

**Consumo específico de energia na secagem de café com sistema de aquecimento resistivo
e bomba de calor**

**Specific energy consumption in drying coffee with resistive heating system and heat
pump**

**Consumo de energía específico en café seco con sistema de calefacción resistente y
bomba de calor**

Recebido: 06/08/2020 | Revisado: 11/08/2020 | Aceito: 14/08/2020 | Publicado: 19/08/2020

Rodrigo Aparecido Jordan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-4461>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: rodrigojordan@ufgd.edu.br

Valdiney Cambuy Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0330>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: vcambuy@yahoo.com

Wellytton Darci Quequeto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0658-2692>

Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: wellytton_quequeto@hotmail.com

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-207X>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: mcavalcantimata@gmail.com

Renata Henrique Hoscher

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5724-7173>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: renatahoscher@hotmail.com

Geraldo Acácio Mabasso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-8195>

Universidade Zambeze, Moçambique

E-mail: geral.do@hotmail.com

Maurício Battilani

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-1633>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: mauriciobattilani@gmail.com

Fabrício Correia de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7373-0667>

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

E-mail: fcoliveira@utfpr.edu.br

Elton Aparecido Siqueira Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3195-2317>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: eltonmartins@ufgd.edu.br

Ricardo Lordelo Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0998-9834>

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

E-mail: ricardolordelo@hotmail.com

Resumo

No Brasil, o uso de bombas de calor em processos de secagem se limita a poucos trabalhos experimentais, com o emprego de equipamentos importados para uso restritamente laboratorial, em escalas muito pequenas. Assim, o trabalho traz contribuições importantes, pois disponibiliza uma série de informações, como dados energéticos, que podem ser empregados para dimensionamento. No trabalho de pesquisa laboratorial de secagem de café natural e descascado em diferentes temperaturas, foram utilizados dois sistemas: um secador convencional com aquecimento resistivo e um protótipo de controlador higroscópico baseado em tecnologia de calor. Objetivou-se com o trabalho determinar e avaliar o consumo de energia elétrica, a taxa específica de remoção de água (SMER) e o coeficiente de desempenho (COP) da bomba de calor. Os valores experimentais da SMER obtidos para o secador com bomba de calor variaram entre 0,0188 e 0,1169 kg de água/kWh, enquanto que para o secador convencional, estes valores ficaram entre 0,0058 e 0,01 kg de água/kWh. Os resultados mostraram que o secador com bomba de calor foi mais eficiente que o secador convencional, de aquecimento sensível e que os valores da SMER dependem das condições de secagem e das características físicas do produto.

Palavras-chave: Secagem; Bomba de calor; *Coffea arabica* L.; Energia.

Abstract

In Brazil, the use of heat pumps in drying processes is limited to a few experimental works, with the use of imported equipment for strictly laboratory use, on very small scales. Thus, the work brings important contributions, as it provides a series of information, such as energy data, that can be used for dimensioning. In the laboratory research work on drying natural and pulped coffee at different temperatures, two systems were used: a conventional dryer with resistive heating and a prototype of a hygroscopic controller based on heat technology. The objective of this work was to determine and evaluate the consumption of electric energy, the specific rate of water removal (SMER) and the heat pump performance coefficient (COP). The SMER experimental values obtained for the heat pump dryer ranged between 0.0188 and 0.1169 kg of water / kWh, whereas for the conventional dryer, these values were between 0.0058 and 0.01 kg of water / kWh. The results showed that the heat pump dryer was more efficient than the conventional, sensitive heating dryer and that the SMER values depend on the drying conditions and the physical characteristics of the product.

Keywords: Drying; Heat pump; *Coffea arabica* L.; Energy.

Resumen

En Brasil, el uso de bombas de calor en procesos de secado se limita a unos pocos trabajos experimentales, con el uso de equipos importados para uso estrictamente de laboratorio, en escalas muy pequeñas. Así, el trabajo aporta importantes aportes, ya que aporta una serie de información, como datos energéticos, que se pueden utilizar para el dimensionamiento. En el trabajo de investigación de laboratorio sobre el secado de café natural y despulpado a diferentes temperaturas, se utilizaron dos sistemas: un secador convencional con calentamiento resistivo y un prototipo de controlador higroscópico basado en tecnología de calor. El objetivo del trabajo fue determinar y evaluar el consumo de energía eléctrica, la tasa específica de remoción de agua (SMER) y el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor (COP). Los valores experimentales SMER obtenidos para el secador con bomba de calor oscilaron entre 0,0188 y 0,1169 kg de agua / kWh, mientras que para el secador convencional estos valores estuvieron entre 0,0058 y 0,01 kg de agua / kWh. Los resultados mostraron que el secador con bomba de calor era más eficiente que el secador de calor sensible convencional y que los valores SMER dependen de las condiciones de secado y las características físicas del producto.

Palabras clave: Secado; Bomba de calor; *Coffea arabica* L.; Energía.

1. Introdução

O aumento da velocidade de secagem pode ser obtido tanto a partir da elevação da temperatura de bulbo seco, redução da umidade relativa do ar, como também aumentando o fluxo de ar. A elevação da temperatura de secagem pode proporcionar danos térmicos e físicos ao produto e comprometer sua integridade. Já a redução da umidade relativa nos processos de secagem ainda é restrita no Brasil, por falta de domínio da tecnologia para aplicação em escala comercial.

Sistemas de secagem que possam operar com temperaturas relativamente baixas, representam uma solução para melhorar a qualidade de produtos sensíveis a temperatura, com a possibilidade de serem mais eficientes no que diz respeito ao consumo de energia, uma vez que utilizam o potencial de secagem do ar ambiente (Ziegler et al., 2013; Taşeri et al., 2018). Contudo, há uma dificuldade em obter baixas temperaturas de secagem em secadores convencionais, pois estes são baseados em aquecimento sensível, estando associado com a umidade relativa. Desta forma, para se obter baixa umidade relativa, tem-se que aumentar a temperatura, o que acaba sendo prejudicial para a qualidade do produto.

Diante disso, a inclusão da bomba de calor em um sistema de secagem proporciona baixos valores de umidade relativa sem a necessidade de elevação da temperatura e do fluxo de ar de secagem. Temperaturas mais baixas proporcionam menores danos térmicos e físicos, além de manter os princípios ativos e essências que podem ser volatilizados com a elevação da temperatura.

Os sistemas que utilizam bombas de calor podem garantir a viabilidade do processo de secagem e a manutenção da qualidade do produto. A secagem por bomba de calor tem sido amplamente relatada como um processo energeticamente eficiente (Dong et al., 2017; 2019). Outra vantagem dos sistemas de bomba de calor é a possibilidade de automação completa dos parâmetros, melhorando o controle das condições de operação (Liu et al., 2017).

Não menos importante é também a questão econômica, devido ao impacto do custo energético da secagem nos processos produtivos de alimentos (Mellmann & Füll; 2008). Alguns trabalhos comprovam a eficiência energética e a economia que as bombas de calor podem proporcionar em processos de secagem (Aktas et al., 2014; 2017; Taşeri et al., 2018).

Tendo em vista como a secagem pode interferir significativamente na qualidade do café (Alves, 2013, Borém et al., 2018; Kulapichitr et al., 2019), estudos e avaliações de novos métodos e sistemas, que venham contribuir para a manutenção da qualidade do produto ganham importância.

No Brasil, o uso de bombas de calor em processos de secagem, se limita a alguns poucos trabalhos experimentais, com o emprego de equipamentos importados, para uso restritamente laboratorial, em escalas muito pequenas. Onde geralmente, não são reportados dados sobre o equipamento. O que leva a uma escassez de informações para aqueles que desejam investir no uso dessa tecnologia. Nesse contexto, o trabalho traz contribuições importantes, pois disponibiliza uma série de informações, como dados energéticos, que podem ser empregados para dimensionamento.

2. Metodologia

A pesquisa de laboratório foi realizada na Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), onde foram realizados os ensaios de secagem, utilizando dois tipos de secadores, um convencional, de aquecimento sensível com resistências elétricas e, outro, com bomba de calor.

Foram utilizados cafés (*Coffea arabica* L. cv. Catiguá), natural e descascado, proveniente da propriedade Vale das Palmeiras, produtora de café gourmet, localizada no município de Ribeirão Claro-PR. Na propriedade (Figura 1), os cafés foram submetidos a pré-secagem (meia seca) em terreiro suspenso até os teores médios de água de 35,20 e 44,87% em base úmida (b.u.), para o café natural e descascado, respectivamente, correspondendo a 0,80 e 0,56 em base seca (b.s.), que foi a condição inicial nos experimentos de secagem. Ao chegar no laboratório, os cafés foram submetidos a um processo manual de limpeza, descartando as impurezas e os grãos que apresentarem algum tipo de dano. O teor de água foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24 h em três repetições de, aproximadamente, 30 g (adaptado de Brasil, 2009).

Figura 1 - Pré-secagem (meia seca) do café natural e descascado em terreiro suspenso e coberto na propriedade Vale das Palmeiras.

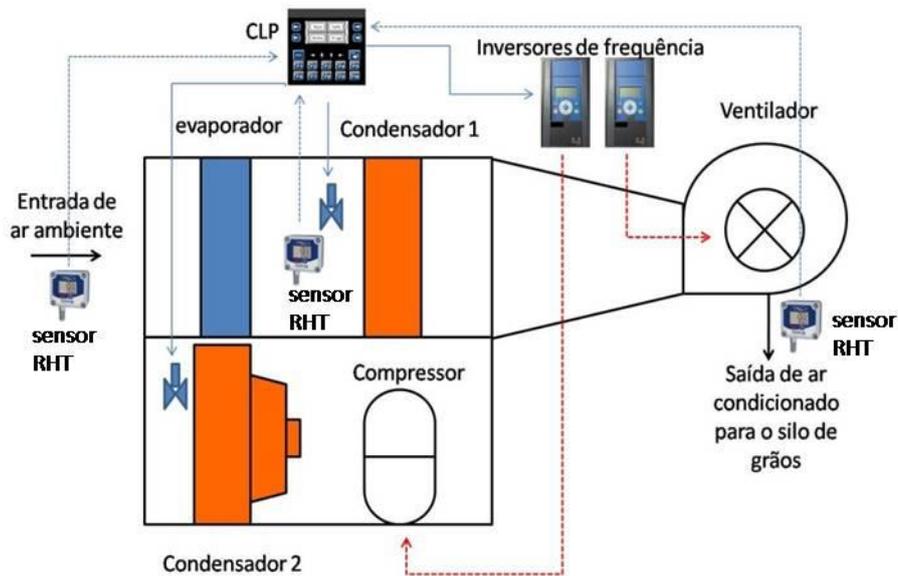


Fonte: Própria (2020).

Posteriormente, os cafés foram submetidos ao processo de secagem. No secador convencional foi utilizada apenas a temperatura de 40 °C, devido a limitação de se trabalhar com temperaturas mais baixas, pelo fato da tecnologia ser baseada em aquecimento sensível do ar. Enquanto que, no sistema de bomba de calor, foram utilizadas as temperaturas de 30, 35 e 40 °C. A massa das amostras foi monitorada periodicamente, em uma balança analítica com resolução de 0,01 g, encerrando a secagem quando o teor de água final atingiu o valor de 11% em base úmida (b.u.), correspondente a 0,13 em base seca (b.s.).

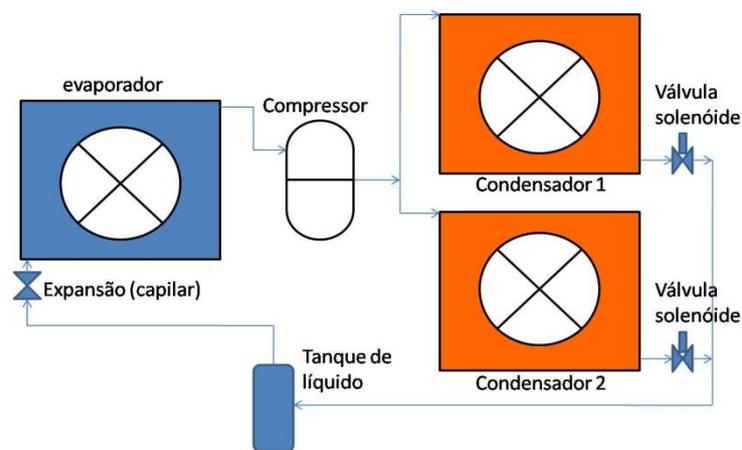
O sistema com bomba de calor utilizado, desenvolvido e instalado no Laboratório de Termodinâmica, Refrigeração e Energia (LTRE) da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da UFGD, consiste de um módulo de controle higroscópico (MCH) para grãos armazenados com capacidade de resfriamento nominal de 1 TR (3024 kcal h⁻¹). Esse equipamento foi projetado para levar o produto a condição de umidade de equilíbrio. O mesmo é capaz de resfriar, secar e elevar o teor de água no produto, dependendo da necessidade. Isto através do uso em série (no mesmo duto) do evaporador e do condensador do sistema de refrigeração. O sistema ainda conta com um condensador auxiliar (condensador 2) para controlar o reaquecimento do ar, de acordo com as condições selecionadas (Figura 2). O direcionamento do fluxo de fluido refrigerante entre cada condensador é feito por válvulas solenóides (Figura 3), agindo no controle de aquecimento do ar.

Figura 2 - Esquema de montagem do módulo de resfriamento.



Fonte: Própria (2020).

Figura 3 - Controle de fluxo nos condensadores.



Fonte: Própria (2020).

A operação do equipamento é supervisionada por um controlador lógico programável (CLP), onde estão inseridas as equações de umidade de equilíbrio. A operação começa com a seleção do produto, em seguida a temperatura e a umidade de equilíbrio desejada (Figura 4). O CLP faz o ajuste automático das condições de operação (rotação do ventilador, rotação do compressor, abertura e fechamento das válvulas solenóides de controle de fluxo de fluido refrigerante pelos condensadores) em função das informações fornecidas por sensores de temperatura e umidade relativa (RHT) instalados na entrada e saída do ar, para que as

condições programadas sejam atendidas.

Figura 4 - Tela do CLP inserção dos dados de entrada e tela com as informações da condição do ar de saída.



Fonte: Própria (2020).

Nos testes de secagem, com pequenas quantidades de produto, o MCH foi conectado a uma câmara isolada (Figura 5), a qual possuía 6 saídas, permitindo o uso de até 6 peneiras de produto para secagem. O conjunto conta com um sistema de aquisição de dados conectado a um computador, o qual monitora e grava os dados de UR e temperatura da câmara de secagem (Figura 6).

Figura 5 - Câmara utilizada em conjunto com o MCH.



Fonte: Própria (2020).

Figura 6 - Câmara conectada ao MCH e sistema de aquisição de dados de UR e T.



Fonte: Própria (2020).

O secador convencional (Figura 7), instalado no Laboratório de Pós-colheita da FCA, é um secador experimental de leito fixo, desenvolvido para secagem com controle de temperatura e variação do fluxo de ar. O mesmo utiliza um conjunto de resistências elétricas com potência nominal de 12 kW para promover o aquecimento do ar. Um controlador de temperatura tipo PID (proporcional integral derivativo), através de um controlador de potência variável, regula a potência das resistências elétricas em função do fluxo de ar ajustado e da temperatura selecionada (Goneli et al., 2016).

Figura 7 - Secador experimental de leito fixo instalado laboratório de Pós-colheita.



Fonte: Própria (2020).

Em ambos os sistemas de secagem foram utilizados medidores para medir o consumo de energia elétrica durante a secagem, para comparações entre os sistemas. Para isso foram empregados medidores de energia elétrica polifásicos, modelo Landis Gyr E650 (Figura 8).

Figura 8 - Medidor de energia elétrica polifásico.



Fonte: Própria (2020).

O secador convencional, com 4 bandejas, foi carregado, em média, nos ensaios de secagem, com 5,2 kg de café natural e 3,2 kg de café descascado. No secador com bomba de calor, o carregamento médio inicial foi de 7,4 kg de café descascado e 5,2 kg de café natural.

A taxa específica de extração de água para os ensaios de secagem (SMER) (Strømmen et al., 2003), foi calculada através da Equação 1.

$$SMER = \frac{(M_i - M_f)}{CE} \quad (1)$$

em que,

$SMER$ = taxa específica de extração de água para os ensaios de secagem (kg de água/kWh);

M_i = massa de produto no início da secagem (kg);

M_f = massa de produto no final da secagem (umidade 11% b.u.) (kg);

CE = consumo de energia medido durante a secagem (kWh).

Como a capacidade de secagem dos dois sistemas empregados era superior a quantidade de produto utilizada nos ensaios, foi estimada a capacidade nominal de secagem dos

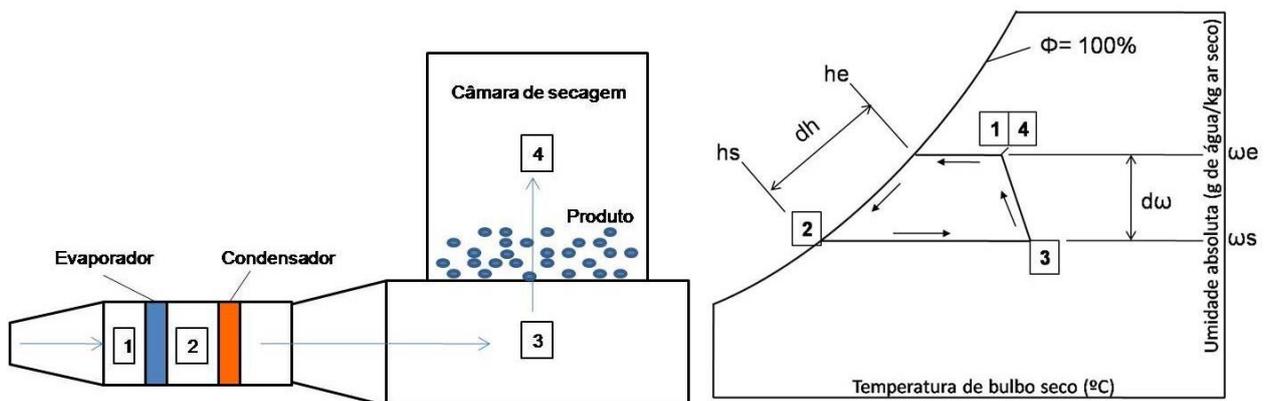
equipamentos em cada condição, para assim determinar a taxa específica de extração de umidade na condição nominal dos equipamentos.

Para o sistema com bomba de calor (BC), a capacidade nominal foi estimada com base no potencial de remoção de água do ar de secagem. Para isso, foi assumido que o ar após passar pelo produto sofreria um processo de umidificação a temperatura constante até atingir um valor de umidade relativa correspondente a condição de umidade de equilíbrio ajustada no equipamento (11% em base umidade), de acordo com o modelo adotado, que foi a equação de Harkins-Jura modificada (Jordan et al., 2020).

Em cálculos preliminares foi observado que assumindo essa condição, o ponto de estado do ar após passar pelo produto, conduzia a um valor de umidade absoluta muito próximo do valor na entrada do evaporador. Dessa forma a variação de umidade absoluta do ar durante a passagem pelo produto (câmara de secagem) poderia ser considerada equivalente a variação de umidade absoluta no evaporador.

A Figura 9 ilustra esse modelo, proposto por Strømme et al. (2003) e adotado no trabalho, indicando os pontos no sistema de secagem e na carta psicrométrica, onde é assumido que a quantidade de água removida do produto pelo ar (potencial de secagem), é proporcional a quantidade de água removida do ar no evaporador ($d\omega$).

Figura 9 - Modelo adotado para o processo de secagem com bomba de calor.



Fonte: Própria (2020), adaptado de Strømme et al. (2003).

Assim, a taxa de remoção de água pelo secador BC, proporcional a remoção de água pelo evaporador, foi calculada pela Equação 2.

$$\dot{M}_{\text{água}} = \dot{M}_{\text{ar}} \cdot (\omega_e - \omega_s) 360 \quad (2)$$

em que,

$\dot{M}_{\text{água}}$ = taxa de remoção de água (kg de água/ h);

\dot{M}_{ar} = vazão mássica de ar seco (kg de ar seco/s);

Q_e = umidade absoluta na entrada do evaporador (kg de água/kg ar seco);

Q_s = umidade absoluta na saída do evaporador (kg de água/kg ar seco).

A vazão mássica de ar seco (Equação 3) foi determinada com base na capacidade do evaporador e na variação da entalpia do ar no evaporador. A capacidade do evaporador (Q_0) foi obtida no catálogo técnico do compressor utilizado na bomba de calor, com base nos valores de temperatura de evaporação e condensação para cada temperatura de secagem (Tabela 1). Foi considerada uma eficiência de troca de calor de 80% para o evaporador (Jordan et al., 2018).

$$\dot{M}_{\text{ar}} = \frac{\dot{Q}_0 \cdot 0,80}{(h_e - h_s)} \quad (3)$$

em que,

h_e = entalpia do ar seco na entrada do evaporador (kJ/kg ar seco);

h_s = entalpia de saída do ar seco (kJ/kg ar seco).

Tabela 1 - Valores de capacidade do evaporador (Q_0) para cada condição de operação.

T secagem (°C)	Te (°C)	Tc (°C)	Q_0 (kJ/s)
30 °C	-5	30	4,52
35 °C	0	35	5,27
40 °C	5	40	6,07

Nota: Te (temperatura de evaporação), Tc (temperatura de condensação).

Fonte: Própria (2020).

Os valores das propriedades psicrométricas entalpia e umidade absoluta do ar foram determinados através do programa computacional Grapsi 8.1.1, utilizando os valores de temperatura e umidade relativa fornecidos ao CLP pelos sensores RHT instalados ao longo do duto de ar da bomba de calor, conforme mostrado na Figura 2.

A taxa específica de extração de água para a condição nominal de operação do secador

BC ($SMER_{NBC}$) (Strømme et al., 2003), foi determinada através da Equação 4.

$$SMER_{NBC} = \frac{\dot{M}_{\text{água}} \cdot t_s}{CE} \quad (4)$$

em que,

$SMER_{NBC}$ = taxa específica de extração de água para a capacidade nominal do secador BC (kg de água/kWh);

t_s = tempo de secagem em cada temperatura (h).

O coeficiente de desempenho (COP) da bomba de calor, considerando o calor entregue no condensador, foi calculado através da Equação 5, ajustada a partir da equação utilizada por Strømme et al. (2003).

$$COP = \frac{SMER_{NBC} \cdot (h_e - h_s)}{3600 \cdot (\omega_e - \omega_s)} + 1 \quad (5)$$

Para o secador convencional, a taxa específica de extração de água para a capacidade nominal ($SMER_{NCV}$), foi estimada com base na relação de consumo de energia obtida entre o secador BC e este para a mesma temperatura de secagem (Equação 6), tendo em vista a estreita relação observada entre a diferença de consumo de energia e coeficiente de desempenho da bomba de calor.

$$SMER_{NCV} = \frac{CE_{BC}}{CE_{CV}} \cdot SMER_{NBC} \quad (6)$$

A capacidade nominal de secagem da bomba de calor, em massa de produto úmido (massa inicial de produto), foi determinada através da Equação 7, em função da massa de produto seco (umidade zero) e da umidade inicial (0,80 (b.s.) para café descascado e 0,56 (b.s.) para café natural).

$$M_{ip} = \frac{M_{sp}}{(1 - U_i)} \quad (7)$$

em que,

M_{ip} = massa inicial de produto úmido (kg);

M_{sp} = massa seca de produto (umidade zero) (kg);

U_i = umidade inicial (b.s.)

A massa seca foi calculada através da equação 8, onde a diferença entre a massa inicial e massa final é a própria quantidade total de água removida durante o processo de secagem, obtida do produto da taxa de remoção de água ($\dot{M}_{\acute{a}gua}$) pelo tempo de secagem (t_s) (Equação 9). Os valores de umidade da Equação 8 também são em base seca.

$$M_{sp} = \frac{M_{ip} - M_{fp}}{(U_i - U_f)} = \frac{M_{\acute{a}gua}}{(U_i - U_f)} \quad (8)$$

em que,

M_{fp} = massa de produto com umidade final (kg);

$M_{\acute{a}gua}$ = massa total de água removida durante a secagem (kg);

U_f = umidade final (11% b.u., 0,13 b.s.).

$$M_{\acute{a}gua} = \dot{M}_{\acute{a}gua} t_s \quad (9)$$

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados dos tempos de secagem e consumo de energia elétrica dos secadores para as condições de secagem. Com base nos dados para o secador BC, verificou-se que o aumento da temperatura de secagem propiciou redução do tempo de secagem e no consumo de energia elétrica. Por outro lado, temperaturas mais elevadas, podem causar perda de qualidade em produtos sensíveis como o café (Borém et al., 2018).

Tabela 2 - Tempo de secagem (t_s), consumo de energia (CE) e potência média (P_m) durante os ensaios.

Ensaio	Secador BC			Secador convencional		
	t_s (h)	CE (kWh)	P_m (kW)	t_s (h)	CE (kWh)	P_m (kW)
Descascado 30 °C	44,00	88,42	2,00	-	-	-
Descascado 35 °C	21,08	42,15	1,99	-	-	-
Descascado 40 °C	17,50	33,35	1,90	17,00	125,26	7,36
Natural 30 °C	116,00	228,34	1,97	-	-	-
Natural 35 °C	54,00	101,03	1,87	-	-	-
Natural 40 °C	40,17	75,96	1,89	27,80	347,24	13,46

Fonte: Própria (2020).

Na condição de secagem de 40 °C, para o café descascado, o consumo de energia do secador convencional foi 3,76 vezes o consumo do secador BC, com tempos de secagem bem similares, 17 e 17,50 h, respectivamente. Já para o café natural, houve um acréscimo de 44% no tempo de secagem do secador BC em relação ao secador convencional. Por outro lado, a diferença de consumo do secador convencional em relação ao secador BC, aumentou, sendo 4,57 vezes superior. Isso foi devido ao aumento de vazão de ar do secador convencional, que exigiu maior potência de aquecimento, o que nesse caso permitiu reduzir o tempo de secagem, porém, fez com que a potência elétrica média saltasse de 7,36 para 13,46 kW.

No caso do secador BC, como todos os ajustes, inclusive a vazão de ar, são feitos pelo CLP, em função das condições programadas, a potência média elétrica requerida sofreu pouquíssima variação entre as condições de secagem.

Essas diferenças entre os dois sistemas, evidenciam a eficiência energética da bomba de calor em processos de secagem (Ziegler et al., 2013; Taşeri et al., 2018). Mellmann & Füll (2008) calcularam que os custos de energia da secagem variam de 30 a 55% dos custos totais no processamento de plantas medicinais e aromáticas

Para ambos os sistemas de secagem, os tempos e o consumo de energia elétrica foram maiores para o café natural. Segundo Siqueira et al. (2017) isso se deve às diferenças morfológicas entre o café descascado e o natural. Quanto maior o número de barreiras físicas, menor será a difusão de líquidos (Alves, 2013).

Por outro lado, a redução no tempo de secagem, provoca aumento da taxa de remoção de água do produto (kg de água/h), afetando negativamente a qualidade sensorial do café (Alves, 2013, Borém et al., 2018).

A Tabela 3 apresenta os valores experimentais de taxa específica de extração de água, obtidos nos ensaios de secagem. Por estarem relacionados diretamente ao consumo de energia dos secadores, e pelo fato deste aumentar com tempo de secagem, o comportamento dos valores de SMER foi inversamente proporcional ao tempo de secagem e proporcional ao aumento de temperatura. A elevação de temperatura proporcionou um aumento da massa de água removida por kWh consumido, melhorando a eficiência energética do secador BC.

Também pela diferença física existentes entre os dois tipos de café (Siqueira et al., 2017), os valores de SMER foram menores para o café natural nos dois secadores, evidenciando a maior necessidade de energia para a remoção de água. No caso do secador BC, em média, o SMER foi 2,61 vezes maior para o café descascado, evidenciando como a geometria do produto afeta esse valor (Vilela & Artur, 2008).

Tabela 3 - Taxa específica de extração de água para os ensaios de secagem.

Ensaio	SMER (kg de água/kWh)	
	Bomba calor	Secador convencional
Descascado 30 °C	0.0522	-
Descascado 35 °C	0.1076	-
Descascado 40 °C	0.1169	0.0100
Natural 30 °C	0.0188	-
Natural 35 °C	0.0369	-
Natural 40 °C	0.0507	0.0058

Fonte: Própria (2020).

Quando se compara os dois secadores na temperatura de secagem de 40 °C, o SMER médio do secador BC foi 10 vezes superior ao valor médio obtido para o secador convencional, o que mais uma vez mostra a eficiência da bomba de calor em produzir ar com elevado potencial de secagem, com um baixo consumo energético.

A Tabela 4 apresenta os valores de coeficiente de desempenho (COP) do secador BC nas diferentes condições de secagem.

Tabela 4 - Valores de coeficiente de desempenho (COP) do secador com bomba de calor para os ensaios de secagem.

Ensaio	COP Bomba de calor
Descascado 30 °C	2.80
Descascado 35 °C	3.11
Descascado 40 °C	3.55
Natural 30 °C	2.84
Natural 35 °C	3.25
Natural 40 °C	3.57

Fonte: Própria (2020).

Observa-se na Tabela 4 que os valores de COP para o café descascado e o café natural foram bem semelhantes. Isto porque, o COP é afetado diretamente pela condição de operação do equipamento, o que está diretamente ligado as temperaturas de operação, e não as características do produto. Por este motivo, os valores decresceram com a temperatura de secagem, pelo fato do equipamento trabalhar com menor temperatura de evaporação (Tabela 1), implicando na redução da capacidade do evaporador, o que está diretamente relacionado ao COP (Jordan et al., 2016).

Foi possível notar que os valores de COP na temperatura de 40 °C (3,55 e 3,57), para os cafés descascado e natural, foram semelhantes a diferença de consumo de energia elétrica para o café descascado entre os dois secadores na temperatura de 40 °C, que foi de 3,76. Sendo a potência elétrica do secador convencional equivalente à sua potência térmica gerada (aquecimento resistivo), é coerente que o COP de aquecimento da bomba de calor traduza essa diferença e, ao mesmo tempo, forneça a dimensão de potência térmica que pode ser gerada na secagem (Jordan et al., 2016).

A Tabela 5 apresenta os valores de SMER para a condição nominal, estimados com base no potencial de secagem do ar produzido pelos secadores.

Tabela 5 - Taxa específica de extração de água calculada para o potencial de secagem dos secadores em condição nominal de operação.

Ensaio	SME_{A} (kg de água/kWh)	
	Bomba calor	Secador convencional
Descascado 30 °C	0.8745	-
Descascado 35 °C	0.8980	-
Descascado 40 °C	1.0747	0.2861
Natural 30 °C	0.8928	-
Natural 35 °C	0.9598	-
Natural 40 °C	1.0831	0.2369

Fonte: Própria (2020).

Pelo fato dos valores de SMER apresentados na Tabela 5, serem baseados no potencial de secagem do ar, não levando em consideração características físicas do produto, apenas os tempos de secagem obtidos nos testes, diferentemente dos valores experimentais, é possível observar que os valores obtidos para o café descascado e natural são bem semelhantes. O valor médio da SMER para a bomba de calor foi de 0,963 kg de água/kWh, quase três vezes superior ao valor médio estimado para o secador convencional.

Liu et al. (2017), relataram em seu trabalho de secagem de cogumelo Shiitake (*Lentinula edodes*) com bomba de calor, um valor de SMER médio de 2,5 kg de água/kWh. Hossain et al. (2013) utilizando um modelo matemático desenvolvido para avaliar o desempenho de bombas de calor na secagem de plantas aromáticas, na secagem de raízes de *Valeriana officinalis* L. em temperatura de 37 °C e umidade relativa 20%, com tempo de secagem de 89 h, obtiveram valores médios de COP e SMER de 5,54 e 0,038 kg de água/kWh.

Ziegler et al. (2013), também trabalhando com modelos de simulação para secagem de plantas medicinais com bomba de calor, relataram valores de SMER variando entre 2,2 e 4,6 kg de água/kWh. O trabalho desses autores também cita que para sistemas convencionais de secagem, a SMER atinge valores entre 0,2 e 0,6 kg de água/kWh.

A forma como os valores variam em cada trabalho, em função do tipo de produto, mostra que a SMER não depende tão somente da eficiência energética da tecnologia utilizada para converter energia em calor. Mais, de características físicas do produto, como geometria e capacidade de perder água em determinadas condições.

Sendo assim, a SMER não deve ser usada para comparar a eficiência entre secadores de bombas de calor operando com diferentes produtos. Observe que nesse trabalho a SMER média foi de 0,963 kg de água/kWh ao passo que no trabalho de Hossain et al. (2013), a SMER média foi de apenas 0,038 kg de água/kWh. Mesmo assim, não se pode afirmar que o segundo foi menos eficiente, pois apresentou um COP de 5,54, enquanto o COP médio obtido nesse trabalho foi 3,19.

Isso mostra o quanto COP é mais adequado para a comparação entre bombas de calor, pois este coeficiente relaciona a energia térmica produzida com a energia consumida. No caso de sistemas que operam com aquecimento resistivo, esse valor pode, no máximo, ser igual a 1. Já as bombas de calor operam com valores muito superiores a unidade.

A Tabela 6 apresenta os valores nominais de capacidade de carga, baseado no potencial de secagem, estimado com o modelo utilizado (Strømmen et al., 2003). A capacidade de secagem variou de acordo com o tipo de café (descascado e natural) e com a temperatura empregada, pois esses dois fatores exerceram influencia na taxa de remoção de água e no tempo de secagem.

Tabela 6 - Capacidade nominal em produto úmido (massa inicial) estimado para o secador BC para a secagem de café natural e descascado.

Condição	Capacidade de carga (kg de produto úmido)
Descascado 30 °C	209,34
Descascado 35 °C	102,47
Descascado 40 °C	97,03
Natural 30 °C	731,61
Natural 35 °C	347,99
Natural 40 °C	295,21

Obs.: Potencial de secagem estimado para as mesmas condições experimentais (valores de umidade, temperaturas e tempos de secagem)

Fonte: Própria (2020).

Como a capacidade foi amarrada ao tempo de secagem (Equação 9), as maiores capacidades foram encontradas para as menores temperaturas, as quais corresponderam a tempos de secagem mais longos. A utilização de menores tempos de secagem, implica no uso de temperaturas mais elevadas e menor carregamento do secador, o que é razoável, tendo em vista o aumento da taxa específica de extração de umidade.

4. Considerações Finais

Foi possível a secagem de café descascado e natural com um secador de bomba de calor, em condições similares a um secador convencional, com apenas um quarto do consumo de energia deste.

A bomba de calor possibilitou a secagem de café em temperaturas inferiores aquelas utilizadas em secadores convencionais, muito próximas da temperatura ambiente, dado ao seu sistema de tratamento de ar, baseado na redução da pressão de vapor do ar, o que é benéfico para produtos sensíveis a temperaturas elevadas, como é o caso do café.

O tempo de secagem variou com as condições de secagem e com o tipo de café, o que por sua vez influenciou na taxa específica de extração de água e na capacidade de carregamento do secador.

Sugere-se para trabalhos futuros avaliar a qualidade sensorial do café, para verificação possíveis relações com as condições de secagem, para que se tenha outro parâmetro, que não seja apenas o consumo de energia, na decisão pela condição de secagem.

Agradecimentos

A Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT), pelo apoio financeiro a pesquisa que originou o trabalho.

A empresa Procer pelo apoio financeiro ao trabalho.

As empresas Elgin, Bplan, Carel, Novus e RAC Brasil pela seção de componentes utilizados no protótipo de bomba de calor.

A Vale das Palmeiras cafés especiais pela sessão das amostras de café para os testes.

Referências

Aktaş, M., Ceylan, İ., & Gürel, A. E. (2014). Testing of a condensation-type heat pump system for low-temperature drying applications. *International Journal of Food Engineering*, 10(3), 521-531.

Aktaş, M., Khanlari, A., Aktekeli, B., & Amini, A. (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 18034-

18044.

Alves, G. E.; Isquierdo, E. P.; Borém, F. M.; Siqueira, V. C.; Oliveira, P. D.; Andrade, E. T. (2013). Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, 8(2), 238-247.

Borém, F. M., Isquierdo, E. P., Alves, G. E., Ribeiro, D. E., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. D. S. (2018). Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. *Coffee Science*, 13(2), 159-167.

Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, 2009. 399 p.

Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2017). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234(1), 121-130.

Dong, W., Hu, R., Long, Y., Li, H., Zhang, Y., Zhu, K., & Chu, Z. (2019). Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food chemistry*, 272(1), 723-731.

Goneli, A. L., Martins, E. A., Jordan, R. A., Geisenhoff, L. O., & Garcia, R. T. (2016). Experimental dryer design for agricultural products. *Engenharia Agrícola*, 36(5), 938-950.

Hossain, M. A., Gottschalk, K., & Hassan, M. S. (2013). Mathematical model for a heat pump dryer for aromatic plant. *Procedia Engineering*, 56(1), 510-520.

Jordan, R. A., Cortez, L. A., Barbin, D. F., & Lucas Junior, J. D. (2016). Heat pump for thermal power production in dairy farm. *Engenharia Agrícola*, 36(5), 779-791.

Jordan, R. A., Cortez, L. A., Silveira Jr, V., Cavalcanti-Mata, M. E., & Oliveira, F. D. D. (2018). Modeling and testing of an ice bank for milk cooling after milking. *Engenharia Agrícola*, 38(4), 510-517.

Jordan, R. A.; Siqueira, V. C.; Cavalcanti-Mata, M. E. R. M.; Hoscher, R. H.; Mabasso, G. A.; Motomyia, A. V. A.; Oliveira, F. C.; Santos, R. C.; Quequeto, W. D. (2020). Cinética de secagem de café natural e descascado a baixa temperatura e umidade relativa com emprego de uma bomba de calor. *Research, Society and Development*, 9(1), e388985528.

Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. *Food chemistry*, 291(1), 49-58.

Liu, Y., Zhao, K., Jiu, M., & Zhang, Y. (2017). Design and drying technology research of heat pump Lentinula edodes drying room. *Procedia Engineering*, 205(1), 983-988.

Mellmann, J., & Füll, C. (2008). Drying facilities for medicinal and aromatic plants-specific energy consumption and potential for optimisation. *Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen*, 13(3), 127-133.

Siqueira, V. C.; Borém, F. M.; Alaves, G. E.; Isquierdo, E. P.; Pinto, A. C. F.; Ribeiro, D. E.; Ribeiro, F. C. (2017). Drying kinetics of processed natural coffee with high moisture content. *Coffee Science*, 12(3), 400-409.

Strømmen, I.; Eikevik, T.M.; Alves-Filho, O.; Syverud, K., Jonassen, O.; “Low temperature Drying with Heat Pumps – New Generations of High Quality Dried products”. The 2nd Nordic Drying Conference, Copenhagen Denmark, 2003.

Taşeri, L.; Aktas, M.; Şevik, S.; Gülcü, M.; Seçin, G. U.; Aktekeli, B. (2018). Determination of Drying Kinetics and Quality Parameters of Grape Pomace Dried with a Heat Pump Dryer. *Food Chemistry*, 260(15), 152-159.

Vilela, C. A. A.; Artur, P. O. (2008). Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(2), 387-394.

Ziegler, T., Jubaer, H., & Mellmann, J. (2013). Simulation of a heat pump dryer for medicinal plants. *Chemie Ingenieur Technik*, 85(3), 353-363.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rodrigo Aparecido Jordan – 13%

Valdiney Cambuy Siqueira – 8%

Wellytton Darci Quequeto – 8%

Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti-Mata – 8%

Renata Henrique Hoscher – 13%

Geraldo Acácio Mabasso – 13%

Maurício Battilani – 8%

Fabício Correia de Oliveira – 8%

Elton Aparecido Siqueira Martins – 8%

Ricardo Lordelo Freitas – 13%