Análise exergética e sua aplicação em spray drying: uma revisão

Exergy analysis and its application of spray drying: a review

Laíza Soliely Costa Gonçalves [1]
Larissa da Silva Santos Pinheiro[1]
Elaine Juliane da costa Silva[1]
Jayuri Susy Fernandes de Araújo[1]
José Jefferson da Silva Nascimento[2]
Antônio Gilson Barbosa de Lima[3]
Flávio Franklin Ferreira de Almeida[1]
Patrício Borges Maracajá[4]

RESUMO: Nos últimos anos, tem havido um aumento significativo no interesse pela análise exergética de processos e sistemas de secagem, bem como na otimização desses processos usando o conceito de exergia. Esse interesse em pesquisa é impulsionado pelo aumento dos preços da energia, preocupações ambientais, crescimento da população mundial, escassez de recursos de combustíveis fósseis e demanda por produtos secos de alta qualidade. A análise exergética proporciona uma ferramenta que permite uma compreensão mais realista das perdas de energia para o ambiente e das irreversibilidades internas do processo. Esta revisão da literatura apresenta um resumo do uso da análise exergética em operações e instalações de secagem por spray drying, destacando seus benefícios e capacidades, além de identificar perspectivas para pesquisas futuras.
Palavras-Chave: Exergia; análise exergética; spray drying; termodinâmica.

ABSTRACT: In recent years, there has been a significant increase in interest in exergy analysis of drying processes and systems, as well as in optimizing these processes using the concept of exergy. This interest in research is driven by rising energy prices, environmental concerns, world population growth, scarcity of fossil fuel resources, and demand for high-quality dry goods. Exergy analysis provides a tool that allows a more realistic understanding of energy losses to the environment and the internal irreversibilities of the process. This literature review presents a summary of the use of exergy analysis in spray drying operations and facilities, highlighting its benefits and capabilities, as well as identifying perspectives for future research.
Keywords: Exergy; exergy analysis; spray drying; thermodynamics.

DOI: https://doi.org/10.61223/coopex.v14i5.554

[1]Alunos (as) do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: laizasolielyc@gmail.com; larissapinheiro2004@gmail.com; elainejuliane300308@gmail.com; : jayuri.susy@gmail.com; flavioalmeida@fiponline.edu.br
2 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;
3 Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1999). Atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Transferência de calor e massa, Escoamento fluido, Matemática aplicada, Princípios Variacionais e Métodos Numéricos, atuando principalmente nos seguintes temas: volumes finitos, secagem e desenvolvimento de secadores, escoamento multifásico e meios porosos. E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br
[4] Bolsistas DO CNPq/INSA – Instituto Nacional do Semiárido E-mail: patrício.maracaja@insa.gov.br

INTRODUÇÃO

A análise exergética oferece uma ferramenta valiosa para obter uma visão mais realista das perdas de energia para o ambiente e das irreversibilidades internas do processo de secagem. Essa metodologia permite identificar e quantificar as fontes de desperdício de energia, bem como propor melhorias e estratégias para otimizar a eficiência energética dos sistemas de secagem (TINOCO-CAICEDO, LOZANO-MEDINA e BLANCO-MARIGORTA. 2020).

A baixa eficiência térmica dos equipamentos de secagem, leva a um estado crítico do uso da tecnologia de secagem. É crucial que pesquisadores e engenheiros aumentem a eficiência térmica dos sistemas de separação usando uma estratégia fundamental para estimar o número de processos de conversão de energia, que é incapaz de distinguir entre várias qualidades de energia, como a qualidade do calor, que depende da temperatura da fonte de calor. A segunda lei da termodinâmica é uma ferramenta poderosa que tem sido extensivamente aplicada a estudos, operações e avaliações de desempenho de sistemas de energia (AGHBASHLO, 2012; AGHBASHLO. KIANMEHR e SAMIMI-AKHIJAHANI , 2008).

Em resumo, a análise exergética emerge como uma ferramenta fundamental para a compreensão aprofundada dos processos de secagem, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a tomada de decisões mais informadas em relação ao uso de energia. Espera-se que essa abordagem continue avançando, impulsionando a eficiência energética e a sustentabilidade na indústria de secagem.

São apontadas perspectivas promissoras para futuras pesquisas nesse campo. É essencial continuar investigando novas metodologias e técnicas para aprimorar a análise exergética e adaptá-la a diferentes tipos de processos de secagem. Isso inclui a consideração de fontes de energia renovável, a integração de sistemas de recuperação de calor e a aplicação de abordagens inovadoras visando à eficiência energética e à sustentabilidade.

Diante do abordado, esta pesquisa tem por objetivo elaborar um levantamento bibliográfico apresentado um resumo abrangente sobre o uso da análise exergética em operações e instalações de secagem. Destacam-se os benefícios proporcionados por essa abordagem, como a identificação precisa de pontos críticos de perda de energia, a possibilidade de avaliar o desempenho de diferentes tecnologias de secagem e a capacidade de propor soluções para reduzir o consumo energético e minimizar os impactos ambientais.

Análise exergética

Na última década, diante do aumento da utilização de energia, tanto a perda de energia quanto a exergia (o trabalho máximo que pode ser realizado com uma determinada quantidade de energia disponível ou com um fluxo de material) ganharam importância na pesquisa termodinâmica (GUINÉ, R, 2020; e KAVEH, M,20210). Diante disso, existe a análise exergética dentro da termodinâmica ao qual é utilizada para calcular as irreversibilidades e os fatores que afetam sua produção.

A exergia pode ser entendida como a medida do máximo trabalho útil que um sistema pode realizar ao interagir com um ambiente a pressão e temperatura constantes.

A análise exergética tem se tornado cada vez mais reconhecida como uma ferramenta valiosa no projeto, avaliação, otimização e aprimoramento de sistemas de energia (AYGI, G, 2020). Uma análise exergética de acordo com (DANTAS, D. N, 2010), permite a obtenção dos valores exergéticos dos fluxos do sistema, consistindo na identificação e quantificação das irreversibilidades com aplicação das exergias de entrada e de saída e perdas dos componentes existentes, bem como no cálculo da eficiência exergética, permitindo quantificar e otimizar a energia disponível que pode ser utilizado em processos de conversão de energia.

Sendo assim, a exergia representa a energia disponível para uso e não é apenas uma propriedade do sistema, mas sim uma propriedade da combinação do sistema com o ambiente. Alterar o ambiente pode influenciar e aumentar a exergia, podendo ser considerada como um verdadeiro valor energético. Dentro desse contexto, a análise exergética nos auxilia a alcançar a determinação do tipo, a localização e a magnitude das perdas de energia em um sistema e encontrar maneiras de reduzir essas perdas, tornando o sistema de energia mais eficiente (KUMAR, Y. & ARORA, V, 2019).

No entanto, embora a análise exergética identifique a localização e a magnitude das perdas de energia térmica, ela tem limitações, pois não pode quantificar o custo dessas perdas. Além disso, uma análise exergética não é conclusiva sobre quais componentes devem ter prioridade de investimento para reduzir as perdas exergéticas (TSATSARONIS, G, 2007).

Para completar uma análise exergética, pode ser aplicada uma análise exergoeconômica, que combina exergia e princípios econômicos no nível do componente para identificar as fontes reais de custo em um sistema térmico (BEJAN, A,1996); Uma vez que as considerações termodinâmicas da exergoeconomia são baseadas no conceito de exergia, o termo exergoeconomia também pode ser usado para descrever a combinação de análise exergética e economia (TSATSARONIS, G, 2018).

Esta análise tem o objetivo de minimizar as perdas por irreversibilidade e reduzir os custos de produção do sistema energético. Ressaltando que, ao contrário da energia, a exergia não é conservada durante um processo, e sim, é destruída devido às irreversibilidades. Com isso, tanto o desempenho ambiental quanto os aspectos econômicos podem ser aprimorados por meio da análise exergoeconômica.

De acordo com (GUINÉ, R,2020) as análises exergéticas e exergoeconômicas permitam quantificar as perdas exergéticas e de custos, mas elas não fornecem informações

suficientes sobre quais perdas são evitáveis; essas informações são essenciais para que ocorram melhores potenciais de melhorias em um sistema. Com isto, a análise exergoeconômica é uma ferramenta proposta que tem sido aplicada a diferentes processos industriais, como geração de energia, indústrias petroquímicas, indústrias alimentícias, a fim de quantificar as perdas econômicas evitáveis e inevitáveis e melhorar a disponibilidade de energia (RATTANADECHOA, P,2016).

Todavia, na literatura ainda não existem estudos aplicando uma análise exergoeconômica avançada na área de secagem por spray drying ou pulverização qualificando este tipo de destruição de exergia, todavia, esta análise exergética é introduzida na secagem, para tornar o secador comercial mais eficiente, avaliando e otimizando as técnicas de secagem, condição, design e outros parâmetros do processo.

Secagem e perdas térmicas

A secagem é um processo intensivo em energia e a análise exergética tem sido amplamente utilizada para a avaliação de desempenho de sistemas de secagem, podendo ser usada de forma eficaz em sistemas de energia, fornecendo o processo adequado, bem como as informações necessárias, como temperatura, pressão, e composição, sendo estes parâmetros eficazes para determinar o custo operacional, a conservação de energia e a versatilidade do combustível em todo processo (CAY, A, 2010).

Com isso podemos definir secagem como uma das operações unitárias mais antigas e tem sido amplamente utilizada pelas indústrias, como uma técnica de preservação que tem como objetivo aumentar a vida útil, melhorar a qualidade dos produtos e reduzir as perdas durante o armazenamento. Diante desse contexto, existem diversos métodos de secagem, variando de acordo com a finalidade do processamento e do tipo de secador utilizado, podendo destacar a liofilização, secagem convectiva, secagem por infravermelho, secagem por pulverização, dentre outros (AHMADI, A,2021)

Entretanto estes tipos de secagem dependem de fontes de energias não renováveis com consumo exacerbado de 10% a 25% de energia do consumo total, principalmente nos países em desenvolvimento, sendo importante o uso eficiente para a secagem desses produtos. Portanto, a otimização dos processos e sistemas de secagem é importante em termos de eficiência energética (ERBAY, Z, 2012).

A principal razão do alto consumo de energia no processo de secagem ocorre devido ao alto calor latente de vaporização e à inerente ineficiência do uso de ar quente como o meio de secagem mais comum utilizado. Portanto, um dos principais problemas com esta tecnologia é reduzir os custos de recursos energéticos para melhorar a eficiência dos equipamentos de secagem para produtos secos de boa qualidade (AGHBASHLO, M, 2010).

Segundo Pellegrino et al (2003), as premissas de perda de energia e eficiência na secagem devem ser consideradas durante o projeto e avaliação térmica de secadores e a principal razão para o alto consumo dessa energia no processo é a baixa eficiência energética dos secadores utilizados. Sendo que, as principais causas de ineficiência nos secadores industriais são múltiplas fontes de perda de calor, condições de secagem impróprias e design

de secador ruim. Além disso, a eficiência operacional do secador também depende da perda de energia de outros componentes do sistema de secagem, como ventiladores, aquecedores, bombas etc.

A partir desse contexto, a exergia vem sendo utilizada com aumento significativo em análise exergética de processos, sistemas de secagem e otimização de processos de secagem, este aumento é justificado pelo valor elevado da energia, riscos ambientais existentes como as chuvas ácida, aquecimento global, aumento populacional, redução dos recursos de combustíveis fósseis e demanda por produtos secos de alta qualidade. A exergia fornece ferramentas úteis para as perdas térmicas existentes para o ambiente,com aplicação otimizada de energia e métodos eficazes para um melhor controle do consumo de energia, bem como as irreversibilidades internas dos processos (AGHBASHLO, M, 2013).

Sendo assim, esta análise exergética, é proposto como uma forma de avaliar e otimizar os requisitos gerais de energia dos processos de secagem, auxiliando em flexibilidades suficientes para atender às necessidades de identificação de parâmetros desejáveis, como perdas e produtividade desses sistemas, bem como uma análise de forma mais detalhada da energia com o objetivo de determinar o melhor desempenho possível e fornecer uma visão clara do processo, quantificando as fontes de ineficiência, distinguindo a qualidade do consumo de energia e a melhor condição de secagem (AHMADI, D.H, 2020).

A otimização dos parâmetros termodinâmicos supracitados é geralmente realizada na indústria de manufatura, principalmente com secadores, para melhorar a qualidade do produto final, reduzindo a utilização de energia e maximizando o custo-benefício; sendo a análise dos parâmetros de energia e exergia uma das técnicas mais importantes para otimizar e melhorar a eficiência de um secador (AFZALI, F,2029). Assim, levando em consideração a otimização dos processos obtém-se a economia de energia a partir da criação de novos secadores e melhoramento nos sistemas já desenvolvidos. Buscando ainda introduzir novos métodos para o processamento de produtos, aumentando a durabilidade, qualidade, uniformidade, disponibilidade e capacidade de integração com outras fontes de energia, bem como melhorar ainda mais a eficiência de processos incluindo produtos intermediários e finais.

Os secadores por pulverização tem desempenho elevado, alta qualidade e são os mais eficientes em termos de energia. No processo de secagem por pulverização ou *spray drying* são utilizadas temperaturas da câmara de secagem, pressão, taxa de fluxo de massa do meio de secagem, taxa de fluxo de massa de alimentação, meios de secagem envolvendo ar, nitrogênio, velocidade do ar, e outros fatores importantes como o formato da câmara, sistemas de contato de gotas de ar, sistemas de descarga de pó e ar, estes parâmetros afetam diretamente os secadores por pulverização que são utilizados. com isso, o interesse pela análise exergética de sistemas de secagem é importante, pelo fato de proporcionar menor eficiência térmica dos sistemas de secagem, tendo um grande potencial para fins tecnológicos de secagem em larga escala (AGHBASHLO, M, 2013).

Ferramentas para análise exergética de spray drying

A análise exergética tornou-se uma ferramenta importante para a avaliação de vários processos industriais intensivos em energia, como a secagem por *spray drying* ou

pulverização. Essa análise identifica os componentes com as maiores perdas de energia, as condições de operação que têm maior impacto nas perdas de energia evitáveis e na irreversibilidade do sistema (TSATSARONIS, G, 2007) .

É importante ressaltar que a secagem por pulverização ou *Spray drying* é um método que permite transformar soluções, suspensões ou emulsões em pó seco de forma rápida e eficiente, utilizando um processo de uma única etapa. Esse processo envolve a pulverização de uma substância atomizada por meio de um gás em alta temperatura. A técnica de secagem por pulverização foi inicialmente desenvolvida no ano de 1860 (AGHBASHLO, M, 2013).

As principais ferramentas postas para analisar e comparar a exergia dos secadores são o uso de energia, taxa de utilização de energia, eficiência exergética, perda de exergia, análise de incerteza e análise termoeconômica, sendo estas, de grande importância para avaliar as técnicas de secagem, melhorando a precisão da coleta de dados e otimizando o custo operacional (KUMAR, Y, 2019).

A utilização de energia é toda quantidade utilizada para o processo de secagem para uma determinada amostra e condições de secagem e varia com a temperatura e a velocidade do ar de secagem, bem como ocorre um aumento de energia com o aumento do tempo de secagem em diferentes temperaturas. Esta energia disponível também é representada de forma qualitativa teórica indefinível, que pode existir em várias formas e tem potencial para realizar trabalho(AMJAD, W,2016).

Para a análise de energia de qualquer secador, a conservação de calor e massa são fatores que são utilizados e são oriundos da primeira lei da termodinâmica. A maior parte do consumo de energia utilizada para a secagem, principalmente na entrada do fluxo, é perdida na exaustão, com isso a eficiência do secador é reduzida, devido à baixa eficiência e ao alto calor latente de evaporação da umidade, tornando a secagem uma operação unitária com uso intensivo de energia (KUMAR, Y, 2019).

Como esta técnica consome grande quantidade de energia de fontes não renováveis, que termina acabando rápido pela sua utilização, ocorreu o impulsionamento para o desenvolvimento de secadores eficientes para minimizar o consumo de energia, estudando todo o projeto e a capacidade de produção, assim como a verificação do desperdício em diferentes campos de técnica de secagem e a eficiência para a operação econômica (KUMAR, Y, 2019).

Com a utilização da energia, surge a taxa de utilização de energia no processo, que é a relação entre a energia total usada para secar e a energia total que entra no secador, sendo utilizada para a entrada de energia útil do secador. Essa taxa é considerada um parâmetro importante para analisar a utilização de energia em processos de secagem em leito fino e em outros secadores, e o seu uso aumenta a temperatura de secagem(AGHBASHLO, 2010).

Sendo assim, a eficiência exergética é uma importante ferramenta, sendo originária do princípio da segunda lei da termodinâmica, e é dada pela relação entre energia útil e trabalho, proveniente da energia, ocasionando uma menor degradação da energia, devido o uso no final do sistema. É utilizada na secagem para avaliar e melhorar as características e condições de um determinado sistema de secagem, sendo um indicador do nível de qualidade da energia convertida em um sistema térmico (GUINÉ, R,2020).

Mediante a segunda lei, a análise exergética busca relacionar o fluxo total de entrada, saída, perdas e eficiência exergética em um sistema de secagem, com o objetivo de determinar a razão entre a exergia utilizada em todos os pontos do estado estacionário e as causas de variação exergética de acordo com(GUINÉ, R,2020), sendo assim a eficiência exergética diminuem com o aumento da temperatura de entrada e velocidade de secagem, indicando que as perdas exergéticas são significativas e que estas perdas aumentam com o aumento da utilização de energia.

A análise de incerteza é uma ferramenta poderosa para localizar a fonte de problemas em experimentos de mau comportamento, analisando a precisão com relação a erros e a confiabilidade do instrumento, com isso alguns fatores que afetam esta análise são importantes como seleção de instrumentos, calibração de instrumentos, condições, ambiente, observação, leitura e planejamento do teste em instrumentos selecionados, contribuindo para a incerteza no processo de medição(AKPINAR, E. K,2005).

Segundo(AGHBASHLO, M, 2013) esta análise pode ser minimizada a partir de avaliações numéricas da eficiência exergética do processo de secagem, com medições da velocidade do ar, temperatura e perda de massa com instrumentos adequados, aumentando assim, a confiabilidade dos valores de energia e exergia.

A análise termoeconômica pode ser definida como sendo uma combinação entre a análise exergética e a análise econômica. Desta maneira tal análise permite valorar (já que permite a atribuição de custos aos fluxos de exergia) a influência das ineficiências termodinâmicas (irreversibilidades) dos processos nos custos de produção (PELLEGRINI, L,2009).

Algumas metodologias termoeconômicas são utilizadas e podem ser divididas em dois grupos: Métodos de Custeio em base Exergética, calculando-se custos médios e Métodos de Otimização (baseados nos múltiplos de Lagrange, por exemplo), onde se calculam os custos marginais dos produtos. Todas as metodologias partem do pressuposto que a exergia, e não a energia, é a única base racional para a atribuição de custos a fluxos energéticos e a perdas energéticas (exergia destruída e/ou perdida) (TSATSARONIS, G, 2018)

Com isso, as principais contribuições para o desenvolvimento da termoeconomia podem ser encontradas nos trabalhos de Antônio Valero e co-autores, Christos Frangopoulos, George Tsatsaronis e Michael Von Spakovky. Cada um destes autores propôs uma fórmula para resolver o problema da determinação das equações auxiliares necessárias para a solução dos balanços de custos em base exergética. Nenhuma dessas metodologias é tida como principal ou mais completa para ser caracterizada como a mais utilizada ou geral (PELLEGRINI, L,2009).

As informações geradas pela análise termoeconômica são distintas daquelas obtidas pelos métodos tradicionais de avaliação econômica que determina parâmetros como tempo de retorno de investimento, taxa interna de retorno, valor presente líquido e preços (FRATZSCHER, W,1997).

Do ponto de vista da análise e otimização de sistemas de conversão de energia, a análise termoeconômica agrega, basicamente, dois conjuntos de equações aos balanços de massa, energia e exergia: os balanços de custo para cada equipamento/processo e os critérios de partição de custos para os equipamentos/processos em que há mais de um produto.

Segundo (TSATSARONIS, G, 2018), a análise termoeconômica completa compreende as seguintes etapas:

- Análise exergética detalhada do sistema;
- Análise econômica detalhada dos equipamentos;
- Custeio exergético; e
- Avaliação exergoeconômica de cada equipamento do sistema.

Contudo, ainda não foi definida uma metodologia geral aplicável a qualquer processo de conversão de energia e que seja reconhecida mundialmente como única. A diferença entre as metodologias existentes para a aplicação da termoeconomia está exatamente na determinação das equações auxiliares para solução dos balanços de custo (PELLEGRINI, L,2009).

Eficiência exergética

A eficiência exergética é uma medida que avalia a eficiência com a qual um sistema utiliza a exergia disponível para realizar trabalho útil, em comparação com a quantidade total de exergia fornecida ao sistema. É uma medida importante na análise de sistemas de energia e processos industriais, pois levam em consideração tanto as perdas de energia quanto as perdas de exergia durante a conversão e utilização de energia (TSATSARONIS, G, 2018).

Antes de relatar as aplicações e parâmetros descritos na literatura para eficiência exergética serão apresentadas as Equações (1) e (2), comumente utilizadas na literatura para análises exergéticas, como nos trabalhos realizados por (KUMAR, Y,2019), destacando que a análise de exergia de secadores, como foco da análise o fluxo total de entrada, saída, perdas e eficiência usando a segunda lei da termodinâmica. A equação geral para a exergia total de um processo de fluxo constante pode ser escrita como:

$$Ex_{total} = Q_{ex} + W_{ex} + M_{ex} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde, Q_{ex}, W_{ex} e M_{ex} são a exergia da transferência de calor (Q), trabalho (W) e massa (M), respectivamente.

Ainda, a equação simplificada para análise de exergia de um secador é dada como:

$$Ex = C_p(T - T_0) - T_0 ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \qquad \text{(Equação 2)}$$

Onde,

Ex = Exergia (kJ/s)

C_p = Calor específico médio (kJ/kg. K)

T = Temperatura no ponto onde se realiza a análise da exergia em K;

T_0 = Temperatura ambiente (K).

Ao calcular o fluxo de entrada ou saída de exergia em um local específico, é necessário considerar a temperatura nesse local e o calor específico médio do fluxo de massa. abordagem é baseada nos princípios da análise exergética, que busca quantificar a qualidade da energia em um sistema e identificar oportunidades de otimização AKPINAR, E. K,2005).

Por sua vez, a eficiência exergética de um sistema pode ser definida pela razão entre o fluxo de saída e o fluxo de entrada de energia, conforme expressa na Equação (3), representando um indicador crítico do nível de qualidade da energia convertida. Dessa forma, é possível afirmar que a eficiência exergética de um sistema é maximizada quando a perda exergética é minimizada (FOLAYAN, J. A, 2018).

$$Exergy\ efficiency = \left(\frac{energy\ out\ flow}{energy\ in\ flow}\right) \quad \text{(Equação 3)}$$

A Equação (3) também pode ser expressa pela Equação (4)

$$Exergy\ efficiency = 1 - \left(\frac{Energy\ out\ flow}{energy\ in\ flow}\right) \quad \text{(Equação 4)}$$

[25] realizaram uma revisão sobre exergia de spray dryer e constataram que não há fatores de eficiência exergética absolutos para uma análise exergética de spray dryer, ao analisar premissas e suposições definidas no estudo e ressaltaram que a Equação (4) representa a equação padrão que geralmente é utilizada por maior parte da literatura quando se trata de secadores (KUMAR, Y,2019).

Além das equações acima descritas, diversas outras equações e variáveis podem ser utilizadas dependendo dos parâmetros envolvidos no processo. Além disso, a avaliação e análise exergética de sistemas de secagem por pulverização também pode ser conduzida utilizando software de resolução de equações de engenharia para a formulação de balanços de massa, energia e exergia de cada componente AKPINAR, E. K,2005).

Eestudando a análise exergética do processo de microencapsulação de corante fotocrômicos pelo método de spray dryer, observaram que ao diminuir a temperatura de secagem de 150 °C para 120 °C, a eficiência exergética aumentou cerca de 16% para o encapsulamento com uma solução de processo contendo água-etanol. Além disso, esses autores destacaram a relação do tipo de solução utilizada no processo, ao utilizar essa redução de temperatura e testar com solvente sendo apenas água, a eficiência exergética aumentou 9,5% e utilizando etanol-água aumentou para 16%, visto que o calor latente do etanol é menor que o da água, favorecendo dessa forma o aumento da eficiência exergética, considerando a taxa de alimentação da solução constante.

Nos processos de secagem em temperaturas mais altas, a energia elétrica é convertida em uma energia térmica de grau mais alto em comparação com a baixa temperatura. Por esta razão, a eficiência exergética da seção de aquecimento foi aumentada pela temperatura do ar

de secagem. Pelo contrário, como a taxa de alimentação da solução de encapsulamento era constante, à medida que a temperatura do ar de secagem aumentava, a mesma quantidade de água (e etanol) era evaporada com maior teor de energia, portanto a eficiência exergética do subsistema de secagem diminuía com o aumento da temperatura (AMJAD, W, 2016). mostra que as eficiências exergéticas dos secadores por spray são intrinsecamente pequenas.

É interessante notar que a abordagem numérica para a avaliação da eficiência exergética do processo de secagem não só evita a operação experimental de alto custo como também elimina as incertezas do instrumento. No entanto, o desenvolvimento de modelos numéricos para calcular o desempenho exergético do processo de secagem com precisão adequada merece mais investigações.

Perda de exergia

A perda de exergia é uma medida da degradação da qualidade da energia em um sistema e fornece informações sobre as ineficiências e irreversibilidades presentes no processo de secagem. Dessa forma, quando a energia perde sua qualidade, resulta em exergia destruída, sendo a análise de perda exergética uma técnica adequada para promover o objetivo de uso mais eficiente dos recursos energéticos, pois permite determinar a localização, os tipos e as verdadeiras magnitudes dos desperdícios e perdas (DINCER, I,2001).

As perdas de exergia em sistemas de secagem por pulverização têm sido estudadas devido à sua importância na eficiência energética e no desempenho geral do processo de secagem por spray dryer (AGHBASHLO, M,2013). Ao entender as fontes e os mecanismos de perda de exergia no spray drying, é possível propor estratégias e melhorias para reduzir essas perdas e aumentar a eficiência do processo. Isso pode incluir otimização do projeto do equipamento, seleção adequada de parâmetros operacionais, melhoria da transferência de calor e massa, recuperação de calor, entre outras medidas.

Essas perdas de exergia representam energia desperdiçada que poderia ser utilizada de forma mais eficiente. Portanto, a análise de exergia do sistema fornece informações sobre as ineficiências e oferece oportunidades para a minimização da perda de exergia das operações unitárias(AGHBASHLO, M,2013).

A secagem por pulverização de encapsulamento de óleo de peixe. Essas investigações mostram que a eficiência energética é maior do que a eficiência exergética
Aviara et al. (2014) constataram que a perda de exergia aumentou à medida que a temperatura aumentou durante o processo de secagem de folhas de hortelã utilizando um secador de bomba de calor. Por outro lado, Motevali e Minaei (AYGI, G, 2015). relataram que a degradação de energia exergética diminuiu com o aumento da temperatura e do tempo durante a secagem em camada fina dos arilos de romã azeda, previamente tratados com micro-ondas. Além disso, Akpinar observou que o fluxo de entrada, o fluxo de saída e as perdas de energia exergética diminuíram com o tempo durante o processo de secagem solar das folhas de salsa.

Folayan, Osuolale, Adewale (2018) realizaram análises exergéticas de secagem de cebola em um secador de batelada e afirmaram que a perda de exergia pode ser considerado um parâmetro de energia que muitas vezes é confundido com a destruição de exergia. No entanto, a perda de exergia representa a transferência de exergia de um sistema para seu ambiente externo de forma irreversível, ou seja, ocorre a descarga de uma corrente de energia não útil para o ambiente, enquanto a destruição de exergia é um fenômeno interno que caracteriza a destruição de exergia devido a irreversibilidades dentro de um componente de um sistema, como pode ser citado o exemplo da destruição de exergia durante o processo de combustão (JOHNSON & LANGRISH, 2017).

Aplicação do processo de secagem por análise de exergia em spray drying

Na secagem por spray drying, a análise exergética permite quantificar a eficiência do processo, identificar as principais fontes de perda de exergia e propor medidas para otimizar o consumo de energia. Uma das principais fontes de perda de exergia no spray drying é o excesso de calor desperdiçado durante a evaporação do líquido. Isso ocorre porque uma quantidade significativa de calor é necessária para evaporar a água presente no líquido, e se esse calor não for utilizado de forma eficiente, resultará em perdas de exergia. Portanto, a otimização do uso de energia térmica é uma área importante de foco na aplicação da análise exergética no spray drying.

Vários estudos já foram realizados para analisar a eficiência exergética e perda de exergia, principalmente de matrizes alimentícias, no processo de secagem em diferentes tipos de secadores (KUMAR, Y, 2007). Fez uma revisão abrangente sobre a análise de energia e exergia e sua aplicação em diferentes técnicas de secagem e apresentou estudos sobre eficiência exergética e perdas de exergia em fatias de batata em secador de ciclone de ar quente de duas bandejas, secador de banda contínua, secador em batelada diagonal, secador solar indireto de várias bandejas(AKPINAR, E. K, 2007) fatias de morango em secador de bandeja experimental; fatias de pimenta em secador de bandeja do tipo convectivo; fatias de maçã em secador tipo ciclone de ar quente de duas bandejas; pistache em secador solar de convecção forçada; fatias de abóbora em secador tipo ciclone de ar quente de duas bandejas [51]; águas residuais de lagar de azeite em secador solar; pimenta malagueta fantasma e fatias de gengibre em secador de túnel solar de convecção forçada; fatias do fruto da palmeira coroba (*Attalea maripa*) por secagem a vácuo; folhas de menta em secador de bandeja de bomba de calor de fonte terrestre; rodelas de cenoura por secador de banda contínua semi-industrial, cubos de cenoura em secador de leito fluidizado em escala de laboratório; fatias de beringela em secador tipo ciclone (AKPINAR, E. K., 2005).

Aviara, (2014) seu estudo sobre análises energéticas e exergéticas em amido de mandioca submetido a secagem em bandejas observou que a eficiência energética é maior do que a eficiência exergética. Utilização de energia, taxa de utilização de energia, entrada e saída de exergia, perda de exergia, eficiências energéticas e exergética, tudo varia com o produto, condições de secagem e tipo de sistema de secagem como já foi largamente descrito na literatura.

Embora já tenham sido largamente estudados os processos exergéticos que envolvem diferentes matrizes alimentícias e diferentes métodos de secagem, os trabalhos que utilizam o

método de secagem por *spray dryer* são mais recentes e escassos na literatura. Os dados relatados foram compilados em relação às variáveis experimentais utilizadas e os principais resultados obtidos pelos autores, como descrito na Tabela 1.

Existem várias abordagens para melhorar a eficiência exergética do processo de spray drying. Uma delas é a recuperação de calor. O calor do ar de exaustão, que normalmente seria perdido, pode ser recuperado e reutilizado para pré-aquecer o ar fresco de entrada, reduzindo assim a quantidade de energia térmica necessária. Além disso, sistemas de troca de calor de alta eficiência, como trocadores de calor de fluxo cruzado, podem ser implementados para maximizar a transferência de calor entre o ar quente e o líquido a ser secado (AKPINAR, E. K., 2005).

Outra estratégia é a otimização da temperatura de secagem. A temperatura do ar de secagem deve ser cuidadosamente ajustada para garantir a evaporação eficiente da água sem causar danos ao produto final. O uso de sistemas de controle avançados e modelos termodinâmicos pode ajudar a determinar a temperatura ideal de secagem, levando em consideração as propriedades do líquido, como ponto de ebulição, umidade e taxa de evaporação (AKPINAR, E. K, 2007).

Além disso, a análise exergética também pode ser aplicada para identificar perdas exergéticas em outros componentes do sistema de spray drying, como compressores de ar, bombas de alimentação e sistemas de filtragem de ar. Através da identificação dessas perdas, podem ser propostas medidas de otimização, como o uso de tecnologias mais eficientes ou o dimensionamento adequado dos equipamentos.

CONCLUSÃO

A secagem por spray dryer é um processo que consome uma quantidade significativa de energia e está sujeito a perdas térmicas. A análise exergética surge como uma ferramenta importante para avaliar o desempenho dos sistemas de secagem, fornecendo informações essenciais para determinar o custo operacional, a conservação de energia e a eficiência do processo. Além disso, a exergia permite identificar as fontes de ineficiência e quantificar as perdas energéticas, contribuindo para a otimização dos processos de secagem.

A eficiência energética dos secadores é um desafio, especialmente devido ao alto calor latente de vaporização e à ineficiência do uso de ar quente como meio de secagem. Isso resulta em altos custos de energia e baixa eficiência dos equipamentos. A análise exergética permite uma avaliação mais detalhada das perdas de energia e oferece ferramentas úteis para otimizar os sistemas de secagem, melhorando a eficiência e reduzindo o consumo de energia.

Dentre as ferramentas utilizadas na análise exergética de sistemas de secagem, destacam-se a utilização de energia, a taxa de utilização de energia, a eficiência exergética, a análise de incerteza e a análise termoeconômica. Essas ferramentas fornecem informações valiosas para avaliar a eficiência dos secadores, identificar pontos de melhoria e otimizar o consumo de energia.

É importante ressaltar que a secagem por pulverização ou spray drying é um método eficiente para transformar líquidos em pó seco, mas consome uma grande quantidade de

energia. Portanto, o desenvolvimento de secadores eficientes é essencial para minimizar o consumo de energia e melhorar a sustentabilidade do processo.

REFERÊNCIAS

AFZALI, F.; DARVISHI, H.; BEHROOZI-KHAZAEI, N. Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system. *Applied Thermal Engineering* **2019**, 154, 358–367,. doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.096.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; HASSAN-BEYGI, S. R. Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus Cerasus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation* **2010**, 34(3):351–65, .

AGHBASHLO, M.; MOBLI, H.; RAFIEE, S.; MADADLOU, A. A review on exergy analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2013**, 22, 1–22. doi:10.1016/j.rser.2013.01.015

AGHBASHLO, M.; MOBLI, H.; RAFIEE, S.; MADADLOU, A. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosystems Engineering* **2012**, 111(2), 229-241. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.12.001

AHMADI, A.; BIPLAB DAS M.A.; EHYAEI, F.; ESMAEILION, M. EL.; HAJ ASSAD,; D.H. JAMALI.O.; KOOHSHEKAN, R.; KUMAR, M.A.; ROSEN, S.; NEGI, S. S. B. & SAFARI, S. Energy, exergy, and techno-economic performance analyses of solar dryers for agro products: A comprehensive review. *Solar Energy* **2021**, 228, 349-373. ISSN 0038-092X. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.060.

AHMADI, D.H.; JAMALI, M.A.; EHYAEI, M.; EL HAJ ASSAD, M. Energy, exergy, economic and exergoenvironmental analyses of gas and air bottoming cycles for production of electricity and hydrogen with gas reformer. *Journal of Cleaner Production* **2020**, 259, 120915. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120915

AKPINAR, E. K; MIDILLI, A.; BICER, Y. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management* **2005**, 46(15–16), 2530–52.

AMJAD, W.; HENSEL, O.; MUNIR, A.; ESPER A,; STURM, B. Thermodynamic analysis of drying process in a diagonal-batch dryer developed for batch uniformity using potato slices. *Journal of Food Engineering*, **2016**, 169, 238-249.

AVIARA, N. A.; ONUOHA, L. N.; FALOLA, O. E.; IGBEKA, J. C. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. *Energy* **2014**, 73, 809-817.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MICHAEL, M. THERMAL Design and Optimization; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, **1996**, 21, ISBN 0471584673.

ÇAY, A.; MORSÜMBÜL, S.; KUMBASAR, E. P. A (2022). Photochromic Microcapsules for Textile Materials by Spray Drying: Part 2—Exergy Analysis of Spray Drying Process. *AATCC Journal of Research* **2022**, 9(1), 3-11. https://doi.org/10.1177/23305517211060794

CAY, A.; TARAKC¸ŸOGŸLU, I. & HEPBASLI, A (2010). Análise exergética de secagem convectiva têxtil com ramas por modelos de subsistema: Parte 1—Modelagem exergética e avaliação. **Drying Technology.** V. 28(12), 1359–1367, 2010.

DANTAS, D. N. (2010). Uso da biomassa da cana - de - açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras no interior paulista. **Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental)** - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP. 2010.

DINCER, I., & CENGEL, Y. A. (2001). Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. **Entropy**, 3(3), 116-149, 2001. https://doi.org/10.3390/e3030116

ERBAY, Z., & KOCA, N. (2012). Energetic, Exergetic, and Exergoeconomic Analyses of Spray-Drying Process during White Cheese Powder Production.**Drying Technology**, 30:4, P.435-444, 2012. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.647183

ERBAY, Z., & KOCA, N. (2014). Exergoeconomic performance assessment of a pilot-scale spray dryer using the specific exergy costing method. **Biosystems Engineering**, 122, 127-138, 2014. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.006

FILHO, D.O.; TANABE, C.S. & COSTA, J.M (2000). Considerations of the exergetic analysis on electric energy rates. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.114-119, 2000.

FOLAYAN, J. A.; OSUOLALE, F.N. & ANAWE, P.A.L (2018). Data on exergy and exergy analyses of drying process of onion in a batch dryer. **Data in Brief**, v, 21, p. 1784-1793, 2018. https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.132

FRATZSCHER, W. (1997). Exergy and Possible Applications. **Revue Générale de Thermique**, v. 36, n. 9, p. 690-696, out. 1997.

GAGGIOLI, R. A.; EL-SAYED, Y. M. (1987). Critical review of second law costing methods. In: IV Internacional Syposium on Second Law Analysis of Thermal Systems, New York, 1987. **Proceedings of the IV International Syposium onSecond Law Analysis of Thermal Systems**. New York: ASME, 1987. P. 59-73. (ASME Book 100236).

GUINÉ, R.; GOLPOUR, I.; BARROCA, M. & KAVEH, M (2020). Application of artificial neural networks (ANNs) modelling in drying technology of food products: A comprehensive survey. **In *A Comprehensive Guide to Neural Network Modeling*; Nova Science Publishers, Inc.: Hauppauge, NY, USA**, 2020. Disponível em: < https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/6396> Acessado em: 01 jun. 2023.

ISHIHARA, A., MITSUSHIMA, S., KAMIYA, N., & OTA, K. I. (2003). Exergy analysis of polymer electrolyte fuel cell systems using methanol. **In International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology** .Vol. 36681, p. 301-306, 2003.

JIN, Y.; CHEN, X. D. (2011). Entropy production during the drying process of milk droplets in an industrial spray dryer. **International Journal of Thermal Sciences**, 50(4), 615–625, 2011. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.10.013.

JOHNSON, P. W., & LANGRISH, T. A. G. (2018). Exergy analysis of a spray dryer: Methods and interpretations. **Drying Technology**, 36(5), 647-661, 2018. https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1349790

JOHNSON, P. W., & LANGRISH, T. A. G. (2020). Interpreting exergy analysis as applied to spray drying systems. **International Journal of Exergy**, 31(2), 120-149, 2020. https://doi.org/10.1504/IJEX.2020.105479

KAVEH, M.; GOLPOUR, I.; GONÇALVES, JC; GHAFOURI, S. & GUINÉ, R. (2021) Determinação da cinética de secagem, consumo específico de energia, encolhimento e propriedades de cor de arilos de romã submetidos à secagem por micro-ondas e convecção. ***Agrícola Aberto**: 6*, 230–242, 2021. Disponível em: < https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/opag-2020-0209/html> Acessado em: 01 jun. 2023.

KUMAR, Y. & ARORA, V. (2019) Energy and Exergy analysis and its Application of different drying Techniques: A Review. **Journal of Thermofluids**. Voo. 05, nº. 02, p. 10-29, 2019.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. & SPECO. (2006). A Systematic and Deneral Methodology for Calculating Efficiencies and Cost in Thermal Systems. **Energy**, v. 31, n. 8-9, p. 1257-1289, jul. 2006.

LI, C., CHEN, Y., ZHANG, X., MOZAFARI, G., FANG, Z., CAO, Y., & LI, C. (2017). Exergy analysis and optimisation of an industrial-scale circulation counter-flow paddy drying process. **Energy**, 251, 123901.2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123901

MAIA C.B.; FERREIRA A.G.; CABEZAS-GÓMEZ L.; SILVA J.D.O.C. & MORAIS, H. S. (2017). Análise termodinâmica do processo de secagem de bananas em uma torre de corrente ascendente solar de pequeno porte no Brasil. **Energia renovável.** v**.** 114. p.1005-1012, 2017.

MIDILLI A. & KUKUK H. (2003). Análise energética e exergética do processo de secagem solar de pistache. **Energia. 2003**; v. 28. p. 539–556, 2003.

MOFFAT R. J. (1988). Descrever as incertezas em resultados experimentais. t**érmica experimental e ciência fluida.** 1(1): 3-17, 1988.

ONIFADE T. B.& JEKAYINFA, S.O. (2015). Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Análise Energética de Secagem em Camada Fina de Pinhão-manso (Jatropha Curcas). **Jornal GSTF em Engenharia Agrícola 2(1)**: 49-59,2015.

PELLEGRINI, L. F. (2009). Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. São Paulo-SP, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-14052009-180026/en.php>. Acessado em: 01 jun. 2023.

PELLEGRINO J.; NANCY M.; MELANIE M. & MAURICIO J. (2003) Série Pegada Energética. Manufatura e Mineração dos EUA, Energetics, Incorporated, Columbia, Maryland, para o Departamento de Energia dos EUA, Programas de Tecnologia Industrial, 2003.

PERCY, S. (1872). Improvement in Drying and Concentrating Liquid Substances by Atomizing. **United States Patent Office**. No. 125,406, dated April 9, 1872. Disponível em: https://patentimages.storage.googleapis.com/ee/16/8d/7262ae44781662/US125406.pdf. Acessado em 18 de maio de 2023. PETRAKOPOULOU, F.; TSATSARONIS, G.; MOROSUK, T. & CARASSAI, A. (2023). Advanced Exergoeconomic Analysis Applied to a Complex Energy Conversion System. **J. Eng. Gas Turbines Power**, *134*, 031801, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4005115>. Acessado em: 01 jun. 2023.

RATTANADECHOA, P. & MAKULB, N. (2016). Microwave-Assisted Drying: A Review of the State-of-the-Art. **Drying Technology**, vol. 34, n. 1, p. 1-38, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2014.957764.

AYGI, G., ERBAY, Z., KOCA, N., & PAZIR, F. (2015). Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree). **International Journal of Exergy**, 16(3), 315-336,2015. https://doi.org/10.1504/IJEX.2015.068229

TEKIN, T. & BAYRAMOĞLU, M. (1998). Exergy Loss Minimization Analysis of Sugar Production Process from Sugar Beet, **Food and Bioproducts Processing**, Volume 76, Issue 3, Pages 149-154, ISSN 0960-3085, 1998. https://doi.org/10.1205/096030898531963.

TINOCO-CAICEDO, D. L.; LOZANO-MEDINA, A. & BLANCO-MARIGORTA A. M. (2020). Conventional and Advanced Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Spray Drying System: A Case Study of an Instant Coffee Factory in Ecuador. Enhancement of Industrial Energy Efficiency and Sustainability. **Energias**, *13* (21), 5622, 2020. Disponível em: < https://doi.org/10.3390/en13215622> Acessado em: 01 de junho de 2023.

TSATSARONIS, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. **Energy.** 32, 249–253,2007. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5622>. Acessado em: 01 de junho de 2023.

TSATSARONIS, G. Thermoeconomic Analysis and Opitimization of Energy Systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 19, n. 3, p. 227-257, 1993.drying tech.

TSATSARONIS, G. & WINHOLD, M. (2018). Exergy Analysis and Optimization of Process Systems. **Elsevier Science & Technology**, 2018. ISBN: 9780128127041.

YILDIRIM, N. & GENC, S. (2017). Energy and exergy analysis of a milk powder production system. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 698-705, 2017.

AGHBASHLO M.; KIANMEHR M. H.; SAMIMI-AKHIJAHANI H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management* **2008**, 49, 10, 2865–2871. doi: 10.1016/j.enconman.2008.03.009.

SRIVASTAVA, A.K.; SHUKLA, S.K.; SINGH, U.K. The First and Second Law Analyses of Thermodynamics of Potato Slices Drying Process. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 32(4), 2017, 1-13. doi: 10.1080/21563306.2017.11909733.

AKPINAR, E. K. Thermodynamic analysis of strawberry drying process in a cyclone type dryer. *Journal of Scientific & Industrial Research* **2007**, 66, 152-161.

AKPINAR, E. K. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2004**, 31(8), 1165-1176.

AKPINAR, E. K.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Thermodynamic analysis of the apple drying process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering* **2005**, 219(1), 1–14.

AKPINAR, E. K., MIDILLI, A., BICER, Y. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering* **2006**, 72(4), 320–31.

CELMA, A.R., CUADROS, F. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy* 2009, 34(3), 660-666.

RABHA, D. K.; MUTHUKUMAR, P.; SOMAYAJI, C. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger, *Renewable Energy* **2017**, 105(C), 764-773.

CORZO, O.; BRACHO, N.; VASQUEZ, A.; PEREIRA, A. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering* **2008**, 86(2), 151-61.

ÇOLAK, N.; KUZGUNKAYA, E.; HEPBAŞLI, A. Exergetic Assessment of Drying of Mint Leaves in a Heat Pump Dryer. *Journal of Food Process Engineering* **2008**, 31(3), 281-298.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; ARABHOSSEINI, A. Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Engineering* **2009**, 91(1), 99-108.

NAZGHELICHI, T.; KIANMEHR, M. H.; AGHBASHLO, M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy* **2010**, 35(12), 4679-4684.