos com o aumento da área do coletor, o consumo de energia do compressor de R744 e do compressor auxiliar diminui, enquanto o consumo da bomba do refrigerante R1234ze aumenta. González et al. (2012) realizaram uma revisão de sistemas de refrigeração a jato simples e híbridos, os autores concluíram que os sistemas de refrigeração híbridos são adequados em aplicações de ar condicionado, devido às altas temperaturas de evaporação. Além disso, o sistema de ejeção não pode lidar com taxas de compressão acima de 4. Ben Mansour et al. (2014) fizeram a modelagem do ejetor sob os conceitos da termodinâmica e da mecânica dos fluidos. Nos resultados obtidos, os autores concluíram que ao aumentar a temperatura de geração, as condições de corrente primaram aumentam além do valor de projeto, resultando na diminuição no desempenho do ejetor devido às perdas de pressão no bocal. Yari et al. (2013) realizaram a simulação em EES do ciclo de refrigeração com duplo evaporador, que opera com R744 no ciclo de alta e baixa temperatura. Esse ciclo opera em modo transcrítico e subcrítico. Nas análises feitos obtiveram COP de 1,182 a temperatura de geração de 72,9 °C. Chen et al. (2019) avaliaram termodinamicamente o ciclo de refrigeração em cascata que funciona com ejetor no ciclo de alta temperatura. Esse ciclo de refrigeração opera com R744 no ciclo de baixa temperatura e R245ca, R600 e R601b no ciclo de alta temperatura. Os autores concluíram que o uso do pré-aquecedor aumenta o COP térmico do ciclo de alta temperatura que opera por ejeção. Além disso, os acréscimos do COP do ciclo de refrigeração em cascata foram de 0,95%, 1,16% e 1,33% para os fluidos refrigerantes R245ca, R601b e R600, respectivamente.

Na Tab. 1 são listados os principais resultados encontrados na literatura, sobre a aplicação do sistema de refrigeração em cascata que opera com ejetor. Observa-se na Tab. 1 a falta de trabalhos experimentais que ajudem a complementar a utilidade prática destes ciclos de refrigeração.

Tabela 1. Resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a aplicação do ejetor em sistemas de refrigeração em cascata.

Autores	Tipo de ejetor	Sistema de refrigeração analisado	Posição do ejetor	Fluidos refrigerantes testados	Tipo de trabalho analisado	Observações
Yari e Mahmoudi, (2011)	EMAC	C	AT	R744/R744	T	COP ↑ 17,2%
Megdouli et al. (2017)	EMPC	C	AT BT	CO ₂ e N ₂ O	T	COP _{max} 1,2 P _{ot} 9,6 Mpa
Dokandari et al. (2014)	EMPC	C	AT BT	R717/R744	T	COP ↑ 7%
Ejemni et al. (2012)	EMPC	C	AT BT	R290/R744	T	COP _{max} 1,8
Megdouli et al. (2016)	EMAC	C	AT	R744/R744	T	COP ↑ 37% P _{ot} 10,4 Mpa
Golbaten Mofrad. et al. (2020)	-	C	AT BT	R744/R744A	T	COP ↑ 7,6%
Li et al. (2018)	EMAC	C	AT	R290/R170	E	↓ 4,77% Consumo de energia
Huang et al. (2011)	EMC EMCC	H	AT	R601b/R744	T	COP _{max} 11,6
Petrenko et al. (2011)	EMC EMCC	H	AT	R600/R744	T	COP _{max} 6,4
Li et al. (2020)	EMAC	H	AT BT	R744/R1234ze	T	COP ↑ 18%
Ben Mansour et al. (2014)	EMPC	H	AT	R290/R134a	T	COP ↑ 21%
Yari et al. (2013)	EMAC	H	AT	R744/R744	T	COP _{max} 1,182
Chen et al. (2019)	-	H	AT	R600/R744 R601b/R744	T	COP ↑ 1,33% COP ↑ 1,13%

Legenda:

EMAC: ejetor de mistura com área constante
EMPC: ejetor de mistura a pressão constante
EMCC: ejetor de mistura cônico-cilíndrica
EMC: ejetor de mistura cilíndrica

H: híbrido
T: teórico
AT: alta temperatura

C: cascata
E: experimental
BT: baixa temperatura

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma revisão detalhada das configurações propostas na literatura que operam com ejetor em sistemas de refrigeração em cascata, tais como: sistema de refrigeração em cascata e híbrido. Nesse sentido, foram feitas as seguintes conclusões:

- Verificou-se que o uso do ejetor melhora o desempenho do sistema de refrigeração em cascata, por causa da recuperação da perda de estrangulamento do processo de expansão, aumentando desta forma a capacidade de refrigeração do sistema. No entanto, a função do ejetor depende fortemente da contrapressão que é influenciada pela temperatura ambiente.
- Verifica-se a importância da elevação da temperatura ambiente na eficiência do ejetor, causando o aumento do escoamento do fluido primário e secundário do ejetor, gerando uma contrapressão na câmara de mistura. Conseqüentemente, o volume específico da entrada do compressor diminui, produzindo o aumento da vazão mássica do compressor.
- A eficiência do sistema de refrigeração híbrido, pode ser melhorada aumentando a temperatura do gerador. Fazendo necessário o estudo dos diferentes tipos de coletores. No entanto, a temperatura do gerador deve ser limitada, pelo fato de que os refrigerantes tendem a perder sua estabilidade química a temperaturas elevadas
- Nos sistemas de refrigeração híbridos observa-se a influência das estações do ano para a demanda de aquecimento do sistema de refrigeração, devido a que a intensidade da radiação solar é mais elevada na estação mais quente. Essa principal razão faz que leve um longo tempo o retorno do investimento no sistema de refrigeração híbrido.
- É muito importante destacar que na literatura a maioria dos estudos realizados anteriormente em sistemas de refrigeração com R744 são baseados em sistemas transcíticos. Observando-se a falta de trabalhos experimentais em sistemas de refrigeração em cascata com a implementação do ejetor, que são necessários para complementar a utilidade prática deste ciclo de refrigeração.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro direto e indireto recebido.

6. REFERENCIAS

- Abdulateef, J. M., Sopian, K., Alghoul, M. A., and Sulaiman, M. Y. 2009. Review on solar-driven ejector refrigeration technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6–7, p. 1338–1349.
- ASHRAE. **Refrigeration**. SI Edition ed. Atlanta: [s.n.].
- Bai, T., Yu, J., and Yan, G. 2016. Advanced exergy analysis on a modified auto-cascade freezer cycle with an ejector. **Energy**, v. 113, p. 385–398.
- Banasiak, K., and Hafner, A. 2011. 1D Computational model of a two-phase R744 ejector for expansion work recovery. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 50, n. 11, p. 2235–2247.
- Bansal, P., and Jain, S. 2007. BANSAL, P.; JAIN, S. **Cascade systems past, present, and future**.
- Ben Mansour, R., Ouzzane, M., and Aidoun, Z. 2014. Numerical evaluation of ejector-assisted mechanical compression systems for refrigeration applications. **International Journal of Refrigeration**, v. 43, p. 36–49.
- Besagni, G., Mereu, R., and Inzoli, F. 2016. Ejector refrigeration: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 373–407.
- Çengel, Y. A., e Boles, M. A. 2001. **Termodinâmica**. Terceira e ed. [s.l.] Mc Graw Hill.
- Chen, G., Ierin, V., Volovyk, O., and Shestopalov, K. 2019. An improved cascade mechanical compression–ejector cooling cycle. **Energy**, v. 170, p. 459–470.
- Chen, X., Omer, S., Worall, M., and Riffat, S. 2013. Recent developments in ejector refrigeration technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 629–651.
- Chen, Z., Jin, X., Shimizu, A., Hihara, E., and Dang, C. 2017a. Effects of the nozzle configuration on solar-powered variable geometry ejectors. **Solar Energy**, v. 150, p. 275–286.
- Chen, Z., Jin, X., Dang, C., and Hihara, E. 2017b. Ejector performance analysis under overall operating conditions considering adjustable nozzle structure. **International Journal of Refrigeration**, v. 84, p. 274–286.
- Chunnanond, K., and Aphornratana, S. 2004. Ejectors: Applications in refrigeration technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, n. 2, p. 129–155.
- Dokandari, D., Hagh, A., and Mahmoudi, S. M.S. 2014. Thermodynamic investigation and optimization of novel ejector-expansion CO₂/NH₃ cascade refrigeration cycles (novel CO₂/NH₃ cycle). **International Journal of Refrigeration**, v. 46, n. 94, p. 26–36.
- Ejemni, N., Nehdi, E., and Kairouani, L. 2012. Use of ejectors in cascade refrigeration systems for exergetic performance improvement. **International Journal of Exergy**, v. 10, n. 2, p. 171–189.

- Elbel, S. 2011. Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide air-conditioning applications. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 7, p. 1545–1561.
- Elbel, S., and Lawrence, N. 2016. Review of recent developments in advanced ejector technology. **International Journal of Refrigeration**, v. 62, p. 1–18.
- Golbaten Mofrad, K., Zandi, S., Salehi, G., and Khoshgoftar Manesh, M. H. 2020. 4E analyses and multi-objective optimization of cascade refrigeration cycles with heat recovery system. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 19, n. June, p. 100613.
- González Bravo, H. E., Dorantes Rodríguez, R., Hernández Gutiérrez, J., Best Y Brown, R., Román Aguila, R., and Terres Peña, H. 2012. State of art of simple and hybrid jet compression refrigeration systems and the working fluid influence. **International Journal of Refrigeration**, v. 35, n. 2, p. 386–396.
- Haida, M., Smolka, J., Palacz, M., Bodys, J., Nowak, A. J., Bulinski, Z., Fic, A., Banasiak, K., and Hafner, A. 2016. Numerical investigation of an R744 liquid ejector for supermarket refrigeration systems. **Thermal Science**, v. 20, n. 4, p. 1259–1269.
- Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., and Petrenko, V. A. 1999. 1-D analysis of ejector performance. **International Journal of Refrigeration**, v. 22, n. 5, p. 354–364.
- Huang, B. J., Shestopalov, K. O., Ierin, V. O., and Volovyk, O. S. 2011. An advanced solar-assisted cascade ejector cooling/CO₂ sub-critical mechanical compression refrigeration system. **30th ISES Biennial Solar World Congress 2011, SWC 2011**, v. 4, n. September, p. 2755–2765.
- Kilicarslan, A., and Hosoz, M. 2010. Energy and irreversibility analysis of a cascade refrigeration system for various refrigerant couples. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2947–2954.
- Ksayer, E. B., and Clodic, D. 2006. Enhancement of CO₂ Refrigeration Cycle Using an Ejector : 1D Analysis. **International Journal of Refrigeration and Air Conditioning Conference - Purdue University**, v. R058, p. 1–8.
- Lee, T. S., Liu, C. H., and Chen, T. W. 2006. Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 7, p. 1100–1108.
- Li, H., Gong, X., Xu, W., Li, M., and Dang, C. 2020. Effects of climate on the solar-powered R1234ze/CO₂ cascade cycle for space cooling. **Renewable Energy**, v. 153, p. 870–883, 2020.
- Li, Y., Yu, J., Qin, H., Sheng, Z., and Wang, Q. 2018. An experimental investigation on a modified cascade refrigeration system with an ejector. **International Journal of Refrigeration**, v. 96, p. 63–69.
- Liu, F., Groll, Eckhard A., and Li, D. 2012. Investigation on performance of variable geometry ejectors for CO₂ refrigeration cycles. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 829–839.
- Llopis, R., Sánchez, D., Sanz-Kock, C., Cabello, R., and Torrella, E. 2014. Energy and environmental comparison of two-stage solutions for commercial refrigeration at low temperature: Fluids and systems. **Applied Energy**, v. 138, p. 133–142.
- Lorentzen, G. 1994a. The use of natural refrigerants : a complete solution to the CFC/HCFC predicament. **Int. J. Refrig. Vol.**, v. 18, n. 3, p. 190–197.
- Lorentzen, G. 1994b. Revival of carbon dioxide as a refrigerant. **H and V Engineer**, v. 66, n. 721, p. 9–14.
- McGovern, R. K., Prakash Narayan, G., and Lienhard, J. H. 2012. Analysis of reversible ejectors and definition of an ejector efficiency. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 54, p. 153–166.
- Megdouli, K., Tashtoush, B. M., Nahdi, E., Elakhdar, M., Kairouani, L., and Mhimid, A. 2016. Thermodynamic analysis of a novel ejector-cascade refrigeration cycles for freezing process applications and air-conditioning. **International Journal of Refrigeration**, v. 70, p. 108–118.
- Megdouli, K., Ejemni, N., Nahdi, E., Mhimid, A., and Kairouani, L. 2017. Thermodynamic analysis of a novel ejector expansion transcritical CO₂/N₂O cascade refrigeration (NEETCR) system for cooling applications at low temperatures. **Energy**, v. 128, p. 586–600.
- Messineo, A., and Panno, D. 2012. Performance Evaluation of Cascade Refrigeration Systems Using Different Refrigerants. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, v. 20, n. 03, p. 1250010.
- Nebot-Andrés, L., Llopis, R., Sánchez, D., and Catalán-Gil, J. 2017. CO₂ with mechanical subcooling vs. CO₂ cascade cycles for medium temperature commercial refrigeration applications thermodynamic analysis. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 7, n. 9.
- Niu, B., and Zhang, Y. 2006. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures. **International Journal of Refrigeration**, v. 30, n. 1, p. 37–42.
- Quadha, A., Haddad, C., En-Nacer, M., and Imine, O. 2007. Performance comparison of cascade and two-stage refrigeration cycles using natural refrigerants. **The 22nd International Congress of Refrigeration**, n. 1998, p. 21–26.
- Petrenko, V. O., Huang, B. J., and Ierin, V. O. 2011. Design-theoretical study of cascade CO₂ sub-critical mechanical compression/butane ejector cooling cycle. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 7, p. 1649–1656.
- Polonara, F., Kuijpers, L. J. M., and Peixoto, R. A. 2017. Potential impacts of the montreal protocol kigali amendment to the choice of refrigerant alternatives. **International Journal of Heat and Technology**, v. 35, n. Special Issue 1, p. S1–S8.

Pounds, D. A. **A high Efficiency Ejector Refrigeration System**. [s.l.] University of Missouri, 2010.

REGULATION (EU) N° 517/2014. **Regulation of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) N° 842/2006**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>>.

Sachdeva, G., Jain, V., and Kachhwaha, S. S. 2014. Performance Study of Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, v. 8, n. 3, p. 7.

Sarbu, I., and Sebarchievici, C. 2013. Review of solar refrigeration and cooling systems. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 286–297.

Šarevski, M. N., and Šarevski, V. N. 2016. **Water (R718) turbo compressor and Ejector Refrigeration / Heat Pump Technology**. [s.l.] Elsevier.

Sokolov, M., Hershgal, D., and Aviv, R. 1990. Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low grade heat. Part 1. Systems characterization. **International Journal of Refrigeration**, v. 13, n. 6, p. 351–356.

Sun, D. W., and Eames, I. W. 1995. Recent developments in the design theories and applications of ejectors - a review. **Journal of the Institute of Energy**, v. 68, n. 475, p. 65–79.

Sun, Z., Liang, Y., Liu, S., Ji, W., Zang, R., Liang, R., and Guo, Z. 2016. Comparative analysis of thermodynamic performance of a cascade refrigeration system for refrigerant couples R41/R404A and R23/R404A. **Applied Energy**, v. 184, p. 19–25.

Tashtoush, B., Alshare, A., and AL-RIFAI, S. 2015. Performance study of ejector cooling cycle at critical mode under superheated primary flow. **Energy Conversion and Management**, v. 94, p. 300–310.

Vidal, H., Colle, S., and Pereira, G. D. S. 2006. Modelling and hourly simulation of a solar ejector cooling system. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 7, p. 663–672.

Yari, M., and Mahmoudi, S. M. S. 2011. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO₂) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO₂ cycle). **Energy**, v. 36, n. 12, p. 6839–6850.

Yari, M., Mehr, A. S., and Mahmoudi, S. M. S. 2013. Simulation study of the combination of absorption refrigeration and ejector-expansion systems. **Renewable Energy**, v. 60, p. 370–381.

Yu, J., Ren, Y., Chen, H., and Li, Y. 2007. Applying mechanical subcooling to ejector refrigeration cycle for improving the coefficient of performance. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 4, p. 1193–1199.

Zhang, Y., He, Y., Wang, Y., Wu, X., Jia, M., and Gong, Y. 2020. Experimental Investigation of the Performance of an R1270/CO₂ Cascade Refrigerant System. **International Journal of Refrigeration**, 2020.

APPLICATION OF CO₂ (R744) IN CASCADE REFRIGERATION SYSTEMS THAT OPERATE WITH EJECTOR – A REVIEW

Abstract. *This paper presents a review of the arrangements proposed in the literature on the application of the ejector in cascade refrigeration systems that operate with R744. The article presents the conventional cascade refrigeration cycle and the configurations that use the ejector as an expansion device, such as: cascade refrigeration system and hybrid. The results found in the literature indicate that the use of the ejector increases the performance of the cooling systems in cascade due to the use of kinetic energy in the expansion process, increasing the suction pressure of the compressor and consequently reducing the energy consumption in it. However, an insufficient amount of experimental work has been observed in the literature to assess the practical feasibility and enhance the use of refrigeration systems.*

Keywords: Ejector, Refrigeration, Cascade, Hybrid, R744