Exergia no processo de secagem de materiais cerâmicos: uma revisão bibliográfica

Exergy in the drying process of ceramic materials: a literature review

Juliana Holanda[1]
Baldoino Sonildo da Nóbrega[2]
José Jefferson da Silva Nascimento[3]
Jose Jefferson da Silva Nascimento Filho[4]
Laila Caroline Duarte Nascimento[5]
Flávio Franklin Ferreira de Almeida[6]

RESUMO: Nos últimos anos, ocorreu um crescente interesse na aplicação da análise exergética para otimizar os processos de secagem de materiais cerâmicos. Esse enfoque se baseia no conceito de exergia e tem sido impulsionado pelo aumento dos preços da energia, preocupações ambientais, crescimento populacional, escassez de recursos de combustíveis fósseis e demanda por produtos secos de alta qualidade. A análise exergética proporciona uma abordagem realista ao avaliar as perdas de energia para o ambiente e as irreversibilidades internas do processo de secagem. O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das análises exergéticas dos processos de secagem de materiais cerâmicos. Esta revisão buscou obter uma abordagem geral e abrangente sobre o uso da análise exergética, os avanços e as tendências desta para o setor de secagem de material cerâmico. Estudos indicaram para o desenvolvimento de novos métodos para realizar análises exergéticas mais avançadas e estruturadas.
Palavras-chave: Análise exergética; Secagem; Materiais cerâmicos.

ABSTRACT: In recent years, there has been a growing interest in the application of exergy analysis to optimize the drying processes of ceramic materials. This approach is based on the concept of exergy and has been driven by rising energy prices, environmental concerns, population growth, scarcity of fossil fuel resources and demand for high-quality dry goods. Exergy analysis provides a realistic approach when evaluating energy losses to the environment and internal irreversibilities of the drying process. The present study aimed to carry out a bibliographical review of exergy analyzes of the drying processes of ceramic materials. This review sought to obtain a general and comprehensive approach to the use of exergy analysis, its advances and trends for the ceramic material drying sector. Studies have indicated the development of new methods to perform more advanced and structured exergy analysis.
Keywords: Exergy analysis; Drying; Ceramic materials

DOI: https://doi.org/ 10.61223/coopex.v14i5.501

[1] Instituto Federal da Paraíba, Brasil - E-mail: juliana.correia@ifpb.edu.br
[2] Instituto Federal da Paraíba, Brasil - E-mail: baldoino.nobrega@ifpb.edu.br
[3] Professor Adjunto do Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: jose.jefferson@professor.ufcg.edu.br
[4] Médico, formado pela Famene-Joao Pessoa. E-mail: jefferson_20_2009@hotmail.com.
[5] Estudante do 9º Período de Medicina da Faculdade de Medicina de Olinda –FMO. E-mail: laila.duarte01@hotmail.com
[6] Mestre em Economia da Empresa pela Universidade Federal da Paraíba-UFPB (2004). Graduado em Ciências Econômicas - (2001). Membro do Grupo de pesquisa: "Agrocomputação" da UFCG, membro do Grupo de pesquisa "Abelhas no Semiárido", e do Grupo de pesquisa: "Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas", ambos da Universidade Federal de Campina Grande -UFCG.

INTRODUÇÃO

A secagem é um processo em que ocorrem simultaneamente a transferência de calor e massa (umidade). Ela pode ocorrer de maneira natural, quando o produto é exposto ao sol e ao vento, de maneira artificial, através de secadores ou de forma mista. O processo de secagem representa uma etapa essencial na produção de alguns materiais, sendo aplicado em vários seguimentos industriais, entre eles, materiais cerâmicos.

Na produção de cerâmicas para revestimentos, telhas, tijolos, porcelanas e outros produtos, a secagem desempenha um papel fundamental, pois consome uma quantidade significativa de energia, assim como libera óxidos de carbono para o meio ambiente (MUJUMDAR, 2007). Dessa forma, torna-se essencial a busca por meios mais eficientes de realizar esse processo de maneira sustentável (DINCE, 2002). Nesse contexto, a análise exergética surge como uma ferramenta poderosa para avaliar e otimizar o desempenho energético dos sistemas de secagem.

A análise exergética se baseia no conceito de exergia, que é uma medida termodinâmica da qualidade da energia. Ao contrário da energia total, a exergia leva em conta tanto a quantidade quanto a qualidade da energia útil em um sistema (Çengel & Boles, 2013). Ao aplicar a análise exergética em processos de secagem, é possível identificar as principais fontes de perdas e ineficiências energéticas, além de quantificar a eficiência do processo de secagem em termos exergéticos.

Em processos de secagem de materiais cerâmicos, a análise exergética, envolve a avaliação dos diferentes componentes do sistema, como o fluxo de ar, a fonte de calor e o material a ser seco. Com base nos princípios da termodinâmica, é possível determinar as taxas de exergia destruída em cada etapa do processo e identificar oportunidades de melhoria (Çengel & Boles, 2013). Além da identificação de ineficiências energéticas, essa análise permite a comparação de diferentes estratégias e tecnologias de secagem. Por exemplo, é possível avaliar o desempenho exergético de diferentes métodos de aquecimento, como a secagem convencional por ar quente versus secagem por micro-ondas, e identificar qual deles apresenta maior eficiência energética.

A integração energética entre processos pode trazer benefícios econômicos consideráveis. De acordo com Aghbashlo et al. (2013) ela consiste em identificar pontos de oportunidade em sistemas de processos, com processos interdependentes, aproveitando o calor residual de um efeito e transferindo-o para outro. Essa prática pode contribuir para uma redução significativa de emissões e aumentar a eficiência energética do processo.

Diante disto, e considerando a importância da temática, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das análises exergéticas dos processos de secagem de materiais cerâmicos. Essa revisão permitirá a compilação e análise crítica dos artigos científicos e estudos existentes, fornecendo uma visão geral dos avanços recentes, metodologias empregadas, resultados obtidos. Ao realizar essa revisão bibliográfica, será possível identificar as principais tendências, desafios e oportunidades relacionadas à análise exergética em processos de secagem de materiais cerâmicos, além de fornecer uma base sólida para futuros estudos e investigações nessa área.

REFERÊNCIAL TEÓRICO

A termodinâmica é a ciência que impacta diretamente na nossa vida cotidiana e no desenvolvimento tecnológico da sociedade. Ela é o ramo da física que estuda as relações entre energia, o trabalho realizado e o calor trocado entre um sistema e sua vizinhança. É regida por suas leis básicas, uma delas é a primeira lei que se baseia no princípio da conservação de energia, indicando que a energia é sempre conservada, ou seja, não pode ser criada ou destruída. (Çengel & Boles, 2013).

Enquanto a primeira lei fala sobre conservação, a segunda lei vai tratar da qualidade da energia. Mais especificamente, ela está interessada na degradação energética que advém durante um processo. Esse interesse se deve ao fato que em processos reais ocorrem na direção da diminuição da qualidade da energia. Em resumo, a segunda lei está preocupada com a geração de entropia e com as perdas de oportunidade de energia para realizar trabalho.

Nas últimas décadas, há uma preocupação sobre a quantificação do desempenho de determinado processo ou equipamento, incluindo suas entradas e desperdícios. É

importante ressaltar que a análise de energia não fornece informações sobre os aspectos de irreversibilidade dos processos termodinâmicos, sendo assim, essa análise é inútil para fins de projeto ou otimização. Devido a essas deficiências da análise de energia, a exergia surgiu para fornecer uma visão mais realista dos sistemas e processos.

Exergia (X) é uma propriedade do sistema que quantifica seu potencial de uso, isto é, dado um sistema em determinado estado, a exergia nos diz quanto de trabalho útil pode ser obtido. A energia nunca é destruída num processo, ela muda de uma forma para outra. Em contrapartida, a exergia é destruída em processos irreversíveis em virtude do aumento da entropia. (Çengel & Boles, 2013)

Algebricamente, temos para sistema fechado:

$$X = (U - U_0) + P(V - V_0) - T_0(S - S_0) + EP + EC \qquad 1$$

Em que, U é a energia interna do sistema, P é a pressão, V o volume, S é a entropia, EP é a energia potencial, EC energia cinética e H entalpia. Para um fluxo de exergia, temos:

$$X = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + EP + EC \qquad 2$$

O balanço exergético é uma ferramenta utilizada para quantificar a energia útil disponível em um sistema, levando em conta não apenas a energia utilizada, mas também a energia que é perdida ou não aproveitada. Esse tipo de análise é especialmente útil em sistemas complexos, como nos processos de secagem, onde é necessário entender as perdas de energia em cada etapa do processo.

Em um secador de materiais cerâmicos, a energia é utilizada para aquecer o ar que circula pelo equipamento e remover a umidade do produto. Quanto mais eficiente for o processo de secagem, maior será a exergia do sistema (AGHBASHLO *et al.* 2013). Para melhorar a exergia do secador, é importante otimizar o processo de circulação do ar, para aumentar a transferência de calor e evitar a perda de energia. Consequentemente gerar uma redução de consumo de energia e impactar de maneira significativa a economia e o meio ambiente.

Na prática, o balanço exergético é calculado a partir da diferença entre a energia útil e a energia perdida em cada etapa do processo (equação 3).

$$X_{entrada} - X_{saída} - X_{destruída} = \Delta X_{sistema} \qquad 3$$

Isso envolve a identificação e a quantificação de todas as formas de energia que entram e saem do sistema, incluindo energia térmica, elétrica, cinética e potencial. Ao aplicar o balanço exergético os engenheiros e cientistas podem identificar as áreas do

processo em que a eficiência pode ser melhorada e reduzir as perdas de energia, tornando o projeto mais eficiente e sustentável.

METODOLOGIA

Para realização deste estudo, o primeiro passo consistiu em definir os critérios de pesquisa e estabelecer as palavras-chave relevantes para a revisão bibliográfica. Esses critérios incluíram o período de publicação dos artigos e as bases de dados a serem consultadas. As palavras-chave foram escolhidas cuidadosamente para abranger os principais conceitos relacionados à análise exergética em processos de secagem de materiais cerâmicos.

Após a definição dos critérios de pesquisa, foi realizada a busca nas bases de dados selecionadas, como Periódicos Capes, Scielo, Google Scholar e Scopus. Foi realizado uma busca sistemática e abrangente para garantir a inclusão de estudos relevantes. Além disso, foram consultadas listas de referências de artigos-chave e periódicos especializados para identificar estudos adicionais que possam ter sido omitidos nas buscas iniciais.

Em seguida, os artigos selecionados foram avaliados quanto à sua relevância para a análise exergética em processos de secagem de materiais cerâmicos. Foram realizadas leituras de títulos, objetivos e resumos para determinar se os estudos atendem aos critérios de inclusão pré-definidos. Os artigos relevantes foram então selecionados para a leitura completa, enquanto aqueles que não atendem aos critérios foram excluídos.

A partir da leitura completa dos artigos selecionados, foram extraídas informações-chave, como objetivos do estudo, metodologias empregadas, resultados obtidos e principais conclusões. Essas informações foram organizadas e sintetizadas de forma a proporcionar uma visão geral e abrangente dos avanços, tendências na análise exergética em processos de secagem de materiais cerâmicos.

ANÁLISE EXERGÉTICA EM PROCESSOS DE SECAGEM DE MATERIAIS CERÂMICOS

Um dos principais objetivos da análise exergética é determinar a causa e estimar quantitativamente a extensão de um defeito de processo térmico ou químico. A análise exergética permite uma melhor compreensão do efeito dos fenômenos termodinâmicos na eficiência de um processo, compara a importância de diferentes fatores termodinâmicos e determina o meio mais eficaz de melhorar o processo em questão. Uma compreensão abrangente da exergia e de seu potencial pode contribuir com a eficiência e o impacto ambiental dos sistemas de secagem. Por exemplo, a indústria de cerâmica, consome uma grande quantidade de energia nos processos de secagem. Portanto, buscar meios que tragam melhorias para utilizar o mínimo de energia na retirada do máximo de umidade do produto, poderão trazer resultados significativos, eficientes e sobretudo sustentável (DINCE, 2002).

Utlu, Hepbasli, Turan (2011), realizaram um estudo sobre a eficiência energética e exergética de um processo de secagem de material cerâmico. Os autores avaliaram um sistema de secagem nas três etapas, buscando analisar as perdas de calor e as eficiências de utilização de energia e exergia para cada componente do sistema, assim como, para todo o sistema. A análise foi baseada em dados operacionais reais obtidos durante um período de 12 meses. Os autores identificaram que ao longo de um ano, ocorreram variações na eficiência energética obtendo os seguintes resultados: spray dryer (58,48 e 65,50%), secador vertical (42,44 e 50,87%) e o forno (30,44 e 36,99%). Os valores da eficiência exergética ficaram na faixa de 44,85 - 65,16%, 34,92 - 45,42% e 12,73 - 16,41%, respectivamente. Observaram que as perdas de calor, no segundo e no terceiro estágio do processo, mostraram um problema com a eficiência do sistema. O estudo indicou que todo o processo tinha um grande potencial para aumentar a eficiência exergética, porém necessitaria de um esforço consciente e planejado para construção de uma estrutura de gerenciamento de energia com o objetivo de melhorar a utilização da exergia no sistema avaliado.

Caglayan, Caliskan (2022 a) realizaram análises exergoambientais baseadas em avaliação do ciclo de vida de um sistema de cogeração usado em indústrias de cerâmica. O estudo examinou o impacto ambiental dos componentes do sistema, além das análises

energéticas e exergéticas. Os resultados mostraram que a abordagem baseada em componentes é lógica para reduzir a destruição exergética, especialmente nos componentes onde ocorrem reações químicas. A análise exergética permitiu avaliar a qualidade da energia utilizada no sistema e em seguida foi possível identificar os componentes que mais contribuem para a destruição exergética. A partir desses resultados foi possível propor soluções para melhorar o desempenho do sistema e reduzir seu impacto ambiental. Além disso, o estudo também revelou os efeitos ambientais dos componentes do sistema de cogeração aplicado à indústria cerâmica. Os autores também identificaram que muitos sistemas de recuperação de calor e economia de energia são propostos para produção cerâmica, mas um dos mais aplicados é o sistema de cogeração baseado em turbina a gás.

Melchíades (2012), propõe a utilização do forno a gás. Ela sugere no estudo a avaliação de desempenho de um forno secador a gás, propondo uma modelagem matemática para analisar o desempenho energético e exergético do forno em várias condições de operação. O estudo conclui que há uma diminuição do rendimento do forno à medida que a temperatura dos gases aumenta. Também se observa que em dias mais quentes o rendimento energético é maior e a eficiência exergética do forno apresentou resultados semelhantes à eficiência energética.

Utlu e Hepbaşlı (2014) investigaram as relações entre as perdas termodinâmicas e os custos de capital para um sistema de secagem de cerâmica, com base em dados operacionais reais, através de uma análise exergoeconômica. Com essa análise foi possível mostrar as perdas energéticas, e exergéticas e os custos de capital para o processo de secagem deste setor. Em termos de eficiências exergéticas, o estudo apontou que as eficiências exergéticas globais do processo de secagem cerâmica variaram entre 11,99% e 64,10%. A relação entre a taxa de perda termodinâmica e os valores de custo de capital variou no intervalo de 53,38 à 135,83 MW/$. Os autores identificaram que as maiores perdas de calor e destruição exergética ocorrem no processo do forno, indicando que seria nesse momento que poderia ocorrer uma melhora do sistema. Identificaram também que essas perdas estão ocorrendo devido ao desgaste do isolamento interno e externo do forno.

Caglayan, Caliskan (2022-b) realizaram um estudo com intuito de avaliar o desempenho econômico, baseado em exergia, de um sistema de cogeração (COGEN) para uma planta de revestimentos cerâmicos e seus componentes. Para isso, utilizaram duas diferentes ferramentas de análise econômica baseadas em exergia, conhecidas como

SPECO (custo específico de exergia) e EXCEM (Exergy-Cost-Energy-Mass). Também investigaram os efeitos de várias temperaturas ambientais em análises econômicas baseadas em exergia. O estudo revelou que as irreversibilidades e, consequentemente, os custos de destruição de exergia, no secador de revestimento de parede (WD), na câmara de combustão (CC) e no secador de telha moída (GD) são altas. Sugerindo que, baseada na exergia, as avaliações econômicas dos componentes devem ser otimizadas. Os autores identificaram a partir do método SPECO que o menor fator econômico está na câmara de combustão. Já no método EXCEM os parâmetros exergéticos dos componentes são diretamente proporcionais às taxas de perda e destruição de exergia, enquanto são inversamente proporcionais às horas de trabalho em um ano e ao custo de capital. Dessa forma os autores sugerem que a planta seja redesenhada.

Em 2021, Caglayan e Caliskan, realizaram análises exergéticas convencionais e avançadas, assim como uma otimização de um sistema de cogeração (COGEN) para uma fábrica de materiais cerâmicos. Definiram novos parâmetros exergéticos para um sistema de cogeração, além de analisarem os efeitos das temperaturas ambientais sobre a eficiência do sistema e dos componentes. Observaram que a eficiência exergética máxima do COGEN é encontrada como 29,85% à temperatura ambiente de 30 °C, enquanto a taxa de destruição de exergia máxima é calculada como 17810,61 kW à temperatura ambiente de 30 °C. Os resultados da análise exergética avançada, mostraram que a câmara de combustão pode não ser o único local a ser observado para a destruição exergética, indicando que a taxa de destruição de exergia pode estar relacionada com razões internas (endógenas) ou com outros componentes (exógenos).

Caglayan, Şöhret, Caliskan (2018), apresentaram uma análise termoecologica de um secador por pulverização utilizado na indústria de material cerâmico. Avaliaram os resultados a partir de uma análise da primeira lei e segunda lei da termodinâmica. O estudo considerou a energia e exergia de uma substância que entra e sai do secador, assim como suas perdas e destruição exergética. A partir dessas informações determinaram a função e o coeficiente desempenho ecológico. Observaram que a redução da destruição da exergia no sistema pode afetar positivamente os parâmetros termoecológicos do secador por pulverização.

Caglayan, Caliskan (2017), avaliaram a sustentabilidade e os efeitos ambientais na eficiência exergética dos sistemas de troca de calor para secadores por pulverização, além de analisar o sistema sob várias temperaturas ambientais de referência. Identificaram

que o aumento da eficiência tem implicações de sustentabilidade que prolongam a vida útil dos recursos, logo obtém-se como resultado maior aproveitamento de materiais e mão de obra. Verificaram que as taxas mínimas de destruição da exergia foram observadas na temperatura de 0 °C e as máximas na temperatura de 20 °C. Identificaram também que há uma relação entre o índice de sustentabilidade e a eficiência exergética. Na análise das temperaturas, observaram que o trocador de calor é mais sustentável a 0 °C, enquanto o secador por pulverização e o sistema geral são mais sustentáveis a temperatura de 20 °C. Concluíram que o secador por pulverização tem mais perdas de energia e exergia que o trocador de calor, sugerindo um isolamento do secador.

Esteves *et al.* (2018) analisaram a utilização de energia e exergia em uma fábrica de cerâmica. Para calcular o balanço de energia do dispositivo foi levada em consideração o fluxo de massa, a temperatura de operação nos elementos críticos do dispositivo e a composição química do gás de combustão. Eles observaram que a análise exergética da planta mostra que a maior parte da degradação de energia ocorre no forno. A análise também possibilitou avaliar o efeito da substituição de combustíveis fósseis por biomassa, caracterizando um aumento da eficiência exergética da usina.

CONSIDERAIS FINAIS

A análise exergética emerge como uma ferramenta valiosa e tem sido utilizada em uma variedade de aplicações, incluindo a secagem de materiais cerâmicos. Ela fornece uma visão que possibilita identificar as ineficiências locais. Logo, é mais abrangente e precisa que a análise energética. O presente estudo buscou realizar uma revisão bibliográfica das análises exergéticas dos processos de secagem de materiais cerâmicos com finalidade de obter uma visão geral e abrangente dos avanços e tendências do setor.

O levantamento da literatura mostra uma valorização do estudo do balanço exergético, pois além de mitigar os custos com energia também apontam para uma preocupação com o meio ambiente. Além disso, também foi citado que a utilização da análise exergética pode levar uma melhora do produto final a ser seco, já que é possível controlar melhor as condições de secagem e minimizar possíveis problemas.

Os estudos indicam uma evolução nos métodos para se realizar uma análise exergética mais avançada e estruturada. Alguns dos autores analisados identificaram que as maiores perdas de calor e destruição exergética ocorrem quando a secagem é realizada no forno. Dessa forma, os trabalhos tem sugerido a análise de um sistema de cogeração baseado em turbina a gás. Outro fator importante identificado na revisão é a indicação de uma correlação entre sustentabilidade e eficiência exergética. A compreensão dos componentes individuais do sistema é fundamental para avaliar adequadamente a quantidade de exergia destruída, o que evidencia a necessidade de abordagens mais precisas.

REFERÊNCIAS

AGHBASHLO, M., MOBLI, H., RAFIEE, S., & MADADLOU, A. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 1-22, 2013.

CAGLAYAN, Hasan; CALISKAN, Hakan. Advanced exergy analyses and optimization of a cogeneration system for ceramic industry by considering endogenous, exogenous, avoidable and unavoidable exergies under different environmental conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 140, p. 110730, 2021.

CAGLAYAN, Hasan; CALISKAN, Hakan. 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 b.

CAGLAYAN, Hasan; CALISKAN, Hakan. Life cycle assessment based exergoenvironmental analysis of a cogeneration system used for ceramic factories. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102078, 2022.

CAGLAYAN, Hasan; CALISKAN, Hakan. Sustainability assessment of heat exchanger units for spray dryers. **Energy**, v. 124, p. 741-751, 2017.

CAGLAYAN, Hasan; ŞÖHRET, Yasin; CALISKAN, Hakan. Thermo-ecologic evaluation of a spray dryer for ceramic industry. **Energy Procedia**, v. 144, p. 164-169, 2018.

ÇENGEL, Y. A. & Boles, M. A. (2013). **Termodinâmica.** Rio de Janeiro: McGraw-Hill. DINCER, Ibrahim. On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems. **International Journal of Energy Research**, v. 26, n. 8, p. 717-727, 2002.

ESTEVES, D., VILARINHO, C., FERREIRA, M. E., CARVALHO, J., ARAÚJO, J., & TEIXEIRA, J. **Energy and exergy analysis of a biomass based ceramic plant.** In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 52071, p. V06AT08A023). American Society of Mechanical Engineers. 2018.

MELCHÍADES, Ana Claudia Bento. **Estudo teórico experimental de um forno a gás natural para indústria cerâmica**. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica). UFCG. Campina Grande/-PB. 2012.

MUJUMDAR, Arun S. **Book Review: Handbook of Industrial Drying:** A Review of:"Publisher: CRC Press. Boca Raton, FL, 2007". 2007.

UTLU, Zafer; HEPBAŞLI, Arif. Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production. **Applied Thermal Engineering**, v. 70, n. 1, p. 748-762, 2014.

UTLU, Zafer; HEPBASLI, Arif; TURAN, Muharrem. Performance analysis and assessment of an industrial dryer in ceramic production. **Drying Technology**, v. 29, n. 15, p. 1792-1813, 2011.