

APLICAÇÃO DA TERMOECONOMIA PARA MELHORAR A SUSTENTABILIDADE DE CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

Renata Portela de Abreu ¹
Victor Hugo Lobo Correia ²
Monica Carvalho ³
Adriano da Silva Marques ⁴
Atílio Barbosa Lourenço ⁵

RESUMO

Devido ao alto consumo de energia elétrica de sistemas de ar condicionado, a tendência de crescimento da demanda global por resfriamento tem sido motivo de preocupação. Estudos que relacionam essa demanda com o aquecimento global alertam para a necessidade de serem estudadas alternativas mais sustentáveis pelo setor de refrigeração. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o panorama acerca da aplicabilidade da Termoeconomia como ferramenta para análise e otimização, visando a redução do consumo de energia e consequentes impactos ambientais de ciclos de refrigeração por compressão de vapor, os quais são amplamente empregados em sistemas de refrigeração e ar condicionado. Para isso, foi realizada uma busca na plataforma Periódicos CAPES, por artigos publicados entre 2004 e 2019. Os artigos foram selecionados segundo critérios de inclusão e exclusão determinados, a fim de direcionar o resultado da busca. Como resultado, dez publicações foram consideradas pertinentes ao tema deste trabalho. Após a revisão, foi possível concluir que a Termoeconomia oferece diversas possibilidades para o melhoramento de ciclos de refrigeração por compressão de vapor. Embora existam poucos trabalhos sobre essa aplicação específica, em parte por conta da dificuldade de implementação de métodos convencionais, novas abordagens termoeconômicas já foram desenvolvidas para resolver esse problema. Por fim, destaca-se a importância de se aliar a Avaliação do Ciclo de Vida à Termoeconomia para que seja obtida uma visão mais abrangente dos impactos ambientais associados ao ciclo, tornando o método capaz de gerar projetos mais sustentáveis.

Palavras-chave: Ar condicionado, Aquecimento global, Meio ambiente, Termoeconomia.

INTRODUÇÃO

Há uma necessidade crescente de se considerar o meio ambiente e a sustentabilidade no dimensionamento de sistemas energéticos devido ao processo de conscientização ambiental da população e demandas cada vez mais exigentes para diminuir o impacto ambiental da sociedade moderna (CARVALHO; SERRA; LOZANO, 2011a; 2011b; CHAVES; SILVA;

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), re.portela96@gmail.com

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica - UFPB, victorloboc@gmail.com

³ Professora, Departamento de Eng. de Energias Renováveis - UFPB, monica@cear.ufpb.br

⁴ Professor ORIENTADOR, Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal Rural de Pernambuco, adriano.marques@ufrpe.br

⁵ Professor ORIENTADOR, Departamento de Eng. Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, atiliobl@gmail.com

CARVALHO, 2018). O aumento generalizado das demandas energéticas está intimamente ligado ao maior acesso a diferentes tecnologias de conforto, dentre elas, o ar-condicionado, cuja maior utilização também pode ser relacionada com as mudanças climáticas (MCMULLAN, 2002; FARBOTKO; WAITT, 2011; LUNDGREN-KOWNACKI *et al.*, 2018).

Dentro de sistemas de refrigeração e ar condicionado, que são imprescindíveis para diversas atividades em grande parte dos âmbitos da sociedade, operam ciclos de refrigeração. Em sua maioria, sistemas de ar condicionado tem como propósito fornecer conforto térmico e melhorar a qualidade do ar em ambientes internos (YU *et al.*, 2009). Na indústria, a refrigeração é essencial para o funcionamento correto de processos em setores como petroquímico, químico e farmacêutico, por exemplo. Também, de acordo com Ruíz (2018), com sistemas de refrigeração se reduz o desperdício de alimentos, contribuindo no combate à fome.

Em contrapartida, associado a ampla aplicabilidade de sistemas de ar condicionado, tem-se seu alto consumo de energia elétrica. O uso de ar condicionado para a climatização de grandes edifícios comerciais ou públicos representa uma parcela considerável do consumo de eletricidade em muitos países (LIN *et al.*, 2014). De acordo com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento – ABRAVA (2019), estima-se que o uso de ar condicionado representa de 30 a 40% do consumo total de energia em prédios comerciais. A *International Energy Agency - IEA* (2018) alerta para a tendência de crescimento da demanda global por resfriamento de espaços e a considera um ponto cego nas políticas energéticas, por receber pouca atenção diante de sua importância. Pesquisadores apontam que o número de aparelhos de refrigeração deverá quadruplicar em todo o mundo até 2050 (RUÍZ, 2018).

À vista disto, segundo Ruíz (2018), se não forem estudadas alternativas sustentáveis pelo setor de refrigeração, as emissões de gases de efeito estufa deverão disparar, e a meta estabelecida no Acordo de Paris, de um aumento limite de 2°C na temperatura média global em relação aos níveis pré-industriais, não será atingida. Já existe uma relação estabelecida entre a crescente demanda por refrigeração e o aquecimento global, gerando a necessidade da implantação de fontes de energia mais sustentáveis e equipamentos de ar condicionado mais eficientes em termos energéticos (DEVITT, 2018).

O estudo da Termodinâmica é indispensável para o desenvolvimento de projetos de sistemas térmicos mais eficientes. De acordo com Zare *et al.* (2012), para a análise termodinâmica de um objeto de estudo, separa-se cada componente como um volume de controle e avaliam-se os fluxos de calor, trabalho e massa. E, para cada componente, são

aplicadas a primeira e a segunda leis da termodinâmica. Segundo Çengel e Boles (2013), a primeira lei é a base do estudo das relações entre diferentes formas e interações de energia e pode ser expressa por meio de um balanço de energia para qualquer tipo de objeto de estudo. Zare *et al.* (2012) afirmam que segunda lei é usada para avaliar a performance de um ciclo em termos de exergia. Esta, “representa o limite superior da quantidade de trabalho que um dispositivo pode produzir sem violar nenhuma das leis da termodinâmica” (ÇENGEL; BOLES, 2013, p. 425). Sabendo disto, desenvolver uma análise exergética é muito importante na caracterização da utilização e destruição da exergia dentro de um ciclo, permitindo localizar e quantificar as irreversibilidades, tornando possível detectar potenciais de melhoria energética (MARQUES; MEDEIROS; SANTOS, 2017).

Zare *et al.* (2012) afirmam que a otimização de projetos de ciclos térmicos deve ser realizada na perspectiva da Termoeconomia (ou Exergoeconomia). Esta, segundo Torres e Valero (2000), tem como objetivo estudar a conexão entre Termodinâmica e Economia, determinar as bases teóricas de uma ciência de economia de energia e assim, obter modelos que considerem a limitação de recursos naturais, buscando parâmetros gerais que permitam analisar a eficiência e o custo de produtos em sistemas com consumo intensivo de energia. Por meio da Termoeconomia é possível investigar como a energia se degrada, quais tipos sistemas energéticos funcionam melhor, como otimizar projetos para reduzir o consumo energético e como evitar que resíduos desses processos danifiquem o meio ambiente (VALERO *et al.*, 2001). Para desenvolver a análise, várias metodologias e abordagens termoeconômicas foram propostas ao longo dos anos, como a Teoria do Custo Exergético (LOZANO e VALERO, 1993), o método SPECOS (LAZZARETTO e TSATSARONIS, 2006), e o modelo UFS (LOURENÇO, 2012), por exemplo.

A termoeconomia já tem sido combinada com a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para proporcionar informação crucial sobre impactos ambientais e como estes se formam em sistemas produtivos (SERRA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2017; CAVALCANTI *et al.*, 2019). É importante que a otimização de sistemas de conversão de energia seja amparada por ferramentas de análise que considerem o impacto ambiental relacionado ao ciclo de vida associado a cada componente, além da eficiência termodinâmica e dos custos (MEYER *et al.*, 2009). Desta forma, metodologias termoeconômicas associadas a ACV fornecem uma perspectiva global de sistemas complexos através de uma análise integrada de energia, economia e meio ambiente (CARVALHO *et al.*, 2012). A versatilidade desta combinação de teorias pode ser observada no

trabalho de Marques (2018), no qual foi possível avaliar de forma ampla uma unidade de trigeração para o atendimento de demandas de calor, frio e energia elétrica.

Assim, tendo em vista a crescente demanda por resfriamento, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar um panorama acerca da aplicabilidade da Termoeconomia como ferramenta para análise e otimização, visando a redução do consumo de energia e consequentes impactos ambientais de ciclos de refrigeração por compressão de vapor, os quais são amplamente empregados em sistemas de refrigeração e ar condicionado.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, inicialmente foi realizado um levantamento de artigos científicos na plataforma Periódicos CAPES, através dos termos de busca “Análise termoeconômica”, “Otimização termoeconômica”, “Abordagem termoeconômica” e “Refrigeração por compressão de vapor”, e seus correspondentes na língua inglesa combinados, publicados entre janeiro de 2004 e julho de 2019.

Para o tratamento dos artigos obtidos na busca, foram definidos critérios de inclusão e exclusão. Como critérios de inclusão, tem-se artigos que utilizam ou desenvolvem metodologias termoeconômicas para a análise e otimização de ciclos de refrigeração por compressão de vapor em sistemas de refrigeração e ar condicionado. E, como critérios de exclusão, citam-se artigos que não desenvolvem análises termoeconômicas diretamente, além dos que tratam de sistemas de refrigeração por absorção, e sistemas de cogeração, trigeração e poligeração.

Com base nesses critérios foi realizada uma análise sistemática para a seleção dos artigos. A triagem teve início com a leitura do título de cada trabalho, no qual é possível identificar o objeto de estudo, na maioria dos casos. Posteriormente, foram lidos os resumos dos que sobraram, a fim de buscar mais detalhes sobre a análise desenvolvida. Os artigos cujos resumos se mostraram pertinentes ao tema deste trabalho foram lidos por completo, para então serem selecionados. Por fim, para enriquecer esta revisão, uma busca por mais artigos foi realizada nas referências dos já selecionados, seguindo os critérios de seleção e análise acima descritos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento inicial resultou em 103 artigos. Após a realização da análise dos textos segundo a metodologia definida e os critérios determinados, dez artigos foram finalmente selecionados: Al-Otaibi, Dincer e Kalyon (2004); Sanaye e Malekmohammadi (2004); Selbaş, Kizilkan e Şencan (2006); Piacentino e Cardona (2010a); Piacentino e Cardona (2010b); Sayyaadi e Nejatolahi (2011); Lourenço, Santos e Donatelli (2012); Piacentino e Talamo (2013); Lourenço *et al.* (2015) e Catrini *et al.* (2018). Nesta seção, serão discutidos os métodos e resultados, e apresentadas as contribuições, em ordem lógica, de cada uma dessas pesquisas no tema relativo ao presente trabalho.

Em seu trabalho, Sanaye e Malekmohammadi (2004) introduziram um método termoeconômico através do qual os parâmetros de projeto de um sistema de ar condicionado, com ciclo de refrigeração por compressão de vapor, podem ser otimamente selecionados, a partir de dados fornecidos por fabricantes. Através de parâmetros econômicos, os autores definiram uma função objetivo, o “custo de refrigeração equivalente”, que engloba os custos de investimento e eletricidade. Esta função é minimizada empregando o método dos multiplicadores de Lagrange, satisfazendo um sistema definido de equações de restrição, as quais são relacionadas com o consumo energético dos componentes do sistema. O método foi aplicado para o projeto de um sistema de ar condicionado para uma determinada carga térmica.

O estudo de Al-Otaibi, Dincer e Kalyon (2004) apresentou uma otimização termoeconômica de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, com o objetivo de minimizar os custos do sistema e maximizar sua eficiência. Para isso, foi realizada uma análise termodinâmica do ciclo em termos de primeira lei, e uma análise econômica associando os parâmetros térmicos de cada componente do sistema com parâmetros de custo. Um estudo paramétrico foi realizado para investigar como esses valores associados variam. E então, a aplicabilidade do modelo foi validada através de um exemplo de sistema de refrigeração real.

Selbaş, Kizilkan e Şencan (2006), por sua vez, apresentaram uma otimização termoeconômica em termos de exergia em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor com superaquecimento e o sub-resfriamento, características implementadas para melhorar a eficiência do ciclo. Os autores investigaram a relação entre os custos e irreversibilidades do ciclo de acordo com as temperaturas do condensador, evaporador, sub-resfriamento e superaquecimento, e para diferentes condições de operação do sistema. É interessante destacar que os cálculos foram realizados para três fluidos refrigerantes alternativos, que não danificam

a camada de ozônio. Também, através da metodologia de otimização utilizada pelos autores, o método de Beyer, foi possível otimizar cada elemento do sistema individualmente em termos econômicos e de perda de exergia. E então, a partir de um sistema proposto, foi possível aplicar o método para determinar as dimensões ótimas dos trocadores de calor de acordo com as temperaturas de superaquecimento e sub-resfriamento correspondentes e fluidos refrigerantes.

Em modelos de otimização termoeconômica, quando se considera apenas uma função objetivo, como por exemplo o critério econômico, o sistema pode não ter resultados satisfatórios em outros critérios. Diante disso, Sayyaadi e Nejatolahi (2011) propuseram uma otimização termoeconômica multiobjetivo para um sistema de refrigeração por compressão de vapor assistido por torre de resfriamento. Foram determinadas duas funções objetivo: a destruição total de exergia (critério termodinâmico) e o custo total do produto do sistema (critério econômico). Ao longo do estudo, três situações de otimização de um dado sistema foram desenvolvidas e comparadas: termodinâmica, econômica e termoeconômica multiobjetivo. Ao final das análises, os autores concluíram que a otimização multiobjetivo, que foi realizada usando algoritmo evolutivo multiobjetivo, produziu resultados mais satisfatórios que as outras duas situações avaliadas.

Um novo modelo termoeconômico foi proposto por Piacentino e Cardona (2010a), direcionado para a avaliação de sistemas que incluem componentes cujo objetivo produtivo é controverso ou ambíguo. Este é o caso de sistemas de refrigeração que possuem componentes dissipativos, como condensadores e válvulas de expansão. Segundo os autores, estes dispositivos podem dar margens para abordagens e resultados subjetivos em metodologias termoeconômicas convencionais. Desta forma, os autores estabeleceram uma nova classificação para os componentes de uma planta em análise, como *Product Makers* e *Product Takers*, e desenvolveram sua metodologia baseando-se nesses conceitos. O estudo, que foi estruturado em duas partes, inclui a análise (PIACENTINO e CARDONA, 2010a) e otimização (PIACENTINO e CARDONA, 2010b) de um chiller industrial, no qual opera um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, dando foco aos componentes dissipativos. Os autores concluíram que o método desenvolvido para a alocação de custos se mostrou menos adequado quando comparado a métodos termoeconômicos convencionais. Porém, se configura um método bastante útil para o problema de otimização.

Piacentino e Talamo (2013) apresentaram uma análise crítica sobre a aplicação de metodologias termoeconômicas para o diagnóstico de falhas de sistemas de ar condicionado. O termo “falha” tratado no artigo se refere àquelas que causam apenas uma queda de performance

do sistema. Para o estudo, foi avaliado um ciclo simples de compressão de vapor, cujas especificações foram detalhadas de modo a permitir a reprodutibilidade dos resultados. Cinco condições de falha foram definidas e os dados de entrada no simulador adotado foram ajustados, para que fosse possível “simular” essas situações. As falhas foram avaliadas simultaneamente e separadamente. Os autores concluíram que o método, embora seja eficiente do ponto de vista qualitativo para a detecção de algumas falhas, necessita ser refinado, pois pode eventualmente gerar resultados imprecisos. Parte dos erros foram associados à modelagem inapropriada da válvula de expansão.

Lourenço, Santos e Donatelli (2012) apresentaram uma abordagem termoeconômica alternativa, o Modelo UFS, aplicada a um ciclo de refrigeração por compressão de vapor em dois estágios com inter-resfriamento. Essa abordagem permite que válvulas de expansão e condensadores sejam isolados na estrutura produtiva, o que torna possível determinar os insumos e produtos desses componentes dissipativos. Os autores avaliaram um ciclo real e um teórico, a fim de verificar a consistência do método. E, além de concluírem que o método UFS gera bons resultados na definição de insumos e produtos, também pode ser utilizado para quantificar irreversibilidades. O Modelo UFS também foi implementado e validado por Lourenço *et al.* (2015) em um ciclo em cascata de refrigeração por compressão de vapor em dois estágios.

Por fim, o trabalho de Catrini *et al.* (2018) propôs uma abordagem baseada na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e na Termoeconomia, e sua aplicação em um chiller de compressão de vapor resfriado a água. A proposta foi combinar as duas técnicas para se obter uma visão abrangente do perfil exergoambiental de um sistema energético. Para avaliar o potencial do método como ferramenta para tomada de decisões nas fases de projeto e operação da planta, foram considerados diferentes situações, relacionados a alternativas de projeto, condições de contexto em termos de tecnologias de fonte de eletricidade e níveis de manutenção. Após as análises, os autores afirmaram que, embora o método possa ser implementado para a avaliação de sistemas existentes, possui um potencial ainda maior na aplicação dessa metodologia como ferramenta de otimização de projeto.

Verificou-se limitada disponibilidade de trabalhos específicos sobre Termoeconomia para a redução do consumo de energia e consequentes impactos ambientais de ciclos de refrigeração. É interessante o fato de que o único trabalho, segundo a revisão da literatura aqui apresentada, sobre aplicação da análise exergo-ambiental para ciclos de refrigeração, ter sido publicado recentemente, em 2018. Porém, conclui-se que existe potencial de aplicabilidade para

mitigação de mudanças climáticas, que podem ser atenuadas pelos resultados de pesquisas científicas e tecnológicas. Experiências de sucesso podem ser estendidas e adaptadas, evidenciando que é possível minimizar os efeitos de situações climáticas adversas. Avançadas tecnologias podem se unir à globalização, com ações locais que respondam pelas demandas típicas de cada região, propiciando o desenvolvimento sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Termoeconomia oferece diversas possibilidades para apontar melhorias em ciclos de refrigeração por compressão de vapor. Observa-se que sua aplicação abrange tanto a fase de projeto quanto a análise de sistemas já existentes. Foi possível ilustrar exemplos de análise e otimização termoeconômica em sistemas simples, assim como sistemas com algumas alterações e mais robustos, como os assistidos por torre de resfriamento e ciclos em cascata.

Além da análise e otimização termoeconômica de sistemas para avaliar os pontos de maiores perdas energéticas e buscar otimizar o custo por efeito de refrigeração, outras abordagens interessantes foram pontuadas. É o caso do método para definição de parâmetros geométricos ótimos para o projeto do sistema e da metodologia para a seleção de equipamentos do sistema a partir de dados do fabricante, como foram apresentados na revisão.

Embora a Termoeconomia seja uma ferramenta extremamente útil para o desenvolvimento de sistemas energéticos, poucos trabalhos sobre sua aplicação em ciclos de refrigeração por compressão de vapor, especificamente, foram encontrados. Parte disso se deve à dificuldade de implementação do método, por conta dos componentes dissipativos. Contudo, estudos voltados para a resolução deste problema já têm sido realizados, e novas abordagens termoeconômicas capazes de gerar bons resultados para esses sistemas já foram desenvolvidas e validadas.

Também, aliado ao progresso nos métodos de análise termoeconômica adequados a esses ciclos, destaca-se sua associação com a Avaliação do Ciclo de Vida. A otimização em termos de eficiência energética em si, ao reduzir o consumo energético, melhora a sustentabilidade de um sistema. No entanto, um estudo termoeconômico combinado com a ACV fornece uma visão mais abrangente acerca dos impactos ambientais associados ao ciclo e é capaz de gerar projetos mais sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (nº 307394/2018-2) e pela bolsa de Mestrado (nº 132407/2019-1), e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS

ABRAVA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **O uso do ar-condicionado e o consumo de energia elétrica – ABRAVA.** (2019). Disponível em: <<https://abrava.com.br/o-uso-do-ar-condicionado-e-o-consumo-de-energia-eletrica-abrava/>>. Acesso em: 8 ago. 2019.

AL-OTAIBI, D. A.; DINCER, I.; KALYON, M. Thermoeconomic optimization of vapor-compression refrigeration systems. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 31, p. 95-107, 2004.

CARVALHO, M.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M.; WOHLGEMUTH, V. Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads. **Environmental Modelling & Software**, v. 30, p. 71-80, 2012.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. Geographic evaluation of trigeneration systems in the tertiary sector. Effect of climatic and electricity supply conditions. **Energy** (Oxford), v. 36, p. 1931-1939, 2011a.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. **Energy**, v. 36, p. 3779-3790, 2011b.

CARVALHO, M.; SILVA, J. A. M. Second law assessment of a Hoffmann kiln for the red ceramics industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 1, 2018.

CATRINI, P.; CELLURA, M.; GUARINO, F.; et al. An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoeconomics: Application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant. **Energy**, v. 160, p. 72-86, 2018.

CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; OCHOA, A. A. V. Exergoeconomic and exergoenvironmental comparison of diesel-biodiesel blends in a direct injection engine at variable loads. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 450-461, 2019.

ÇENGEL, Y.; BOLES, M. **Termodinâmica**. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHAVES, A. F. F.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, M. Environmental impact and cost allocations for a dual product heat pump. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 763-772, 2018.

DEVITT, T. In a warming world, could air conditioning make things worse?. **University of Wisconsin-Madison**, Madison, jul. 2018. Disponível em: <https://news.wisc.edu/in-a-warming-world-could-air-conditioning-make-things-worse/>. Acesso em: 8 ago. 2019.

FARBOTKO, C.; WAITT, G. Residential air-conditioning and climate change: voices of the vulnerable. **Health Promotion Journal of Australia**, v. 22, n. 4, p. 13-15, 2011.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling**: Opportunities for energy-efficient air conditioning. OECD/IEA, 2018

LAZZARETTO, A; TSATSARONIS, G. SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, v. 31, p.1257-1289, 2006.

LIN, H; LI, X; CHENG, P; XU, B. Thermoeconomic evaluation of air conditioning system with chilled water storage. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 328-332, 2014.

LOURENÇO, A. B. **Uma Nova Abordagem Termoeconômica para o Tratamento de Equipamentos Dissipativos**. Dissertação de Mestrado: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LOURENÇO, A. B.; NEBRA, S. A.; SANTOS, J. J. C. S; DONATELLI, J. L. M. Application of an alternative thermoeconomic approach to a two-stage vapour compression refrigeration cascade cycle. **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 3, p. 903-913, 2014.

LOURENÇO, A. B.; SANTOS, J. J. C. S.; DONATELLI, J. L. M. Application of an alternative thermoeconomic approach to a two-stage vapor. *In*: ECOS, 25., 2012. **ECOS 2012: the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes**. Perugia: Firenze University Press, 2012.

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

LUNDGREN-KOWNACKI, K.; HORNYANSZKY, E. D., CHU, T. A; et al. Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 3, p. 401-412, 2018.

MARQUES, A. S. **Avaliação Exergoeconômica e Ambiental de uma Unidade de Micro-trigeração**. Tese de Doutorado: Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MARQUES, A. S; MEDEIROS, J. L; SANTOS, C. A. C. Análise exergoeconômica pelo método SPECO na cogeração automotiva para uso de um sistema de refrigeração por absorção. *In*: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 13., 2017, Lisboa. **Anais do XIII Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica**. Lisboa: Federação Ibero-americana de Engenharia Mecânica, 2017.

MCMULLAN, J. T. Refrigeration and the environment — issues and strategies for the future. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, n. 1, p. 89-99, 2002.

MEYER, L.; TSATSARONIS, G.; BUCHGEISTER, J; SCHEBEK, L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. **Energy**, v. 34, n. 1, p.75-89, 2009.

PIACENTINO, A.; CARDONA, E. Scope Oriented Thermo-economic analysis of energy systems. Part II: Formation Structure of Optimality for robust design. **Applied Energy**, v. 87, p. 957–970, 2010b.

PIACENTINO, A.; CARDONA, E. Scope-Oriented Thermo-economic analysis of energy systems. Part I: Looking for a non-postulated cost accounting for the dissipative devices of a vapour compression chiller. Is it feasible?. **Applied Energy**, v. 87, p. 943–956, 2010a.

PIACENTINO, A.; TALAMO, M. Critical analysis of conventional thermo-economic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: Capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, p. 24-44, 2013.

RUIZ, B. I. O paradoxo da refrigeração. **Deutsche Welle**, jun. 2018. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/o-paradoxo-da-refrigera%C3%A7%C3%A3o/a-44797276>. Acesso em: 8 ago. 2019.

SANAYE, S.; MALEKMOHAMMADI, H. R. Thermal and economical optimization of air conditioning units with vapor compression refrigeration system. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, p. 1807-1825, 2004.

SAYYAADI, H.; NEJATOLAH, M. Multi-objective optimization of a cooling tower assisted vapor compression refrigeration system. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, p. 243-256, 2011.

SELBAS, R.; KIZILKAN, O.; SENCAN, A. Thermo-economic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle. **Energy**, v. 31, p. 2108–2128, 2006

SERRA, L. M.; CARVALHO, M.; LOZANO, M. A. Tackling environmental impacts in simple trigeneration systems operating under variable conditions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1087-1098, 2014.

SILVA, J. A. M.; SANTOS, J. J. C. S.; CARVALHO, M.; OLIVEIRA JUNIOR, S. On the thermo-economic and LCA methods for waste and fuel allocation in multiproduct systems. **Energy**, v. 127, p. 775-785, 2017.

TORRES, C. C; VALERO, A. C. **Termoeconomía**. Curso de Doctorado. Dpto. Ingeniería Mecánica, 2000.

VALERO, A; SERRA, L; UCHE, J. **Fundamentals of thermoeconomics**. EURO Summer Course on Sustainable Assessment of Clean Air Technologies, 2001.

YU, B. F; HU, Z. B; LIU, M; YANG, H. L; KONG, Q. X; LIU, Y. H. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. **International Journal of Refrigeration**, v. 32, p. 3-20, 2009.

ZARE, V; MAHMOUDI, S. M. S.; YARI, M; AMIDPOUR, M. Thermoeconomic analysis and optimization of an ammonia–water power/cooling cogeneration cycle. **Energy**, v. 47, p. 271-283, 2012.