

Eixo Temático ET-06-009 - Energia

BOMBA DE CALOR ASSISTIDA POR ENERGIA SOLAR APLICADA A SECAGEM DE ALIMENTOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Anderson Felipe Chaves Fortes¹, Daniel Fernandes Queiroga Leite¹,
Maria Mayara de Souza Grilo², Monica Carvalho²

¹Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil; ²Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.

RESUMO

Grande parte da energia consumida na indústria alimentícia é usada para secagem. Os secadores convencionais apresentam desvantagens como baixa eficiência de secagem, menores taxas específicas de extração de umidade (SMER), altas temperaturas de operação (60°C à 90°C) e alto custo de operação. A utilização de bombas de calor para a secagem de alimentos tem se destacado por apresentar melhores eficiências de secagem, maiores SMER, e temperaturas de operação mais baixas (10°C a 65°C) do que sistemas convencionais garantindo produtos com maior qualidade, e redução na emissões de gases de efeito estufa. Pesquisas tem demonstrado a viabilidade do aproveitamento da energia solar de maneira acoplada aos sistemas de secagem com uso de bomba de calor, garantindo melhor eficiência energética e um processo mais sustentável. Este trabalho apresenta uma revisão da aplicação de bombas de calor assistidas por energia solar para a secagem de produtos alimentícios. A revisão foi realizada com base em artigos publicados em periódicos científicos (Google acadêmico e Periódicos CAPES), no período de 2011 à 2016. Verificou se a necessidade da padronização de parâmetros de performance, o elevado potencial de P&D para a aplicação de Bomba de Calor Assistida por Energia Solar aplicada a Secagem de Alimentos.

Palavras-Chave: Secagem de Alimentos, Bomba de Calor, Energia Solar, Bomba de Calor Assistida por Energia Solar.

ABSTRACT

The majority of the energy consumed by the food industry is used for drying purposes. Conventional dryers present disadvantages such as low drying efficiencies, lower specific moisture extraction rates (SMER), high operating temperatures (60°C to 90°C) and high operation costs. The utilization of heat pumps for food drying purposes has been in the spotlight lately due to higher drying efficiencies, higher SMER, lower operation temperatures (between 10°C and 65°C) that guarantee higher quality products, and reduced emissions of greenhouse gases. Research have demonstrated the viability of making use of solar energy coupled to heat pump drying systems, guaranteeing improved energy efficiency and an overall more sustainable process. This study presents a review on the application of solar energy assisted heat pumps for food drying purposes. The review was carried out by consulting the databases Google Scholar and Periódicos Capes, searching for peer-reviewed studies published in scientific journals

between 2011 and 2016. The necessity of standardization and uniformity of performance parameters was verified, along with high potential for R&D application for solar assisted heat pumps for drying purposes.

Keywords: Food drying; Heat Pump; Solar Energy; Solar Assisted Heat Pump.

INTRODUÇÃO

Mujumdar (2014) define secagem como um processo térmico de remoção de substâncias voláteis (umidade) para a fabricação de um produto sólido, sendo este processo composto por dois subprocessos: transferência de calor para o produto a fim de evaporar a umidade da superfície e transferência da umidade interna do corpo para a superfície devido ao primeiro subprocesso descrito.

Chou e Chua (2001) consideram que o processo de secagem é indispensável na indústria alimentícia, bem como na agricultura e que grandes quantidades dos produtos alimentícios passam pelo processo de secagem a fim de aumentar sua vida útil, reduzir o custo de armazenamento, transporte, garantindo uma boa aparência e mantendo o conteúdo nutritivo. Chong et al. (2014) afirma que uma das maiores preocupações do processo de secagem é com relação à qualidade dos produtos desidratados. Apesar de sua necessidade, o processo de secagem apresenta um elevado consumo energético e segundo Kemp (2011) o processo de secagem consome entre 10% e 20% de toda a energia utilizada no setor industrial dos países desenvolvidos. Segundo Fayose e Huan (2016) o aumento do preço dos combustíveis fósseis e da energia elétrica e emissão de gases nocivos à camada de ozônio associada aos secadores convencionais fez com que métodos secagem sustentáveis e com recuperação de calor tenham se tornado importantes.

Dentre as alternativas aos secadores convencionais destacam-se os secadores solares e as bombas de calor aplicadas a secagem. Jangam (2011) afirma que a aplicação de energia solar para a secagem de alimentos é promissora, contudo de acordo com Mujumdar (2014) os secadores solares apresentam dificuldades de controle dos parâmetros do processo de secagem, a dependência das condições do tempo e clima, necessidade de coletores grandes, tais problemas podem ser contornados com estratégias de controle do processo, uso de técnicas de armazenamento de energia ou de aquecedores auxiliares. A aplicação de bomba de calor na secagem de alimentos também tem se mostrado promissora, Rahman et al (2013) afirma que a Bomba de Calor tem se destacado como um método de recuperação de energia que seria desperdiçada, Best (1997) afirma que a aplicação de bomba de calor no processo de secagem apresenta grandes vantagens como uma temperatura de secagem mais baixa, o que garante menos danos às propriedades do alimento, e um melhor controle sobre as condições do processo. Diante das vantagens apresentadas pelos secadores por bomba de calor e secadores solares muitos trabalhos têm sido desenvolvidos com relação à Bomba de Calor Assistida por Energia Solar (BCAES), Zangh et al (2014) afirma que a proposta de integração de bomba de calor com coletores solares tem sido proposta e desenvolvida por muitos pesquisadores em todo mundo. De acordo com Kaygusuz e Ayhan (1999) a combinação da bomba de calor com a energia solar reduz as desvantagens de cada um operando só. Em condições de onde a energia solar apresenta condições insuficientes de promover a secagem só ela pode ser assistida pela bomba de calor ou atuar como fonte de calor da bomba. A bomba de calor operando juntamente com a energia solar apresentará menor consumo de energia e conseqüentemente melhor

eficiência energética. A Fig. 1 apresenta o esquema de uma bomba de calor assistida por energia solar com armazenamento de energia térmica onde ar é aquecido em coletores solares e passa por um reservatório térmico onde adiciona a energia à um fluido em mudança de fase, logo após, dependendo das condições da operação de secagem este ar poderá ser misturado ao ar que foi desumidificado no evaporador e aquecido no condensador da bomba de calor para então ser direcionado para a câmara de secagem. Em uma condição de insuficiência de energia solar e necessidade de aquecimento auxiliar do ar que sai da bomba de calor a energia armazenada no reservatório será utilizada para suprir a necessidade de aquecimento auxiliar.

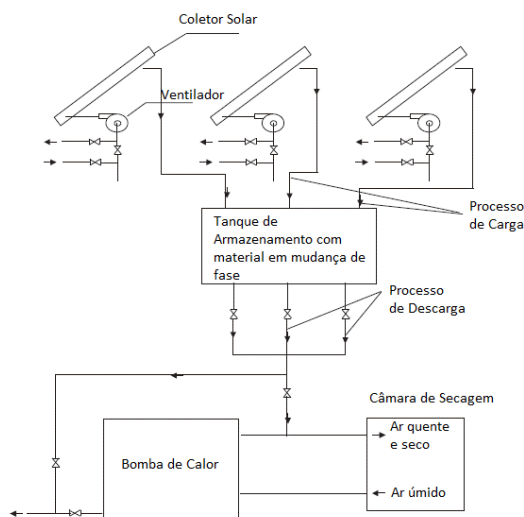


Figura 1. Esquema de um sistema de Bomba de Calor Assistida por Energia Solar com armazenamento de energia térmica; Traduzido de Chou & Chua (2006).

Definir a viabilidade de implementação de um sistema BCAES para a secagem de alimentos requer a caracterização dos parâmetros de performance dos equipamentos em termos de eficiência de secagem, gasto energético e qualidade dos produtos obtidos. Para tanto foram definidos alguns parâmetros para quantificar a performance do sistema operando em diversas situações, dentre estes parâmetros podemos destacar a Taxa Específica de Evaporação de Umidade (SMER), a Taxa de Secagem (RD), o Coeficiente de Performance da Bomba de Calor (COP) e Taxa de Utilização de Energia (EUR). O SMER representa a taxa de condensação de vapor d'água, pois fornece uma indicação da energia requerida para remover umidade do material a ser secado expressa em kg/kJ, conforme Eq. (1). Li *et al.* 2011 define que um importante parâmetro para avaliação do desempenho de um sistema de secagem é a redução da umidade do produto analisado, este parâmetro é denominado Taxa de Secagem, conforme Eq. (2).

Segundo Van Wylen (2003) o COP representa um indicador de eficiência de uma bomba de calor dado pela relação entre a energia pretendida e a energia gasta, conforme Eq. (3). Segundo Sevik *et al* (2013) a taxa de utilização de energia (EUR) na cabine de secagem, sendo representada pela Eq. (4).

$$SMER = \frac{m_{H_2O}}{W_{comp}} \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_h}{W_{comp}} \quad (3)$$

$$EUR = \frac{Q_{dc}}{Q_d} \quad (4)$$

Onde m_{H_2O} é a massa de vapor d'água condensada do ar, W_{comp} é o trabalho do compressor, Q_h é o calor rejeitado pelo condensador, M_t e $M_{t+\Delta t}$ são o teores de umidade inicial e final, respectivamente, Δt é o tempo de secagem, Q_{dc} é o calor utilizado na retirada de umidade do alimento dentro da cabine de secagem e Q_d é o fluxo líquido de calor do secador.

O objetivo deste artigo foi o de realizar uma revisão sistemática de literatura com relação à pesquisa e novas técnicas desenvolvidas para aplicação de bomba de calor assistida por energia solar para secagem de alimentos, apresentando um comparativo entre os parâmetros de performance de novos sistemas que tem sido desenvolvidos ao longo dos últimos cinco anos, avaliando as modificações no projeto do sistema e melhorias que vem sendo implementadas.

METODOLOGIA

Uma busca sistemática de artigos científicos publicados entre janeiro de 2011 a junho de 2016 foi executada nas bases de dados Periódicos CAPES, através dos descritores: Solar Assisted Heat Pump, Solar Assisted Heat Pump Dryer, assim como seus sinônimos e correspondentes na língua portuguesa, em combinações variadas. Foi utilizado, nas bases de dados possíveis, o operador booleano OR.

Critérios de Inclusão

Incluíram-se estudos experimentais que tiveram como objetivos: avaliar a performance do sistema BCAES aplicado à secagem de alimentos em diversas condições de operação, desenvolver novas técnicas de aplicação, implementar e avaliar modificações no projeto do sistema, verificar as propriedades dos produtos após o processo de secagem. Foram selecionados estudos publicados em língua inglesa ou portuguesa.

Critérios de Exclusão

Foram excluídos da revisão artigos que avaliaram BCAES para aplicações distintas da secagem de alimentos, se limitavam a análise das propriedades dos produtos após a secagem, que analisavam sistemas que funcionavam apenas por bomba de calor ou que funcionavam apenas por secadores solares, e que promoveram apenas análise teórica.

Análise

Inicialmente, foi realizada uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos localizados na busca. Posteriormente, todos os estudos que se apresentaram pertinentes ao tema foram obtidos na íntegra e analisados separadamente por três avaliadores. Por fim, os artigos analisados e selecionados pelos avaliadores, seguindo os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, foram incluídos na sistematização dos dados após reunião de consenso. As listas de referências de todos os artigos elegíveis foram consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para esta revisão.

RESULTADOS

A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 97 estudos. Após a triagem pela leitura dos títulos e resumos, 22 estudos foram considerados potencialmente elegíveis e lidos na íntegra pelos avaliadores. Ao término das análises, 6 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o estudo: Li(2011), Mortezapour (2012), Sevik (2013), Sevik (2014), Mohanraj (2014) e Yahia (2016). Os estudos selecionados foram publicados entre os anos de 2011 e 2016.

Dentre os estudos selecionados, todos foram realizados em países em desenvolvimento (China, Iran, Turquia (2), Índia, Indonésia) e sete em países em desenvolvimento. Os objetivos dos autores tiveram em comum avaliar a performance do sistema implementado.

A continuação será apresentada brevemente cada estudo, juntamente com as particularidades de cada estrutura, e os parâmetros de desempenho.

Investigação Experimental de um Sistema de Secagem em Armazém por BCAES

Li et al. (2011) desenvolveu e analisou a performance de um protótipo de bomba de calor assistida por energia solar para a secagem de alimentos em celeiro conforme Fig. 2 composto por quatro unidades: (I) bomba de calor assistida por energia solar, (II) sistema de fornecimento e recirculação de ar, (III) unidade de distribuição de ar, e (IV) agitador automático de grãos. O sistema apresenta ainda um diafragma móvel com a finalidade de possibilitar a entrada de ar fresco e controlar a temperatura do ar no processo de secagem. O sistema pode operar em quatro modos de acordo com as condições climáticas: aquecimento por energia solar, aquecimento por bomba solar, aquecimento por bomba de calor assistido por energia solar ou desumidificação bomba de calor. O agitador de grãos tem por finalidade garantir uma homogeneidade no nível de umidade dos grãos ao longo do celeiro.

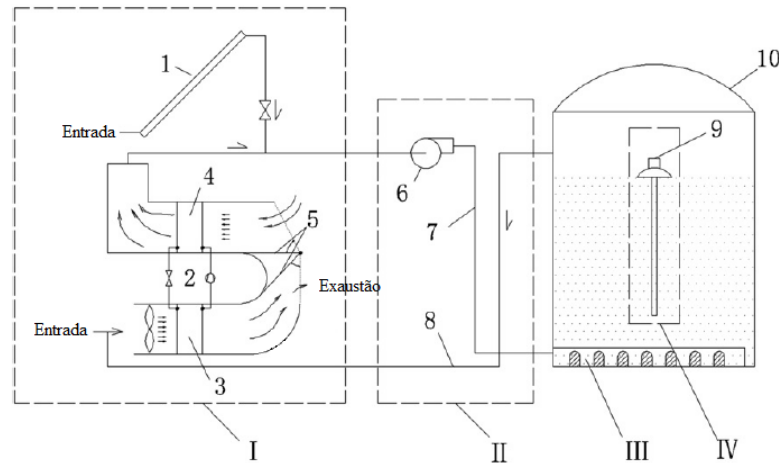


Figura 2. Esquema de um BCAES, 1. coletor solar, 2. bomba de calor, 3. evaporador, 4. condensador, 5. diafragma móvel, 6. ventilador, 7. duto de ar, 8. duto de recirculação de ar, 9. agitador de grãos, 10. Celeiro; Traduzido de Li (2011).

Foram analisados o nível de consumo de potência e a qualidade do grão (ácidos graxos e UNSOUND KERNEL). A diferença média de temperatura entre o ambiente e ar de secagem foi de 8.9 °C, a umidade relativa dentro do celeiro variou de 13.6 a 37.7 % durante um processo de 42 horas, devido à baixa temperatura de operação e o alto tempo de secagem a qualidade dos grãos não foi comprometida, o nível de consumo de potência foi de 1.24 kWh. A diferença máxima de umidade entre grãos dentro do celeiro foi de 4.2% garantindo um nível de umidade uniforme nos produtos.

Secagem de Açafraão com um Secador por Bomba de Calor Assistida por um Híbrido Fotovoltaico-Térmico Solar

Mortezapour (2012) propôs a análise de um secador híbrido fotovoltaico-térmico (PVT) solar equipado com uma bomba de calor para a secagem de açafraão conforme Fig. 3. O ar passa pelo evaporador onde é resfriado e desumidificado, segue para o coletor solar onde é aquecido e resfria o painel fotovoltaico, depois sofre aquecimento no condensador e em um aquecedor elétrico auxiliar antes de entrar na câmara de secagem. Existe ainda uma válvula de ar fresco controlada eletronicamente a fim de reduzir temperatura e umidade relativa do ar que passa no coletor solar.

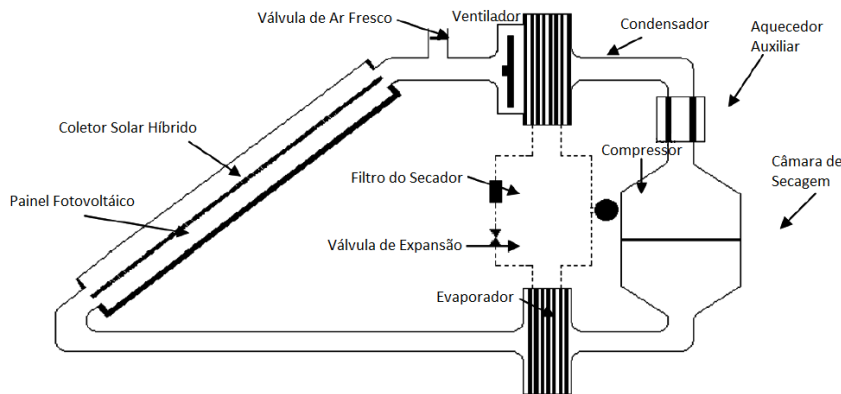


Figura 3. Esquema de Bomba de Calor Assistida por Fotovoltaico-Térmico Solar; Traduzido de Mortezapour (2012).

O sistema operou em três níveis de vazão mássica de ar (0.008, 0.012 e 0.016 kg/s) e três níveis de temperatura (40, 50 e 60 °C), em dois modos (com e sem o uso da bomba de calor). Verificou-se que a taxa de secagem aumenta com a temperatura do ar de secagem, maior fluxo de ar promove aumento da eficiência térmica (28%) e elétrica (10.2%) do sistema. A presença da bomba de calor promove desumidificação e redução da umidade relativa do ar de secagem de forma a intensificar a taxa de secagem, além de resfriar o painel fotovoltaico o que melhor a sua eficiência elétrica (redução média de 33% no consumo de energia elétrica). O secador apresentou eficiência máxima de 72% com SMER de 1.16 obtida com fluxo de ar de 0.016 kg/s e temperatura de 60°C.

Secagem de Cogumelo com BCAES

Sevik et al. (2013) examinou experimentalmente a secagem de cogumelos utilizando de um sistema de secagem por bomba de calor assistida por energia solar. Foi desenvolvido um programa de computador para monitoramento do sistema a fim de controlar temperatura de secagem, umidade relativa, peso dos produtos, velocidade do ar, dentre outros, usando de Controlador Logico Programável (CLP). O sistema é composto basicamente de câmara de secagem, bomba de calor, sistema de energia solar, dutos de ar, tubulações de água e instrumentação, conforme Fig. 4. O sistema é configurado para operar em três modos: apenas com energia solar, apenas com a bomba de calor ou bomba de calor assistida por energia solar, sendo o modo de operação definido em função de condições climáticas. O sistema apresenta ainda armazenamento de energia térmica com função de suprimento auxiliar em condições de ausência de energia solar e aquecimento da bomba de calor insuficiente.

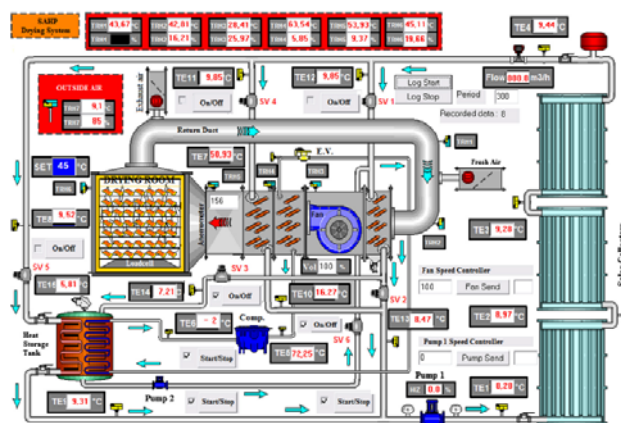


Figura 4. Programa de monitoramento de sistema de secagem BCAES (Sevik, 2013).

Foram obtidos COP entre 2.1 e 3.1, a taxa de utilização de energia variou entre 0.42 e 0.66, Smer variou entre 0.26 e 0.92 kg/kWh. Verificou-se que a energia solar é melhor em termos de consumo de energia, pois foi na situação de uso apenas de energia solar que se obteve o SMER máximo, com uma temperatura de secagem de 55 °C. Devido ao sistema de controle e instrumentação robusto o secador reduziu os erros de operação por interferência humana. A aplicação de energia solar melhorou a eficiência térmica da bomba de calor. O processo de secagem pode ser contínuo, com utilização de energia solar se disponível e funcionamento por bomba de calor na ausência de energia

solar. A melhor qualidade do cogumelo seco foi alcançada com temperatura de secagem de 45 °C, no entanto nas demais temperaturas a qualidade não foi comprometida.

Investigação Experimental de um Novo Projeto de Secador Solar-Bomba de Calor sobre Diferentes Condições Climáticas e Comportamento de Secagem dos Produtos Seleccionados

Sevik (2014) propôs um novo projeto de secador com bomba de calor assistida por energia solar para analisar experimentalmente a secagem de quatro produtos agrícolas (tomate, morango, hortelã e salsa). Através da utilização de um controlador (PID) a secagem foi realizada a uma temperatura constante de 50°C e o comportamento da secagem, bem como os efeitos do controlador no sistema, foram analisados. Constituído por unidade fotovoltaica (PV), um coletor de ar com passe duplo (DPSAC), bomba de calor (HP) e o sistema de controle automático, o secador, fig. XX, pode operar em três modos de trabalho: aquecimento por energia solar, aquecimento por bomba solar e aquecimento por bomba de calor assistido por energia solar.

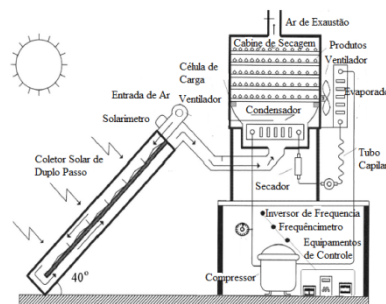


Figura 5. Esquema de BCAES. Traduzido de Sevik (2014).

Após as experiências foram obtidos como resultados os coeficientes de desempenho de todo o sistema (COP) de 1.96, 2.27, 2.28 e 2.17 para o tomate, morango, menta e salsa, respectivamente. A média da eficiência térmica da (DPSAC) foi entre 16% e 79%. Uma taxa de extração de umidade específica (SMER) de todo o sistema variando entre 0,03 kg/kW h e 0,46 kg/kW h para os produtos e uma taxa de utilização de energia (EUR) entre 0,19 e 0,48.

Performance de um Híbrido Solar-Ambiente fonte de um Secador por Bomba de Calor para Secagem de Côco sobre condições climáticas quente e úmida

Mohanraj (2014) avaliou parâmetros para verificar o desempenho energético de um sistema híbrido solar ambiente de uma bomba de calor para a secagem de coco no clima quente e úmido da Índia. A fig. XX mostra a configuração dos dois circuitos que compõem o sistema. O circuito da bomba de calor é composto por um compressor alternativo com entrada nominal de 1020 W, um condensador, um receptor líquido, um visor de vidro, um secador de refrigerante, um dispositivo de expansão termostática e um coletor solar. O circuito de secagem de ar consiste em um condensador, um ventilador com potência de 735 W, um medidor de orifício, uma válvula de controle, e uma câmara de secagem.

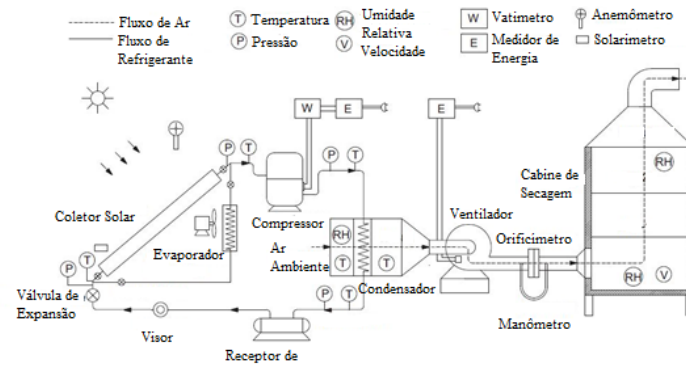


Figura 6. Esquema de BCAES. Traduzido de Monrahaj (2014).

Obteve-se como resultados um COP (coeficiente de desempenho) variando entre 2,31 e 2,77 com um valor médio de 2,54; um SMER (taxa de extração de umidade específica) de 0,79 e uma redução significativa no teor de umidade do coco de 52% para 9,2% e 9,8% nas bandejas inferior e superior colocadas na câmara de secagem em um período de 40 horas.

Projeto e Avaliação de Performance de um Secador BCAES Integrado com um Forno de Biomassa para Pimenta Vermelha

Yahya (2016) investigou o desempenho de uma bomba de calor assistida por energia solar integrada com um forno de biomassa para a secagem de pimenta vermelha. A implementação do forno busca revolver desvantagens das técnicas atuais de secagem, pois proporciona uma baixa umidade relativa do ar e possibilita a realização de processos de secagem em dias nublados, chuvosos e à noite. O sistema é constituído de bomba de calor, coletor solar, forno de biomassa, câmara de secagem e ventilador, conforme fig. 7.

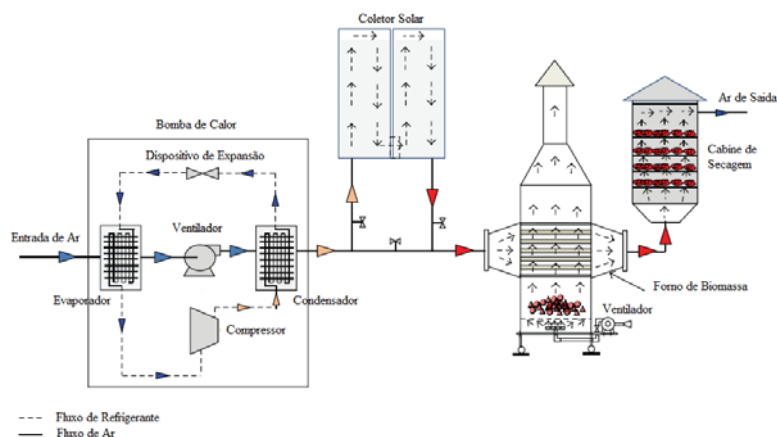


Figura 7. Esquema de BCAES acoplado à Forno de Biomassa. Traduzido de Yahya (2016).

Comparou-se a secagem com bomba de calor com a secagem ao sol aberto e obteve-se uma economia de tempo de secagem de 82% em uma amostra de 22 kg. Foram obtidos em média uma taxa de secagem de 1,57 kg/h, uma taxa de extração de umidade específica (SMER) de 0,14 kg/kWh e uma eficiência térmica do secador de

9.03%. O desempenho de três modelos matemáticos (Newton, Henderson-Pabis e Page) foi avaliado, para verificar qual modelo descreve melhor a cinética da secagem das pimentas vermelhas, a partir da comparação entre o coeficiente de desempenho (COP) da bomba de calor obtido de 3.84.

DISCUSSÃO

Nesta secção serão feitas comparações entres os parâmetros de performance dos artigos apresentados bem como as estruturas. Além dos parâmetros de performance previamente definidos na tabela estão apresentados ainda, Eficiência Térmica do Coletor Solar (ETCS), Conteúdo de Umidade Inicial (CUI) e Conteúdo de Umidade Final (CUF) e Tempo de Secagem (TS).

Tabela 7. Parâmetros Avaliados em BCAES Aplicados à Secagem de Alimentos

	SMER (kg/kWh)	EUR	COP	ETCS(%)	CUI (%)	CUF(%)	TS (h)
Li (2011)					12.90	12.50	42.0
Montezapour (2012)	1.16			10.8 a 28			
Sevik (2013)	0.26 a 0.92	0.42 a 0.66	2.10 a 3.10	50 a 75	92.98	6.50	2.8 a 4.5
Sevik (2014)	0.03 à 0.46	0.19 a 0.48	1.96 a 2.28				
Monrahaj (2014)	0.79		2.31 a 2.77		52.00	9.80	40.0
Yahia (2016)	0.14				80.99	7.41	11.0

Análise de Parâmetros de Desempenho Térmico: COP e ETCS

Com relação ao COP três trabalhos apresentaram a análise deste parâmetro, onde os melhores resultados foram obtidos em Sevik (2013) e Monrahaj (2014). No entanto vale ressaltar que Monrahaj (2014) calculou o COP especificamente da Bomba de Calor considerando apenas o trabalho do compressor e o calor do condensador, não apresentando as influências do coletor solar e do consumo de energia dos demais componentes do sistema, enquanto que Sevik (2013) definiu o COP da Bomba de Calor e também o COP do sistema como um todo levando em conta os consumos de energia de equipamentos auxiliares do sistema, mas também não leva em conta o efeito do aquecimento do coletor solar, conseqüentemente se Monrahaj (2014) considerasse a energia consumida por demais equipamentos do sistema poderia apresentar um COP ainda menor. Seria interessante a implementação de uma eficiência exegética pois esta leva em conta as condições do meio que apresentam importância significativa no processo de secagem.

Montezapour (2012) e Sevik (2013) apresentam a eficiência térmica de seus coletores solares, o que deveria também ser um padrão tendo em vista que a energia solar é um dos princípios de funcionamento de BCAES, no entanto este parâmetro também sofre influência do meio e de disponibilidade que depende das condições climáticas de cada região.

Parâmetros de Performance de Desempenho Elétrico: EUR e SMER

Com relação à desempenho elétrico existe a necessidade de padronização de um parâmetro para este critério de desempenho. Os trabalhos de Sevik (2013) e Sevik (2014) apresentaram este critério de desempenho, Li (2011) apresentou a energia total consumida durante o seu procedimento de secagem e a energia consumida para reduzir em 1% o conteúdo de umidade de 1 tonelada de grão. Montezapour (2012) apresentou também a energia total consumida para os processos de secagem que analisou.

Com relação ao SMER os trabalhos de Monrahaj (2014) e Sevik (2013) apresentaram melhores resultados. Existe uma dificuldade na comparação destes resultados tendo em vista que alimentos diferentes apresentam comportamentos diferentes durante o processo de secagem, e que indiretamente as condições climáticas afetam as condições do ar de secagem, principalmente em sistemas abertos e sistemas que não possuem implementação de controle e instrumentação robustos. O parâmetro SMER tem se apresentado como um padrão de análise, tendo sido apresentado em 5 dos 6 trabalhos analisados, no entanto seria importante a criação de um parâmetro que levasse em conta as propriedades de secagem de para diferentes tipos de alimento.

Parâmetro de Secagem: DR

A Taxa de Secagem apresenta a a relação entre a massa da umidade retirada e o tempo aplicado para a retirada desta massa, apenas Yahia (2016) apresentou um valor médio este parâmetro em seu procedimento. DR se apresenta como um importante parâmetro a ser acompanhado durante o processo de secagem a fim de caracterizar o comportamento dos alimentos a medida que o processo de secagem se desenvolve.

Parâmetros de Operação

Um dos principais parâmetros de operação pode ser destacado é a temperatura do ar de secagem que variou de 40 à 60 °C, percebe-se que maiores temperaturas levam à um menor tempo de secagem e a maiores danos nas propriedades nutritivas e estéticas dos produtos, no entanto para os trabalhos analisados os danos provocados pelas temperaturas mais elevadas não comprometeram a qualidade dos produtos.

Melhorias de Projeto

Li (2011) teve como principal contribuição propor uma secagem continua de produtos já armazenados, apesar de conteúdo de umidade retirado ter sido baixo houve uma grande contribuição pela garantia de uma melhor uniformidade do conteúdo de umidade de todo produto armazenado, apresentando uma padronização desta característica dos produtos. Montezapour (2012) implementou um coletor solar termo-fotovoltaico que aproveitou a energia solar tanto para aquecimento de ar como produção de energia elétrica, fazendo ainda com que o evaporador da bomba de calor resfriasse a placa fotovoltaica aumentando sua elétrica. Sevik (2013) apresentou um sistema de instrumentação e controle robusto garantindo um melhor controle sobre os parâmetros de operação, propriedades do produto seco e reduzindo a possibilidade de erro humano além de também utilizar o coletor solar como fonte de calor para a Bomba de Calor. Sevik (2014) implementou um controle PID estratégico que garantia a temperatura de secagem independente das condições ambientais, o sistema alterava seus modos de operação automaticamente em função das condições climáticas. Monrahaj (2014) apresentou um sistema eficiente aproveitando de melhores condições climáticas. Yahia (2016) apresentou a queima de biomassa como uma alternativa para aquecimento

auxiliar do ar de secagem, podendo se aproveitar de resíduos orgânicos para complementar o fornecimento de calor ao ar e conseqüentemente reduzir o consumo de energia da bomba de calor.

CONCLUSÃO

A principal vantagem da secagem por meio de bomba de calor emerge da habilidade destes dispositivos de recuperar energia dos gases de exaustão, e também de controlar a temperatura e umidade das condições de secagem. Existe vasta literatura científica sobre a importância de condições precisas de secagem para melhorar a qualidade dos produtos. A revisão sistemática e detalhada desenvolvida neste trabalho teve o objetivo de consultar o Google Acadêmico e o Periódicos CAPES, restringindo a busca para artigos publicados entre 2011 e 2016, com as seguintes palavras-chave Bomba de Calor Assistida por Energia Solar, Secagem de Alimentos, Heat Pump Dryer, Solar Energy.

Esta revisão mostrou que sistemas BCAES aplicados a secagem apresentam um grande potencial em pesquisa em desenvolvimento, observa-se a necessidade de padronização dos parâmetros de performance e criação de novos que levem em conta as condições ambientais de cada região e as propriedades dos tipos de alimento que estão sendo secados. Observa-se também que o sistema é promissor, apresentando diversas vantagens com relação aos secadores convencionais, e que a implementação de controle e instrumentação adequados podem promover ainda mais melhorias nos sistemas bem como nos produtos. Inovações tem sido implementadas e associação deste sistema a outros sistemas térmicos vem sendo avaliadas. É essencial para os países que apresentam uma indústria alimentícia forte o desenvolvimento de pesquisa no sentido de aprimorar os sistemas de secagem e promover o desenvolvimento de equipamentos sustentáveis e eficientes e neste contexto se encaixa o Brasil e a Pesquisa & Desenvolvimento de Bombas de Calor Assistidas por Energia Solar para a Secagem de Alimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (projetos 475879/2013-9 e 303199/2015-6).

REFERÊNCIAS

- BEST, R. et al. Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system. **Renewable energy**, v. 9, n. 1, p. 690-694, 1996.
- CHONG, C. H.; FIGIEL, A.; LAW, C. L.; WOJDYŁO, A. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 4, p. 975-989, 2014.
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, n. 10, p. 359-369, 2001.
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. **Heat pump drying systems**. Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2006.

FAYOSE, F.; HUAN, Z. Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa. **International Journal of Food Science**, 2016.

JANGAM, S. V. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. **Drying Technology**, v. 29, n. 12, p. 1343-1357, 2011.

KAYGUSUZ, K.; AYHAN, T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 13, p. 1377-1396, 1999.

KEMP, I. C. Fundamentals of energy analysis of dryers. **Modern Drying Technology**, v. 4, p. 1-46, 2011.

LI, Y. et al. Experimental investigation on a solar assisted heat pump in-store drying system. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1718-1724, 2011.

MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. CRC Press, 2014.

MOHANRAJ, M. Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions. **Energy for Sustainable Development**, v. 23, p. 165-169, 2014.

MORTEZAPOUR, H. et al. Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. **Drying Technology**, v. 30, n. 6, p. 560-566, 2012.

RAHMAN, S. M. A.; SAIDUR, R.; HAWLADER, M. N. A. An economic optimization of evaporator and air collector area in a solar assisted heat pump drying system. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 377-384, 2013.

ŞEVIK, S. et al. Mushroom drying with solar assisted heat pump system. **Energy Conversion and Management**, v. 72, p. 171-178, 2013.

ŞEVIK, S. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. **Solar Energy**, v. 105, p. 190-205, 2014.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2003.

YAHYA, M. Design and Performance Evaluation of a Solar Assisted Heat Pump Dryer Integrated with Biomass Furnace for Red Chilli. **International Journal of Photoenergy**, v. 2016, ID 8763947, 14 p, 2016.

ZHANG, D.; WU, Q. B.; LI, J. P.; KONG, X. Q. Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, n. 1, p. 522-528, 2014.