

AVALIAÇÃO EXERGÉTICA E DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA PARA A SUSTENTABILIDADE: APLICAÇÃO A SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAIS

MARCOS ANTÔNIO
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

MONICA CARVALHO

Introdução

Na esteira da evolução tecnológica dos sistemas de refrigeração e seus correlatos, surge também a necessidade de avaliar os impactos energéticos, econômicos e ambientais associados à produção, operação e descarte de tais sistemas (LIU et al., 2020). Uma vez que os processos de refrigeração industriais são grandes consumidores de energia, é necessário racionalizar o consumo associado à sua operação (TEREHOVICS et al., 2018) como estratégia de apoio para melhorar os níveis de eficiência energética e sustentabilidade.

Problema de Pesquisa e Objetivo

As discussões na literatura têm se intensificado de forma considerável nas temáticas relacionadas à avaliação exergética e ambiental aplicadas como metodologia de análise nos mais variados processos produtivos, como os processos de geração de potência, calor e resfriamento (FU et al., 2022). Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi realizar uma Revisão Sistemática da Literatura para compreender às discussões acerca da análise exergética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial considerando o período de 2018 a 2022.

Fundamentação Teórica

A avaliação exergética se apresenta como uma ferramenta poderosa para análise quantitativa e qualitativa de todo e qualquer processo em que há trocas e transformação de energia (IBRAHIM et al., 2018). A análise exergética possibilita analisar a eficiência de uma fonte energética, como também indicar pontos de melhoria da eficiência de um sistema ou processo. Sendo assim, a finalidade é a de promover a otimização, propiciando a redução das perdas, sendo também o elemento basilar para as avaliações termoeconômicas e ambientais (SAINI, et al., 2018).

Metodologia

Neste estudo, fez-se o uso das diretrizes propostas por Kitchenham (2004) para a construção desta revisão sistemática e a busca dos artigos relacionados com o objetivo da pesquisa foram nas seguintes bases de dados: Scopus, Web of Science e Science Direct, de modo que a coleta nestas bases ocorreu entre os meses de maio a junho de 2023. Quanto ao critério temporal foram considerados os artigos publicados entre 2018 a 2022, sendo analisados apenas artigos científicos no idioma em inglês e que estavam disponíveis por completo para download.

Análise dos Resultados

Foram identificados 290 documentos, dos quais na Scopus obteve-se um total de 116 estudos, 96 artigos na Web of Science e 78 artigos na Science Direct. Após as etapas de triagem resultou em 10 artigos para análise. Observou-se que os trabalhos focaram no uso das análises exergéticas e ambientais utilizando tanto metodologias consagradas de avaliação termoeconômica e ambiental, como propondo novos métodos de combinação entre estas, como ferramenta de diagnóstico de sistemas térmicos aplicados a processos conversão de energia, resfriamento e aquecimento.

Conclusão

A contribuição deste trabalho foi demonstrar através dos estudos identificados os desdobramentos das pesquisas atuais relacionadas à aplicação das metodologias de avaliação termoambientais e termoeconômicas para sistemas térmicos, em especial para a refrigeração industrial. Demonstrando assim a importância da temática como parte dos esforços para o uso racional da energia, aumento de eficiência térmica, mitigação e/ou racionalização de impactos ambientais e econômicos associados à operação destes sistemas.

Referências Bibliográficas

FU, C.; SHEN, Q.; WU, T. Exergo-economic comparisons of solar cooling systems coupled to series/parallel absorption chiller types considering the lowest heat transfer area. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022. KITCHENHAM, B. Procedures for Undertaking Systematic Review. Computer Science Department, Keele University and ICT National Australia, 2004. LIU, X. et al. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of an integrated process combining CO₂ capture and storage, an organic Rankine cycle and an absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 2020.

Palavras Chave

Análise exergética, Ciclo de vida, Refrigeração Industrial

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das bolsas de produtividade em pesquisa 309452/2021-0 308753/2021-6.

AValiação Exergética e de Ciclo de Vida como Estratégia para a Sustentabilidade: Aplicação a Sistemas de Refrigeração Industriais

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração como um todo possuem importância fundamental na vida moderna. As demandas relacionadas à produção de frio e climatização para as variadas aplicações é uma constante (ANTONIE *et al.*, 2022). De acordo com Wu *et al.* (2019) a cadeia do frio, por exemplo, está integralmente associada ao processo de produção e acondicionamento térmico de alimentos. Neste caso, o produto, independentemente de sua origem, necessita de ser mantido em um ambiente refrigerado do momento que é produzido até o seu consumo (SADI; ARABKOOHSAR, 2020).

Por outro lado, de acordo com Randazzo *et al.* (2020), a demanda da refrigeração aplicada a sistemas de climatização e aquecimento também está em processo de crescimento, devido a exigência de conforto térmico, maior acesso à tecnologia e como consequência relacionada às mudanças climáticas, com o processo de aquecimento global sendo uma constante ao longo dos anos (ALROBAIAN, 2023). A refrigeração industrial é um ramo dos sistemas térmicos que tem como função a produção de frio em grande escala, de modo a atender a demandas de resfriamento ou de climatização.

De acordo com Zu *et al.* (2021), os sistemas de refrigeração industriais foram evoluindo de acordo com a evolução tecnológica e devido ao aumento da demanda por sistemas mais robustos para atender as demandas que vão se apresentando ao longo do tempo, de modo que, atualmente, é possível contar com diversos arranjos de equipamentos e sistemas para atender aplicações variadas.

Na esteira da evolução tecnológica dos sistemas de refrigeração e seus correlatos, surge também a necessidade de avaliar os impactos energéticos, econômicos e ambientais associados à produção, operação e descarte de tais sistemas (LIU *et al.*, 2020). Assim, uma vez que os processos de refrigeração industriais são grandes consumidores de energia, é necessário racionalizar o consumo associado à sua operação como estratégia de apoio para melhorar os níveis de eficiência energética e sustentabilidade (TEREHOVICS *et al.*, 2018). A crescente demanda de energia, crescimento econômico, e preocupação com impactos ambientais evidencia a necessidade de buscar soluções tecnológicas que permitam o desenvolvimento sustentável, considerando o cenário atual.

Para tanto, segundo Colakoglu e Durmayaz (2022) a aplicação de metodologias de avaliação exergética podem ajudar racionalizar a demanda energética desses sistemas, seja na fase de projeto, na otimização de plantas em operação, como também na utilização de fontes energéticas renováveis como alternativa ao consumo de energia proveniente das fontes tradicionais. Assim, a avaliação exergética se apresenta como uma ferramenta poderosa para análise quantitativa e qualitativa de todo e qualquer processo em que há trocas e transformação de energia (IBRAHIM *et al.*, 2018). Com efeito, a análise exergética possibilita analisar a eficiência de uma fonte energética, como também indicar pontos de melhoria da eficiência de um sistema ou processo. Sendo assim, a finalidade é a de promover a otimização, propiciando a redução das perdas, sendo também o elemento basilar para as avaliações termoeconômicas e ambientais (SAINI, *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, as discussões na literatura têm se intensificado de forma considerável nas temáticas relacionadas à avaliação exergética e ambiental aplicadas como metodologia de análise nos mais variados processos produtivos, como os processos de geração de potência, calor e resfriamento (FU *et al.*, 2022).

De acordo com Marques *et al.* (2021), estudos relacionados a estes sistemas têm sido recorrentes, pois há motivos plausíveis que tornam necessária a adoção de metodologias de avaliação termoambientais, tais como o uso sustentável da energia, a redução de emissões associados à operação de sistemas de refrigeração, o uso de fontes energéticas renováveis, aumento do rendimento térmico, além da avaliação de impacto econômico relacionada aos processos de conversão de energia. A temática é bastante relevante dada a dinâmica do consumo energético, impacto ambiental associado a emissões de gases de efeito estufa e custos econômicos relacionados a sistemas de refrigeração industrial (ALSAMAN *et al.*, 2022). Abreu *et al.* (2022) desenvolveram análises termoeconômica e ambiental para um sistema de climatização em um *Shopping Center* localizado na cidade de João Pessoa (Paraíba), traçando um panorama de custos energéticos, econômicos e ambiental demandados pelo sistema de climatização do prédio.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para compreender o estado da arte recente quanto às discussões acerca da análise exegética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial. Assim, a RSL visou mapear os estudos primários que possuíam relação com a seguinte questão de pesquisa: **Qual o cenário atual sobre estudos aplicados à análise exegética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial considerando o período de 2018 a 2022?**

Para tanto, com a RSL procurou-se destacar as principais discussões na literatura acerca da temática em estudo. Posteriormente, foram delineados os procedimentos utilizados nesta RSL contendo uma síntese dos estudos primários identificados. Por fim, a partir dos resultados obtidos com a realização da revisão sistemática, estão as considerações finais destacando-se os principais achados e discussões encontradas na literatura.

2 METODOLOGIA

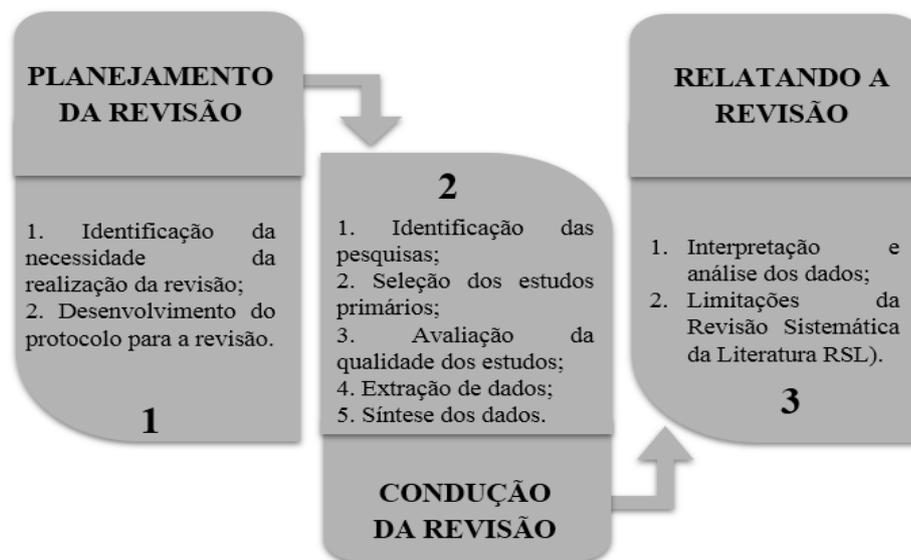
Kitchenham (2004) evidencia que através da revisão sistemática é possível avaliar e compreender as pesquisas relevantes para uma questão de pesquisa específica, área ou fenômeno de relevância. Assim, as revisões sistemáticas ao tomarem por base uma estratégia de pesquisa delimitada direciona para a localização do máximo de estudos relevantes.

Ainda segundo a referida autora, as revisões sistemáticas possibilitam a identificação das principais evidências acerca de um tema mediante o uso de uma metodologia rigorosa, transparente e auditável. Portanto, uma revisão sistemática possibilita novos encaminhamentos de pesquisa seja para sustentar ou refutar hipóteses de pesquisa, bem como desenvolver hipóteses diferentes ou adicionais para discussões.

Brereton *et al.* (2007) destacam que a definição do protocolo na revisão sistemática minimiza o viés no estudo e que é preciso especificar os processos que serão seguidos. Na mesma direção, Aguinis, Ramani e Alabduljader (2018) enfatizam a importância de a revisão sistemática ser descrita de forma detalhada e com procedimentos metodológicos transparentes, para que outros pesquisadores consigam reproduzir o protocolo definido.

Neste estudo, fez-se o uso das diretrizes propostas por Kitchenham (2004) para a construção desta revisão sistemática. Para a autora o processo de revisão sistemática abrange as seguintes fases: i) planejamento da revisão, ii) condução da revisão e iii) relatando a revisão. A figura 1 resume o processo delineado para a execução da RSL:

Figura 1- Etapas para a Revisão Sistemática da Literatura



Fonte: Autores (2023), com base em Kitchenham (2004).

Após a definição do protocolo, estabeleceu-se como panorama de análise os estudos que foram realizados no período de 2018 a 2022, a fim de evidenciar as principais discussões sobre análise exérgica e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial.

2.1 FONTES DE INFORMAÇÃO

Para a busca dos artigos relacionados com o objetivo da pesquisa foram utilizadas três bases de dados: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. É válido salientar, que para a identificação dos artigos nas referidas bases, a busca ocorreu de forma manual a partir das seguintes palavras-chave: “Refrigeration”, “Exergy”, “Cold rooms”, “Life cycle assesment”, “Carbon footprint”, “Greenhouse gases” acompanhadas dos operadores booleanos AND ou OR. Ressalta-se que a coleta nestas bases de dados ocorreu entre os meses de maio a junho de 2023.

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Neste estudo foram considerados somente os artigos que possuíam acesso aberto e estavam disponíveis para *download* e os trabalhos que não atenderam este critério foram eliminados da análise.

Para a seleção dos estudos utilizou-se as bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, sendo que a pesquisa dos artigos ocorreu através dos títulos visando identificar aqueles que possuísssem relação com “Refrigeração industrial”, “Exergia”, “Câmaras frias”, “Avaliação de Ciclo de Vida”, “pegada de carbono” e “gases do efeito estufa”. Assim, foram incluídos os artigos que versavam sobre a análise exérgica para refrigeração industrial e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Em relação a delimitação do período de tempo para a busca dos artigos foi considerado os artigos publicados entre 2018 a 2022, a fim de realizar um levantamento sobre o estado da arte acerca das discussões sobre análise exérgica para refrigeração industrial e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Frisa-se que não foram incluídos nesta revisão, a literatura cinzenta, sendo, portanto, analisados apenas artigos científicos.

Ainda no processo de exclusão dos artigos, destaca-se que foram considerados somente aqueles que estavam no idioma inglês. Portanto, os trabalhos em outros idiomas e que não estavam dentro do recorte temporal (2018 a 2022) foram excluídos. A escolha pela delimitação de tempo para os últimos cinco anos nas buscas dos artigos deveu-se ao fato de que os métodos discutidos nos artigos evoluem de forma muito rápida (AGUINIS, RAMANI E ALABDULJADER, 2018), por isso é importante definir lapso temporal para análise do estado da arte e obter as discussões mais recentes acerca de determinado assunto.

Para a avaliação da qualidade dos artigos, os periódicos que possuíam Fator de Impacto (JCR) menor que 1 foram excluídos. Para além disso, os artigos que estavam duplicados nas bases de dados ou entre as bases também foram suprimidos.

2.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A seleção dos artigos foi feita no idioma em inglês nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct* e foram utilizadas as seguintes *strings* de busca na pesquisa avançada: “*Refrigeration*”, “*Exergy*”, “*Cold rooms*”, “*Life cycle assessment*”, “*Carbon footprint*”, “*Greenhouse gases*”.

Dessa forma, as buscas nas bases de dados ocorreram da seguinte forma: TS= ((“*Refrigeration*” OR “*cooling*” OR “*cold room*” OR “*cold chain*”) AND (“*exergy*”) AND (“*life cycle assessment*” OR “*carbon footprint*” OR “*greenhouse gases*” OR “*GHG*”)) sendo o idioma em inglês, o recorte temporal de 5 anos (2018 a 2022), o tipo de estudo selecionado foi “artigo de pesquisa” e somente trabalhos com acesso aberto foram considerados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

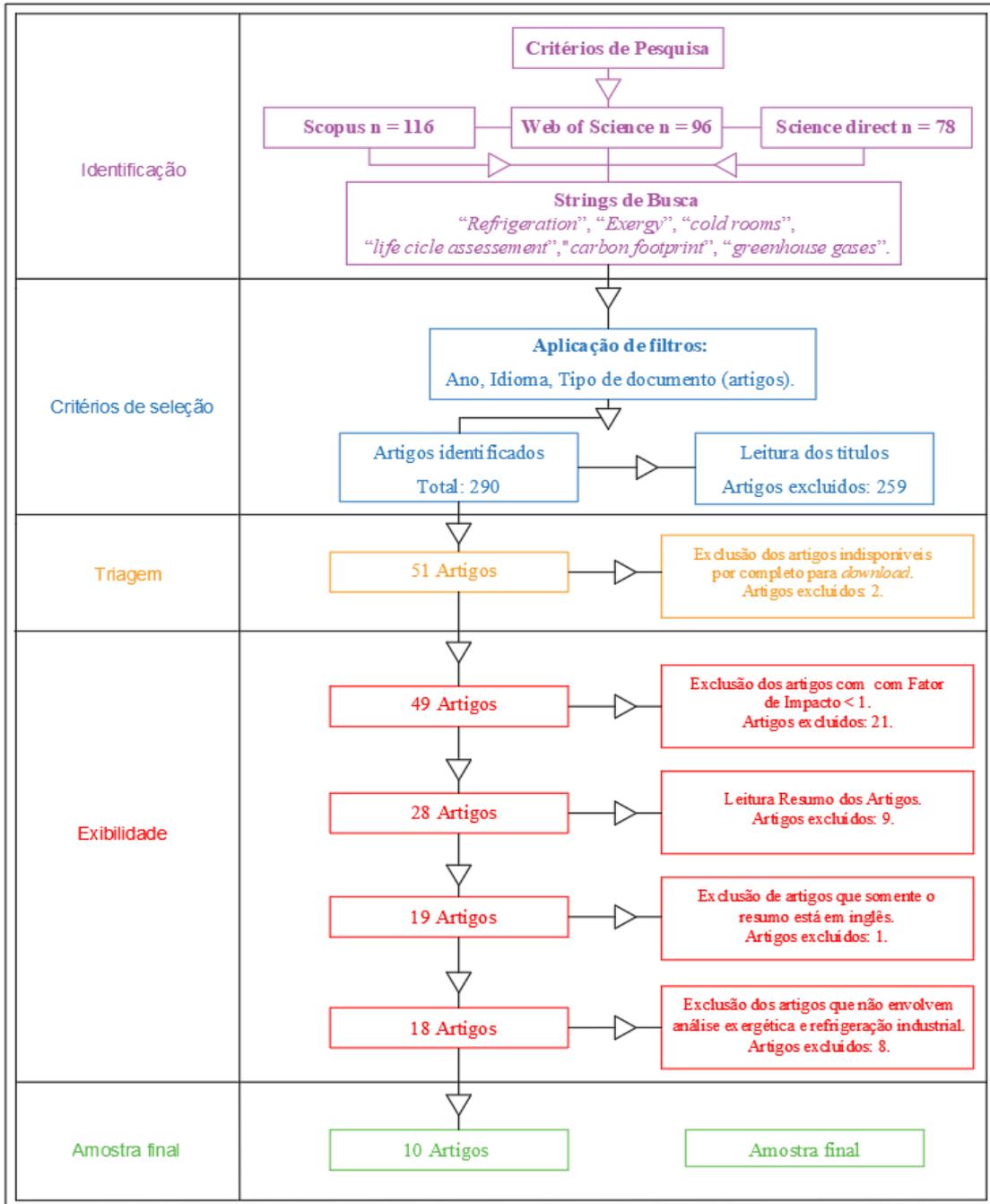
Nas buscas realizadas nas bases de dados utilizou-se como recorte temporal o período de 2018 a 2022 e, a partir daí, foi verificado se os resultados apresentados eram somente artigos com acesso aberto, de modo que foram identificados 290 documentos, dos quais na *Scopus* obteve-se um total de 116 estudos, 96 artigos na *Web of Science* e 78 artigos na *Science Direct*.

Em seguida, realizou-se a leitura dos títulos dos artigos, a fim de analisar se estavam alinhados com a questão de pesquisa e os que não possuíam relação foram excluídos, de modo que resultou na exclusão de 239 artigos, totalizando 51 artigos para aplicação do próximo critério. Destaca-se que os artigos indisponíveis por completo para *download* foram excluídos, resultando em 49 estudos. É oportuno evidenciar que a filtragem com a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos teve o propósito de identificar os estudos primários que tinham relação com a questão de pesquisa delimitada nesta revisão sistemática.

Também foram utilizados como critério de exclusão os artigos com fator de impacto menor que 1 e/ou que eram estudos secundários, totalizando 28 artigos primários. Por conseguinte, após a leitura dos resumos destes trabalhos foram excluídos 9 estudos que não estavam relacionados com o objetivo da pesquisa, ficando assim, 19 artigos. Ainda nesta etapa identificou-se um artigo que somente o resumo encontrava-se na língua inglesa e o trabalho por completo estava em outro idioma, por isso, foi desconsiderado, restando um quantitativo de 18 artigos para leitura da introdução, metodologia e conclusão.

Após esta etapa de triagem foram excluídos os artigos que não relacionavam análise exérgica e refrigeração industrial sendo eliminados 8 trabalhos. Por fim, na última etapa, foi feita a leitura na íntegra dos 10 artigos por enquadrar-se nos critérios estabelecidos nesta RSL. O processo de extração dos artigos foi organizado conforme consta na figura 2.

Figura 2 - Passos para obtenção dos artigos analisados



Fonte: Autores (2023).

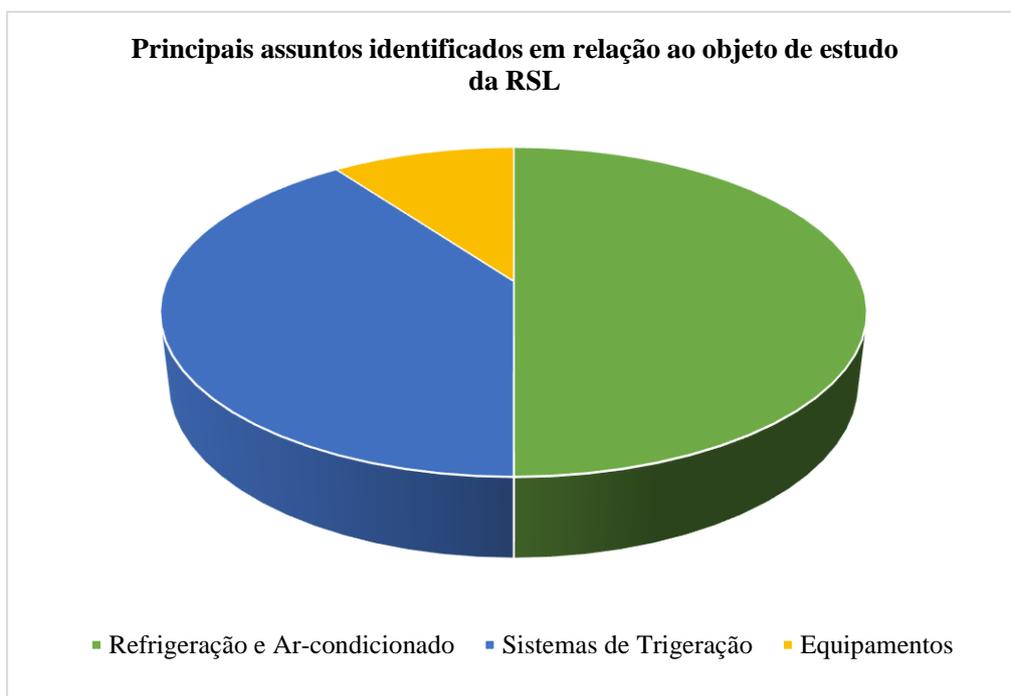
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS IDENTIFICADOS

Por meio dos artigos identificados nesta revisão sistemática, observou-se que os trabalhos focaram no uso das análises exérgicas e ambientais utilizando tanto metodologias consagradas de avaliação termoeconômica e ambiental, como propondo novos métodos de combinação entre estas, como ferramenta de diagnóstico de sistemas térmicos aplicados a processos conversão de energia, resfriamento e aquecimento. Uma vez que dos 10 trabalhos triados, 9 deles tratam diretamente de análises termoeconômicas e ambientais em plantas térmicas.

Entre os principais assuntos abordados nos artigos identificados nesta RSL verificou-se preponderância para Avaliação de desempenho exergético e ambiental e, mais especificamente, para os seguintes temas: Análise exegética, ciclo de vida (ACV) e Refrigeração, e emissões de gases de efeito estufa, respectivamente, estando os trabalhos bem alinhados acerca do objetivo definidos para esta revisão.

Em relação ao objeto de estudo dos trabalhos triados, identificou-se a concentração das discussões em termos percentuais, avaliações termoeconômica e ambientais aplicadas a sistemas de refrigeração e ar-condicionado (50%), trigeração (40%) e a fluidos refrigerantes utilizados em equipamentos (10%), de modo a analisar através destas metodologias ou combinações das mesmas, as eficiências dos sistemas nos pontos de vista, energético, econômico e ambiental, além de propor alternativas sustentáveis através das avaliações dos cenários específicos de cada objeto de estudo.

Figura 3 - Distribuição dos estudos identificados



Fonte: Autores (2023).

Em relação aos periódicos nos quais os artigos foram publicados, sete artigos possuem Fator de Impacto (JCR) maior que 8,857. É válido salientar que, dos 10 artigos identificados somente um artigo possui fator de impacto menor que cinco, o que demonstra a relevância e o nível dos trabalhos produzidos acerca da temática de avaliações exegéticas e ambientais, como ferramentas para otimização de sistemas térmicos aplicados na produção de potência, resfriamento e aquecimento.

Entre os autores dos estudos identificados na RSL, somente um autor publicou mais de um trabalho na mesma temática de avaliação termoeconômica e ambiental, utilizando as ferramentas de análise exergética e de ACV para estudar sistemas térmicos (CHEN et. al, 2021, e CHEN et. al, 2022). Assim, entende-se que a análise a respeito do assunto tem sido evidenciada na literatura, mas que ainda não se esgotaram as discussões merecendo aprofundamentos tendo em vista que se vislumbra potencial para maiores desdobramentos.

Esta observação se justifica, quando se considera o lapso temporal do recorte da RSL, onde os trabalhos identificados possuem regularidade nas suas publicações ao longo dos anos

do recorte temporal definido nesta pesquisa, sendo que o ano de 2022 apresentou mais trabalhos publicados, três artigos (ABREU *et al.* 2022; WENZEL; RADGEN, 2022; CHEN, 2022).

Já o ano de 2020 apresentou somente um trabalho (WANG, 2020) mantendo sempre a tendência referente a temática do uso da análise exérgica e de ACV como ferramenta de avaliação aplicada a processos de transformação de fontes energéticas em potência, resfriamento e calor e os impactos ambientais gerados por estes.

De acordo com a avaliação dos trabalhos identificados, observa-se que há o uso por parte dos autores de metodologias consagradas de avaliação termoeconômica e ambiental de sistemas térmicos nas mais variadas aplicações, desde plantas de trieração a análise de equipamentos. Para além disso, há estudos propondo metodologias com combinações alternativas entre os métodos de avaliação objetivando tornar as análises mais acuradas com resultados mais refinados e personalizadas para um objeto de estudo específico.

No quadro 1, é detalhada a relação dos trabalhos identificados nesta RSL, ordenados de forma crescente no ano de publicação.

Quadro 1 - Relação dos Estudos teóricos e experimentais identificados para esta RSL

Título	Ano	Journals	Fator de Impacto (JCR)	Autores
Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system	2018	Energy	8,857	Adriano S. Marques; Monica Carvalho; Alvaro A.V. Ochoa; Raphael Abrahao; Carlos A.C. Santos
An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoeconomics: application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant	2018	Energy	8,857	P. Catrini, M. Cellura; F. Guarino; D. Panno, A. Piacentino
A comprehensive exergy-based evaluation on cascade absorption-compression refrigeration system for low temperature applications - exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessments	2019	Journal of Cleaner Production	11,072	Seyed Ali Mousavi; Mehdi Mehrpooya
Advanced exergy, exergo-economic and exergo-environmental analyses of a solar based trigeneration energy system	2019	Applied Thermal Engineering	6,465	Hadis Montazerinejad; Pouria Ahmadi; Zeynab Montazerinejad
Environmental impact assessment of office building heating and cooling sources: A life cycle approach	2020	Journal of Cleaner Production	11,072	Chendong Wang; Anqi Xu; Shifei Jiao; Zihua Zhou; Debao Zhang; Junwei Liu; Jihong Ling; Feng Gao; Raufdeen Rameezdeen; Like Wang; Yuan Wang; Jian Zuo
Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump	2021	Energy	8,857	Yuzhu Chen; Jinzhao Xu; Dandan Zhao; Jun Wang; Peter D. Lund

Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications	2021	Environmental Science and Pollution Research	5,19	Saji Raveendran Padmavathy; Murugan Paradesi Chockalingam; Nithyanandhan Kamaraj; Godwin Glivin; Venkatesh Thangaraj; Bharathiraja Moorthy
Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall	2022	International Journal of Refrigeration	4,14	Renata Portela Abreu; Victor Hugo Lobo Correia; Atílio Barbosa Lourenço; Adriano da Silva Marques; Monica Carvalho
Multi-Criteria Comparison of Energy and Environmental Assessment Approaches for the Example of Cooling Towers	2022	Appl. Syst. Innov.	5,18	Paula M. Wenzel; Peter Radgen
Techno-economic cost assessment of a combined cooling heating and power system coupled to organic Rankine cycle with life cycle method	2022	Energy	8,857	Yuzhu Chen; Huilian Hua; Jinzhaoh Xu; Zhonghua Yun; Jun Wang; Peter D. Lund

Fonte: Autores (2023).

A partir da análise dos 10 artigos identificados com a RSL observou-se maiores discussões voltadas para os seguintes temas: Análise exergética, Avaliação de Ciclo de Vida, Refrigeração, Resfriamento e Eficiência energética, avaliação exergoeconômica e exergoambiental, os quais são abordados na seção 3.2, na apresentação dos trabalhos identificados na presente revisão sistemática.

Com efeito, procedeu-se com a construção de uma nuvem de palavras e foram utilizadas as palavras-chave contidas nos 10 artigos que foram analisados. Destaca-se que, na nuvem, a repetição das palavras nos artigos relaciona-se com o tamanho, de modo que quanto maior o tamanho da palavra na nuvem significa que ela apareceu mais vezes entre os 10 artigos selecionados. Dessa forma, as palavras em evidência dão ênfase para maior compreensão dos principais assuntos levantados nos artigos triados, conforme exposto na figura 4.

Já Catrini *et al.* (2018) desenvolveram um estudo integrado baseado no método de avaliação TEC-LCA, aplicado a um chiller refrigerado a água para fins de climatização. O estudo teve como objetivo aplicar a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) aliada a termoeconomia como ferramenta para analisar o perfil exergoambiental de sistemas energéticos, utilizando as capacidades das duas técnicas para avaliar simultaneamente os aspectos termodinâmicos dos processos de conversão de energia e os impactos ambientais associados ao ciclo de vida do equipamento. A metodologia delineada pelos autores focou em contabilizar os custos exergéticos, para tanto, realizaram um balanço exergético dos fluxos de energia do sistema como um todo. A análise exergética, por sua vez, abriu caminho para a análise termoeconômica, onde foram quantificados os custos associados aos fluxos exergéticos relacionados aos recursos consumidos e produtos gerados pelo sistema.

Para as análises da primeira e segunda lei, os autores utilizaram o software *Engineering Equation Solver* (EES) e o *IMST-ART*® como simulador de planta térmica, de modo a modelar a transferência de calor entre a água e o fluido refrigerante para o circuito evaporador-condensador. A etapa de ACV foi baseada segundo a série ISSO 14040 para avaliar e quantificar os impactos ambientais gerados pelo Chiller ao longo do seu ciclo de vida. O estudo trouxe como resultados avaliações de cenários de funcionamento com o Chiller em plantas térmicas modificadas, considerando a tecnologia e planos de manutenção distintos, onde concluíram que o método de abordagem integrada TEC-LCA fornece uma visão abrangente dos impactos ambientais através da contabilização de ACV e custos termoeconômicos para sistemas de conversão de energia, onde os impactos mais significativos se deram devido ao cenários em que a torre de resfriamento estava subdimensionada, na etapa de construção, e a manutenção precarizada para a etapa de uso, além de mostrar que o cenário considerando a matriz energética descarbonizada contribui em até 70% para a redução dos indicadores associados a ACV (CATRINI *et al.*, 2018).

Mousavi e Mehrpooya (2019) realizaram um estudo abrangente a respeito de um novo sistema de refrigeração por absorção-compressão em cascata, onde avaliaram, através da avaliação exergética, o processo de refrigeração de ponta a ponta, em que conseguiram estimar a eficiência exergética total, taxa de destruição de exergia global e coeficiente de desempenho do sistema. Os autores para realizarem o estudo, simularam o sistema em *softwares* combinados, onde analisaram detalhadamente os fluxos exergéticos do sistema através de balanços de massa e energia. A avaliação exergoambiental foi baseada na ACV utilizando o Ecoindicador 99, considerando o período de vida útil do sistema. Já a avaliação exergoambiental foi feita através da análise do custo de aquisição e operação do equipamento. Como resultado, identificaram fontes de irreversibilidades associadas ao sistema devido ao compressor e trocadores de calor, assim como pontos de otimização, através da avaliação paramétrica que realizaram, tendo estas irreversibilidades impactado significativamente nos resultados das avaliações exergoeconômicas e ambientais. Além disso, os autores através do estudo comprovaram a viabilidade do uso de análises paramétricas como ferramenta avançada para avaliar sistemas de absorção-compressão em cascata para fins de refrigeração.

Montazerinejad, Ahmadi e Montazerinejad (2019) propuseram um novo sistema CCHP através do uso da energia solar que combina resfriamento, aquecimento e energia e, a partir daí, fizeram uma análise sob o ponto de vista termodinâmico e termoeconômico. Os autores realizaram avaliações exergéticas, exergoeconômicas e exergoambientais. Para tanto, por meio da criação de códigos no *software Engineering Equation Solver* (EES) a análise exergética foi realizada e identificou-se que o “tanque de armazenamento possui a maior taxa de destruição de exergia e o maior custo de destruição de exergia.

Wang *et al.* (2020) desenvolveram uma avaliação de impacto ambiental de fontes de aquecimento e refrigeração em edifícios empresariais, objetivando através destas investigações, auxiliar os projetistas a escolherem com maior assertividade fontes de aquecimento e

resfriamento ecologicamente corretas e economicamente viáveis, além de contribuir para a formulação de políticas de incentivo para o uso de fontes de energia sustentáveis junto às entidades governamentais. Os autores escolheram um prédio comercial em Tianjin, China, o qual era equipado com um sistema de climatização. Com isso, selecionaram 7 fontes energéticas para avaliar e comparar os impactos ambientais associados a cada fonte em diferentes combinações de uso, de forma a verificar a mais economicamente viável e ambientalmente mais sustentável para o uso no prédio. Para realizar as avaliações, os autores efetuaram análises de 1ª e 2ª lei e extraíram a taxa de eficiência térmica e exérgica das fontes e a partir desses resultados, basearam-se na avaliação de ciclo de vida (ACV).

Os resultados do estudo mostraram que as análises exérgicas das fontes de aquecimento e resfriamento selecionadas evidenciaram que as taxas de eficiência para o aquecimento são significativamente maiores em relação às de resfriamento, devido ao fato dos poderes caloríficos das fontes energéticas (óleo, gás e carvão) distintos e as diferenças entre as quantidades de energia consumida para suprir as demandas térmicas da edificação. Em relação aos impactos ambientais, o estudo traz resultados importantes, já que indica as melhores combinações entre as fontes e sistemas disponíveis, demonstrando que sistemas de cogeração a gás e bombas de calor com fonte geotérmica combinados a sistema de refrigeração convencional resultaram nas melhores opções em relação a eficiência térmica, econômica e de impacto ambiental associado (WANG *et al.*, 2020).

Chen *et al.* (2021) fizeram uma avaliação exergoeconômica e de sensibilidade para um sistema combinado de refrigeração, aquecimento e energia CCHP movido a energia solar acoplado ao ciclo orgânico de Rankine (ORC) e uma bomba de calor por absorção AHP. Para o desenvolvimento do estudo, foram feitas modelagens matemáticas do sistema e dos seus parâmetros de funcionamento, como também as considerações termodinâmicas aplicadas ao mesmo. Destaca-se que, esta modelagem foi necessária para efetuar a avaliação exérgica do sistema, onde, através do balanço de massa e energia, seus resultados serviram como base para as avaliações exergoeconômica, que ao utilizar o método do retorno simples, possibilitou estimar os custos associados ao sistema. Os autores também efetuaram simulações através do *Software Energy Plus* utilizando parâmetros climáticos da região de Pequim, China, como irradiância solar e temperaturas médias anuais, de forma a simular cenários distintos e combinados das condições de trabalho do sistema em consequência da demanda térmica da edificação na qual o sistema equipa ao longo do ano.

O estudo de Chen *et al.* (2021) mostrou através das análises efetuadas, que o sistema apresenta eficiência energética mais baixa e eficiência exérgica máximo operando no modo de resfriamento – demanda de refrigeração, ao passo que operando no modo de aquecimento, exibe eficiência energética máxima e, operando de forma híbrida, apresenta baixas eficiências energética e exérgica. Os resultados do estudo denotam que a unidade AHP que equipa o sistema de trigeração tem sua eficiência melhorada quando utiliza calor proveniente do aquecimento solar e da fonte geotérmica, com COP entre 1,38 e 2, dependendo do modo de operação, como também concluiu o custo exérgico específico do sistema como um todo é da ordem de 0,31 \$/kWh, além de possuir um *payback* de 3,5 anos.

Padmavathy *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo para o desempenho energético e de potencial de emissões de gases de efeito estufa para diferentes misturas ecológicas de fluido refrigerantes com baixo GWP (*Global Warming Potential*) como alternativa ao uso do R134a. O estudo teve como objetivo indicar através de simulações e testes experimentais com diferentes misturas de fluidos refrigerantes um fluido equivalente ao R134a que possuísse baixo GWP. Assim, desenvolveram modelagens matemáticas dos balanços de massa e energia para um sistema de refrigeração doméstico avaliando a eficiência energética e exérgica através de simulações de cenários de funcionamento e composição de fluidos refrigerantes diversos, através dos *Softwares* MATLAB E REFPROP. Em paralelo, realizaram

testes experimentais com refrigerador doméstico de 190L a partir de misturas de refrigerantes considerados menos poluentes.

A partir das simulações e avaliações experimentais, os resultados obtidos denotam que entre as misturas R1234ze/R134a observou-se redução do COP em até 20% comparado ao R134a, apesar da melhora da eficiência exergética em até 16% e queda da irreversibilidade geral do sistema em 12,4%. Para além disso, em relação aos índices de TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), o R1234ze/R134a apresentou desempenho melhor que o R134a, podendo ser um bom substituto deste em aplicações de baixa temperatura e sendo capaz de atender as expectativas do Protocolo de Montreal e Quioto referente às emissões de GWP (PADMAVATHY *et al.*, 2021).

Abreu *et al.* (2022) realizaram uma avaliação de um sistema de Chillers para produção de água gelada em um *Shopping Center*, combinando avaliação termoeconômica e termoambiental para estimar os custos energéticos, financeiros e ambientais relacionados ao processo de produção de frio para fins de climatização. Para avaliar a central de água gelada da edificação, utilizaram os dados operacionais da planta durante a etapa de coleta de dados na planta objeto de estudo, como também se basearam nos dados técnicos dos equipamentos constituintes do sistema, onde puderam determinar pela análise exergética através do *software Engineering Equation Solver* (EES) a avaliação exergoeconômica os custos monetários associados à produção de água gelada.

Por outro lado, o estudo termoambiental foi desenvolvido através da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), baseando-se na norma ISO 14040 e utilizando o *software SimaPro*® e o banco de dados *Ecoinvent* para estimar o impacto ambiental associado ao processo produtivo da produção dos equipamentos do sistema até seu descarte. O estudo trouxe como resultado os quantitativos relativos aos custos energéticos, financeiros e ambientais devidos a atividade, como também apresentou a viabilidade da aplicação combinada da avaliação termoeconômica e ambiental focada em análise de emissão de gases de efeito estufa (GEE) em um caso real de produção e armazenamento de água gelada para fins de condicionamento térmico de uma edificação de grande porte, além de disseminar através dos resultados do estudo a abordagem utilizada como alternativa viável para avaliar outros sistemas de refrigeração (ABREU *et al.*, 2022).

Wenzel e Radgen (2022) efetuaram uma análise multicritério comparando as abordagens dos métodos de avaliação exergéticas e ambientais utilizando torres de resfriamento como objeto de estudo. O trabalho elaborou critérios de comparação sistemáticos adequados ao equipamento e posteriormente usou tais critérios como comparativo entre análise de fluxo de material, análise de energia, inventário e avaliação ciclo de vida (ACV), pegada ambiental, análise exergética, entre outros. Os autores realizaram uma revisão comparada entre os estudos das abordagens baseadas em critérios para métodos de avaliação de energia e ambientais aplicados a sistemas de refrigeração, classificando através de um fluxograma lógico os objetivos, critérios, adequações, conhecimento, exame dos métodos de análise e ponderações necessárias relacionadas ao objeto de estudo e classificando os resultados encontrados.

Através dos critérios relacionados à ACV, Wenzel e Radgen (2022) desenvolveram em seu estudo, um método mais adequado para avaliação energética e ambiental para torres de resfriamento, onde foi observado que a área de aplicação, perspectiva de ciclo de vida quantidades físicas inventariadas, categorias de impacto, análise de eficiência são principais fatores que influenciam fortemente na aplicação das metodologias de avaliação energética e ambiental. Como resultado principal, o estudo mostrou que a avaliação multicritério, combinando sistematicamente os métodos de avaliação energética e ambiental, levando em consideração os objetivos específicos de cada caso podem ser utilizados e, conseqüentemente, para o estudo de caso em questão, os métodos que compreendem a avaliação de fluxos energéticos através da análise exergética, são os mais adequados.

Chen *et al.* (2022) propuseram um método técnico-econômico modificado combinado com avaliação de ciclo de vida (ACV), utilizando como objeto de estudo um sistema de trigerção acionado por um motor de combustão interna acoplado a uma unidade de Ciclo Rankine equipada com um trocador de calor por absorção. Para isso, utilizaram critérios e indicadores de avaliação relacionados a energia/exergia, meio ambiente e economia, uma vez que o método proposto leva em consideração todos estes resultados. A partir daí, desenvolveram modelos térmicos para avaliar a eficiência térmica e exergética do sistema em sua totalidade, como também seus componentes em separado. Já para quantificar o desempenho ambiental do sistema, usaram o método de avaliação do berço ao túmulo para quantificar as contribuições relacionadas às emissões de gases de efeito estufa (GEE) devidas a matéria-prima, construção dos componentes e sistema, operação, reciclagem do material após o fim da vida útil, transporte e consumo de combustíveis.

Também utilizaram o método de emissões equivalentes para quantificar o impacto relacionado às emissões de poluentes no meio ambiente relativo à operação do sistema para cada tipo de combustível analisado. Já para a avaliação tecno-econômica, fizeram o uso da metodologia convencional combinando o custo equivalente de emissão oriundo da ACV. Os resultados mostraram através da análise detalhada do sistema, que a etapa de operação deste é a responsável pelo maior consumo de combustível. Além disso, constataram também que o custo específico da eletricidade gerada por este sistema é o menor, 0,145 \$/kWh, enquanto o custo referente a produção de frio é o maior, 0,663 \$/kWh, e que o custo da produção de energia através do ORC é menor do que o do ICE. Assim, a partir dos resultados alcançados o método proposto para avaliar este sistema energético é viável, se apresentando como uma ferramenta eficaz para avaliar sistemas similares, de modo a contribuir com o consumo racional da energia concomitante com menores impactos ambientais e custos econômicos (CHEN *et al.*,2022).

Finalmente, a partir da análise dos artigos verificou-se que as discussões se concentram na avaliação exergética como análise inicial para investigações mais detalhadas do ponto de vista termodinâmico, principalmente com a combinação de critérios ambientais. Reconhecendo que a sustentabilidade é um termo que engloba aspectos sociais, econômicos e ambientais, a maioria das ferramentas para quantificar a sustentabilidade envolve indicadores baseados em fluxos de energia. Sendo assim, o potencial da combinação da análise exergética e de ciclo de vida no tratamento de questões de sustentabilidade e na solução de problemas ambientais é considerável.

4 CONCLUSÃO

A partir da análise dos artigos observou-se com a revisão sistemática que as discussões atuais se concentram na análise exergética como ferramenta de partida para investigações exergo-ambiental e exergoeconômicas de sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento. Os trabalhos identificados na RSL abordaram tanto o uso de métodos consagrados de avaliação termoeconômica e ambiental através da análise exergética, combinação de metodologias de avaliação e até mesmo a elaboração de métodos derivados dos métodos tradicionais.

A análise dos estudos identificados mostrou uma tendência para pesquisas relacionadas a aplicação de métodos de avaliação exergoeconômicos e ambientais modificados para melhor explorar variáveis e especificidades dos sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento. Contribuindo com maior assertividade nas avaliações se comparados aos métodos tradicionais, mostrando assim a versatilidade e importância da combinação/modificação das metodologias de avaliação como meio para obter resultados de eficiência térmica, econômica e ambiental mais precisos.

A contribuição deste trabalho foi demonstrar através dos estudos identificados os desdobramentos das pesquisas atuais relacionadas à aplicação das metodologias de avaliação termoambientais e termoeconômicas para sistemas térmicos, em especial para a refrigeração industrial. Demonstrando assim a importância da temática como parte dos esforços para o uso racional da energia, aumento de eficiência térmica, mitigação e/ou racionalização de impactos ambientais e econômicos associados à operação destes sistemas.

Dessa forma, os estudos retornados e que foram selecionados para análise destacam a importância de direcionar maiores investigações para a temática da análise exergética aliada as avaliações termoeconômicas e ambientais como ferramenta de diagnóstico de sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento, objetivando aumento de eficiência energética, econômica e ambiental.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das bolsas de produtividade em pesquisa 309452/2021-0 308753/2021-6.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. P. *et al.* **Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall.** International Journal of Refrigeration, volume 134, 2022, Pages 304-311, ISSN 0140-7007. doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.011.

AGUINIS, H.; RAMANI, R. S.; ALABDULJADER, N. **What You See Is What You Get? Enhancing Methodological Transparency in Management Research.** Academy of Management Annals, 12(1), 83–110, 2018. doi:10.5465/annals.2016.0011.

ALROBAIAN, A. A. **Impact of optimal sizing and integration of thermal energy storage in solar assisted energy systems.** Renewable Energy, Elsevier, vol. 211(C), pages 761-771, 2023. doi: 10.1016/j.renene.2023.05.010.

ALSAMAN, A.S. **Hybrid Solar-Driven Desalination/Cooling Systems: Current Situation and Future Trend.** Energies. 15(21):8099, 2022. doi: doi.org/10.3390/en15218099.

ANTOINE. P. *et al.* **Thermodynamic performance's analysis of a cold production by hybrid compressor-based thermochemical sorption processes using ammoniated salts.** Energy Conversion and Management, volume 267, ISSN 0196-8904, 2022. doi: doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115931.

BRERETON, *et al.* **Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain.** Journal of Systems and Software, 80(4), 571–583, 2007. doi: 10.1016/j.jss.2006.07.009.

CATRINI *et al.* **An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoeconomics: Application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant.** Energy, 160, 72–86, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.223.

CHEN, Y. *et al.* **Techno-economic cost assessment of a combined cooling heating and power system coupled to organic Rankine cycle with life cycle method.** Energy, 239, 121939, 2022. doi: 10.1016/j.energy.2021.121939.

CHEN *et al.* **Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump.** *Energy*, 230, 120717, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120717.

COLAKOGLU, M.; DURMAYAZ, A. **Energy, exergy, economic and emission saving analysis and multiobjective optimization of a new multi-generation system based on a solar tower with triple combined power cycle.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, volume 52, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102289>.

FU, C.; SHEN, Q.; WU, T. **Exergo-economic comparisons of solar cooling systems coupled to series/parallel absorption chiller types considering the lowest heat transfer area.** *Case Studies in Thermal Engineering*, volume 39, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102456>.

IBRAHIM, T. K. *et al.* **A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants.** *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, Volume 90, Pages 835-850, ISSN 1364-0321, 2018. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.072.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Undertaking Systematic Review.** Joint Technical Report, Computer Science Department, Keele University and ICT National Australia, 2004.

LIU, X. *et al.* **Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of an integrated process combining CO₂ capture and storage, an organic Rankine cycle and an absorption refrigeration cycle.** *Energy Conversion and Management*, volume 210, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112738>.

MARQUES *et al.* **Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system.** *Energy*, 216, 119310, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2020.119310.

MONTAZERINEJAD, H.; AHMADI, P.; MONTAZERINEJAD, Z. **Advanced Exergy, Exergo-economic and Exergo-environmental analyses of a Solar based Trigeneration Energy System.** *Applied Thermal Engineering*, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.

MOUSAVI, S. A.; MEHRPOOYA. **A comprehensive exergy-based evaluation on cascade absorption-compression refrigeration system for low temperature applications - exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessments.** *Journal of Cleaner Production*, 246, 119005, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119005.

PADMAVATHY *et al.* **Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications.** *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. doi.org/10.1007/s11356-021-15875-2.

RANDAZZO, T.; CIAN, E.; MISTRY, M. N. **Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries,** *Economic Modelling*, volume 90, 2020. doi: doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001.

SADI, M.; ARABKOOHSAR, A. **Techno-economic analysis of off-grid solar-driven cold storage systems for preventing the waste of agricultural products in hot and humid**

climates. Journal of Cleaner Production, volume 275, 2020. doi:
doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124143.

SAINI, S. K. *et al.* **Comparative study of Exergetic and Economic analysis of Multi-evaporator NH₃ and NH₃-CO₂ CRS for a Seafood Processing Plant.** International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 2130, 2021.
<https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2130>.

TEREHOVICS, E. *et al.* **Analysis of fish refrigeration electricity consumption, Energy Procedia.** volume 147, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.084>.

WANG *et al.* **Environmental impact assessment of office building heating and cooling sources: A life cycle approach.** Journal of Cleaner Production, 121140, 2020. doi:
10.1016/j.jclepro.2020.121140.

WENZEL, P. M.; PETER, R. **Multi-Criteria Comparison of Energy and Environmental Assessment Approaches for the Example of Cooling Towers.** Applied System Innovation, n. 5, 89, 2022. doi.org/10.3390/asi5050089.

ZHU, Y. D. *et al.* **Thermodynamic analysis of a novel multi-target-temperature cascade cycle for refrigeration.** Energy Conversion and Management, volume 243, 2021. doi:
doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114380.

WU, W. *et al.* **Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment.** Applied Energy, volume 254, 2019. doi:
doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113586.