

## **ANÁLISE EXERGÉTICA APLICADA A SISTEMAS DE COGERAÇÃO: UMA ESTRATÉGIA PARA SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA**

**MARCOS ANTÔNIO**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

**CARLOS ANTÔNIO CABRAL DOS SANTOS**

**MONICA CARVALHO**

**ALEXANDRE MAGNO VIEIRA GONÇALVES DE BRITO**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

### **Introdução**

O crescimento populacional em conjunto com o desenvolvimento econômico e tecnológico, vem contribuindo ao longo dos anos, de forma sucessiva, para o aumento do consumo de energia elétrica para suprir as demandas da sociedade como um todo (IBRAHIM et al., 2018). Segundo Caglayan e Caliskan (2022) nas mais diversas aplicações industriais, considera-se importante a aplicação da análise de exergia em sistemas de cogeração e seus processos, na busca de condições energéticas, econômicas e ambientais sustentáveis para operações produtivas.

### **Problema de Pesquisa e Objetivo**

O objetivo deste estudo é realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para compreender o estado da arte quanto às discussões mais recentes acerca da análise exérgica aplicada a sistemas de cogeração para refrigeração industrial. Assim, a RSL visou mapear os estudos primários que possuam relação com a seguinte questão de pesquisa: Qual o estado da arte sobre a aplicação da análise exérgica para a refrigeração industrial no período de 2017 a 2022?

### **Fundamentação Teórica**

De acordo com Polyvianchuk et al., 2023, observam-se implicações relativas aos impactos ambientais associados a dependência por combustíveis fósseis como um desafio mundial a ser mitigado. Nesse sentido, a transição energética tem proporcionado soluções tecnológicas aplicadas ao uso eficiente dos recursos energéticos, de modo a propiciar condições de utilização eficiente e sustentável da energia, com impactos ambientais mínimos (CATRINI et al., 2018). Para tanto, o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de cogeração se apresenta como ferramenta importante neste novo cenário.

### **Metodologia**

Para agregar os estudos primários deve-se estabelecer um protocolo para o processo de revisão sistemática, assim para o presente estudo utilizou-se o estabelecido por Kitchenham (2004). Assim, definiu-se como panorama de análise, os estudos que foram realizados no período de 2017 a 2022 visando mapear as principais discussões a respeito da análise exérgica aplicada a sistemas de cogeração para geração de energia elétrica, aquecimento e refrigeração industrial.

### **Análise dos Resultados**

Dentre as áreas de concentração dos estudos, a vertente relacionada a avaliação da operação de sistemas de cogeração esteve presente em 50% dos trabalhos identificados, seguido dos estudos que tratavam de análises a respeito do uso de diferentes fluidos refrigerantes, 30% e 20% de trabalhos relacionados a estudos comparativos e de proposição de novas configurações de sistemas de cogeração. Através dos estudos identificados nesta RSL, as discussões se concentraram na melhoria da operação, troca de componentes de baixa eficiência e adoção de fluidos refrigerantes mais eficientes e sustentáveis.

### **Conclusão**

Assim, os estudos identificados nesta RSL, apontam a diversidade de áreas de investigação dentro do tema principal, evidenciando as potencialidades da metodologia de avaliação exérgica aplicada a sistemas de cogeração, de forma a elevar o potencial de geração de energia elétrica, calor e refrigeração através das fontes energéticas disponíveis, e promover, através do desenvolvimento tecnológico, processos de conversão de energia mais limpos e sustentáveis e economicamente viáveis.

### **Referências Bibliográficas**

CAGLAYAN, H.; CALISKAN, H. Assessment of a cogeneration system for ceramic industry by using various exergy based economic approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, p. 112728, 2022. KITCHENHAM, B. Procedures for Undertaking Systematic Review. Computer Science Department. Keele University and ICT National Australia, 2004. MARQUES, A. S. et al. Exergoeconomic Assessment of a Compact ElectricityCooling Cogeneration Unit. *Energies*, 13(20), 5417, 2020. doi:10.3390/en13205417.

### **Palavras Chave**

Análise exérgica, Cogeração, Sustentabilidade energética

### **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.

# ANÁLISE EXERGÉTICA APLICADA A SISTEMAS DE COGERAÇÃO: UMA ESTRATÉGIA PARA SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional juntamente com os desenvolvimentos econômicos e tecnológicos, vem contribuindo ao longo dos anos, de forma sucessiva, para o aumento do consumo de energia elétrica para suprir as demandas da sociedade como um todo (IBRAHIM *et al.*, 2018).

Somando a isto, a pandemia da Covid-19 e a instabilidade internacional a respeito da guerra russo-ucraniana, demonstrou mais ainda a dependência e aumento do uso de fontes energéticas não renováveis pelos países, tendo essa conjuntura pressionado suas matrizes energéticas para atenderem as demandas energéticas de suas populações e parques industriais (ZAKERI *et al.*, 2022).

Por conseguinte, observam-se implicações relativas aos impactos ambientais associados a grande dependência de combustíveis fósseis, que se apresentam como um desafio mundial a ser mitigado (POLYVIANCHUK *et al.*, 2023). Nesse sentido, a transição energética tem proporcionado soluções técnicas para melhoria tecnológicas aplicadas ao uso eficiente dos recursos energéticos, de modo a propiciar condições de utilização eficiente e sustentável da energia, com impactos ambientais mínimos (CATRINI *et al.*, 2018). Para tanto, o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas para conversão de calor, energia elétrica e refrigeração estão dentre os que têm se destacado (MOGHIMI *et al.*, 2018).

Best e Rivera (2015) destacam que nas últimas décadas a escassez de combustíveis fósseis e o impacto ocasionado ao meio ambiente vem levando os pesquisadores a investigarem outros métodos de conversão e aproveitamento de energia eficientes e ecologicamente sustentáveis.

Assim, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com sistemas de cogeração e isso decorre em virtude de suas características favoráveis a elevada performance termodinâmica, menor emissão de gases de efeito estufa, bem como por seu baixo custo para a geração de energia térmica e elétrica (CATALANO *et al.*, 2020).

Segundo Caglayan e Caliskan (2022) nas mais diversas aplicações industriais, considera-se importante a aplicação da análise de exergia de sistemas e seus processos, na busca de condições energéticas, econômicas e ambientais mais eficientes para operações produtivas. Sendo assim, uma ferramenta termodinâmica que pode ser utilizada para avaliar o desempenho de ciclos de refrigeração determinando a magnitude e a localização das irreversibilidades de processos, perdas de qualidade energética, possibilitando o estudo das mudanças de variáveis operacionais do processo, visando aumento de eficiência e economia de consumo de energia (PEREIRA *et al.*, 2022).

Deste modo, é perceptível que a análise exergética é vantajosa de se utilizar por viabilizar mais possibilidades em aplicações de pesquisas. Segundo Liu *et al.* (2019), a análise exergética é reconhecida como o método mais eficaz para avaliar a qualidade dos fluxos de energia, os seus processos de conversão e seu uso racional. Para o mesmo autor, os princípios da exergia também podem ser empregados para desenvolver novos métodos que utilizem os recursos energéticos de uma forma mais eficiente.

Com efeito, a cogeração, conhecida também como associação de geração de calor e energia, é a produção concomitante de duas formas de energia, resultado de uma única fonte de combustível. Ademais, a cogeração desempenha um papel significativo,

mantendo as perspectivas de longo prazo nos mercados globais de energia, principalmente devido aos seus inúmeros benefícios operacionais, ambientais e econômicos (MOUSSAWI *et al.*, 2016). Desde a década de 1970, a cogeração tem sido utilizada para melhorar a eficiência dos sistemas de produção, tanto na área industrial, quanto na área de refrigeração (BRANCHINI *et al.*, 2021).

Para tanto, a utilização da energia térmica residual pode ser aplicada em fornecimento de serviços relacionados ao calor, como aquecimento de ambientes de fornecimento de água quente, bem como serviços relacionados com o frio, a exemplo de câmaras frias, sistemas de refrigeração em indústrias automotivas, farmacêuticas, sucroalcooleiras e ambientes domésticos (MAN *et al.*, 2022).

Além disso, ainda há a questão de sustentabilidade envolvida, uma vez que o mundo está cada vez mais atento aos impactos ambientais associados aos processos produtivos. Sendo, portanto, a utilização de cogeração essencial como uma tecnologia eficiente para reduzir a emissão de gases do efeito estufa beneficiando assim o planeta, por isso, é preferível a cogeração por escolher uma energia de fonte limpa (BRITO *et al.*, 2023).

Segundo Peng *et al.*, 2022, a refrigeração industrial, em específico a cadeia do frio, é responsável por demandas energéticas significativas, que conseqüentemente resultam em impactos ambientais consideráveis devido a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Dessa forma, o investimento em fontes de energia renováveis cresceu substancialmente desde o final da década de 1980, o que em conjunto com a crise do petróleo da década de 1970 e a preocupação com as emissões de gases de efeito estufa levaram ao aumento expressivo da exploração de fontes energéticas das matrizes eólica, de biomassa e solar (MORAIS *et al.*, 2020).

Face ao exposto, o objetivo deste estudo é realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para compreender o estado da arte quanto às discussões mais recentes acerca da análise exegética aplicada a sistemas de cogeração para refrigeração industrial. Assim, a RSL visou mapear os estudos primários que possuíam relação com a seguinte questão de pesquisa: Qual o estado da arte sobre a aplicação da análise exergética para a refrigeração industrial no período de 2017 a 2022?

Para tanto, organizou-se este trabalho da seguinte forma: a seção 2 aborda a metodologia contendo critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos estudos. Já a seção 3 traz os principais resultados e discussões dos estudos que foram identificados a partir do protocolo definido neste trabalho. Por último, a seção 4 volta-se para as conclusões da RSL.

## **2 METODOLOGIA**

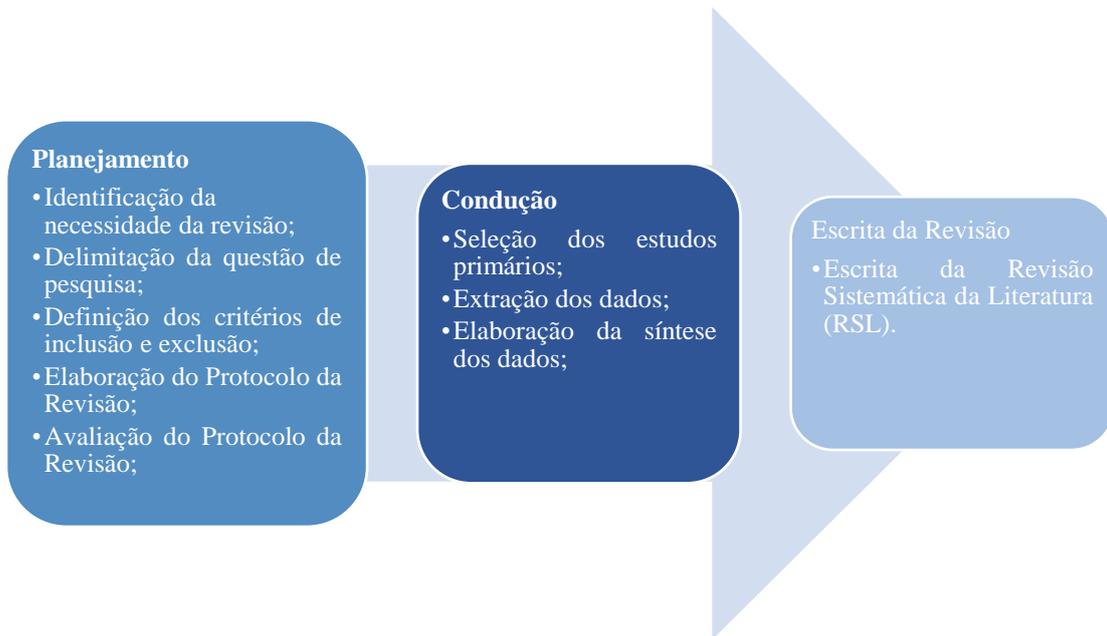
Para agregar os estudos primários deve-se estabelecer um protocolo para o processo de revisão sistemática, assim para o presente estudo utilizou-se o estabelecido por Kitchenham (2004). Assim, definiu-se como panorama de análise, os estudos que foram realizados no período de 2017 a 2022 visando mapear as principais discussões a respeito da análise exergética aplicadas a sistemas de cogeração para geração de energia elétrica, aquecimento e frio industrial.

Para Tranfield, Denyer e Smart (2003), o processo de revisão sistemática é estruturado de acordo com a seguintes etapas: i) planejamento, ii) condução e iii) escrita da revisão e disseminação dos resultados.

De acordo com os autores, este processo deve ser seguido com o maior rigor metodológico possível, de modo a garantir o alinhamento e a qualidade do trabalho de RSL relacionado ao tema que se deseja abordar.

A figura 1 ilustra as etapas que foram seguidas para a realização da RSL:

Figura 1- Etapas para a Revisão Sistemática



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

Para busca de artigos alinhados com o objetivo da pesquisa utilizou-se a base de dados da *Scopus*. A seleção dos artigos foi feita apenas no idioma em inglês por ser o idioma mais utilizado na disseminação de publicações acadêmicas. Dessa forma, foram utilizadas as seguintes *strings* de busca: “*Cogeneration*”, “*Exergy*”, “*Industrial cooling*”, “*Cold chambers*” na base de dados *Scopus* visando a obtenção dos trabalhos mais relevantes para a questão de pesquisa definida para este trabalho. Destaca-se que os artigos que apenas o resumo estava em inglês foram desconsiderados.

Para esta revisão apenas os estudos que estavam disponíveis na íntegra para *download* e de livre acesso foram considerados. Assim, os trabalhos que não se enquadraram neste critério foram retirados da análise. Quanto ao fator temporal foram incluídos somente os artigos publicados no período de 2017 a 2022, a fim de realizar um levantamento sobre o estado da arte acerca das discussões sobre análise exérgica aplicada a sistemas de cogeração para refrigeração industrial.

É válido salientar, que os estudos de teses, dissertações e trabalhos de revisão sistemática não foram objeto de análise neste trabalho, sendo, portanto, analisados apenas artigos.

Portanto, os trabalhos em outros idiomas e que não estavam dentro do critério temporal (2017 a 2022) foram excluídos. Para além disso, os periódicos que possuíam Fator de Impacto (JCR) menor que 1 foram eliminados da análise. Também foi definido como filtro o tipo dos documentos, uma vez que somente os artigos científicos foram incluídos. Desse modo, a pesquisa teve como objetivo mapear os estudos primários que possuíam relação com a questão de pesquisa: Qual o estado da arte sobre a aplicação da análise exérgica em sistemas de cogeração para produção de eletricidade e refrigeração industrial no período de 2017 a 2022?

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca na base de dados definida nesta revisão ocorreu para o período específico de 2017 a 2022 sendo verificado se trabalhos que foram retornados estavam alinhados com a questão de pesquisa.

Após a consulta na base de dados da *Scopus* observou-se a existência de duplicidade entre os trabalhos nessa base de dados *Scopus* e por não haver artigos duplicados não foi feita a exclusão de nenhum estudo. A partir da leitura do título dos trabalhos foram excluídos aqueles que não estavam relacionados com o objetivo da pesquisa.

Posteriormente, passou-se para a leitura do resumo dos estudos a fim de analisar quais possuíam relação com a pergunta de pesquisa. Em seguida, através da leitura da introdução, metodologia e conclusão também se avaliou os trabalhos que foram retornados.

Na base *Scopus*, obteve-se um total de 75 documentos para as *strings* de busca que foram definidas após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Depois, procedeu-se para a realização de refinamento com a leitura dos títulos e passou-se para o total de 34 artigos.

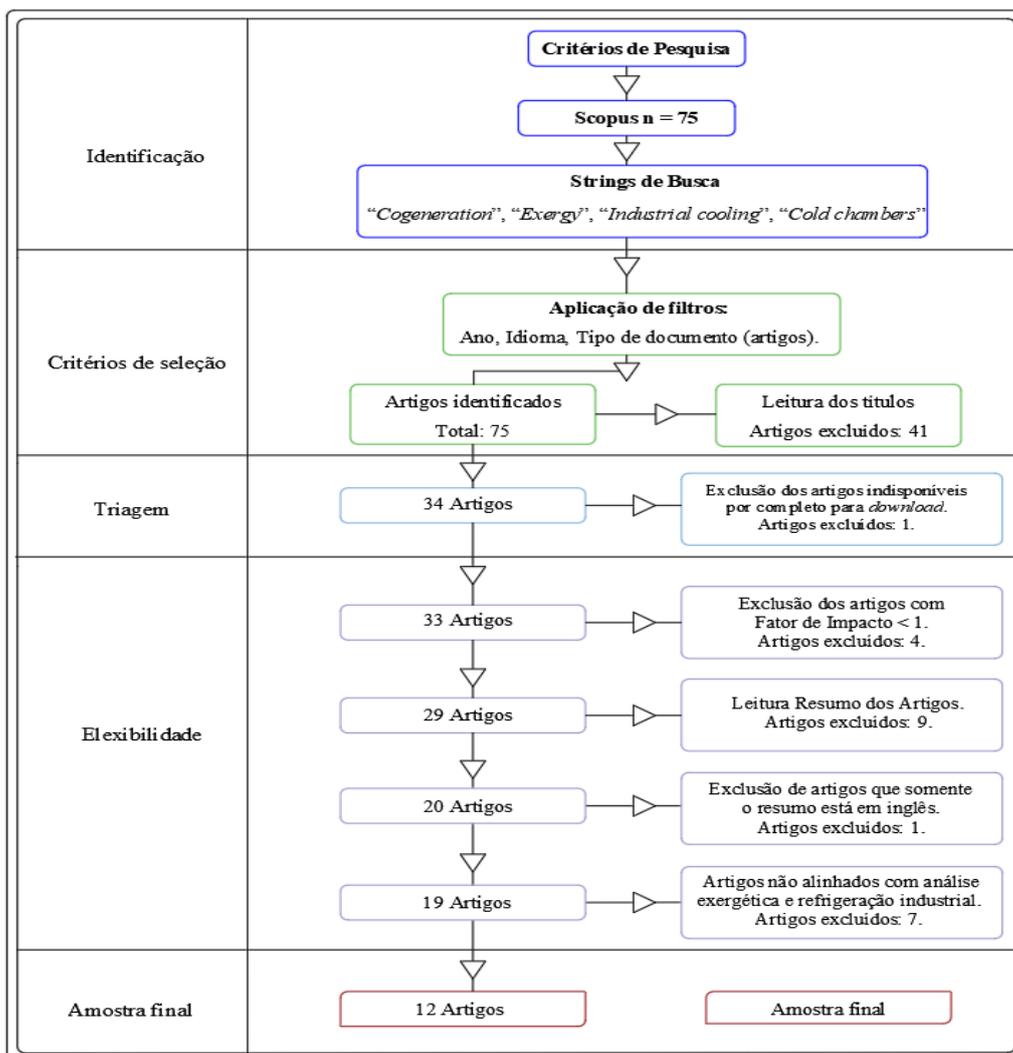
Posteriormente, verificou-se os artigos que estavam disponíveis por completo para *download* e aqueles em que não foi possível obter o acesso foram excluídos gerando-se 33 artigos.

Também foram utilizados como critério de exclusão os artigos que tinham fator de impacto menor que 1 e/ou que eram estudos secundários totalizando 29 artigos primários. Por conseguinte, após a leitura dos resumos destes trabalhos foram excluídos 9 estudos por não estarem alinhados com o objetivo da pesquisa, ficando assim, 20 artigos.

Destaca-se que nesta etapa identificou-se um artigo que somente o seu resumo encontrava-se na língua inglesa e, por isso, foi desconsiderado restando um quantitativo de 19 artigos para leitura da introdução, metodologia e conclusão. Por fim, na última etapa foi feita a leitura na íntegra dos artigos, e somente 12 artigos enquadraram-se nos critérios estabelecidos neste estudo.

O processo extração dos artigos foi estruturado na figura 2.

Figura 2 - Passos para obtenção dos artigos analisados



Fonte: Autores (2023).

### 3.1 Características dos estudos identificados

O Quadro 1 a seguir traz as principais características dos artigos que foram analisados a partir da extração feita na base de dados da *Scopus*.

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

Título	Ano	Journals	Fator de Impacto (JCR)	Autores
1. A cogeneration cycle comparative analysis with parallel arrangement	2022	Alexandria Engineering Journal	6,77	Raveendra Nath R.; Hemachandra Reddy K.; Vijaya Bhaskar Reddy C.
2. Parametric optimization of blowdown operated double-effect vapour absorption refrigeration system	2022	Journal thermal engineering	1,58	Gambhir D.; Sherwani A.F.; Arora A., Ashwni

<b>3. Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of a compound ejector-heat pump with low GWP refrigerants for simultaneous data center cooling and district heating</b>	2022	International Journal of Refrigeration	3,94	Al-Sayyab A.K.S.; Navarro-Esbrí J.; Mota-Babiloni A.
<b>4. Hybrid thermochemical cycles for low-grade heat storage and conversion into cold and/or power</b>	2020	Energy Conversion and Management	9,70	Godefroy A.; Perier-Muzet M.; Neveu P.; Mazet N.;
<b>5. Exergoeconomic assessment of a compact electricity-cooling cogeneration unit</b>	2020	Energies	3,54	Marques A.S.; Carvalho M.; Ochoa Á.A.V.; Souza R.J.; dos Santos C.A.C.
<b>6. Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cooling</b>	2020	Renewable Energy	2,21	Braimakis K.; Magiri-Skouloudi D.; Grimekis D.; Karellas S.;
<b>7. Working-fluid selection and thermoeconomic optimisation of a combined cycle cogeneration dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system for solid oxide fuel cell (SOFC) waste-heat recovery</b>	2020	Applied Energy	11,30	Emadi M.A.; Chitgar N.; Oyewunmi O.A.; Markides C.N.
<b>8. Energy and cost analysis and optimization of a geothermal-based cogeneration cycle using an ammonia-water solution: Thermodynamic and thermoeconomic viewpoints</b>	2020	Sustainability	4,16	Javanshir N.; Seyed Mahmoudi S.M.; Kordlar M.A. Rosen M.A.
<b>9. Thermodynamic analyses on hybrid sorption cycles for low-grade heat storage and cogeneration of power and refrigeration</b>	2019	Applied Energy	11,30	Godefroy A.; Perier-Muzet M.; Mazet N.
<b>10. Analysis on the performance of steam absorption chiller at various operating conditions</b>	2019	International Journal of Engineering and Advanced Technology	1,21	Bahsan R. Sarudin K.A.M., Ali N.M., Mohamad S.N.A.
<b>11. Thermodynamic and exergic modelling of a combined cooling, heating and power system based on solid oxide fuel cell</b>	2019	Journal of Mechanical Engineering and Sciences	2,31	Pirkandi J.; Joharchi A.M.; Ommian M.
<b>12. Analysis on innovative resorption cycle for power and refrigeration cogeneration</b>	2018	Applied Energy	11,30	Jiang L.; Roskilly A.P.; Wang R.Z.; Wang L.W.

Fonte: Autores (2023).

Destaca-se que, dos trabalhos identificados para análise nesta RSL, três estudos foram publicados na mesma revista, que é a “*Applied Energy*”, a qual possui JCR de 11,30, conforme descrito no Quadro 1. No que diz respeito a identificação do ano que houve maior publicação destacou-se a maior predominância em 2020 com 5 artigos seguido do ano de 2022 e 2019 com três artigos, 2018 com apenas 1 artigo. Já para o ano de 2021 não foram retornados artigos que envolvessem a temática definida nesta RSL.

Outro ponto a ser destacado é que em todos os 12 estudos há no mínimo três autores ou mais, e em apenas dois estudos se observou repetição de autores entre os estudos analisados.

Assim, compreende-se que não há saturação nas discussões a respeito do tema, abarcando diversos estudos e metodologias relacionadas o uso da análise exergética como ferramenta de avaliação de sistemas de cogeração e suas potencialidades dos pontos de vista energético, econômico e ambiental.

Ademais, constata-se a qualidade dos artigos analisados, pois dos 12 estudos apenas quatro possuem fator de impacto (JCR) menor que três.

É importante observar que dentre os estudos identificados nesta RSL, todos trabalhos utilizaram a metodologia de avaliação exergética como ferramenta para avaliação de desempenho térmico e energético de sistemas de cogeração.

Entre os 12 trabalhos, as discussões estavam concentradas em três vertentes: Avaliações relacionadas a operação de sistemas de cogeração, avaliação de eficiência com diferentes fluidos refrigerantes e comparação e preposição de novos sistemas de cogeração para geração de energia elétrica e refrigeração.

Dentre as áreas de concentração dos estudos, a vertente relacionada a avaliação da operação de sistemas de cogeração esteve presente em 50% dos trabalhos identificados, seguido dos estudos que tratavam de análises a respeito do uso de diferentes fluidos refrigerantes, 30% e 20% de trabalhos relacionados a estudos comparativos e de proposição de novas configurações de sistemas de cogeração.

### **3.2 Apresentação dos estudos identificados na pesquisa**

A seguir, são apresentados, em ordem cronológica, os 12 estudos que foram identificados na pesquisa, enfatizando-se os seus objetivos e principais resultados.

O estudo realizado por Jiang *et al.* (2018) examinou os potenciais de cogeração de energia e refrigeração destacando a importância da exploração deste tema ao proporem um novo tipo de ciclo de cogeração. Para isso, utilizaram água e compostos de amônia para analisar o desempenho de transferência de calor e massa quando a temperatura se encontra na faixa e 200°C a 360°C e adotaram solventes compostos para a realização e análise do ciclo, de modo que, separaram a geração de energia e o desempenho de refrigeração.

A partir daí, destacaram que ao se comparar com outros ciclos de sorção para cogeração de energia e refrigeração em temperaturas com fonte de calor semelhantes, o ciclo de reabsorção proposto apresenta maior eficiência exergética, em torno de 30% maior que a do ciclo de cogeração de sorção água-amônia e duas vezes maior que a de reabsorção básica ciclo de cogeração.

Os autores concluíram que os sistemas de cogeração podem converter distintas formas de energia através de uma fonte primária de energia e se esses sistemas forem bem projetados e operados, propiciam maior produção de energia elétrica, quando em comparação a um sistema de eletricidade e calor, por serem considerados de maior eficiência.

Pirkandi, Joharchi e Ommian (2019) procederam com análises termodinâmicas e exergéticas em um sistema de resfriamento, aquecimento e energia elétrica que inclui uma

célula de combustível de óxido sólido e um resfriador de absorção de brometo de lítio de único efeito. Os resultados evidenciaram que com a elevação da vazão de ar que entra no sistema, a eficiência geral é reduzida e isso acontece devido ao aumento da quantidade de trabalho desempenhado pelo compressor de ar e resfriamento da célula a combustível. Para além disso, também observaram que com o aumento das taxas de fluxo do ar de entrada do sistema, a taxa de destruição de exergia é reduzida e que a taxa de perda de exergia no sistema é elevada.

Bahsan *et. al* (2019) realizaram análise termodinâmica para energia e exergia e, para isso, fizeram o uso do *Steam Absorption Chiller* (SAC), considerado o principal componente da Usina de Cogeração para fornecimento de água gelada utilizando o vapor como entrada do sistema para fins de resfriamento. Assim, utilizaram o SAC na planta de cogeração PJ1, que é um tipo de brometo de lítio/água de duplo efeito, onde monitoraram com base no *Coefficient of performance* (COP), *Exergetic Efficiency* (ECOP) e *Load Factor* (LF) por um período de uma semana.

Destaca-se que através de planilha no programa *Excel* calcularam as destruições de exergia dentro dos sistemas e a perda total de exergia, de forma que diversas condições de operações foram analisadas, bem como a temperatura de entrada do vapor, temperatura de entrada de água gelada e fator de carga. Os resultados demonstraram que a maior destruição de exergia aconteceu no gerador de alta temperatura seguido pelo absorvedor e que o aumento do fator de carga, entrada de vapor e água gelada eleva a temperatura do desempenho do sistema.

Já Godefroy, Perier-Muzet e Mazet (2019) discutem uma lacuna na literatura quanto ao conhecimento acerca de configurações, reagentes e critérios de desempenho para ciclos termoquímicos híbridos para cogeração de energia e refrigeração. Ao analisarem um ciclo de refrigeração por sorção sólido/gás com um ciclo de Rankine fizeram o uso de três formas para acoplamento desses ciclos com o objetivo de desenvolver novos ciclos que possibilitassem a cogeração de energia e refrigeração com reserva de energia intrínseca.

Desse modo, a metodologia utilizada procurou investigar cinco critérios de desempenho relevantes, quais sejam: temperatura necessária da fonte de calor; eficiência energética; eficiência exergetica; taxa de produção de energia; e exergia densidade de armazenamento. Ademais, um enorme conjunto de 103 (cento e três) sais reagentes também foi analisado. Logo, os autores propuseram uma avaliação comparativa detalhadas dos desempenhos para o conjunto de critérios, modos e reagentes com o intuito de identificar como se destacam dentre os vários campos de aplicação.

Javanshir *et al.* (2020) em analisaram um ciclo cogeração para análise termoeconômica. Assim, fizeram o uso da solução de amônia-água como fluido de trabalho e a água quente geotérmica como fonte de calor por meio do ciclo de cogeração de energia elétrica e refrigeração.

Destaca-se que o sistema é uma combinação de um ciclo Kalina modificado (KC) que produz energia e um ciclo de refrigeração por absorção (ARC) que produz resfriamento. Sendo assim, analisaram, do ponto de vista termodinâmico e econômico o sistema utilizando o *software Engineering Equation Solver* (EES). Também realizaram um estudo paramétrico com o intuito de analisar os resultados dos parâmetros de decisão para o desempenho do ciclo.

Os resultados mostraram que comparando o sistema de cogeração proposto com seus subsistemas, que a junção dos dois subsistemas ocasionou reduções no custo unitário de energia mesmo em comparação quando a energia é produzida a partir do Ciclo Kalina de forma individual. Já quanto a análise termoeconômica, observaram maiores valores

totais de taxa de destruição de exergia, bem como taxa de custo total de destruição de exergia.

Emadi *et al.* (2020) também combinam um ciclo de cogeração para fins de geração de eletricidade e refrigeração no qual o ciclo Rankine orgânico (ORC) de duplo efeito é utilizado para recuperar calor residual em um sistema de célula de combustível de óxido sólido equipado a uma turbina a gás (SOFC-GT). Assim, o artigo ao examinar o sistema proposto do ponto de vista energético e exergético, aplica relações econômicas para cada componente do sistema com o objetivo de propiciar uma avaliação econômica global do sistema apresentado.

Ressalta-se que o fluido de trabalho no desempenho do sistema é analisado a partir do uso de uma rede neural artificial e uma abordagem de otimização multiobjetivo. Assim, das 20 combinações diferentes de fluidos, a combinação de R601 (ciclo superior) e etano (ciclo inferior) é sugerida como ótimo pelo método LINMAP em decorrência com a satisfação dos objetivos de otimização e que a análise econômica do sistema SOFC-GT-ORC denota que o custo de produção de um sistema elétrico equivale a US\$ 33,2 por MWh, que é 12,9% e 73,9% menor do que o custo nivelado de eletricidade de sistemas SOFC-GT e SOFC separados, respectivamente.

Braimakis *et al.* (2020) investigaram o uso de biomassa em usinas combinadas de calor e energia (CHP) com aquecimento e resfriamento urbano concentrando a análise no projeto termodinâmico e na observação do desempenho de layouts de usinas de CHP USC movidas a biomassa em grande escala. Assim, o estudo investiga o desempenho do sistema para cobrir as demandas de calor dos processos industriais de alumínio e celulose e papel, simultaneamente com o aquecimento e resfriamento urbano.

Os resultados denotam que as eficiências: elétrica e exérgica das plantas de alumínio/celulose e papel são 43,45; 44,22% e 38,93; 39,62%, nessa ordem. Enquanto para o CHP, ao maximizar o calor as eficiências: elétrica, exérgica elétrica, CHP e exérgica CHP das plantas de alumínio/celulose e papel são 21,81%; 34,32%; 19,54%; 31,70%, 92,50%; 86,76% e 39,43%; 39,01%, por essa ordem.

Marques *et al.* (2020) destacam que após revisões sistemáticas não identificaram sistema compacto de cogeração de eletricidade-resfriamento para avaliação exergoeconômica baseada em *SPecific Exergy COsting* (SPECO). Assim, fazendo o uso da metodologia SPECO realizam uma avaliação exergoeconômica em um sistema compacto de cogeração de eletricidade-resfriamento (motor de combustão interna Otto e um Chiller de absorção de efeito único água-amônia). Os autores dividiram a análise termodinâmica em duas etapas: (i) motor de combustão interna, e (ii) cada componente do sistema de refrigeração por absorção.

Para tanto, os autores enfatizaram que o sistema faz uso dos gases de escape de um motor de combustão interna (ICE) de ciclo Otto de 126 hp para acionar uma unidade de refrigeração de absorção de água e amônia de 5 RT. A destruição de exergia é maior no ICE (67,88%), acompanhado do gerador de vapor (14,46%). Tendo em vista o custo da exergia destruída somada a taxa de custo total do equipamento, os maiores valores são encontrados no ICE, junto do gerador de vapor. Refira-se que com a investigação os autores concluíram sobre a eficácia do método SPECO para identificação de ineficiências de sistemas energéticos e que as avaliações exergoeconômicas podem contribuir para unidades de cogeração de refrigeração de eletricidade com maior eficácia.

Godefroy *et al.* (2020) examinaram ciclos termoquímicos híbridos para armazenamento de calor e cogeração de energia e frio. Para isso, os processos de cálculos de energia foram feitos por meio da utilização do *software* EES. Os ciclos apresentam três características de destaque: i) podem ser acionados por calor de baixo grau, como resíduos industriais de calor, em temperaturas que variam de 100 a 250 °C; ii) são capazes

de armazenarem energia como potencial químico e iii) de converter em frio e/ou energia, proporcionando uma cogeração de energia elétrica e frio com produção de frio predominante ou de geração de energia – a depender do modo de operação. Para isso, projetaram cinco modos de operação para produção de frio predominante e geração de energia.

Ainda segundo os autores, a análise termodinâmica empreendida buscou analisar os desempenhos energéticos e exergéticos, para uma ampla diversidade de sais reativos no sistema termoquímico. Também projetaram sistemas alternativos com as mesmas funções e baseados em sistemas comerciais que foram comparados com ciclos termoquímicos híbridos. Observou-se, após esta comparação, que a densidade de armazenamento de energia é menor para ciclos híbridos. Todavia, a eficiência energética global pode ser maior para os híbridos, sobretudo para os modos de produção frio preponderantes, que pode ser 34% maior do que para o sistema comercial alternativo.

Al-Sayyab, Navarro-Esbrí e Mota-Babiloni (2022) realizaram uma avaliação energética, exergética e ambiental de um novo sistema de ejetor-bomba de calor composto PV/T (térmico fotovoltaico) para resfriamento simultâneo de *data center* com utilização de calor residual para um sistema de aquecimento urbano. Para isso, o estudo comparou onze refrigerantes de menor potencial de aquecimento global (GWP) de distintos grupos de segurança da ASHRAE (R450A, R513A, R515A, R515B, R516A, R152a, R444A, R1234ze(E), R1234yf, R290 e R1243zf) com o hidrofluorcarbono (HFC) R134a.

Os resultados mostraram que para todos os refrigerantes analisados, o novo arranjo do sistema denota melhoria geral no desempenho do sistema. No que tange a análise de energia, o aprimoramento do coeficiente de desempenho de resfriamento (COPC) varia de 15% a 54% em comparação com uma bomba de calor R134a tradicional. Com relação à análise exergética, o R515B apresenta maior eficiência exergética do que todos os refrigerantes analisados.

Gambhir, Sherwani e Arora (2022) analisaram um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito (VARs), impulsionado pelo calor de descarga de uma usina termelétrica de 210 MW localizada em Badarpur, através da metodologia de superfície de resposta (RSM). O método RSM ajuda a desenvolver uma relação entre as variáveis de decisão e a eficiência da segunda lei por meio da equação de regressão polinomial não linear de segunda ordem.

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para identificar as variáveis de decisão que são significativas no desempenho térmico do sistema. Para além disso, realizaram a análise do coeficiente de ligação estrutural (CSB) do evaporador. As variáveis de decisão são as temperaturas do gerador de alta pressão, gerador de baixa pressão, condensador, absorvedor e evaporador.

Os resultados denotaram que a eficiência da segunda lei é influenciada significativamente pela temperatura do absorvedor (valor  $F = 2.049,4$ ), acompanhada pela temperatura do condensador (valor  $F = 1.596,4$ ) e é menos impactada pela temperatura do gerador de alta pressão (valor  $F = 495$ ).

Nath *et al.* (2022) propuseram fluxos paralelo objetivando melhorias nos fluxos de energia e refrigeração. Para análise do ciclo, cinco variáveis-chave foram investigadas: 1) temperatura do vapor úmido; 2) fração de secura do vapor úmido; 3) concentração da solução básica; 4) temperatura de saída do evaporador; e 5) temperatura ambiente da água, as quais tiveram por objetivo compreender dois sistemas de cogeração.

É válido salientar que o modelo proposto pelos autores foi desenvolvido com propriedades amônia-água avaliadas a partir do REFPROP 9.1 e Programação MATLAB. Destaca-se que o ciclo Goswami é uma das soluções para gerar energia elétrica e refrigeração simultaneamente com menos poluição e que os fluxos de energia e

refrigeração são conectados em série, a saída de refrigeração é limitada em um arranjo em série. Os resultados levaram a compreensão de que a geração de energia eleva com o aumento da fração de secura e a queda da concentração da solução básica. Por outro lado, o efeito de refrigeração é elevado a partir da queda da fração de secura e aumento da concentração da solução básica.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo apresentar os resultados obtidos através da realização de uma revisão sistemática da literatura, a fim de identificar os principais estudos realizados e seus desdobramentos a respeito do uso da análise exérgica em sistemas cogeração aplicados a refrigeração industrial no período de 2017 a 2022.

Através dos estudos identificados nesta RSL, observou-se as discussões se concentraram em aspectos relacionados a melhoria da operação, substituição de componentes de baixa eficiência, substituição de fluidos de trabalho e preposição/cominação entre sistemas, de modo a promover maior eficiência energética, térmica, econômica e ambiental.

Assim, os estudos identificados nesta RSL, apontam a diversidade de áreas de investigação dentro do tema principal, evidenciando as potencialidades da metodologia de avaliação exérgica aplicada a sistemas de cogeração, de forma a elevar o potencial de geração de energia elétrica, calor e refrigeração através das fontes energéticas disponíveis, e promover, através do desenvolvimento tecnológico, processos de conversão de energia mais limpos e sustentáveis e economicamente viáveis.

#### 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

AL-SAYYAB, A. K. S.; NAVARRO-ESBRÍ, J.; MOTA-BABILONI, A. **Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of a compound ejector-heat pump with low GWP refrigerants for simultaneous data center cooling and district heating.** International Journal of Refrigeration 133, 61–72, 2022.

BAHSAN, R. *et. al.* **Analysis on the Performance of Steam Absorption Chiller at Various Operating Conditions.** International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). ISSN: 2249 – 8958, Volume-9 Issue-1, October 2019.

BEST, R.; RIVERA, W. **A review of thermal cooling systems.** Appl. Therm. Eng. 2015, 75, 1162–1175. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.08.018.

BRAIMAKIS, K. *et. al.* **Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass-fuelled steam power plants for industrial CHP, district heating and cooling.** Renewable Energy, 2020. S096014812030286X. doi:10.1016/j.renene.2020.02.091.

BRANCHINI, L. *et al.* **Cogeneration supporting the energy transition in the Italian ceramic tile industry.** Sustainability, 2021, 75, 4006-4023. doi:10.3390/buildings12081247.

BRITO *et al.* **Cogeração na indústria cerâmica: uma revisão sistemática sobre a recuperação de calor em fornos cerâmicos e seus benefícios.** Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. 2023.

CAGLAYAN, H.; CALISKAN, H. **Assessment of a cogeneration system for ceramic industry by using various exergy based economic approaches.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 167, p. 112728, 2022.

CATALANO, F. *et al.* **Energetic analysis and optimal design of a CHP plant in a frozen food processing factory through a dynamical simulation model.** Energy Conversion and Management, v. 225, p. 113444, 2020.

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

EMADI, M. A. *et al.* **Working-fluid selection and thermoeconomic optimisation of a combined cycle cogeneration dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system for solid oxide fuel cell (SOFC) waste-heat recovery.** Applied Energy 261, 114384, 2020.

GAMBHIR, D. *et al.* **Parametric optimization of blowdown operated double-effect vapour absorption refrigeration system.** Journal of Thermal Engineering, 2022. DOI: 10.18186/thermal.1067035.

GODEFROY, A.; PERIER-MUZET, M.; MAZET, N. **Thermodynamic analyses on hybrid sorption cycles for low-grade heat storage and cogeneration of power and refrigeration.** Applied Energy, 255, 113751, 2019. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113751.

GODEFROY, A. *et al.* **Hybrid thermochemical cycles for low-grade heat storage and conversion into cold and/or power.** Energy Conversion and Management, 225, 113347, 2020. doi:10.1016/j.enconman.2020.113347.

IBRAHIM, T. K. *et al.* **A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 835–850, jul. 2018.

JAVANSHIR, N. *et al.* **Energy and Cost Analysis and Optimization of a Geothermal-Based Cogeneration Cycle Using an Ammonia-Water Solution: Thermodynamic and Thermo-economic Viewpoints.** Sustainability, 12(2), 484, 2020. doi:10.3390/su12020484.

JIANG, L. *et al.* **Analysis on innovative resorption cycle for power and refrigeration cogeneration.** Applied Energy, 218, 10–21, 2018. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.174.

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

LIU, Z. et al. **Conventional and advanced exergy analysis of a novel transcritical compressed carbon dioxide energy storage system**. *Energy Conversion and Management*, v. 198, p. 111807–111807, 2019.

MAN, S. S. *et. al.* **Policy implications for promoting the adoption of cogeneration systems in the hotel industry: an extension of the technology acceptance mode**. *Buildings*. 2022, 12, 1247-1267.

MARQUES, A. S. *et al.* **Exergoeconomic Assessment of a Compact Electricity-Cooling Cogeneration Unit**. *Energies*, 13(20), 5417, 2020. doi:10.3390/en13205417.

MOGHIMI M. *et. al.* **4E analysis and multi-objective optimization of a CCHP cycle based on gas turbine and ejector refrigeration**. *Appl Therm Eng*, 141: 516-30, 2018.

MORAIS, P. H. S. *et. al.* **Energy, exergetic and economic analyses of a combined solar-biomass-ORC cooling cogeneration systems for a Brazilian small plant**. *Renewable Energy*, 157, 1131-1147, 2020. doi:10.1016/j.renene.2020.04.147

NATH, R. R.; REDDY, K. H.; REDDY, C. V. B. **A cogeneration cycle comparative analysis with parallel arrangement**. *Alexandria Engineering Journal*, 2022. doi:10.1016/j.aej.2021.06.018.

PENG, Z. et al. **Thermo-economic analysis of absorption-compression hybrid cooling systems with parallel subcooling and recooling for small scale low-grade heat source and low temperature application**. *International Journal of Refrigeration*, 2022.

PEREIRA, J. B., **Exergetic analysis in a refrigeration cycle bench by vapor compression**. *Brazilian Journal of Development*. 2022, 8, 56293-56308. doi:10.34117/bjdv8n8-09.

PIRKANDI, J., JOHARCHI, A. M.; OMMIAN, M. **Thermodynamic and exergetic modelling of a combined cooling, heating and power system based on solid oxide fuel cell**. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 13(4), 6088–6111, 2019. <https://doi.org/10.15282/jmes.13.4.2019.23.0479>.

POLYVIANCHUK, A. et al. **The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine**. *Energy*, v. 263, p. 125876, 2023.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review**. *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

ZAKERI, B. et al. **Pandemic, War, and Global Energy Transitions**. *Energies*, v. 15, n. 17, p. 6114, 23, 2022.