



CICLOS DE REFRIGERAÇÃO: CONCEITOS E ESTUDOS DE EFICIÊNCIA

Francielli Silva Geniê¹, Andréa Oliveira Souza da Costa² Esly Ferreira da Costa Junior²

¹Graduanda, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Brasil
(franci_genier@hotmail.com),

²Doutor (a), Docente na Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Brasil

Recebido em: 06/05/2013 – Aprovado em: 17/06/2013 – Publicado em: 01/07/2013

RESUMO

A utilização de sistemas de refrigeração contribui para a conservação de alimentos por mais tempo, para o conforto térmico e para manutenção de ambientes industriais, de modo que sua abrangência compreende diversas áreas da Engenharia. Por conseguinte, há um constante interesse em tornar os ciclos de refrigeração mais eficientes e, desse modo, promover uma economia energética considerável. Neste trabalho, pretende-se apresentar uma revisão dos principais tipos de sistemas de refrigeração e iniciativas de melhorias nos processos em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: ciclo de refrigeração, fluido refrigerante, COP, otimização.

REFRIGERATION CYCLES: CONCEPTS AND STUDIES OF EFFICIENCY

ABSTRACT

The use of cooling systems contributes: to preserve food for long periods, for thermal comfort and maintenance of industrial environments. For this reason, its scope covers various areas of engineering. Therefore, there is a constant interest in making more efficient refrigeration cycles and promote a considerable energy saving. This work aims to present a review of the main types of cooling systems and process improvement initiatives.

KEYWORDS: refrigeration cycle, refrigerant fluid, COP, optimization.

INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, há uma crescente busca por mudanças em diversos processos produtivos por motivos ligados a três preocupações: meio ambiente, energia e economia global. Neste contexto, apesar de a matriz energética brasileira

ser aproximadamente 46% renovável, valor muito superior à média mundial de 12%, ainda há muito que se fazer no que se refere à economia de energia. Basta lembrar-se de crises como a de 2001, quando a ausência de chuvas limitou a produção das hidrelétricas e, conseqüentemente, levou o país a um longo período de racionamento de energia elétrica, influenciando direta e indiretamente todos os setores da economia e da política brasileira (VICHI & MANSOR, 2009).

Deste modo, a utilização mais eficiente da energia é um assunto de extensa pesquisa nas universidades e de grande interesse nas empresas devido à utilização mais consciente dos recursos naturais disponíveis e ao ganho financeiro proporcionado. Dentre tais estudos, destacam-se as pesquisas voltadas para sistemas de refrigeração, nos quais a economia energética está diretamente ligada à eficiência de funcionamento dos seus componentes.

Deve-se ter em mente que um ciclo de refrigeração é um sistema térmico que transfere energia em forma de calor de uma região de baixo potencial energético para uma região de alto potencial energético. Como o saldo de variação de energia é positivo, significa que a energia adentra no sistema, portanto, em um ciclo de refrigeração se faz necessária uma fonte de energia externa (FERZOLA, 2010). O desempenho de um ciclo de refrigeração normalmente é medido por meio do Coeficiente de Performance (COP), definido pela Equação 1 em sistemas de compressão e pela Equação 2 em sistemas de absorção, em que Q é calor e W é trabalho (ASHRAE, 2010).

$$COP = \frac{\text{Taxa de refrigeração}}{\text{Trabalho de compressão}} = \frac{Q_{\text{evaporador}}}{W_{\text{compressor}}} \quad (1)$$

$$COP = \frac{\text{Taxa de refrigeração}}{\text{Taxa de adição de calor no gerador}} = \frac{Q_{\text{evaporador}}}{Q_{\text{gerador}}} \quad (2)$$

Grande parte das pesquisas envolvendo a otimização de ciclos de refrigeração tem por objetivo melhorar o COP do sistema. Em seus estudos, FERZOLA (2010) aborda a análise global de um sistema de refrigeração industrial para produção e envase de bebidas. O sistema foi simulado levando em conta todos os acoplamentos entre os componentes, com o intuito de verificar a influência das variações nas temperaturas e pressões na temperatura final da bebida. Na busca pelo ponto de máximo COP, verificou-se que, além das condições de produção, é necessário ter atenção aos parâmetros ambientais, tais como a hora do dia e o mês do ano.

De modo semelhante, TODESCHINI (2011), a fim de reduzir a demanda energética, analisou um ciclo de refrigeração de uma cervejaria, determinando a carga térmica total, as temperaturas de evaporação e condensação e as curvas características dos equipamentos instalados. A primeira proposta de economia foi a divisão dos regimes de operação que oferece uma economia média de 3% na potência de compressão. A segunda proposta de economia é a escolha de temperaturas de condensação adequadas conforme as condições externas, que oferece uma economia média de 8% na potência de compressão.

Este trabalho tem por objetivo revisar os principais ciclos de refrigeração e os conceitos necessários para seu entendimento, bem como as diversas formas de otimizá-los a partir de simulações matemáticas e/ou ensaios experimentais.

BREVE HISTÓRICO

A utilização dos meios de refrigeração é do conhecimento humano desde as mais antigas civilizações. Membros da cultura ancestral Puebloan, que viveram na região de Mesa Verde, no deserto do Colorado, entre 600 e 1300 D.C., por sua vez, construíam suas habitações em locais protegidos da incidência dos raios solares pelas encostas das pedras, de modo a amenizar a temperatura do ambiente (UNESCO, 2013). Tem-se ainda a civilização chinesa, que muitos séculos antes de Cristo, usava o gelo natural como fonte refrigerante com o intuito de conservar o chá que consumiam. As civilizações gregas e romanas também aproveitavam o gelo colhido no alto das montanhas, a custo do trabalho escravo, para o preparo de bebidas e alimentos gelados (SOUZA, 2007).

Desta forma, por muito tempo esteve-se diretamente dependente da natureza para a obtenção do gelo, que só se formava no inverno e/ou nas regiões de clima bastante frio. Mesmo nestas regiões, havia limitações de estocagem, só podendo ser feita por períodos relativamente curtos. Por este motivo, engenheiros e pesquisadores voltaram-se para a busca de meios e processos que permitissem manter um objeto ou ambiente refrigerado artificialmente (BENEDETTI, 2010).

A refrigeração por absorção teve seu desenvolvimento iniciado a partir dos trabalhos de Ferdinand E. Carré, que inventou, de fato, a máquina de absorção em 1820, fabricada em grande número na Alemanha, França e Inglaterra (STEPHAN, 1983). Em 1824, Faraday sugeriu a criação de uma unidade de refrigeração na qual uma reação entre os vapores de amônia e sais de prata fosse usada para obter a vaporização da amônia líquida. Desde então, outros pares de substâncias foram testados, a fim de obter uma maior eficiência térmica (PRATTS, 1997).

Em 1834, Jacob Perkins fez a primeira descrição completa através de um registro de patente de uma máquina de refrigeração por compressão operando de maneira cíclica. Mas apenas em 1919, nos EUA, que o refrigerador realmente passou do estágio pioneiro para a etapa produtiva. SPREEN (1925), citado por JAMES , (2008) diz que de 1919 a 1924 o aumento na venda dos refrigeradores foi de 100% a cada ano.

FLUIDOS REFRIGERANTES

O fluido chamado refrigerante absorve calor de uma substância do ambiente a ser resfriado. Dependendo da finalidade e das condições de operação, o fluido que mais se adequa é escolhido, uma vez que não há um refrigerante que possua todas as qualidades consideradas ideais. Condensar-se a pressões moderadas, evaporar-se a pressões acima da atmosférica, ser quimicamente estável, não ser corrosivo, não ser tóxico, ser de fácil localização em caso de vazamentos e não atacar a camada de ozônio são algumas das principais propriedades de um bom refrigerante (FERRAZ, 2008).

Os refrigerantes podem ser divididos em três classes, conforme sua maneira de absorção ou extração do calor das substâncias a serem refrigeradas. O Quadro 1 apresenta o *modus operandi* de cada classe e alguns exemplos.

QUADRO 1. Classificação dos fluidos refrigerantes.

	Características	Exemplos
Classe 1	Resfriam materiais por absorção do calor latente	CFC's (R-11, R-12, R-502, etc.) HCFC's (R-22, R-141b, etc.) HFC's (R-134a, R-404A, R-407C, etc.)
Classe 2	Resfriam substâncias pela absorção de seus calores sensíveis	Ar, salmoura de cloreto de cálcio, salmoura de cloreto de sódio (sal comum) e álcool.
Classe 3	Soluções que contêm vapores absorvidos de agentes liquidificáveis ou meios refrigerantes	Água/Amônia

Fonte: Adaptado de FERRAZ, (2008).

A *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, (ASHRAE, 2010) lista mais de 100 refrigerantes, com as designações numéricas deles, fórmulas químicas, diagramas p-h, propriedades termodinâmicas e outras características nos livros *Fundamentals e Refrigeration*.

LEE et al., (2008) analisaram misturas de R290 e R600 com fração mássica de 55/45 como uma alternativa para o R134. Foram realizados ensaios a fim de otimizar o processo no que se refere à carga de refrigerante e ao comprimento do tubo capilar. O experimento comparou o R134 com a mistura R290/R600. O consumo de energia foi 12,3% maior no uso do R134a. A velocidade de refrigeração, sendo a temperatura considerada -15 °C, aumentou 28,8% quando usando a mistura.

PRINCIPAIS TIPOS DE CICLO DE REFRIGERAÇÃO

CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO MECÂNICA DE VAPOR

A refrigeração por compressão de vapor é a mais usada no condicionamento de ar de ambientes, para resfriamento e congelamento de produtos e em equipamentos frigoríficos. Neste sistema o fluido refrigerante entra no evaporador a baixa pressão, na forma de mistura de líquido mais vapor, e retira energia do meio interno enquanto passa para o estado de vapor. O vapor entra no compressor onde é comprimido e bombeado, tornando-se vapor superaquecido e deslocando-se para o condensador, que tem a função de liberar a energia retirada do ambiente. O fluido, ao liberar energia, passa do estado de vapor superaquecido para líquido (condensação) e finalmente entra no dispositivo de expansão, onde tem sua pressão reduzida, para novamente ingressar no evaporador e repetir-se assim o ciclo (FERRAZ, 2008). A Figura 1 ilustra este sistema.

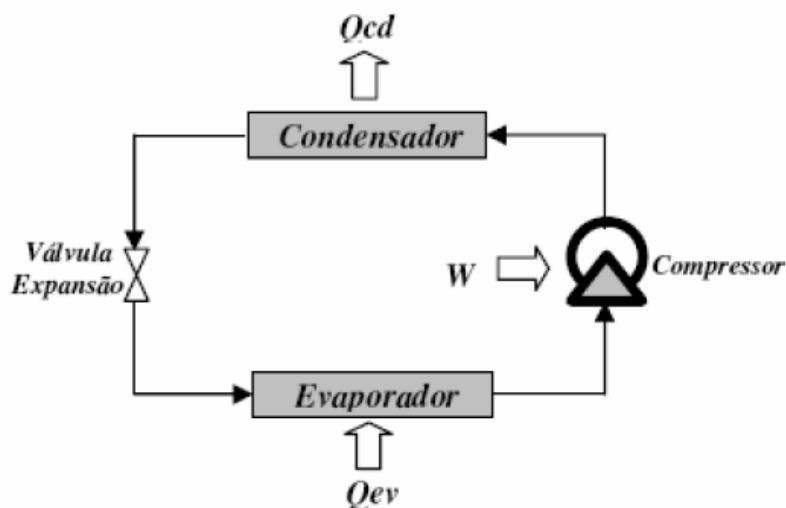


FIGURA 1. Ciclo padrão de refrigeração por compressão (GARCIA et al., 2007).

A análise do ciclo termodinâmico efetuado pelo sistema tem início no compressor. A compressão é hipoteticamente isentrópica, na qual o vapor saturado passa da pressão P_0 para pressão P_C e da entalpia h_1 para h_2 , consumindo trabalho mecânico, representado pela passagem do ponto 1 para o ponto 2 da Figura 2 (VARGAS, 2009).

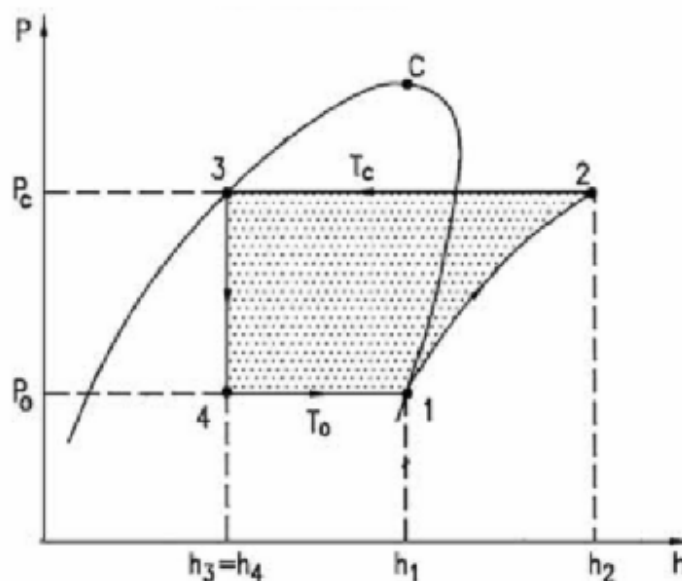


FIGURA 2. Ciclo termodinâmico (VARGAS, 2010).

LOBOSCO (2009) desenvolveu uma função para avaliar o desempenho de ciclos de refrigeração por compressão a vapor, do ponto de vista termodinâmico e ambiental, através da análise estatística dos resultados da simulação computacional. A função proposta representa um índice global de avaliação da eficiência

termodinâmica e dos critérios ambientais, envolvendo a análise exérgica do ciclo, valores do COP, do ODP (*ozone depletion potencial*) e do GWP (*Global Warming Potential*). As simulações permitiram testar diferentes combinações de misturas de refrigerantes. Nas simulações, foram avaliados diversos refrigerantes puros (R134a, R290, R152a e R600a) e misturas binárias dos mesmos em três proporções mássicas: 75%, 50% e 25%. Como resultado, observou-se que o desempenho do ciclo termodinâmico teve uma variação de 10% e 20% das pressões da região de alta pressão e de baixa pressão e através dessa avaliação foi possível sugerir nova faixa de atuação das pressões visando uma otimização do ciclo. Através do índice da função de desempenho foi possível determinar que o R600a e suas misturas são os refrigerantes mais adequados para o ciclo proposto.

MENEGHETTI (2009) estudou a possibilidade de reduzir o consumo de energia elétrica num sistema de refrigeração por compressão, originalmente concebido para regime de rotação fixa do compressor, quando submetido a um regime de rotação variável. O sistema de refrigeração foi identificado e concebido num modelo matemático de múltiplas entradas e múltiplas saídas. Nas simulações foram implementados controle de temperatura liga-desliga, controlador PID (Controlador de ações Proporcional, Integral e Derivativo) e controle *fuzzy* – que pode ser descrito, segundo SILVA (2003), como o conjunto de regras de decisão, de formalismo similar, para a representação do conhecimento e inferência de novos conhecimentos. Quanto à estabilidade de temperatura e erro em regime, tanto o PID quanto o *fuzzy* obtiveram desempenho satisfatório se comparados ao liga-desliga. Apenas o controle *fuzzy* obteve economia no consumo de energia elétrica, proporcionando uma redução de 5,4% quando comparado aos demais.

GARCIA et al., (2007) estudaram a avaliação inicial do desempenho de um sistema a compressão de vapor (SRCV), com capacidade de refrigeração de 5 TR (17,5 kW) trabalhando com uma válvula de expansão termostática. Os resultados mostraram que mudanças na velocidade do compressor permitem que o sistema opere mais confortavelmente e adequadamente para altas e baixas cargas frigoríficas. Além disso, verificou-se que com a carga de refrigerante fixa, pode-se melhorar o COP mudando a velocidade do compressor, permitindo também ajustar graus de superaquecimento normais para este tipo de sistema, como parâmetros de avaliação para o ótimo funcionamento.

PINELLI (2008) propôs a montagem de um protótipo de resfriamento de líquido completamente automatizado, cujas variáveis do processo e a análise do consumo de energia elétrica puderam ser monitoradas. Os ensaios foram realizados com variações de carga térmica e frequência do motor em 1800, 1500, 1200 e 900 W e 40, 50, 60 e 70 Hz utilizando condensação à água e condensação a ar. Assim, analisaram-se os comportamentos da temperatura de descarga, COP Total, COP Útil e potência consumida. Foram observados melhores resultados para o sistema com condensação a ar, além do que, para temperaturas de condensação menores e temperaturas de evaporação maiores, ocorreu um aumento no COP total, COP útil e uma redução na temperatura de descarga e no consumo de energia.

Fontes de energia mais baratas ou renováveis para os ciclos de refrigeração por compressão também são interessantes e vêm sendo estudadas ao longo dos anos. SILVA (2004), por exemplo, analisou o funcionamento de um compressor de frequência variável que utilizasse a energia eólica, em São Luis do Maranhão, para manter um sistema de refrigeração. Para tal, foi escolhido o cata vento tipo *Savonius*, baseando-se nos valores de velocidade local do vento. Frente aos

resultados, o autor considerou possível a utilização deste sistema, mas salienta a necessidade de estudos experimentais.

CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

Os ciclos de refrigeração por absorção configuram um dos mais antigos métodos de refrigeração. Esses sistemas utilizam pares de fluidos na sua operação, geralmente amônia-água ou água-brometo de lítio, um atuando como refrigerante e outro como absorvente (MENNA, 2008). No ciclo de absorção de amônia/água, o vapor de amônia a baixa pressão é absorvido pela água e a solução líquida é bombeada a uma pressão superior por uma bomba de líquido. Quando o vapor de amônia deixa o evaporador a baixa pressão, ele é absorvido por uma solução com baixa concentração em amônia (solução fraca). Após a absorção, obtém-se uma solução rica em amônia (solução forte), que é bombeada por meio de um trocador de calor ao gerador, onde será mantida a alta temperatura e alta pressão. Desta forma, o vapor de amônia se separa da solução e segue para o condensador e depois de condensado vai para a válvula de expansão e para o evaporador. A solução fraca então retorna ao absorvedor e o ciclo se reinicia (FERRAZ, 2008).

Pode ser adicionado ao sistema um trocador de calor *TCS*, importante no reaproveitamento de fluxos de calor, sendo que para uma mesma demanda de refrigeração, o COP é aumentado em 60%, se comparado com o mesmo ciclo de refrigeração sem *TCS*, já que o fluxo de calor fornecido ao gerador será menor (SRIKHIRIN et al., 2001). A Figura 3 mostra um arranjo esquemático dos elementos essenciais deste ciclo.

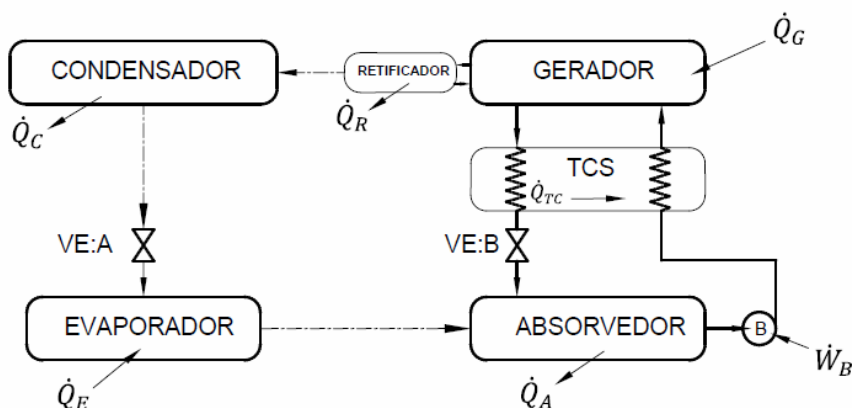


FIGURA 3. Ciclo de refrigeração de absorção de amônia (ZAVALETA-AGUILAR, 2010).

O desempenho de um sistema de refrigeração por absorção é extremamente dependente das propriedades químicas e termodinâmicas do fluido de trabalho. Um requisito fundamental para uma combinação de absorvente / refrigerante é que, em fase líquida, estes precisam ser miscíveis na faixa de temperatura de operação do ciclo. É importante ainda que a mistura seja quimicamente estável, não tóxica, não explosiva, não corrosiva e inofensiva ao meio ambiente (MORAES, 2012).

Apesar de um sistema de refrigeração por absorção possuir um baixo custo operacional, quando comparado com o ciclo de compressão, sua utilização é menos comum devido à menor eficiência que apresenta. No entanto, diante da atual procura

por sistemas mais econômicos, diversas pesquisas a cerca da refrigeração por absorção vem sendo desenvolvidas.

ROMANO et al., (2012), buscando uma análise energética de um ciclo de refrigeração por absorção com a mistura amônia-água como fluido refrigerante, efetuaram uma simulação em programa comercial MATLAB® para determinar as propriedades termodinâmicas de cada estado do sistema a partir de algumas condições de contorno para o funcionamento de um ciclo de refrigeração ideal. Após a obtenção de todos os estados, verificou-se que a energia necessária para a operação do sistema está dentro de uma faixa que torna viável a sua aplicação com a utilização de fontes alternativas de energia.

ARAÚJO (2010) simulou uma unidade de refrigeração nos regimes permanente e transiente e comparou seus resultados aos valores experimentais. Seus resultados confirmaram a necessidade de obter o vapor de amônia com alta pureza e indicaram possíveis aproveitamentos de energia interna dentro do sistema. PRETER (2009) modelou um protótipo laboratorial do sistema de refrigeração por absorção e verificou a importância do retificador e como o uso do sistema GAX (*Generator/Absorber Heat Exchange* - Trocador de Calor Gerador/Absorvedor) contribuiu para o aumento do COP.

MORAES (2012) focou-se no desenvolvimento de códigos numéricos para simular um ciclo de refrigeração por absorção tendo em vista a possibilidade de acoplar o sistema a um caminhão frigorífico, de modo a utilizar o calor despejado pelos gases de escape no gerador do ciclo. Para tal, foi proposta uma alternativa para as previsões da transferência de calor em cada componente do ciclo, abordando os fatores físicos envolvidos em cada parte do circuito. No gerador, a confecção e operação mostraram-se ser de simples aplicação, sendo necessário haver um diâmetro mínimo no feixe de tubos por onde passarão os gases, com objetivo de evitar o aparecimento de uma contrapressão no motor, comprometendo sua execução. Também foi observado que no condensador, desde que seja mantida uma vazão mínima de ar ambiente na serpentina e esse ar não esteja a uma temperatura muito elevada, não haverá problemas em sua operação. O evaporador mostrou desempenho considerável, podendo retirar até 2,2 kW de calor do interior do caminhão e não apresenta perda de carga significativa.

Analogamente, DILAY (2008) desenvolveu um modelo matemático simplificado de um sistema de cogeração, constituído por um coletor solar, um queimador a gás, um reservatório térmico, um trocador de calor de água quente e um refrigerador por absorção, idealizado para produzir simultaneamente calor (trocador de calor de água quente) e refrigeração (refrigerador por absorção). Como resultado, determinou-se que existe um conjunto fundamental ótimo das três taxas de capacidades térmicas que caracterizam o sistema, tal que, o máximo desempenho é obtido no equipamento com coletor solar e queimador de gás para aquecimento de água e refrigeração e, portanto com as máximas taxas de aquecimento de água e refrigeração, não importando o quão complicado seja a sua concepção.

CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR JATO COMPRESSÃO DE VAPOR (EJETOR)

Este tipo de sistema de refrigeração é similar a um sistema de compressão de vapor, de modo que um ejetor é usado no lugar de um compressor mecânico para

comprimir o vapor de refrigerante a partir do evaporador para o condensador. Em relação aos sistemas de compressão de vapor, este processo apresenta as vantagens de não ter partes móveis, não requerer lubrificação, ter um baixo custo de operação, além de aproveitar energia barata. Mas não é utilizado massivamente por causa do baixo coeficiente de desempenho COP, em comparação com os demais sistemas de refrigeração (VARGAS et al., 2009).

A configuração do sistema de refrigeração proposto por VARGAS et al., (2009) é mostrada na Figura 4. O sistema é composto de um gerador de vapor, que usa o calor a partir de qualquer fonte de calor; um ejetor, que é o principal elemento deste sistema; um condensador, através do qual os fluxos de calor são descartados para fora do sistema; um evaporador, onde o frio é produzido; um tubo capilar, que introduz uma perda de carga; um acumulador e três válvulas solenoides.

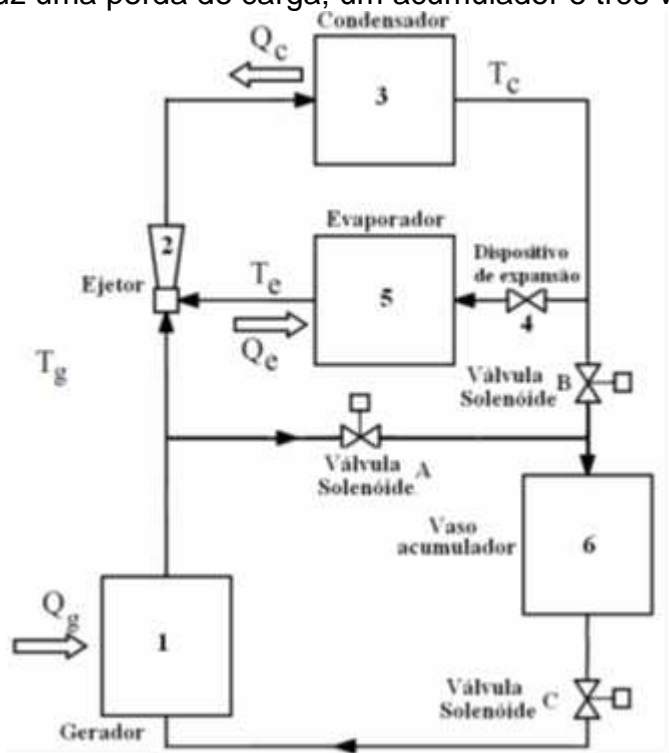


FIGURA 4. Diagrama do sistema de refrigeração por jato-compressão de vapor intermitente (VARGAS et al., 2009).

Em seu estudo, VARGAS et al., (2009) investigaram a concepção do principal elemento da proposta do sistema de refrigeração, o ejetor. Com o auxílio do software EES (Engineering Equation Solver) foram realizadas simulações com diferentes fluidos refrigerantes sintéticos. O R141b, cuja fórmula molecular é $\text{CH}_3\text{CCL}_2\text{F}$, apresentou as melhores propriedades termodinâmicas e de transporte para o funcionamento eficaz do protótipo.

HE et al., (2009) construíram modelos matemáticos para analisar o desempenho de ejetor bem como de todo o sistema de refrigeração, a fim de fornecer orientações para a sua operação. Para tal, os modelos dos sistemas de refrigeração por ejetor foram divididos em duas categorias principais: os modelos termodinâmicos, que podem ser subdivididos em modelos de fluxo monofásico e bifásico; os modelos dinâmicos, que também obedecem estas duas subdivisões.

CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

A adsorção é um fenômeno superficial que ocorre na interface de duas fases que ocorre quando se coloca uma matriz porosa sólida (adsorvente) em contato com uma mistura de fluidos (adsorvato) (VARGAS, 2010).

O ciclo de refrigeração por adsorção pode ser dividido em duas partes, conforme mostrados nas Figuras 5 e 6. Com o fornecimento da energia (Q_H), é iniciado o processo de dessorção, quando a pressão de saturação do adsorvato se iguala pressão do condensador. O adsorvato fluirá na forma de vapor para o condensador, liquefazendo-se com a liberação do calor de condensação (Q_P).

Reduzindo-se a temperatura do sorsor com a retirada do calor (Q_P), a temperatura e a pressão do condensador passam a operar como evaporador, quando o fluido refrigerante flui para o sorsor. Normalmente, esse processo é intermitente, devido à dificuldade de escoar o adsorvente, que é de fase sólida.

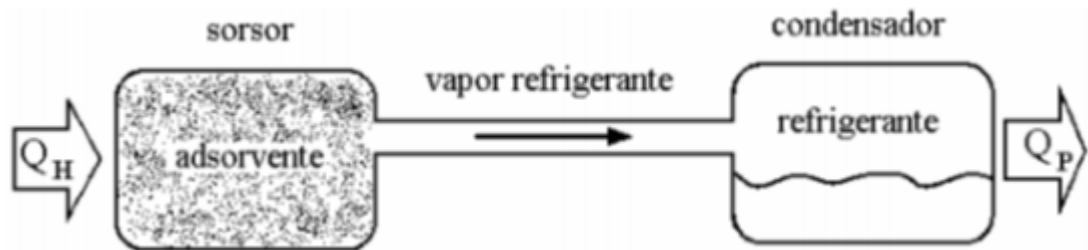


FIGURA 5. Ciclo de refrigeração por adsorção intermitente, fase de dessorção (regeneração) do refrigerante (SOUZA, 2007 citado por VARGAS, 2010)

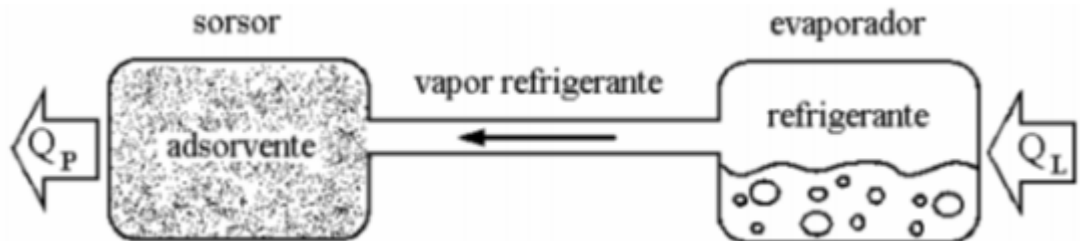


FIGURA 6. Ciclo de refrigeração por adsorção intermitente, fase adsorção provocando o efeito frigorífico. (SOUZA, 2007, citado por VARGAS, 2010).

RIFFEL (2008) estudou um refrigerador térmico de adsorção de 20 kW, a fim de otimizar o processo adsorptivo quanto ao seu coeficiente de performance e potência frigorífica específica. Dessa forma, um modelo matemático, que descreve a dinâmica dentro de um trocador de calor do tipo tubo-aletado, foi proposto e validado experimentalmente. Entre os resultados encontrados, destaca-se que a potência específica frigorífica (PFE), é mais sensível à variação dos parâmetros que o COP, ou seja, é mais simples aumentar a PFE que o COP. Entretanto, deve-se ressaltar que uma das principais críticas/dificuldades dessa tecnologia de adsorção ainda é o baixo COP.

EXERGIA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

A exergia é definida como a quantidade máxima de trabalho que um sistema pode desenvolver quando é trazido para um estado de equilíbrio termodinâmico com o ambiente (KOTAS, 1985 citado por FABREGA, 2010). Pode ser dividida em quatro partes: cinética, potencial, física e química. Sabe-se que todos os processos reais são irreversíveis, conseqüentemente haverá sempre uma perda (destruição) de exergia e produção de entropia. Assim, avaliar a magnitude da parcela de exergia destruída em relação à exergia fornecida ao sistema de refrigeração, de modo a determinar as principais irreversibilidades encontradas é importante para a melhoria do processo (SILVA et al., 2012). Dentro deste contexto, alguns autores buscaram analisar sistemas de refrigeração a partir da exergia destruída, visando torná-los mais eficientes.

FABREGA (2010), com o objetivo de otimizar o sistema de refrigeração utilizou o simulador comercial Hysys® versão 3.2 para a simulação do processo produtivo e do ciclo de refrigeração, obtendo-se as grandezas termodinâmicas necessárias para o cálculo da análise exergética. Aplicando a Teoria do Custo Exergético desenvolvida por LOZANO & VALERO (1993) foi possível calcular os custos de cada corrente do processo utilizando o software Matlab 7.0. A Figura 7 representa como a exergia é destruída nos equipamentos que compõem o ciclo em questão. Observa-se, a partir desta, que a destruição de exergia se concentra principalmente nos compressores.

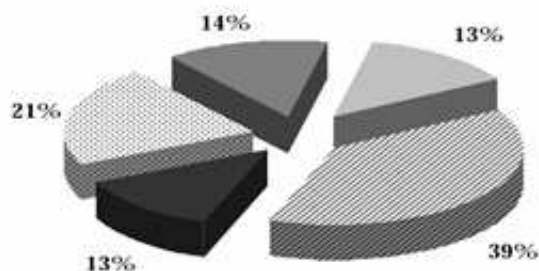


FIGURA 7. Distribuição da destruição de exergia no ciclo de refrigeração por equipamentos (FABREGA, 2010).

De posse destes resultados, a função objetivo foi definida visando minimizar a exergia destruída no processo e o método de otimização utilizado foi o SQP (*Sequential Quadratic Programing*). Com a metodologia aplicada a exergia destruída foi reduzida em 19,95%. Em relação aos custos exergéticos foi obtida uma redução de 10,94% e os custos exergoeconômicos foram reduzidos em 6,45% (SQP) representando uma economia de 77000 R\$/h (FABREGA, 2010).

YUMRUTA et al., (2002) analisaram em termos de exergia um sistema de refrigeração com amônia, a fim de estudar os efeitos das temperaturas de condensação e evaporação sobre perdas de exergia, perdas de pressão eficiência da segunda lei e o coeficiente de desempenho (COP). Foi utilizado

um software para o equacionamento e cálculo numérico das equações obtidas através da análise de exergia. Observou-se que a temperatura de condensação e de evaporação tem forte efeito sobre perdas de exergia no condensador e evaporador.

PEREIRA (2006) investigou uma unidade experimental de refrigeração por absorção de cinco toneladas de refrigeração, TR, montada em laboratório para liberação e absorção de calor. Utilizando medições experimentais, uma análise térmica e exergética do sistema foi realizada, visando otimizar os parâmetros de operação e projeto para um máximo desempenho do sistema. Os resultados mostraram máximos de eficiência térmica exergética para a unidade otimizada duplamente, em relação à vazão mássica de água dos lados frio e quente do refrigerador por absorção. Foi observada uma variação de 30% e 50% nas eficiências de 1ª e 2ª Leis, respectivamente, na faixa de vazão analisada experimentalmente, demonstrando a importância do ótimo encontrado para máximo desempenho termodinâmico e, portanto, mínimo consumo de energia.

PALÁCIOS (2007) estudou sistemas de refrigeração por absorção de simples e duplo efeito de H₂O/LiBr por meio de análises termodinâmica, exergética e exergoeconômica, considerando como fontes de aquecimento um sistema de queima direta de gás natural e energia de rejeito de um sistema de cogeração. Os resultados mostraram que a eficiência exergética do sistema de simples efeito com queima direta foi de 2,03%, enquanto a eficiência do sistema de duplo efeito com queima direta foi de 3,75%. Os sistemas acionados por água quente (simples efeito) e por vapor (duplo efeito) apresentaram eficiências exergéticas de 10,84% e 15,43%, respectivamente. Isto indica que, do ponto de vista exergético, sistemas de refrigeração por absorção são mais apropriados para trabalhar como parte de sistemas de cogeração, ou com a utilização de rejeitos de calor como insumo de energia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com a eficiência energética é um dos principais motivadores das pesquisas sobre sistemas de refrigeração, de modo que o aumento do COP e a utilização de fontes energéticas mais baratas estão entre os objetivos mais comuns. Para tal, é necessário avaliar as condições do ambiente a ser refrigerado, qual o fluido refrigerante adequado, bem como qual processo se encaixa mais com o projeto em questão.

Neste sentido, simulações computacionais se mostram uma importante ferramenta no aperfeiçoamento destes processos, sendo de baixo custo e cujos resultados, dependendo da qualidade do modelo utilizado, podem servir de base para escolhas operacionais. Outro instrumento eficaz na busca pelo aumento do desempenho dos ciclos de refrigeração é a análise exergética, uma vez que determina os principais pontos de perda de exergia e, assim, contribui para pontuar as melhorias necessárias.

Assim, os sistemas de refrigeração assumem crescente importância industrial e em projetos domésticos no Brasil, o que torna ainda mais coerente a busca pelo aprofundamento dos conhecimentos a cerca deste processo e pela constante aprimoramento do mesmo.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. J. P.; **Simulação de uma unidade de refrigeração por absorção usando o par amônia/água nos regimes permanentes e transientes.** João pessoa, 2010. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba.

ASHRAE (EUA). **American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers.** Disponível em : <[https://www.ashrae.org./](https://www.ashrae.org/)>. Acesso em 09/03/2010.

BENEDETTI, T. M.; **Análise técnica e econômica de um sistema de refrigeração por ciclo de absorção amônia-água e sua integração com um abatedouro de aves.** Campinas, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

DILAY, E.; **Modelagem, simulação e otimização de uma unidade de aquecimento de água e refrigeração por absorção de alimentação híbrida a coletor solar e gás combustível.** Curitiba, 2008. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

FÁBREGA, F. DE M. **Otimização termoeconômica de sistemas de refrigeração do processo de produção de etileno e propileno.** Campinas, 2010. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.

FERRAZ, F.; **Apostila de refrigeração.** Santo Amaro, 2008. Centro federal de educação tecnológica da Bahia.

FERZOLA, J. F.; **Análise global de um sistema de refrigeração industrial.** Porto Alegre, 2010. Trabalho de conclusão do curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GARCIA, F. E. M.; BANDARRA FILHO, E. P.; MENDOZA, O. S. H. **Avaliação do desempenho de um sistema refrigeração por compressão de vapor a velocidade variável.** IN: 17º Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, 2007, Uberlândia, p.1 - 6.

HE, S.; LI, Y.; WANG, R. Z.; **Progress of mathematical modeling on ejectors.** Renewable and sustainable energy reviews 13, 1760–1780, 2009.

JAMES, S. J., EVANS, J., JAMES, C.; **A review of the performance of domestic refrigerators.** *Journal of food engineering*, v.87, p.2-10, 2008.

KOTAS, T. J.; **The exergy method of thermal plant analysis.** Butterworths, 1985 *apud* Fabrega, 2010.

LEE, M. -Y., LEE, D. -Y., KIM, Y.; **Performance characteristics of a smallcapacity directly cooled refrigerator using R290/R600a (55/45).** *Internacional journal of refrigeration*, 2008, DOI:10.1016/J.IJREFRIG.2007.11.014.

LOBOSCO, R. J.; **Análise do desempenho termodinâmico e ambiental de um**

ciclo de refrigeração e proposta de uma função global de avaliação. Campinas, 2009. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

LOZANO, M. A., VALERO, A.; Theory of the exergetic cost. **Energy**, V.18, N.19, p..939-960, 1993.

MENEGHETTI, C. R.; **Estratégias de controle em câmara de refrigeração por compressão de vapor.** Campinas, 2009. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

MENNA, M. R. M.; **Modelagem e análise de custo de sistemas de refrigeração por absorção.** Toledo, 2008, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

MORAES, A.N.; **Simulação numérica de um ciclo de refrigeração por absorção.** Brasília, 2012. relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de engenheiro mecânico (graduação), Universidade de Brasília.

PALACIOS, R. B.; **Avaliação de sistemas de refrigeração por absorção H₂O/LiBr e sua possibilidade de inserção no setor terciário utilizando gás natural.** Campinas, 2007. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

PEREIRA, M. V. A.; **Análise exergetica experimental de uma unidade de refrigeração por absorção de 5 TR movida a gás liquefeito de petróleo (GLP) e/ou gases de exaustão.** Paraná, 2006. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

PINELLI, T. G.; **Automação e análise do consumo de energia de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido.** Campinas, 2008. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

PRATTS, R. L.; **Melhoramentos de um sistema de resfriamento por absorção por água amônia, para fabricação de gelo.** Campinas, 1997. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

PRETER, F. C.; **Modelagem e simulação de um protótipo laboratorial de um ciclo de refrigeração por absorção de amônia- água.** São Paulo, 2009. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de São Paulo.

RIFFEL, D. B.; **Estudo teórico e experimental da dinâmica e da otimização de refrigeradores térmicos por adsorção.** João Pessoa, 2008. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba.

ROMANO, L. F. R.; GALLO, R.; CAMPOS, R. S. DE.; **Análise energética de um sistema de refrigeração por absorção utilizando a mistura amônia-água.** XVII Seminário de iniciação científica e tecnológica da UTFPR, Cornélio Procópio - PR, 2012. Disponível em : <<http://conferencias.utfpr.edu.br/ocs/index.php/sicite/2012/paper/viewfile/281/740>>. Acesso em :09 DEZ. 2012.

SILVA, F. V. DA.; **Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração**

para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle. Campinas, 2003. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas.

SILVA, J. DE J. P.E.; **Estudo preliminar da viabilidade técnica de um sistema eólico para refrigeração**, Campinas, 2004. Trabalho final de mestrado profissional, Universidade Estadual de Campinas.

SILVA, S. C.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. S.; Conceitos fundamentais da propriedade termodinâmica exergia e exemplos de aplicação para análise de processos reais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n. 15, p..2025-2037, nov/2012.

SOUZA, W. L. **Análise exergoeconômica dos ciclos de refrigeração por absorção de única pressão.** João Pessoa, 2007. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba.

SRIKHIRIN P.; APHORNRATANA, S. E CHUNGPAIBULPATANA, S.; **A review of absorption refrigeration technologies.** Renew. Sust.Energ.Rev. v.5, n.4 , p.343-372, 2001.

STEPHAN, K.; *History of absorption heat pumps and working pair developments in europe.* Int.J.refrig.v.3, n.3 p.160, 1983.

TODESCHINI, A.; **Propostas de economia de energia em um sistema de refrigeração.** Porto Alegre, 2011. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. Mesa verde national park. Disponível em: <http://whc.unesco.org/en/list/27>> Acesso em 24 de fevereiro de 2013.

VARGAS, L. C. P.; BARBOSA, C. R. F.; FONTES, F. A. O.; ALMEIDA, I. M. G.; **Projeto do ejetor de um sistema de refrigeração por jato compressão de vapor.** IV Congresso de pesquisa e inovação da rede norte e nordeste de educação tecnológica, Belém- PA, 2009. Disponível em: <http://www.connepi2009.ifpa.edu.br/>>. Acesso em 02/03/2013.

VARGAS, L. C. P.; **Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão.** Natal, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. A. T. C.; Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Química Nova**, São Paulo, p.757-767, abr/2009.

YUMRUTA R.; KUNDUZ M.; KANOĞLU M.; *Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems.* **Exergy, na international journal.** 2: 266–272, 2002.

ZAVALETA-AGUILAR, E. W.; **Modelagem térmica da coluna de destilação de um ciclo de refrigeração por absorção de amônia/água.** São Paulo, 2010.

Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.