## UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

THIAGO AURÉLIO ARRUDA SILVA

## APLICAÇÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE COMO ARMAZENADOR DE ENERGIA TÉRMICA EM SISTEMA DE SECAGEM SOLAR

**RONDONÓPOLIS – MT** 

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO INSTITUTO DE CINÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

THIAGO AURÉLIO ARRUDA SILVA

## APLICAÇÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE COMO ARMAZENADOR DE ENERGIA TÉRMICA EM SISTEMA DE SECAGEM SOLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof.ª Dra. Niédja Marizze Cezar Alves

## RONDONÓPOLIS – MT 2021

#### Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586a Silva, Thiago Aurélio Arruda. Aplicação de material de mudança de fase como armazenador de energia térmica em sistema de secagem solar / Thiago Aurélio Arruda Silva. -- 2021 73 f. : il. color. ; 30 cm.
Orientadora: Niédja Marizze Cezar Alves. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2021. Inclui bibliografía.
1. Cera de palma. 2. Cinética de secagem. 3. Rendimento térmico. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

SEI/UFMT - 3857787 - MESTRADO - Folha de Aprovação



### MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

### UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

### PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO

### PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

### FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: APLICAÇÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE COMO ARMAZENADOR DE ENERGIA TÉRMICA EM SISTEMA DE SECAGEM SOLAR

AUTOR: MESTRANDO THIAGO AURÉLIO ARRUDA SILVA

Dissertação defendida e aprovada em 30 de agosto de 2021.

#### COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Doutora Niédja Marizze Cezar Alves (Presidente Banca / Orientadora)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. Doutor Marcio Koetz (Examinador Interno)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. Doutora Maria da Conceição Trindade Bezerra e Oliveira (Examinador Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

4. Doutora Débora Rafaelly Soares Silva (Examinador Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

5. Doutor Tonny José Araújo da Silva (Examinador Suplente)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

RONDONÓPOLIS, 30/08/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Débora Rafaelly Soares Silva**, **Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.

Documento assinado eletronicamente por MARIA DA CONCEICAO TRINDADE BEZERRA E OLIVEIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso, em 30/08/2021, às 16:52, conforme horário SEI/UFMT - 3857787 - MESTRADO - Folha de Aprovação



oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por NIEDJA MARIZZE CEZAR ALVES, Diretor(a) do Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas ICAT / CUR, em 30/08/2021, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por MARCIO KOETZ, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso, em 30/08/2021, às 17:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador\_externo.php? acao=documento\_conferir&id\_orgao\_acesso\_externo=0, informando o código verificador 3857787 e o código CRC 3C43E660.

Referência: Processo nº 23108.069690/2021-51

SEI nº 3857787

Dedico,

A Cristo, verdadeira fonte de amor e meu eterno amigo, e a minha amada mãe, Ana Maria

#### AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Jesus Cristo, pelo seu olhar e proteção constantes em minha vida, além de todo amor a mim concedido.

Aos meus pais, Ana Maria de Arruda e Geraldo Silva por todo o apoio, amor e exemplo a mim concedidos. Aos meus queridos e muito amados avós, Antônio José e Maria Pereira, por serem exemplos de pessoa. A toda minha família por me apoiarem ao longo de minha trajetória.

Aos meus irmãos Karla Hyorrana, Pedro Aurélio e José Felipe a quem sempre irei estar presente.

À minha orientadora Niédja Marizze Cezar Alves pelos anos de orientação, paciência e por sempre se alegrar com as conquistas dos seus. A todos os demais docentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pelo conhecimento transmitido.

A todos meus amigos. Aqueles que sempre estiveram comigo, nos bons e maus momentos, Marcos Vinícius e Palooza Lima. Aos meus amigos da graduação e mestrado, Aline, Ivan, Nahyara, Rackel, Juscielly, Elisa, Hederson João, Werlen, Fyamma, Drielli, Christian, Maria Isabel, Alisson e Jean, obrigado por dividirem comigo esse momento tão importante. As minhas grandes amigas, proporcionadas pelo trabalho, Ariadne, Janaína e Letícia. E aos meus amigos Isaac, Leonardo, Hemilton, Vitor, Gabriella, Karen, Luana e Eloysa por estarem sempre comigo.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte a mim concedido durante a pós-graduação.

A Universidade Federal de Rondonópolis, e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

Ao Programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Cuiabá, pelo suporte nos experimentos.

A Prefeitura Municipal de Rondonópolis, pelo suporte através o Programa Acelerador de Projetos Inovadores de Rondonópolis (PAPIRO).

A SLC Agrícola pela oportunidade e confiança a mim concedida.

A todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho e meu desenvolvimento,

#### MUITO OBRIGADO!

"A humildade é o princípio do aprendizado" Hugo de São Vitor

#### **RESUMO**

### Aplicação de material de mudança de fase como armazenador de energia térmica em sistema de secagem solar

O processo de secagem tem sido empregado pelos seres humanos desde os primórdios das civilizações e tornou-se essencial em processos industriais e de conservação de alimentos. Dentre os métodos de secagem, a solar tem sido comumente abordada na literatura nos últimos anos, como uma opção sustentável e de baixo custo, apesar das desvantagens, especialmente devido a sua natureza intermitente. Como medida a se mitigar essa limitação, sistemas de armazenamento de calor são aplicados na secagem solar, a fim de acumular calor durante o dia e dar continuidade a desidratação em períodos noturnos ou nublados. O acúmulo por via latente tem se mostrado promissor, por meio da utilização dos chamados materiais de mudanca de fase. Dentre esses produtos, destaca-se os materiais biológicos, como as ceras vegetais, por serem uma alternativa sustentável em relação a parafina. O Brasil, por ser um país com elevada incidência de irradiação solar, possui potencial para secagem solar por meio de armazenamento de calor. À vista disso, o objetivo geral do presente trabalho foi estudar a aplicação de materiais de mudança de fase biológicos na secagem solar, na região Centro-Oeste brasileira. A fim de se atender os objetivos específicos, dividiu-se este trabalho em três capítulos, sendo: Capítulo 01 – avaliar a viabilidade do uso de materiais de mudança de fase biológicos em sistemas de secagem solar; Capítulo 02 - avaliar a performance de um secador solar com sistema de armazenamento de energia térmica por calor latente, a base de material biológico; Capítulo 03 - determinar as curvas de cinética de secagem de produto nativo, com acúmulo de calor latente em secagem solar e recomendar modelo matemático de melhor ajuste. O primeiro estudo avaliou o uso das ceras de carnaúba tipo 3, soja, palma e da parafina como armazenadores de calor latente. A cera de palma demonstrou ser mais promissora para este fim, com faixa de temperatura de fusão mais ajustada a secagem solar, acumulando 239,04 J por grama de produto. O segundo capítulo abordou a construção e a avaliação do desempenho térmico de um secador solar indireto convencional e de um com armazenamento de calor, a base de cera de palma. Neste, o secador com sistema de armazenamento térmico, apresentou, no dia de melhor desempenho a temperatura máxima de 82,7 °C, rendimento térmico médio de 103,97% e eficiência mássica média de 67,68%. No terceiro capítulo, ajustou-se nove modelos matemáticos aos dados de cinética de secagem de pseudofrutos de caju, em secador solar com armazenamento de energia térmica, por meio da cera de palma, e em secador solar indireto convencional. O modelo de Aproximação da Difusão ajustou-se melhor as curvas de secagem do primeiro equipamento, enquanto o de Cavalcanti e Mata as do segundo. Nos dias 15 e 16 de junho, o secador com armazenamento apresentou taxa de secagem estimadas mais elevadas que o secador com a ausência desse mecanismo térmico. Por fim, o método de secagem, com armazenamento de energia térmica, com base em materiais de mudança de fase biológico, demonstrou características superiores à parafina, especialmente quanto a cera de palma. Esta cera teve uma maior adaptação as condições climáticas da Região Centro-Oeste. O secador com a cera de palma apresentou melhor performance, sendo possível o uso em produtos oriundos da agricultura familiar.

Palavras-chave: cera de palma, rendimento térmico, cinética de secagem

#### ABSTRACT

### Application of phase change material as thermal energy storage in a solar drying system

The drying process has been employed by human beings since the dawn of civilizations and it has become essential in industrial and food preservation processes. Among the drying methods, solar drying has been commonly discussed in the literature in recent years as a sustainable and low-cost option, despite its disadvantages, especially due to its intermittent nature. As a measure to mitigate this limitation, heat storage systems are applied in solar drying in order to accumulate heat during the day and continue dehydration at night or cloudy periods. Latent accumulation has been shown to be promising through the use of so-called phase change materials. Among these products, biological materials such as vegetable waxes stand out, as they are a sustainable alternative to paraffin. Brazil, being a country with a high incidence of solar irradiation, has the potential for solar drying through heat storage. In view of this, the general objective of the present work was to study the application of biological phase change materials in solar drying, in the Brazilian Midwest region. In order to meet the specific objectives, this work was divided into three chapters, as follows: Chapter 01 - assess the feasibility of using biological phase change materials in solar drying systems; Chapter 02 – evaluate the performance of a solar dryer with a latent heat thermal energy storage system, based on biological material; Chapter 03 – determine the drying kinetics curves of native product, with latent heat accumulation in solar drying and recommend a better fit mathematical model. The first study evaluated the use of type 3 carnauba, soy, palm and paraffin waxes as latent heat storage. Palm wax proved to be more promising for this purpose, with a melting temperature range more adjusted to solar drying, accumulating 239.04 J per gram of product. The second chapter addressed the construction and evaluation of the thermal performance of a conventional indirect solar dryer and one with heat storage, based on palm wax. In this, the dryer with thermal storage system, presented, on the day of best performance, the maximum temperature of 82.7 °C, average thermal efficiency of 103.97% and average mass efficiency of 67.68%. In the third chapter, nine mathematical models were adjusted to the data of drying kinetics of cashew nuts, in a solar dryer with thermal energy storage, using palm wax, and in a conventional indirect solar dryer. The Diffusion Approximation model better fit the drying curves of the first equipment, while Cavalcanti and Mata's model fits the second one. On June 15th and 16th, the dryer with storage showed higher estimated drying rates than the dryer with the absence of this thermal mechanism. Finally, the drying method, with thermal energy storage, based on biological phase change materials, demonstrated superior characteristics to paraffin, especially with regard to palm wax. This wax had a greater adaptation to the climatic conditions of the Midwest Region. The dryer with palm wax presented better performance, being possible to be used in products from family farming.

Keywords: palm wax, thermal yield, drying kinetics

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estrutura experimental para avaliação de diferentes PCMs: (1) Chapa de
aquecimento; (2) Secção Transversal; (3) Placa de Arduino para aquisição de dados
Figura 1.2. Detalhe da secção transversal de parede para câmara de secagem
Figura 1.3. Disposição dos sensores de temperatura na chapa de aquecimento e de
armazenamento por ACL
Figura 1.4. Metodologia para estimativa de propriedades térmicas a partir de curva DSC 26
Figura 1.5. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de carnaúba
Figura 1.6. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de palma
Figura 1.7. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de soja
<b>Figura 1.8.</b> Curvas da análise DSC e temperatura para parafina
Figura 1.9. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de
armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de carnaúba
Figura 1.10. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de
armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de palma
Figura 1.11. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de
armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de soja
Figura 1.12. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de
armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de parafina
Figura 1.13. Energia teórica armazenada e tempo de descarga de calor para as ceras de
carnaúba, palma, soja e parafina. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferenciam entre
si, pelo teste de Tuckey, à 5% de probabilidade
Figura 2.1. Vistas das estruturas empregadas na construção dos secadores solares: coletor solar
(a), câmara de secagem (b) e câmara de secagem do secador 1 (c), com SAET (estruturas
representadas em branco a fim de se facilitar a visualização)
Figura 2.2. Secador 1 (parte superior) e secador 2 (parte inferior) em funcionamento em campo
experimental
Figura 2.3. Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar
horária (Qsolar-horária) para o Experimento 1 (14/06)

Figura 2.4. Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar
horária (Qsolar-horária) para o Experimento 2 (15/06) 45
Figura 2.5. Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar
horária (Qsolar-horária) para o Experimento 3 (16/06) 45
Figura 2.6. Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem
pelo coletor solar, no Experimento 1
Figura 2.7. Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem
pelo coletor solar, no Experimento 2
Figura 2.8. Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem
pelo coletor solar, no Experimento 3
Figura 2.9. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a passagem
pelo coletor solar, no Experimento 1
Figura 2.10. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a
passagem pelo coletor solar, no Experimento 2
Figura 2.11. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a
passagem pelo coletor solar, no Experimento 3
Figura 2.12. Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do
pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 1 49
Figura 2.13. Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do
pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 2 49
Figura 2.14. Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do
pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 3 50
Figura 2.15. Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02,
no Experimento 1
Figura 2.16. Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02,
no Experimento 2
Figura 2.17. Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02,
no Experimento 3
Figura 3.1. Variação das temperaturas de entrada no coletor solar (T1), entrada (T2) e saída
(T3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 1 62

Figura 3.2. Variação das temperaturas de entrada no coletor solar (T1), entrada (T2) e saída
(T3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 2 62
Figura 3.3. Variação das temperaturas de entrada no coletor solar (T1), entrada (T2) e saída
(T3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 3 62
Figura 3.4. Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar (UR1), entrada (UR2)
e saída (UR3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 1.64
Figura 3.5. Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar (UR1), entrada (UR2)
e saída (UR3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 2.64
Figura 3.6. Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar (UR1), entrada (UR2)
e saída (UR3) da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 3.64
Figura 3.7. Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para
os secadores 01 e 02, no Experimento 01
Figura 3.8. Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para
os secadores 01 e 02, no Experimento 02
Figura 3.9. Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para
os secadores 01 e 02, no Experimento 03

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Propriedades térmicas estimadas pela curva DSC para as cercas de carnaúba,
palma, soja e parafina
Tabela 2.1. Dados médios das massas inicial, final e seca; umidades inicial e final das amostras
de caju e eficiência mássica dos secadores 1 e 2
Tabela 3.1. Modelos ajustados aos dados experimentais da secagem do pedúnculo de caju nos
secadores 01 e 02 61
Tabela 3.2. Parâmetros estatísticos (SE – desvio padrão da estimativa; P – erro médio relativo;
R2 – coeficiente de determinação; AIC – critérios de informação de Akaike; BIC – critérios de
informação Bayesiano) para os modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade
do pedúnculo de caju nos secadores 01 e 02
Tabela 3.3. Parâmetros do ajuste dos modelos de Aproximação da Difusão (Secador 01) e
Cavalcanti Mata (Secador 02) para os Experimentos 01, 02 e 03

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Ac: área de cobertura ACL: Armazenamento de Energia Térmica por Calor Latente AIC: critério de informação de Akaike ANVISA: Agência Nacional de Vigilância Sanitária BIC: critério de informação Bayesiano bioPCM: Biological Phase Change Materials ou Materiais de Mudança de Fase Biológicos **BTU: Unidades Térmicas Britânicas**  $C_{lp}$ : calor específico da fase líquida C<sub>p</sub>: calor específico da fase sólida DSC: Differential Scanning Calorimetry ou Calorimetria Exploratória Diferencial E: energia teórica armazenada GLP: gás liquefeito de petróleo GLR: graus de liberdade h: entalpia IEA: International Energy Association INMET: Instituto Nacional de Meteorologia m: massa P: erro médio relativo PCM: Phase Change Materials ou Materiais de Mudança de Fase PVC: policloreto de vinila R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação RDC: Resolução de Diretoria Colegiada RU: razão de umidade SAET: Sistema de Armazenamento de Energia Térmica SE: desvio-padrão da estimativa SQR: soma dos quadrados do resíduo T: temperatura. t: tempo td: tempo de descarga Tendset: temperatura de fim de fusão T<sub>ma</sub>: temperatura média de aquecimento

 $T_{mp}: temperatura de pico de fusão$   $T_{msa}: temperatura média de superfície de aquecimento$   $T_{onset}: temperatura de início de fusão$  U: umidade  $U_e: umidade de equilíbrio higroscópico$  UR: umidade relativa  $\dot{Q}_{e-s}: fluxo de calor entre o volume de controle e ambiente$   $\dot{Q}_{solar}: irradiação solar incidente$   $\dot{Q}_{solar-horária}: irradiação solar horária$  n: vazão mássica  $\eta_{câmara}: eficiência mássica$   $\eta_{coletor}: rendimento térmico.$   $\Delta: variação$ p: massa específica

## SUMÁRIO

INTRO	DUÇÃO GERAL	
LITERA	ATURA CITADA	
CAPÍTI	ULO I: VIABILIDADE DE CERAS VEGETAIS NO ARMAZE	ENAMENTO DE
ENERG	JIA TÉRMICA EM SECAGEM SOLAR	
1.1.	INTRODUÇÃO	
1.2.	MATERIAL E MÉTODOS	
1.2	.1. Estrutura experimental	
1.2	.2. Análise experimental	
1.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
1.4.	CONCLUSÕES	
1.5.	LITERATURA CITADA	
CAPÍTI	ULO II: DESEMPENHO DE SECADOR SOLAR COM ARMAZI	ENAMENTO DE
CALOR	R LATENTE À BASE BIOLÓGICA	
2.1.	INTRODUÇÃO	
2.2.	MATERIAL E MÉTODOS	
2.2.	.1. Construção dos Secadores	
2.2.	.2. Procedimento da Secagem	41
2.2.	.3. Avaliação do desempenho dos secadores	41
2.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
2.4.	CONCLUSÕES	54
2.5.	LITERATURA CITADA	55
CAPÍTU	ULO III: CINÉTICA DA SECAGEM DE CAJU EM SECADO	R SOLAR COM
ARMAZ	ZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA	
3.1.	INTRODUÇÃO	
3.2.	MATERIAL E MÉTODOS	
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	
3.4.	CONCLUSÕES	
3.5.	LITERATURA CITADA	70
CONCL	LUSÕES GERAIS	73

## INTRODUÇÃO GERAL

O processo de desidratação, ou seja, a secagem de alimentos tem sido usada desde o início das civilizações, quando o homem percebeu que a exposição dos alimentos ao sol, elevava seu tempo de conservação. Qualquer indústria, assim como muitas fazendas, faz o uso desse processo (MUSIELAK et al., 2016).

A secagem se baseia na remoção de água dos produtos, com o intuito de se reduzir a atividade microbiológica e as reações químicas, elevando assim a estabilidade e a vida de prateleira. Esse fato torna a secagem imprescindível para a transformação industrial dos alimentos e produtos agrícolas em geral (OLIVEIRA et al., 2015).

Embora apresente essa importância, a secagem pode corresponder de 10 a 20% do consumo industrial de energia em um país desenvolvido (LEE et al., 2013). Ademais aos altos custos energéticos, influenciam também os aspectos ambientais. O processo usa em larga escala combustíveis fósseis ou vegetais, logo, emite gases como o CO<sub>2</sub> (REYES et al., 2014).

Muitas são as pesquisas que apresentam alternativas à utilização dos combustíveis fósseis. Umas delas é o uso da energia solar. Além de ser uma fonte gratuita, estima-se que o potencial anual de energia solar esteja entre 1.575 e 49.837 EJ, o que é maior do que todo o suprimento total de energia primária anual no mundo, em 2014, conforme dados estabelecidos pela International Energy Association (IEA). Em condições de céu claro o fornecimento de energia é de cerca de 1.000 W m<sup>-2</sup>, suficiente para atender demandas de baixa temperatura (ALVA et al., 2018).

Em muitos países de clima tropical, com alta incidência de radiação solar, a secagem a sol aberto é bem difundida, porém esta é restrita pela susceptibilidade de consumo por animais, ocorrência de precipitações pluviométricas e perda da qualidade por alto aquecimento (LAKSHIMI et al., 2018).

Sendo assim faz-se o uso dos secadores solares indiretos. Estes atuam como fonte de aquecimento ao ar de secagem, e têm sido muito estudados, em razão do seu baixo custo e alto potencial de sustentabilidade. Do ponto de vista econômico, o emprego de secadores solares pode reduzir até 60% dos custos operacionais (VÁSQUEZ et al., 2016).

O uso de energia solar para fins de secagem é potencializado no Brasil, devido à proximidade à linha do equador, que proporciona um alta incidência de radiação solar, com pequena oscilação entre as estações do ano. Essas características naturais fazem o país ser o que mais recebe essa fonte de energia no mundo, com mais e 3 mil horas de brilho do sol no ano, o

que corresponde a uma incidência solar que varia entre 4.500 e 6.300 W h m<sup>-2</sup> (MARQUES et al., 2019).

Apesar das muitas vantagens, o uso da energia solar ainda é limitado principalmente pela sua natureza intermitente, ou seja, apresenta períodos de baixa ou nula disponibilidade, nas 24 horas do dia. Tal característica pode ser solucionada com a aplicações dos Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica (SAET) (ALVA et al., 2018).

Os SAET são sistemas que tornam disponíveis a energia térmica absorvida durante o dia, em momentos de baixa ocorrência da luz solar. Muitos estudos são encontrados na literatura com armazenamento por calor sensível: leito rochoso, seixos, areia e cascalho (GARG et al., 1985; LEON & KUMAR, 2008; VIJAYAN et al., 2016; LAKSHIMI et al., 2018). Contudo os materiais de armazenamento de energia térmica por calor sensível apresentam a desvantagem de ocupar um grande volume para uma boa eficiência.

Nesse sentido, nos últimos anos, muitos trabalhos têm estudado os materiais de armazenamento de energia térmica por calor latente (ACL), dos quais se destacam os materiais de mudança de fase (PCM, do inglês Phase Change Materials) (SHALABY et al., 2014; REYES et al., 2014; NDUKWU e BENNAMOUNM, 2018). Os PCM são vantajosos em virtude da alta capacidade de armazenamento, dissipação de calor e temperatura a taxas constantes, ocupam pequenos volumes, dentre outras.

Apesar dos amplos estudos e potencialidades dos PCMs, a sua aplicação é muito sazonal e varia conforme a localidade. Existem ainda uma ampla gama de materiais que atuam como PCM. Portanto, ainda se carece de informações e dados sobre aproveitamento de SAETs por calor latente, no Brasil, para fins de secagem.

Diante do exposto, o objetivo geral da presente dissertação foi estudar a aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica por calor latente, utilizando os materiais de mudança de fase, na região Centro-Oeste do Brasil. A fim de se alcançar esse objetivo o trabalho foi dividido em Capítulos, que correspondem aos objetivos específicos. O Capítulo 1 objetivou estudar a capacidade de uma estrutura de armazenamento térmico, em sistemas de secagem, de quatro PCMs diferentes: cera de palma, cera de carnaúba, cera de soja e parafina. O Segundo Capítulo consistiu na construção, validação e avaliação da eficiência de um secador solar indireto com SAET, o qual utilizou o PCM que apresentou os melhores resultados obtidos na primeira parte. Por fim, o Capítulo 3 avaliou a cinética de secagem de produtos oriundos da agricultura familiar regional.

## LITERATURA CITADA

ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. Na overview of thermal energy storage systems. **Energy**, v.144, p.341.378, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037.

GARG, H. P.; SHARMA, V. K.; MAHAJAN, R. B.; BHARGAVE, A. K. Experimental study of an inexpensive solar collector cum storage system for agricultural uses. **Solar Energy**, v.35, p. 321-331, 1985.

LAKSHMI, D. V. N.; MUTHUKUMAR, P.; LAYEK, A.; NAYAK, P. K. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v.120, p.23-34, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053.

LEE, D.; JANGAM, S.; MUJUMDAR, A. S. Some recent advances in drying technologies to produce particulate solids. **KONA Powder and Particle Journal**, n.30, p.69-83, 2013.

LEON, M. A.; KUMAR, S. Design and performance evaluation of a solar-assisted biomass drying system with thermal storage. **Drying Technology**, v.26, p. 936-947, 2008.

MARQUES, G. I.; ROSENO, K. T. C.; NIZZOLI FILHO, I. Usina fotovoltaica: simulação para energia renovável no vale do Açú-RN-Brasil. **Unisanta Science and Technology**, v.8, n.1, p.22-28, 2019.

MUSIELAK, G.; MIERZWA, D.; KROEHNKE, J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. **Trends in Food Science and Technology**, v.56, p.126-141, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.003.

NDUKWU, M. C.; BENNAMOUN, L. Potential of integrating Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O pellets in solar drying system, **Drying Technology**, v.36, n.9, p.1017-1030, 2018. DOI: 10.1080/07373937.2017.1366506.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M.G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.18, n.4, p.314-321, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.5315.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1ª ed., 2006. 60p.

REYES, A.; MAHN, A.; VÁSQUEZ, F. Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. **Energy Conversion and Management**, v.83, p.241-248, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.077.

SHALABY, S. M.; BEK, M. A. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. **Energy Conversion and Management**, v. 83, p. 1-8, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043

VÁSQUEZ, J.; REYES, A.; MAHN, A.; CUBILLOS, F. Experimental evaluation of fuzzy control solar drying with thermal energy storage system. **Drying Technology**, v.34, n.13, p.1558-1566, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1137001.

VIJAYAN, S.; ARJUNAN, T. V.; KUMAR, A. mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible heat based indirect solar dryer. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.26, p.59-67, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.014.

# CAPÍTULO I VIABILIDADE DE CERAS VEGETAIS NO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA EM SECAGEM SOLAR

**Resumo:** O armazenamento de calor é uma importante alternativa, para mitigar as limitações de fonte intermitentes de energia térmica, como a energia solar. Materiais de mudança de fase, que armazenam energia na forma latente, tem sido objetos de muitos estudos, dadas suas vantagens. O objetivo do presente artigo foi avaliar o armazenamento de calor das ceras de carnaúba tipo 3, palma, soja e parafina, para uso em sistemas de secagem solar. Os materiais foram avaliados em estrutura experimental, por meio da medição de temperatura e caracterizados em análise de Calorimetria Exploratória Diferencial. Calculou-se o calor teórico armazenado e o tempo de descarga, os quais foram estudados pelo teste de Tuckey, à 5% de probabilidade. As temperaturas de pico de fusão foram 85,57, 59,32, 59,24 e 65,00 °C, respectivamente para as ceras de carnaúba, palma, soja e parafina, assim como o calor latente de fusão: 150,78, 193,01, 116,07 e 180,92 J g<sup>-1</sup>. O processo de aquecimento das amostras apresentou região sólida e de mudança de fase. A ceras de carnaúba e palma armazenaram a maior quantidade de calor. A cera de palma demonstrou maior potencial para aplicação em sistemas de secagem solar.

Palavras-chave: calor latente, caracterização térmica, material de mudança de fase.

**Abstract:** Heat storage is an important alternative to mitigate intermittent thermal energy source limitations such as solar energy. Phase change materials, which store energy in latent form, have been the subject of many studies, given their advantages. The aim of this article was to evaluate the heat storage of type 3 carnauba, palm, soy waxes and paraffin for use in solar drying systems. The materials were evaluated in an experimental structure, by measuring temperature and characterized in Differential Scanning Calorimetry analysis. Theoretical stored heat and discharge time were calculated, which were studied by the Tukey test, at 5% probability. The peak melting temperatures were 85.57, 59.32, 59.24 e 65.00 °C, respectively for carnauba, soy, palm waxes and paraffin, as well as the latent heat of fusion: 150.78, 193.01, 116.07 and 180.92 J g<sup>-1</sup>. The heating process of the samples showed a solid and phase change region. Carnauba and palm waxes stored the greatest amount of heat. Palm wax has shown greater potential for application in solar drying systems.

Keywords: latent heat, phase change material, thermal characterization.

#### 1.1. INTRODUÇÃO

O armazenamento de energia é uma solução para fontes intermitentes, como é o caso da energia solar. Existem muitas formas de se armazenar energia, as quais podem ser realizadas por vias mecânicas, elétricas ou térmicas (BAL et al., 2010). A armazenagem térmica é

importante em processos que utilizam calor, sendo uma opção sustentável ao uso de combustíveis fósseis, como no caso de secadores (SOARES et al., 2013).

Diferentes tipos de materiais podem ser empregados para acúmulo de calor em Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica (SAET). Esses podem ser classificados quanto ao tipo de calor armazenado: sensível e latente. Dentre os materiais empregados por via sensível de armazenagem, cita-se a água, metais líquidos, rochas e concretos. Estes, porém, apresentam algumas desvantagens, como o baixo calor específico e instabilidade na liberação de calor (ALVA et al., 2018).

Em razão disso, têm crescido os estudos de SAETs com materiais que armazenam calor por via latente. Destes, destacam-se os Materiais de Mudança de Fase (ou, no inglês, Phase Change Material, PCM), por possuírem uma alta capacidade de armazenar energia calorífica, bem como, liberando a uma taxa constante. Esses materiais, após sofrerem o processo de fusão, solidificam novamente, e assim, suportam outros processos de carga e descarga de calor. A aplicação dos PCM em estruturas civis é mais expressiva, tendo, inclusive, no mercado produtos comerciais a base de parafina e sais hidratados (GRADE, 2013).

Apesar de a parafina ser mais amplamente estudada e empregada em SAETs, este produto trata-se de um derivado do petróleo, não caracterizando-se como sustentável. Um tipo de PCM que possui alta tendência de aplicabilidade são os de base biológica (bioPCM), que podem ser ceras vegetais, extraídas de frutas, nozes ou sementes.

Dentre os tipos de bioPCMs podem ser mencionadas os óleos de soja, de palma e de coco (SHARMA et al., 2015). Além destes, a cera de carnaúba tipo 3 tem sido indicada como um promissor PCM, devido ao elevado calor latente de fusão, exemplificado pelo estudo de revestimento deste material para uso em leito fluidizado (PAULO et al., 2019). Já a cera de palma é descrita como um PCM de baixo custo, pelos autores Wongwuttanasatian et al. (2020), sendo este selecionado para um estudo de aumento de eficiência em módulos fotovoltaicos. A cera de soja, por sua vez, apresenta a vantagem de possuir um baixo ponto de fusão, segundo Trisnadewi et al. (2021), em um estudo de ciclagem térmica de bioPCM.

Assim, diante do exposto, o objetivo deste capítulo foi realizar um estudo térmico de três materiais biológicos de mudança de fase, em uma secção transversal, para aplicação em SAETs, para sistemas de secagem.

#### **1.2. MATERIAL E MÉTODOS**

Os procedimentos experimentais foram conduzidos no Laboratório de Sementes e Bioenergia, da Universidade Federal de Rondonópolis. Analisou-se quatro diferentes PCMs: parafina, cera de palma, cera de carnaúba tipo 3 e cera de soja, adquiridas em comércio especializado de ceras.

#### 1.2.1. Estrutura experimental

Para escolha do PCM de melhor performance para armazenamento de energia térmica, em sistemas de secagem solar, um módulo experimental foi adaptado do trabalho de Soares et al. (2015) (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Estrutura experimental para avaliação de diferentes PCMs: (1) Chapa de aquecimento; (2) Secção Transversal; (3) Placa de Arduino para aquisição de dados. Fonte: o autor.

O estudo conduzido por este autor consistiu na aproximação de uma chapa aquecida a uma placa contendo parafina macroencapsulada (que atuou como PCM), a fim de se estudar o comportamento térmico e o acúmulo de energia deste material. Este foi realizado por meio do monitoramento das temperaturas de aquecimento, de superfície do invólucro do PCM, bem como das cavidades que continham o material.

Assim, como fonte de calor, atuou como a chapa de aquecimento um agitador magnético, o qual se regulou para um aquecimento médio de 70 °C, a fim de simular o ar aquecido pelo secador solar. A face de aquecimento foi voltada para uma secção transversal de estrutura, que representou as paredes de câmara de secagem de um secador solar (Figura 1.2). A mesma foi constituída de uma placa de ACL (Armazenamento de Energia Térmica por Calor Latente), composta de um policloreto de vinila (PVC) de dimensões 10 x 10 cm, o qual atuou

como uma macrocápsula para alocação dos PCMs. Fixou-se a placa ACL, material isolante a fim de proporcionar que a descarga da energia de secagem fosse feita apenas em uma face, o qual foi constituído de lã de vidro entre duas chapas de madeira.



Figura 1.2. Detalhe da secção transversal de parede para câmara de secagem. Fonte: o autor.

A fim de monitorar as variações de temperatura na superfície de aquecimento, na superfície da placa de ACL, bem como do PCM, foi construído um sistema de aquisição de dados. Esse foi composto por placa de Arduíno Uno, programada para receber os dados de temperatura de sensores Termopar tipo k, dispostos conforme a Figura 1.3.



Figura 1.3. Disposição dos sensores de temperatura na chapa de aquecimento e de armazenamento por ACL. Fonte: o autor.

Utilizou-se os termopares localizados na chapa de aquecimento, bem como na superfície de armazenamento, para obter a temperatura média de aquecimento (T<sub>ma</sub>) e temperatura média de superfície de armazenamento (T<sub>msa</sub>), respectivamente. Três termopares foram alocados nas cavidades internas do policarbonato para mensurar a variação de temperatura do PCM. Os dados de todos os sensores foram verificados a cada minuto.

#### 1.2.2. Análise experimental

Primeiramente, caracterizou-se os PCMs por meio da análise DSC (Differential Scanning Calorimetry ou Calorimetria Exploratória Diferencial), por meio equipamento DSC-60. Os procedimentos foram conduzidos em laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Cuiabá.

A análise térmica foi realizada na faixa de temperatura de 0-200 °C, em células de alumínio, contendo amostras com cerca de 1,0 mg. As mesmas foram aquecidas a uma taxa de 20 °C min<sup>-1</sup>, em atmosfera de ar.

As ceras de carnaúba, palma, soja e a parafina foram analisadas com o intuito de se conhecer as propriedades de temperatura de início de fusão ( $T_{onset}$ ), temperatura de fim de fusão ( $T_{endset}$ ), temperatura de pico de fusão ( $T_{mp}$ ), calor latente de fusão e o calor específico da fase sólida. Tais propriedades são obtidas segundo metodologia estabelecida por Caneravolo Júnior (2003), conforme Figura 1.4.



**Figura 1.4.** Metodologia para estimativa de propriedades térmicas a partir de curva DSC. Fonte: Caneravolo Júnior (2003)

Após a caracterização, iniciou-se o estudo de fase de carga dos PCMs, através do módulo experimental. A chapa de aquecimento foi posicionada em contado com a superfície da placa de ACL, com o intuito de simular o ar aquecido em um secador solar. O início se deu a temperatura ambiente, aproximadamente 27 °C. Manteve-se o aquecimento por 420 min ou até que a temperatura do interior do policarbonato alveolar, ou seja, do PCM, fosse igual a T<sub>ma</sub>. Após, a chapa de aquecimento foi desligada dando início a fase de descarga de calor da placa de ACL, ao qual mensurou-se o tempo até que o PCM atingisse a temperatura ambiente. Este

foi feito com o intuito de se avaliar o PCM que apresentasse a distribuição de calor mais duradoura e uniforme.

Com os dados coletados pelo sistema de aquisição de dados, foi montada a curva de temperatura em função do tempo, T(t) e calculada a energia teórica armazenada para cada material estudado, por meio da Equação 1.1 (KALASELVAM e PARAMESHWARAN, 2014).

$$\mathbf{E} = \mathbf{m} \int_{T_1}^{T_m} C_p dT + \mathbf{m} \, \mathbf{a}_m \Delta \mathbf{h}_m + \mathbf{m} \int_{T_m}^{T_2} C_p dT = \mathbf{m} [C_{sp} (T_m - T_1) + \mathbf{a}_m \Delta \mathbf{h}_m + C_{lp} (T_2 - T_m)]$$
(1.1)

Em que:

E: energia teórica armazenada (J);

m: massa do material (kg);

T<sub>1</sub>: temperatura inicial (°C);

T<sub>m</sub>: temperatura de fusão (°C);

T<sub>2</sub>: temperatura final (°C);

 $C_p$ : calor específico (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>);

 $C_{sp}$ : calor específico durante o armazenamento sensível na fase sólida (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); C<sub>lp</sub>: calor específico durante o armazenamento sensível na fase líquida (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); a<sub>m</sub>: fração derretida;

 $\Delta h_m$ : calor de fusão por unidade de massa (J kg<sup>-1</sup>).

Os dados de energia teórica armazenada (E) e tempo de descarga (t<sub>d</sub>) foram comparados a 5% de probabilidade, pelo teste de Tuckey, a quatro repetições, no software R Studio 3.6.1(R CORE TEAM, 2019).

#### **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 1.3.

As curvas do sinal DSC, bem como a de aquecimento das amostras, são demonstradas nas Figuras 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8.

Observa-se nas figuras que todos os materiais apresentaram picos endotérmicos, ou seja, absorveram energia do meio, necessário para que ocorra a fusão. Nota-se também três regiões distintas, região de estado sólido (I), região de transição de fase (II) e região de estado líquido (III).



Figura 1.5. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de carnaúba. Fonte: o autor



Figura 1.6. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de palma. Fonte: o autor



Figura 1.7. Curvas da análise DSC e temperatura para a cera de soja. Fonte: o autor



Figura 1.8. Curvas da análise DSC e temperatura para parafina. Fonte: o autor

A variação de energia que ocorre nas regiões I e III corresponde ao calor sensível da fase sólida e líquida, respectivamente. A região II corresponde a região de transição da fase sólida para líquida. A área correspondente ao pico endodérmico observado nessa região corresponde ao calor latente de fusão.

Constata-se também a ocorrência de dois picos endotérmicos para as ceras de soja e a parafina. O maior pico endotérmico representa a transição sólido líquido, enquanto o menor a transformação sólido-sólido, presente em alguns materiais. Akgün et al. (2008) observaram esse comportamento no estudo da aplicação de três tipos de parafina, para fins de armazenamento de energia. San et al. (2020) também notaram a ocorrência de dois picos no estudo comparativo de PCMs de base biológica com a parafina. Os autores notaram a ocorrência de um estado sólido-sólido na transição de fase. O mesmo ocorreu no estudo de parafina realizado por Rao e Zhang (2011).

A partir das curvas DSC obteve-se as propriedades dos materiais estudados, os quais são descritos na Tabela 1.1.

	Material			
Propriedade	Cera de Carnaúba	Cerca de Palma	Cera de Soja	Parafina
Calor Latente de Fusão (J g <sup>-1</sup> )	150,78	193,01	116,07	180,92
Temperatura de pico de fusão (°C)	85,57	59,32	59,24	65,00
Temperatura de início de fusão (°C)	74,72	52,94	48,58	57,80
Temperatura de fim de fusão (°C)	91,57	68,66	66,10	70,72
Calor específico da fase sólida (J g <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	8,53	5,61	2,07	2,35

Tabela 1.1. Propriedades térmicas estimadas pela curva DSC para as cercas de carnaúba, palma, soja e parafina

Dentre as ceras estudadas, a cera de palma evidenciou o maior calor latente de fusão, mais compatível com a parafina. O maior calor específico da fase sólida foi apresentado pela cera de carnaúba. Monteiro (2018) estudou um método alternativo para medição das propriedades termofísicas das ceras de soja, palma e carnaúba. O método empregado como base foi o de T-History, uma metodologia alternativa a DSC. Dos resultados obtidos pela autora, o calor latente de fusão para as ceras de palma, carnaúba, soja e a parafina foram 133, 241, 195 e 251 J g<sup>-1</sup>, respectivamente. Os resultados das análises térmicas podem apresentar diferenças decorrentes dos métodos empregados, erros de medição de cada processo, além da origem de cada produto.

No que tange ao calor específico da fase sólida e a temperatura de fusão, Sobolciak et al. (2016) determinaram que a fusão da parafina, incorporada com grafites e polietileno, ocorre

em 42 °C, com um acúmulo de calor latente de fusão entre 103 e 119 J g<sup>-1</sup>, avaliados por DSC. Mathis et al. (2019) estudaram o potencial de armazenamento de calor de bioPCM, eutético, ou seja, a mistura de dois materiais, no caso dos ácidos cáprico e láirico. Este material iniciou o processo de fusão a 19.7 °C, acumulando um calor latente de fusão de 128,7 J g<sup>-1</sup>, dentro da faixa de variação dos materiais estudados no presente trabalho. Fabiani et al. (2020) estudou o óleo de palma como bioPCM. Embora apresente baixo ponto (24 °C) e baixo calor latente de fusão (47,0 J g<sup>-1</sup>), em relação a produtos comerciais, o material mostra-se promissor a composição de eutéticos.

Alves et al. (2020) ao estudarem um secador solar na região do Cerrado, alcançaram um pico de temperatura de 71 °C, no processo de secagem de banana maçã. Considerando esta informação, nota-se que as ceras de palma, soja e a parafina apresentaram uma faixa de temperatura de transição de fase mais adequadas ao uso em SAETs para secagem solar. Apesar de possuir potencial para maior armazenamento de energia, com maiores valores para calor específico da fase sólida e calor latente de fusão, a cera de carnaúba possui faixa de temperatura de transição sólido-líquido acima de 71 °C. Dentre as ceras que melhor se adequam a secagem, dadas tais condições, destaca-se a cera de palma.

As curvas de aquecimento do modulo experimental e, logo, da fase de carga de cada PCM estudado são expressas nas figuras 1.9, 1.10, 1.11 e 1.12.

Nota-se pelas figuras, o processo de aquecimento dos materiais em duas regiões: a de aquecimento sensível (sólido), caracterizado pelo aumento linear da temperatura, e a de mudança de fase (armazenamento de calor latente). Em comparação ao estudo desenvolvido por Soares (2015), não se observou a terceira região de aquecimento linear, devido ao aquecimento da fase líquida. Isso se deve a temperatura média de aquecimento (71,00 °C), não ser a T<sub>endset</sub>, especialmente no caso das ceras de carnaúba (91,57 °C) e a parafina (70,72 °C). Isso demonstra que o armazenamento de calor latente, no caso desses materiais, é restringido pela faixa de aquecimento de ar em sistemas de secagem.

Outro fenômeno notado no aquecimento experimental das ceras macroencapsuladas em PVC é de estratificação térmica. Nota-se que a temperatura do PCM é menor em cavidades mais baixas. Este fenômeno ocorre em razão do mecanismo de aquecimento do mesmo. Primeiramente o aquecimento do PCM ocorre por condução, ou seja, a superfície quente do PVC transmite o calor, de forma linear ao material interno. Conforme ocorre o derretimento das ceras, o mecanismo interno de transmissão de calor passa a ser por convecção, criando um fluxo interno de calor, que leva a parte superior de cada cavidade a aquecer a parte inferior da

Temperatura (°C) Tempo (min) -Superfície - Aquecimento - Cavidade 1 - Cavidade 2 - Cavidade 3

cavidade acima. Este mesmo fenômeno foi relatado por Soares et al. (2015) no estudo de parafina em macrocapsulas de alumínio.

Figura 1.9. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de carnaúba. Fonte: o autor



Figura 1.10. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de palma. Fonte: o autor



Figura 1.11. Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de soja. Fonte: o autor



**Figura 1.12.** Variação de temperatura para a superfície de aquecimento, superfície de armazenamento e das cavidades internas preenchidas com cera de parafina. Fonte: o autor

A partir das curvas de aquecimento do módulo experimental, para cada material estudado, calculou-se a energia teórica armazenada, por meio da equação 1.1, bem como obteve-se o tempo de descarga. A figura 1.13 mostra as médias de energia armazenada em função da massa, bem como o tempo de descarga de calor de cada amostra.



**Figura 1.13.** Energia teórica armazenada e tempo de descarga de calor para as ceras de carnaúba, palma, soja e parafina. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferenciam entre si, pelo teste de Tuckey, à 5% de probabilidade. Fonte: o autor.

As ceras de carnaúba e palma foram os PCM que armazenaram as maiores quantidades de calor por unidade de massa. Entretanto, considerando os resultados anteriores, apenas a cera de palma armazenou calor do tipo latente. Em estudo conduzido Yadav e Samir (2019), o calor armazenado pela parafina alcançou 346.47 J g<sup>-1</sup>, a um fluxo de calor de 3100 W m<sup>-2</sup>, com ponto de fusão a 57.85 °C. Soares et al. (2015) armazenaram ao todo 509 J, em um procedimento experimental com parafina.

Considerando o tempo de descarga do calor acumulado, não houve diferença estatística entre os PCM. No entanto, constata-se que todos os bioPCM estudados apresentaram maior tempo de descarga em relação a parafina. O maior tempo de descarga da energia acumulada proporciona uma melhor distribuição da mesma.

Em estudo conduzido por Soares et al. (2015) a parafina comercial PCM RT28 HC descarregou todo o calor acumulado em 340 minutos. Este maior valor deve-se a maior quantidade de calor armazenado pelo material, em razão do menor ponto de fusão.

#### **1.4. CONCLUSÕES**

Por meio deste estudo térmico permite-se concluir que:

A cera de palma apresentou maior capacidade de armazenar calor latente e, junto com a cera de soja, aptidão para armazenar calor de transição de fase.

O fenômeno de estratificação térmica conduziu o aquecimento de todos os materiais estudados.

A ceras de palma e carnaúba armazenaram maior quantidade de calor, tendo a primeira maior possibilidade de uso em sistemas de secagem solar, como ACL.

#### **1.5. LITERATURA CITADA**

AKGÜN, M.; AYDIN, O.; KAYGUSSUZ, K. Thermal energy storage performance of paraffin in a novel tube-in-shell system. **Applied Thermal Engineering**, v.28, n.5, p.405-413, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.05.013

ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. Na overview of thermal energy storage systems. **Energy**, v.144, p.341.378, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037.

ALVES, N. M. C.; RODRIGUES, J. O.; ARRUDA-SILVA, T. A.; GALLE, N. B. C.; SALINA, T. H. C.; MOURA, A. S.; SILVA, K. L. M.; BORGES, C. J. A. Performance of solar dryer with thermal energy storage in brazilian cerrado region. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.9, p.64220-64235, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-016

BAL, L. M.; SATYA, S.; NAIK, S. N. Solar dryer with thermal energy storage systems for dying agricultural food products: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, n.8, p.2298-2314, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.014.

CANERAVOLO JÚNIOR, S. A. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2003. 445 p.

FABIANI, C.; PISELLO, A. L.; BARBANERA, M.; CABEZA, L. Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. **Journal of Energy Storage**, v.28, 101129, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101129.

GRADE, P. J. S. P. S. Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

KALAISELVAM, S.; PARAMESHWARAN, R. **Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability:** Systems Design, Assessment and Applications. Londres: Academic Press, 2014. 444 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2013-0-09744-7.

MATHIS, D.; BLANCHET, P.; LANDRY, V.; LAGIÈRE, P. Thermal characterization of biobased phase changing materials in decorative wood-based panels for thermal energy storage. **Green Energy & Environment**, v.4, n.1, p.56-65, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gee.2018.05.004. MONTEIRO, M. M. **Caracterização termofísica de biomateriais de mudança de fase por meio da metodologia T-History.** 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais), Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília.

PAULO, B. B.; ADREOLA, K.; TARANTO, O.; FERREIRA, A. D.; PRATA, A. S. Coating approach for a Phase Change Material (PCM). **Powder Technology**, v.341, p.147-156, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.003.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation** for Statistical Computing, Vienna., 2019.

RAO, Z. H.; ZHANG, G. Q. Thermal properties of paraffin wax-based composites containing graphite. **Energy Sources**, v.33, p.587-593, 2011. DOI: http://doi.org/10.1080/15567030903117679

SAN, M. N.; CAGGIANO, A.; MANKEL, C.; KOENDERS, E. A comparative study on the thermal energy storage performance of bio-based and paraffin-based PCMs using DSC procedures. **Materials** (**Basel**), v.13, n.7, ma1705, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/ma13071705

SHARMA, R. K.; GANESAN, P.; TYAGI, V. V.; METSELAAR, H. S. C.; SANDARAN, S. C. Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, v.95, p.193-228, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.084.

SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. **Energy and Buildings**, v.59, p.82-103, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042.

SOARES, N.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P.; COSTA, J. J. Experimental study of the heat transfer trough a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials. **Applied Energy**, v.142, p.192-205, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.034

SOBOLCIAK, P.; KARKRI, M.; AL-MAADEED, M. A.; KRUPA, I. Thermal characterization of phase change materials based on linear low-density polyethylene, paraffin wax and expanded graphite. **Renewable Energy**, v.88, p.372-382, 2016, DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.056.

TRISNADEWI, T.; KUSRINI, E.; NURJAYA, D. M.; PUTRA, N.; MAHLIA, T. M. I. Experimental analysis of natural wax as phase change material by thermal cycling test using
thermoelectric system. **Journal of Energy Storage**, V.40, 102703, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102703

WONGWUTTANASATIAN, T.; SARIKARIN, T.; SUKSRIAB, A. Performance enhancement of a photovoltaic module by passive cooling using phase change material in a finned container heat sink. **Solar Energy**, v.195, p.47-53, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.053

YADAV, A.; SAMIR, S. Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure. **Journal of energy Storage,** v.21, p.405-417, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.005.

# CAPÍTULO II DESEMPENHO DE SECADOR SOLAR COM ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE À BASE BIOLÓGICA

**Resumo:** A secagem solar é uma opção atrativa à secagem convencional pela alta disponibilidade de energia térmica. Em vista disso, secadores com armazenamento de energia térmica são cada vez mais estudados, de modo especial aqueles a base de materiais de mudança de fase biológicos. O objetivo do presente estudo foi construir e desenvolver um secador solar indireto, com armazenagem de calor a base de cera de palma (secador 1), e compará-lo a secagem solar convencional (secador 02). Avaliou-se os secadores por meio da Primeira Lei da Termodinâmica, pela qual se determinou o rendimento térmico e a eficiência mássica. Conduziu-se a secagem do pseudofruto do caju, em três dias distintos. Os picos de temperatura no secador 01 foram 75,2, 82,7 e 76, 1 °C e no secador 02 foram 58,4, 72,8 e 54,8 °C, respectivamente aos três dias de secagem. O secador 01 apresentou maior rendimento térmico médio, com 103,97%, no experimento 3. As maiores eficiências mássicas foram obtidas no dia 2, com 67,68% para o secador 01 e 57,27% para o secador 02. A cera de palma demonstrou potencial no uso como armazenador de energia térmica, na secagem solar de caju.

Palavras-chave: rendimento térmico, eficiência mássica, material de mudança de fase

**Abstract:** Solar drying is an attractive option to conventional drying due to the high availability of thermal energy. As a result, dryers with thermal energy storage are increasingly studied, especially those based on biological phase change materials. The aim of the present study was to build and develop an indirect solar dryer, with palm wax heat storage (dryer 1), and compare it to conventional solar drying (dryer 02). The dryers were evaluated using the First Law of Thermodynamics, by which the thermal yield and mass efficiency were determined. The drying of the cashew pseudofruit was carried out on three different days. The temperature peaks in dryer 01 were 75.2, 82.7 and 76, 1 °C and in dryer 02 was 58.4, 72.8 and 54.8 °C, respectively, after the three days of drying. Dryer 01 presented the highest average thermal yield, with 103.97%, in experiment 3. The highest mass efficiencies were obtained on day 2, with 67.68% for dryer 01 and 57.27% for dryer 02. Palm wax showed potential for use as a thermal energy store in the solar drying of cashew pseudofruit.

Keywords: thermal yield, mass efficiency, phase change material

# 2.1. INTRODUÇÃO

A secagem é um processo largamente utilizado pela agroindústria, como uma importante ferramenta de conservação de grãos, sementes, cereais, frutas e alimentos em geral (CELESTINO, 2010). O processo mais comum de secagem utilizado é que ocorre por troca de calor e umidade entre o produto a ser seco e o ar aquecido (SILVA et al., 2008). Muitos combustíveis são empregados como fonte de calor, por meio de sua queima, como lenha vegetal

e os fósseis, como o GLP (gás liquefeito de petróleo) (PRECCI et al., 2001). Contudo, muito se fala atualmente em energias limpas, especialmente a energia solar.

Atualmente, existe no mundo uma grande demanda por energia. A projeção de consumo energético para 2030 é de 722 quatrilhões de BTU's (Unidades Térmicas Britânicas) (BAL et al., 2010). Em contrapartida a essa alta necessidade, há uma avaliação de que a Terra receba uma quantidade de irradiação solar correspondente a 10 mil vezes a energia consumida nos anos 2000 (CRESESB, 2004). No Brasil, a região Centro-Oeste é uma das que apresenta maior incidência de radiação solar: em média de 5,7 kWh m<sup>-2</sup> (PEREIRA et al., 2012).

Apesar de ser uma grande fonte de energia, o sol possui um fator limitante, isto é seu caráter intermitente, tendo em vista períodos noturnos e dias nublados ou chuvosos. Contudo, sistemas que armazenam a energia térmica têm sido estudados, com a utilização de materiais como a água, rochas e, mais recentemente, os materiais de mudança de fase (em inglês, phase change materials, PCM) (BAL et al., 2010).

Dentre estes materiais, tem-se buscado aqueles que não tenham base petroquímica, como o caso da parafina. Uma boa opção, é a cera de palma. Este material possui vantagens como o baixo custo, estável por muitos ciclos térmicos, ecologicamente correto e baixo risco à saúde, em caso de vazamentos (FABIANI et al., 2020).

Em virtude de o processo de retirada de água dos alimentos ser essencial, a fim de se aumentar o tempo de vida de prateleira e reduzir os mecanismos de deterioração dos alimentos, muitas vezes os produtos oriundos da agricultura familiar possuem menos possibilidades de inserção no mercado, por serem comercializados in natura. Assim, o desenvolvimento de equipamentos de secagem de baixo custo se faz necessário para que os pequenos produtores possam ser competitivos no mercado.

Portanto, objetiva-se com o referido capítulo desenvolver e avaliar um secador solar indireto para secagem de produtos agrícolas, com sistema de armazenamento de energia por calor latente, a base de cera de palma.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

A condução dos experimentos e análises ocorreram no Laboratório de Sementes e Bioenergia e a secagem em campo experimental da Universidade Federal de Rondonópolis (latitude 16° 27' 49" S, longitude 55° 34' 47" O).

#### 2.2.1. Construção dos Secadores

Dois secadores de iguais dimensões foram construídos. A diferenciação entre os equipamentos ocorreu pela presença do sistema de armazenamento de energia térmica, à base de cera de palma (Secador 1), e a ausência deste (Secador 2).

Cada secador foi constituído de duas estruturas básicas: o coletor solar e a câmara de secagem. A construção foi realizada com o intuito de se obter uma relação volumetria 4:1, ou seja, que o volume interno do coletor solar fosse quatro vezes maior que o volume interno da câmara de secagem.

O coletor solar foi do tipo placa plana, com dimensões de 1,15 m de comprimento, 1,00 m de largura e 0,15 m de profundidade. O mesmo foi coberto com placa de vidro (4 mm de espessura). O capacitor térmico da estrutura constituiu-se de uma folha de telha de fibrocimento, pintada de preto (Figura 2.1 a). Não houve diferenciação entre os coletores solares dos secadores.

A câmara de secagem possui as dimensões internas com área de base quadrada de 0,30 m x 0,30 m e 0,48 m de altura. Um suporte de chapa perfurada foi alocado em seu interior. As paredes da câmara constituem-se de material isolante (lã de vidro) entre duas folhas de madeirite. A entrada de ar é constituída de um bocal retangular de 0,30 m x 0,13 m. O topo dos secadores foi em forma de tronco de pirâmide de 0,07 m de altura, com exaustor quadricular de 0,05 m. Na parte posterior, foram utilizadas portas para manuseio, com dimensões de 0,20 m x 0,20 m (Figura 2.1 b).

O Sistema de Armazenamento de Energia Térmica (SAET) foi instalado no secador 01 pelo revestimento das paredes internas com bioPCM (cera de palma), em macrocapsula de policloreto de vinila (PVC) (Figura 2.1 c). Todas a estruturas foram pintadas de preto a fim de se otimizar a conservação e absorção de calor.



**Figura 2.1.** Vistas das estruturas empregadas na construção dos secadores solares: coletor solar (a), câmara de secagem (b) e câmara de secagem do secador 1 (c), com SAET (estruturas representadas em branco a fim de se facilitar a visualização). Fonte: o autor.

### 2.2.2. Procedimento da Secagem

A avaliação dos secadores foi feita por meio da secagem do pseudofruto do cajueiro (Anacardium occidentale), em três dias: 14, 15 e 16 de junho de 2021. Uma vez que cada dia proporcionou condições climáticas distintas, cada dia caracterizou um experimento diferente, assim nomeados experimentos 1, 2 e 3, respectivamente.

Deste modo, quatro repetições, com amostras de massa aproximada em 100 g do produto, dispostos de forma inteira (in natura), foram alocadas em placas de petri, no interior da câmara de secagem de cada secador. O coletor solar foi acoplado a câmara de secagem com uma inclinação de 16°, equivalente à latitude local, para que os raios solares incidissem perpendicularmente, proporcionando maior aproveitamento energético. Com o mesmo intuito, os secadores foram dispostos com a face da cobertura de vidro voltadas ao sentido Norte-Sul (Figura 2.2).



Figura 2.2. Secador 1 (parte superior) e secador 2 (parte inferior) em funcionamento em campo experimental.

#### 2.2.3. Avaliação do desempenho dos secadores

O estudo do desempenho térmico e mássico dos secadores foi realizado por meio da Primeira Lei da Termodinâmica (Equação 2.1), a qual relaciona calor, trabalho, energia cinética e potencial associadas a um volume de controle, tendo como fluido o ar de secagem.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{e} \dot{m}_{e} \left( h_{e} + \frac{v_{e}^{2}}{2} + gz_{e} \right) - \sum_{s} \dot{m}_{s} \left( h_{s} + \frac{v_{s}^{2}}{2} + gz_{s} \right)$$
(2.1)

Em que:

- $\frac{\partial E}{\partial t}$ : taxa temporal de variação de energia no volume de controle (W);
- Q: transferência de calor através da fronteira do volume de controle (W);
- W: transferência de trabalho através da fronteira do volume de controle (W);
- m: vazão mássicas (kg s<sup>-1</sup>);
- h: entalpia específica do ar (kJ kg<sup>-1</sup>);
- v: velocidade do ar (m s<sup>-1</sup>);
- g: aceleração da gravidade (m  $s^{-2}$ );
- z: valor absoluto da posição vertical, altura (m);
- e: entrada do volume de controle;
- s: saída do volume de controle.

Assim sendo, o coletor solar e a câmara de secagem foram distinguidos como dois volumes de controle diferentes. O volume de controle referente ao coletor fornece o rendimento térmico dos secadores. O volume de controle formado pela câmara de secagem proporciona a eficiência mássica.

Ao se calcular o rendimento térmico do secador deve-se considerar as características construtivas do coletor solar. Percebe-se que as energias cinéticas e potenciais do mesmo são nulas, uma vez que não há movimento, podendo-se da mesma forma aferir que não há realização de trabalho. Portanto, a partir dessas premissas, manipulou-se a Equação 2.1 e deduziu-se a Equação 2.2:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{e-s} + \dot{\mathbf{m}}_e \mathbf{h}_e = \dot{\mathbf{m}}_s \mathbf{h}_s \tag{2.2}$$

Da equação 2 infere-se que  $\dot{Q}_{e-s}$  representa a transferência de energia que ocorre através da fronteira do volume de controle para o fluido de trabalho, ou seja, o ar de secagem. Considerando a que a vazão mássica de entrada é igual a de saída, pode-se reescrever a Equação 2.2 como:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{e}-\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{m}} \left( \mathbf{h}_{\mathbf{s}} - \mathbf{h}_{\mathbf{e}} \right) \tag{2.3}$$

Deste modo, um anemômetro de fio quente (modelo F-900) foi alocado na entrada de cada coletor solar, com o intuito de se obter a vazão mássica do ar. Os dados de velocidade do ar no interior do coletor foram aplicados à Equação 2.4:

$$\dot{\mathbf{m}} = \rho \mathbf{V} \mathbf{A}$$
 (2.4)

Em que:

- $\rho$ : massa específica do fluido de trabalho (kg m<sup>-3</sup>);
- V: velocidade do fluido de trabalho no interior do volume de controle (m s<sup>-1</sup>);
- A: Área de entrada do fluido no volume de controle (m<sup>2</sup>),

Logo, o rendimento térmico do secador é igual a razão entre a energia transferida para o interior do volume de controle ( $\dot{Q}_{e-s}$ ) e a Irradiação Solar incidente sobre a área da cobertura transparente do coletor ( $\dot{Q}_{solar}$ ), que, por sua vez, é o produto entre a área da cobertura ( $A_c$ ) e a irradiação solar horária para o dia ( $\dot{Q}_{solar-horária}$ ) (Equação 2.5).

$$\eta_{\text{coletor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{e-s}}}{\dot{Q}_{\text{solar}}} = \frac{\dot{m} (h_{\text{s}} - h_{\text{e}})}{A_{\text{c}} \cdot \dot{Q}_{\text{solar-horária}}}$$
(2.5)

As informações de entalpia de entrada foram estimadas a partir dos dados de temperatura (T) e umidade relativa (UR) do ar ambiente, que assim como a  $\dot{Q}_{solar-horária}$ , foram fornecidas pela estação meteorológica instalada no campus da UFR. Os valores da entalpia de saída foram obtidos a partir dos dados de T e UR do ar de secagem, mensurados por meio de dois sensores de umidade e temperatura, modelo HT-70, instalados no ponto de junção coletor-câmara de cada secador. As magnitudes de T e UR foram lançadas no software Computer Aided Thermodynamic Tables 3, no qual estimou-se as informações h<sub>e</sub> e h<sub>s</sub>, por meio de gráficos psicrométricos eletrônicos.

Para o cálculo de eficiência mássica o volume de controle é aplicado à câmara de secagem. Este possui vazões mássicas distintas, ou seja, a massa do ar de entrada é menor que a massa do ar de saída, a qual contém o acréscimo da massa de água, oriunda da desidratação do produto.

A partir das especificações construtivas da câmara estima-se que a energia cinética e potencial na entrada e na saída são iguais, e o trabalho é nulo. Assim, pode-se dizer que a câmara

de secagem atua como um sorvedouro, uma vez que nesse sistema termodinâmico a T de entrada equivale a de saída, observando-se tal comportamento para os secadores. Assim aplicando tais constatações à Equação 1, tem-se que a eficiência mássica é igual a Equação 2.6.

$$\eta_{c\hat{a}mara} = \frac{m_i \cdot m_f}{m_w} \cdot 100 \tag{2.6}$$

Em que:

 $\eta_{c\hat{a}mara}$ : eficiência mássica do processo de secagem (%);  $m_i$ : massa inicial do produto (g);  $m_f$ : massa final do produto (g);  $m_w$ : massa total de água do produto a ser seco (g).

A perda de massa das amostras foi mensurada por pesagens periódicas em balança, nos intervalos de 0, 5, 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 e 600 min. Ao fim da secagem, aplicou-se o teste de umidade, conforme Instituto Adolfo Lutz (2008). A diferença entre a massa inicial e massa seca das amostras de caju no teste de umidade correspondeu a massa total de água.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações climáticas ocorridas nos dias de secagem, foram coletadas entre os horários de 08 h às 19 h, período que abrangeu o de operação dos secadores. As variações de temperatura, umidade relativa e irradiação solar horária são expressas nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5, respectivamente para os dias 14, 15 e 16 de junho.

De acordo com Köppen (1931), o clima da região na qual conduziu-se a secagem é classificado como Aw. Também denominado clima tropical de savana, essa classificação climática distingue regiões com temperaturas médias superiores a 18 °C em todos os meses. A estação seca ocorre no outono/inverno e a estação chuvosa, na primavera/verão (SOUZA et al., 2013).

Assim sendo, observa-se que o período de condução dos experimentos ocorreu na estação seca, na qual não houve precipitações pluviométricas e com a irradiação solar horária, variando de forma homogênea, o que indica a menor interferência de nuvens.

#### CAPÍTULO II: DESEMPENHO DE SECADOR SOLAR COM ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE À BASE BIOLÓGICA 45



**Figura 2.3.** Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar horária (Q<sub>solar-horária</sub>) para o Experimento 1 (14/06).



**Figura 2.4.** Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar horária (Q<sub>solar-horária</sub>) para o Experimento 2 (15/06).



**Figura 2.5.** Variação dos dados de temperatura (Te), umidade relativa (URe) e irradiação solar horária (Q<sub>solar-horária</sub>) para o Experimento 3 (16/06).

Nas figuras 2.6, 2.7 e 2.8, é expressa a variação de temperatura, após a passagem pelo coletor solar, para o Secador 1 e Secador 2.



**Figura 2.6.** Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 1.



**Figura 2.7.** Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 2.



**Figura 2.8.** Variação dos dados de temperatura (T) do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 3.

De acordo com as figuras, as temperaturas de pico para o Secador 01 foram de 75,2, 82,7 e 76, 1 °C, enquanto para o Secador 02, 58,4, 72,8 e 54,8 °C, de forma respectiva aos experimentos 01, 02 e 03. Nota-se que em todos os dias de secagem o secador revestido com cera de palma apresentou maiores temperaturas, em relação ao secador sem SAET. Observa-se também, o PCM contribui para aumentar o potencial de secagem, contudo não prolongou o processo em períodos de baixa disponibilidade de luz de sol (após as 17 h).

A taxa de aquecimento observada até o horário de pico de temperatura (cerca de 13 h e 12 min) foi de 10,1, 13,8 e 10,6 °C h<sup>-1</sup>, para os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. O Secador 02, por sua vez, apresentou uma taxa de aquecimento de 7,9, 10,2 e 6,4 °C h<sup>-1</sup>, considerando os mesmos dias de secagem.

De modo geral, constata-se que o experimento 03 foi o que mais diferenciou os dois sistemas de secagem, quando considerada a temperatura do fluido de secagem aquecido (21,3 °C entre os picos de temperatura). Este dia transcorreu com uma variação homogênea da Q<sub>solar-horária</sub>, logo, condiciona uma taxa de aquecimento mais contínua nos secadores, bem como uma carga de calor constante do PCM (Cera de Palma). Este fato comprova-se ao perceber que o pico de temperatura se prolongou por 1 h, após as 13 h 12 min (horário de T máxima) no secador 01, enquanto no secador 02, declinou-se.

Alves et al. (2020), justificaram essa diferença entre as temperaturas, apesar da mesma estrutura de coletor solar, pelo fato de o equipamento absorver calor também pelas paredes laterais (região onde se alocou as placas com PCM). Os mesmos autores, no estudo de um secador solar com SAET, à base de parafina, alcançaram uma temperatura de pico a 71,7 °C. Khadraoui et al. (2017), obtiveram um pico de temperatura de 50 °C, em um coletor solar integrado com parafina, na secagem no norte da Tunísia, 1 °C superior ao coletor sem o PCM. Vigneshkumar et al. (2021), na secagem de batatas, em um secador solar indireto, com SAET a base de parafina, alcançaram temperaturas superiores a 60 °C.

Quanto ao comportamento da umidade relativa do ar de secagem, após a passagem pelo coletor, pode-se observar nas figuras 2.9, 2.10 e 2.11.

Assim, conforme as observações destas figuras, no interior da câmara de secagem, o Secador 01 obteve 56,8% de umidade relativa, no início de secagem no experimento 1, tendo uma UR mínima de 0,9%. Os experimentos 02 e 03 obtiveram máximas e mínimas para essa propriedade de 62,7 e 0,4%; 63,8 e 0,1%, respectivamente. O Secador 02, por sua ver apresentou maiores e menores magnitudes para UR de 51,1 e 12,2%, 63,8 e 1,9% e 64,5 e 8,2%, de forma respectiva aos dias 14, 15 e 16 de junho.



Figura 2.9. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 1.



Figura 2.10. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 2.



Figura 2.11. Variação dos dados de umidade relativa do fluido de secagem (ar) após a passagem pelo coletor solar, no Experimento 3.

Percebe-se que o secador com PCM proporcionou um ar de secagem mais seco em relação ao sem este material. Resultados semelhantes foram encontrados por Alves et al. (2020), com o uso de parafina como PCM na secagem de banana. Vigneshkumar et al. (2021) justificaram esse comportamento pela remoção de umidade do PCM, possivelmente pelo fornecimento de calor. Azaiza et al. (2020) compararam a secagem de pimentas vermelhas em duas estufas, uma com PCM (parafina) e outra sem PCM, e observaram que a UR, naquela que apresentava SAET, foi 18,6% inferior a convencional.

Por meio dos dados de T e UR, estimou-se as entalpias de entrada e saída do coletor, inerentes ao fluido de secagem, aplicando-as na Equação 2.5, bem como os valores de Irradiação Solar Horária e vazão mássica. Deste modo determinou-se o Rendimento Térmico dos secadores para cada experimento, expresso nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14.



**Figura 2.12.** Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 1.



**Figura 2.13.** Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 2.



**Figura 2.14.** Variação do rendimento térmico de secagem ao longo do período de secagem do pedúnculo de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 3.

O rendimento médio para os Secadores 1 e 2 foram 43,49% e 56,77%, no dia 14 de junho; 64,79% e 65,00%, no dia 15 de junho e 103,97% e 59,82%, no dia 16 de junho. No experimento 1, o pico do rendimento térmico foi às 08 h e 57 min (186,41%), para o secador 1 e às 09h e 12 min para o secador 2 (208,29%). O rendimento máximo no experimento 2, foi alcançado às 09 h e 12 min no secador 1, com 279,29%, e às 10 h e 12 min no secador 2, com 238,61%. Por sua vez, no experimento 3, o pico foi atingido com 370,40% para o secador com o PCM (às 09 h e 42 min) e 283,94 % para o secador sem o material (às 10 h12 min). Os rendimentos maiores que 100% são justificados pelo fato de o secador não absorver calor apenas pelo coletor solar. Uma vez que os raios solares também incidem nas paredes laterais, isso promove um maior aquecimento, não apenas pela área da placa de vidro.

O maior rendimento térmico médio no experimento 03 corrobora com os resultados de Alves et al. (2020), que ao secarem banana em um secador com SAET a base de parafina, o maior rendimento deste foi obtido em um dia com comportamento homogêneo da irradiação solar horária (com base nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5). Assim, o secador com SAET mostra maior rendimento térmico em períodos com comportamentos regulares da Q<sub>solar-horária</sub>.

Por meio das figuras foi possível constatar-se ainda que ambos os secadores apresentaram o comportamento de acumular temperatura pela manhã, até por volta das 10 h. Após este horário a tendência torna-se decrescente. Esse fenômeno é consequência do capacitor térmico (telha de fibrocimento) que acumula calor na fase sensível, liberando-o para o fluido de secagem em períodos de baixa disponibilidade de energia (radiação térmica), justificando também os valores acima de 100%.

Nota-se também que os rendimentos térmicos foram maiores para o secador 2 nos experimentos 1 e 2, ainda que os coletores solares possuíssem estruturas idênticas. Nesse caso, nota-se que os valores médios da UR na saída do coletor do secador com SAET foram 21,08, 23,02 e 24,00%, de forma respectiva aos experimentos 1, 2 e 3. No que diz respeito ao secador 02, os valores médios desta propriedade foram 29,1, 26,05 e 30,06%, respectivamente aos dias 14, 15 e 16 de junho. Deste modo, como o ar úmido possui um maior calor específico associado, em relação ao ar seco, em virtude das propriedades da água, houve uma maior energia associada ao secador 2, que apresentou um ar mais úmido. A mesma justificativa foi apresentada por Alves et al. (2020) na secagem de bananas, na região do Cerrado brasileiro.

Resultado semelhante foi encontrado no estudo de Bhardwaj et al. (2019) na secagem de *Valeriana jatamans*, na região do Himalaia, onde os maiores rendimentos foram obtidos para o coletor sem armazenamento de energia térmica.

SunilRaj e Eswaramoorthy (2020) obtiveram uma eficiência térmica máxima de 65% em um secador solar, com o uso de Parafina. Khadraoui et al. (2017) por sua vez, integraram o PCM ao coletor solar, que apresentou uma eficiência média de 33,9%. Rabha e Muthukumar (2017) alcançaram um pico de 40,2% no rendimento térmico para um aquecedor solar de placa plana, na secagem de gengibre e ghost chilli pepper, na região nordeste da Índia. Morais et al. (2019) usaram um secador solar indireto, sem SAET, na secagem de sementes de mamão, no qual o coletor solar obteve um rendimento médio de 45% e temperatura máxima de 53 °C, na região Nordeste do Brasil.

Os dados de perda de massa das amostras de pseudofruto de caju e eficiência mássica horária dos secadores 01 e 02 são expressos nas figuras 2.15, 2.16 e 2.17.



**Figura 2.15.** Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02, no Experimento 1.



**Figura 2.16.** Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02, no Experimento 2.



**Figura 2.17.** Valores de perda de massa e eficiência mássica horária para os secadores 01 e 02, no Experimento 3.

Verifica-se, por meio das figuras, que a perda de massa ocorreu a uma taxa maior para o Secador 01, nos experimentos 02 e 03, enquanto no Secador 02 para o experimento 01. Apesar disso, não houve uma diferença acentuada entre os equipamentos nos dias 14 e 16 de junho. Uma distinção mais perceptível na perda de massa ocorreu no dia 15, no qual também ocorreu maior T e menor UR para o Secador 1. Tal fato pode ser justificado pela forma a qual foram secas as amostras, dispostas inteiras no interior da câmara. Assim, devido as maiores dimensões, especialmente espessura, minimiza-se a área superficial do produto vegetal em contato com o ar de secagem, tornando o gradiente de movimentação da água mais lento.

Tal constatação pode ser corroborada pelos resultados de Rodrigues et al. (2021). Estes autores determinaram coeficientes de difusão diferentes para secagem solar de batata doce,

dispostas em diferentes formatos. Uma curva semelhante foi obtida por Nunes e Pellegrino (2017) na secagem de bananas em secador solar, com amostras de cerca de 70 g.

Ainda em análise dessas figuras, a eficiência mássica máxima dos secadores 01 e 02 ocorrem em 5,75% (13 h 42 min) e 4,85% (11 h 42 min), 22,89% (08 h 47 min) e 16,27% (08 h 57 min), 8,44% (08 h 47 min) e 10,71% (08 h 47 min), respectivamente aos experimentos 01, 02 e 03. O valor de eficiência mássica horária corresponde ao percentual de água removida num dado intervalo de tempo, em função do conteúdo total de água da amostra. Assim sendo, verifica-se que as maiores inclinações nas curvas de perda de massa coincidem com estes picos. Tal fato se deve que, nestes momentos, é fornecido maior quantidade de energia para que haja a quebra das ligações intermoleculares que prendem as moléculas de água, inicialmente mais fracas (forças de Van der Walls), mas que tendem a se fortalecer conforme se reduz a umidade (pontes de hidrogênio), como observado na linearização da curva de variação de massa. Comportamento semelhante ocorreu na secagem solar de cebola (BARBOSA et al., 2018).

Mediante as informações de perda de massa, determinou-se a umidade inicial, e ao final da secagem das amostras do pseudofruto do caju, bem como a eficiência mássica geral dos secadores (Tabela 2.1).

massica uos seca	uoles l e 2.								
Secador	lor m <sub>i</sub>		f ms		$\mathbf{U}_{\mathbf{f}}$	ηcâmara			
Experimento 1									
1	100,00	62,70	11,30	88,70	82,00	42,05			
2	100,00	62,00	10,50	89,50	83,10	42,46			
Experimento 2									
1	100,00	37,60	7,80	92,20	79,30	67,68			
2	101,00	49,80	11,60	88,50	76,70	57,27			
Experimento 3									
1	101,00	51,70	8,60	91,50	83,40	53,35			
2	100,2	53,60	8,60	91,40	84,00	50,87			

 Tabela 2.1. Dados médios das massas inicial, final e seca; umidades inicial e final das amostras de caju e eficiência

 mássica dos secadores 1 e 2.

**m**<sub>i</sub>: massa inicial do produto, g; **m**<sub>f</sub>: massa final após a desidratação no secador, g; **m**<sub>s</sub>: massa seca ao fim do teste de umidade, g; **U**i: umidade inicial, antes da desidratação no secador, em base úmida, %; **U**<sub>f</sub>: umidade final, após a desidratação no secador, em base úmida, %; **n**<sub>câmara</sub>: eficiência mássica, %.

Os teores de água mais baixos foram observados para o secador 1, nos experimentos 1 (82,00%) e 3 (83,40%), e para o secador 2, no experimento 2 (76,70%). Apesar disso, em nenhuma secagem obteve-se produto com umidade inferior a 25% (b.u.).

Este é o limite estabelecido pela Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) nº 272, de 22 de setembro de 2005, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), para uma fruta ser considerada seca, e em nível seguro contra desenvolvimento de microrganismos. Este fato, deve-se, como dito, principalmente pelo formato dos frutos, dispostos inteiros, in natura, na câmara de secagem.

A secagem conduzida com frutos em secções de menores dimensões, possibilita atingir a umidade estabelecida pela legislação. Como no trabalho de Morais et al. (2019), que ao secarem sementes de mamão reduziram o teor de água de 83,08 a 7,22%. Atalay (2019), por sua vez, reduziram o conteúdo de água de fatias de laranja de 93,5% a 10,28%, com secador solar integrado com sistema de armazenamento térmico por calor sensível, por meio de leito compactado. Já Lakshmi et al. (2018) obtiveram amostras de *Curcuma caesia* com 8,5% de umidade, após 18,5 horas de secagem em secador solar com armazenamento de calor à base de parafina, nas quais o teor inicial de água era de 73.4%.

No que tange a eficiência mássica, o secador 01 demonstrou, de modo geral, valores superiores ao secador 02, especialmente evidenciado nos experimentos 02 e 03. Isso demonstra que o a cera de palma, demonstrou potencial de uso como PCM, potencializando a secagem do pseudofruto do cajueiro.

Os valores, no entanto, foram inferiores aos obtidos por Alves et al. (2020), na secagem solar com SAET a base de parafina, com valores de 91,90%, na secagem de banana. Bhardwaj et al. (2019) alcançaram uma  $\eta$  máxima de 27.84%, com armazenamento de energia térmica, na secagem de plantas medicinais.

### 2.4. CONCLUSÕES

Os presentes resultados permitem tomar as consequentes conclusões:

O secador com armazenamento de energia térmica obteve maiores temperaturas e menores umidades relativas do ar de secagem.

O maior rendimento térmico foi observado para o secador com armazenamento de energia por calor latente, no dia com condições regulares de irradiação solar.

As maiores eficiências mássicas horárias foram proporcionadas pelo secador com armazenamento de energia térmica.

O secador com armazenamento de energia térmica, a base de cera de palma, obteve produtos mais secos e maior eficiência mássica nos dias 15 e 16 de junho.

A cera de palma possui potencial para uso na armazenagem de energia térmica, na secagem solar de pseudofrutos de caju.

# 2.5. LITERATURA CITADA

ALVES, N. M. C.; RODRIGUES, J. O.; ARRUDA-SILVA, T. A.; GALLE, N. B. C.; SALINA, T. H. C.; MOURA, A. S.; SILVA, K. L. M.; BORGES, C. J. A. Performance of solar dryer with thermal energy storage in brazilian cerrado region. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.9, p.64220-64235, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-016

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005. Características mínimas de qualidade a que devem obedecer aos produtos vegetais. Brasília, DF, 2005.

ATALAY, H. Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system. **Energy**, v.172, p. 1037-1052, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.023.

AZAIZIA, Z.; KOOLI, S.; HAMDI, I.; ELKHAL, W.; GUIZANI, A. A. Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1972-1984, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.055

BAL, L. M.; SATYA, S.; NAIK, S. N. Solar dryer with thermal energy storage systems for dying agricultural food products: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, n.8, p.2298-2314, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.014.

BARBOSA, E. G.; BELÉM, G. L.; DANUSA, G. C.; NUNES, B. R. P. Avaliação do processo de secagem da cebola (*Allium cepa* L.) em corte transversal utilizando um secador solar de baixo custo. **Revista Saúde e Ciência online**, v.7, n.2, p.263-274, 2018. DOI: https://doi.org/10.35572/rsc.v7i2.115.

BHARDWAJ, A. K.; KUMAR, R.; CHAUHAN, R. Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region. **Solar Energy**, v. 177, p. 395-407, 2019.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.

FABIANI, C.; PISELLO, A. L.; BARBANERA, M.; CABEZA, L. Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. **Journal of Energy Storage**, v.28, 101129, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101129.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 4<sup>a</sup> ed, 2008. 1020p.

KHADRAOUI, E. A.; BOUADILA, S.; KOOLI, S.; FARHAT, A.; GUIZANI, A. Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. **Journal of Cleaner Production**, v.148, p.37-48, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149

KÖPPEN, W. Grundriss der Klimakunde: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.

LAKSHMI, D. V. N.; MUTHUKUMAR, P.; LAYEK, A.; NAYAK, P. N. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v.120, p.23-34, 2018.

MORAIS, D. Y. M. N.; FIGUEIREDO NETO, A.; MELO JÚNIOR, J. C. F de; COSTA, J. D. de S.; COSTA, M. de S.; ALENCAR, C. H. F. Viabilidade técnica de secador solar no contexto do semiárido Brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v.5, n.2, p.1036-1045, 2019.

NUNES, A. C.; PELLEGRINO, N. S. L. Tecnologías sustentáveis: desenvolvimento de um secador solar para secagem de frutas. **Revista Espacios**, v.38, n.53, p.9-16, 2021.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. The renewable energy Market in Brazil: current status and potential. **Sustainable Energy Reviews**, v.16, n.6, p.3786-3802, 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.024.

PRECCI, R. L.; SOBRINHO, J. C.; SILVA, J. de S.; SILVA, J. N. Fontes de Energia para Secagem. In: SILVA, J. de S. **Secagem e armazenagem de café:** tecnologias e custos. Viçosa-MG: Jard Editora, 2001. 162 p.

RABHA, D. K.; MUTHUKUMAR, P. Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax–based latent heat storage system. **Solar Energy**, v. 149, p.214-226, 2017.

RODRIGUES, J. J.; LIMA, M. E. P.; ALVES, K. A.; PACHECO, T. H.; CUNHA, G. L. N.; JOVLINO, J. R.; GALDINO, P. O.; SILVA, A. S. Análise cinética de secagem solar em

amostras de batata doce. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.4, p.43122-43130, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-668.

SHALABY, S. M.; BEK, M. A. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. **Energy Conversion and Management**, v.83, p.1-8, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043

SILVA, J. de S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa-MG: Ed. Aprenda Fácil, 2<sup>a</sup> ed., 2008. 560 p.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, n.1, p.33-43, 2013.

SUNILRAJ, B. A.; ESWARAMOORTHY, M. Experimental study on hybrid natural circulation type solar air heater with paraffin wax based thermal storage. **Materials Today: proceedings**, v.23, p.49-52, 2020.

VIGNESHKUMAR, N.; VENKATASUDHAHAR, M.; KUMAR, P. M.; RAMESH, A.; SUBBIAH, R.; STALIN, P. M. J.; SURESH, V.; KUMAR, M. N.; MONITH, S.; KUMAR, R. M.; KRIUTHIKESWARAN, M. Investigation on indirect solar dryer for drying sliced potatoes using phase change materials (PCM). **Materials Today: Proceedings**, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562.

# CAPÍTULO III CINÉTICA DA SECAGEM DE CAJU EM SECADOR SOLAR COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

**Resumo:** O caju é uma espécie nativa de regiões tropicais, que gera como produto comercial a amêndoa e o pseudofruto. O pseudofruto, embora rico em vitaminas, é altamente perecível. A secagem solar surge como uma opção de conservação. Aliada a sistemas de armazenagem térmica, a desidratação pode ser potencializada, aliada a sustentabilidade, baixo custo e grande capacidade de armazenar calor dos materiais de mudança de fase, como a cera de palma. O objetivo foi estudar a cinética da secagem do caju em secador solar com armazenamento de calor e em secador convencional. Mensurou-se a perda de massa em três dias. Ajustou-se os dados de razão de umidade a nove modelos matemáticos. Selecionou-se o melhor ajuste a partir do coeficiente de determinação, desvio padrão da estimativa, erro médio relativo e os critérios de informação Bayesiano e de Akaike. O modelo de aproximação da difusão foi o de melhor ajuste às curvas de cinética de secagem, no secador com armazenamento de energia, ajustou-se a equação de Cavalcanti Mata. A taxa de secagem estimada foi maior para os dias 15 e 16 de junho. O Secador com armazenamento de energia, a base de cera de palma, proporcionou produtos mais secos.

Palavras-chave: razão de umidade, modelo matemático, cera de palma

**Abstract:** Cashew is a species native to tropical regions, which generates almonds and pseudofruits as a commercial product. The pseudofruit, although rich in vitamins, is highly perishable. Solar drying appears as a conservation option. Combined with thermal storage systems, dehydration can be enhanced, combined with sustainability, low cost and high heat storage capacity from phase change materials such as palm wax. The objective was to study the kinetics of cashew drying in a solar dryer with heat storage and in a conventional dryer. Mass loss was measured in three days. The moisture ratio data were fitted to nine mathematical models. The best fit was selected from the coefficient of determination, standard deviation of the estimate, mean relative error and the Bayesian and Akaike information criteria. The Diffusion The diffusion approximation model was the best fit to the drying kinetic curves, in the dryer with thermal energy storage. The Cavalcanti Mata equation was fitted to the drying kinetics of the dryer without energy storage. The estimated drying rate was higher on June 15th and 16th. The energy storage dryer, based on palm wax, provided drier products.

**Keywords:** moisture ratio, mathematical model, palm wax

# 3.1. INTRODUÇÃO

O cajueiro (*Anacardium occidentale*) é uma espécie frutífera comum em regiões tropicais como Brasil. Apresenta grande importância econômica para região nordeste brasileira

e apontada como uma das frutas que contribuem para fonte de renda para pequenos agricultores em cidades do Mato Grosso (SOUZA, 2019).

A castanha de caju (o fruto do cajueiro) e o pseudofruto desta árvore, comumente chamado de caju, são os principais produtos comercializados, seja em escala industrial ou familiar (SILVA et al., 2021). Estima-se que a produção deste fruto em 2020 tenha alcançado 138.763 toneladas (INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021).

O pseudofruto do caju é uma importante fonte de vitaminas, podendo ter até 10 vezes mais vitamina C que o abacaxi. Apesar, disso a comercialização do fruto é limitada pela sua alta perecibilidade. Uma alternativa que poder ser empregada para o aumento da vida de prateleira do produto é a secagem ou desidratação (OLALUSI e ERINLE, 2019). Este método de conservação reduz a atividade de água, impedindo o desenvolvimento de fatores de deterioração, como microrganismos e reações químicas (MACHADO et al., 2010).

Dentre os métodos de secagem, a secagem solar se mostra uma opção promissora a agricultura familiar, por apresentar boa viabilidade econômica, elimina custos com combustíveis, além de gerar produtos secos de maior qualidade. Embora, seja um método intermitente, integrações com sistemas de armazenamento de energia térmica (SAET), por calor latente, tem mitigado esta limitação (MADHANKUMAR et al., 2021). Os chamados materiais de mudança de fase de base biológica, tem sido promissores materiais que compõem esses sistemas, como a cera de palma, que apresenta baixo custo (FABIANI et al., 2020).

Por ser um modo de secagem ainda em desenvolvimento, poucas são as aplicações de expressões que representem cinética de secagem de produtos agrícolas secos nestes sistemas. Esses modelos matemáticos são importantes para o dimensionamento comercial de secadores (ALVES et al., 2021). Sabe-se que o ajuste destes modelos é influenciado pelo método, teor de água, temperatura, condições ambientais. Em vista disso, diferentes ajustes têm sido apresentados a diferentes tipos de secagem e produtos (LAKSHIMI et al., 2018).

Mediante o exposto, objetivou-se com o presente capítulo, determinar as curvas de cinética de secagem, do pedúnculo de caju, em secador solar indireto, com sistema de armazenagem térmica, a base de cera de palma, e em secador solar indireto convencional.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram conduzidos em campo experimental da Universidade Federal de Rondonópolis (na latitude 16° 27' 49" S, longitude 55° 34' 47" O). Para secagem foram utilizados dois secadores solares indiretos. Os mesmos foram constituídos de duas partes: coletor solar e câmara de secagem. O coletor solar possuía dimensões de 1,15 x 1,00 x 0,15 m, com placa de vidro de 4 mm de espessura e telha de fibrocimento (pintada de preto), enquanto a câmara, 0,30 x 0,48 x 0,30 m, com paredes de lã de vidro entre duas folhas de madeirite. O secador 01 era implementado com SAET, a base de cera de palma, inserida em placas de policroreto de vinila (PVC), que revestiam as paredes internas da câmara. O secador 02 tratase de um secador solar indireto, ou seja, não possuía SAET.

Amostras de pedúnculo de caju (adquiridas em mercado local), de aproximadamente 100 g, foram alocadas, de forma inteira, no interior da câmara de secagem. O procedimento foi repetido em três dias (14, 15, e 16 de junho), entre as 08 h 30 min e 18 h 30 min (10 h ou 600 min de secagem). Como cada dia de secagem proporciona uma condição ambiental diferente, os mesmos foram tratados como Experimentos 1, 2 e 3, respectivamente.

A variação de temperatura ( $T_1$ ) e umidade relativa ( $UR_1$ ) de entrada no coletor solar foi considerada tomando-se os dados da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), instalados no interior do campus. Os valores de T e UR de entrada da câmara de secagem ( $T_2$  e UR<sub>2</sub>) e saída de ar ( $T_3$  e UR<sub>3</sub>) foram mensuradas por quatro sensores, modelo HT-70.

As amostras foram pesadas em intervalos regulares de 0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 e 600 minutos de secagem, em balança semianalítica. A partir dos valores periódicos das massas, calculou-se a razão de umidade (RU), em cada intervalo estabelecido, baseada nos valores de perda de massa e umidade de equilíbrio ( $U_e$ ). Os valores de RU foram calculados pela Equação 3.1:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e}$$
(3.1)

Em que:

U: umidade do produto no intervalo t (%);
U<sub>0</sub>: umidade no tempo zero (%);
U<sub>e</sub>: umidade de equilíbrio (%).

Com os dados de RU em função do tempo, construiu-se as curvas de secagem, as quais foram ajustadas aos dados experimentais, a partir de 9 modelos propostos na literatura (Tabela 3.1), para cada dia de secagem.

Nome do Modelo	Modelo	Equação
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$	(3.2)
Cavalcanti Mata	$RU = a \exp(-k t^{n}) + b \exp(-k t^{m}) + c$	(3.3)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-c t)$	(3.4)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(3.5)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t)$	(3.6)
Logaritmo	$RU = a \exp(-k t) + b$	(3.7)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(3.8)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(3.9)
Verma	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(b t)$	(3.10)

Tabela 3.1. Modelos ajustados aos dados experimentais da secagem do pedúnculo de caju nos secadores 01 e 02

a, b, c, m, n: coeficientes dos modelos, adimensionais; k: constante de secagem, min<sup>-1</sup>; t: tempo de secagem, min.

Os modelos descritos foram ajustados aos dados experimentais de secagem por meio de análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton. O ajuste dos modelos, aos dados de razão de umidade, foi feito pelo software Sigmaplot 10.0. A seleção do modelo mais fiel à predição foi realizada por meio dos critérios estatísticos de coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), desvio-padrão da estimativa (SE) (Equação 3.11), erro médio relativo (P) (Equação 3.12) e os critérios de informação Bayesiano (BIC) (Equação 3.13) e de Akaike (AIC) (Equação 3.14), estes dois últimos parâmetros foram calculados conforme descrito por Zhao et al. (2017).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (RU_{exp} - RU_{teor})^2}{GLR}}$$
(3.11)

$$\mathbf{P} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{\mathrm{RU}_{\mathrm{exp}} - \mathrm{RU}_{\mathrm{teo}}}{\mathrm{RU}_{\mathrm{exp}}} \right)$$
(3.12)

AIC = 
$$n \ln \left(\frac{SQR}{n}\right) + 2(N+1) + \frac{2(N+1)(N+2)}{n-N-2}$$
 (3.13)

$$BIC = n \ln \left(\frac{SQR}{n}\right) + (N+1) \ln (N)$$
(3.14)

Em que:

RU<sub>exp</sub>: razão de umidade experimental (adimensional);
RU<sub>teor</sub>: razão de umidade estimada (adimensional);
GLR: graus de liberdade do modelo (adimensional);
SQR: soma dos quadrados dos resíduos (adimensional);
N: número de parâmetros do modelo, (adimensional);
n: número de observações, (adimensional).

#### **3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As condições de temperatura de secagem do pseudofruto de caju, para os secadores 01 e 02, são expressas nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente aos experimentos 1, 2 e 3.



**Figura 3.1.** Variação das temperaturas de entrada no coletor solar  $(T_1)$ , entrada  $(T_2)$  e saída  $(T_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 1.



**Figura 3.2.** Variação das temperaturas de entrada no coletor solar  $(T_1)$ , entrada  $(T_2)$  e saída  $(T_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 2.



**Figura 3.3.** Variação das temperaturas de entrada no coletor solar  $(T_1)$ , entrada  $(T_2)$  e saída  $(T_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 3.

A partir das informações, determinou-se as temperaturas médias no interior da câmara de secagem para os Experimentos 01, 02 e 03, as quais foram 55,82 e 46,60 °C, 50,27 e 56,95 °C, 57,31 e 44,59 °C, respectivamente para os Secadores 01 e 02. Nota-se que o secador 01 sobressaiu-se ao 02 nos dias 14 e 16 de junho. Este fato foi apontado por Alves et al. (2020) como um comportamento ocorrido em virtude das maiores oscilações da irradiação solar horária. Este estudo apontou que, a secagem com armazenamento de energia térmica a base de parafina, promoveu maiores temperaturas nos dias com uma irradiação solar mais homogênea, o que não ocorreu no dia 15, como pode-se notar pelas quedas bruscas de T<sub>2</sub> entre os 200 e 500 minutos de secagem.

No que tange as condições de T<sub>1</sub>, os valores médios foram de 29,09, 31,09 e 28,15 °C. Assim sendo, o secador 01 elevou em 86,69, 68,99 e 97,62% a temperatura de entrada, respectivamente aos experimentos 01, 02 e 03. Seguindo os mesmos dias, em sequência, o secador 02 elevou a T<sub>1</sub> em 60,19, 83,18 e 58,40%. Constata-se pelas curvas de T<sub>2</sub>, que o dia 16 de junho foi mais homogêneo no aquecimento, não apresentando quedas bruscas na temperatura. Logo, a maior taxa de aquecimento foi registrada neste dia para o secador 01.

Estes resultados colaboram com os encontrados por Baniasdi et al. (2017) que elevaram até 5 °C a temperatura de secagem, com o uso de armazenamento de energia térmica a base de parafina, na secagem de damasco. Atalay e Cankurtaran (2021) atingiram picos de temperatura no interior da câmara de secagem de até 60 °C, na secagem de fatias de morango, com o uso da parafina como PCM.

Quanto as condições de umidade relativa, as figuras 3.4, 3.5 e 3.6 expressam a oscilação desta propriedade nos dias 14, 15 e 16 de junho, de forma respectiva.

A partir da análise das figuras de umidade relativa, toma-se que os valores médios desta, na câmara de secagem do secador 01, foram 15,81, 17,63 e 13,40%, respectivamente aos experimentos 01, 02 e 03. O Secador 02, por sua vez, proporcionou teores médios de UR em 22,34, 13,11 e 20,88%, em sequência aos dias 14, 15 e 16.

Considerando a UR média de entrada, o secador 01 tornou o fluido de secagem 73,88, 66,44 e 75,92% mais seco, de maneira respectiva aos experimentos 01, 02 e 03, enquanto o secador 02, 68,42, 75,04 e 62,47%, na mesma ordem.

Nota-se que a UR apresentou comportamento semelhante ao da temperatura, uma vez que a última age sobre a primeira. Isso pois, por análise psicrométrica, sabe-se que em maiores temperaturas a razão de mistura kg de ar seco/kg vapor d'água reduz-se, em razão especialmente da expansão de volume. Portanto, o comportamento da UR é uma consequência do aquecimento do ar, sendo, entretanto, inversamente proporcionais.

Esse comportamento foi relatado por Atalay e Cankurtaran (2021), na secagem de morangos fatiados. Estes autores alcançaram uma UR mínima de 44,84%, empregando a parafina como armazenador de calor.



**Figura 3.4.** Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar  $(UR_1)$ , entrada  $(UR_2)$  e saída  $(UR_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 1.



**Figura 3.5.** Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar  $(UR_1)$ , entrada  $(UR_2)$  e saída  $(UR_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 2.



**Figura 3.6.** Variação das umidades relativas de entrada no coletor solar  $(UR_1)$ , entrada  $(UR_2)$  e saída  $(UR_3)$  da câmara de secagem para os secadores 01 (A) e 02 (B), no Experimento 3.

Na tabela 3.2, expõe-se os critérios estatísticos empregados na seleção do modelo para

descrever o fenômeno de secagem no secador com armazenamento e sem o PCM.

**Tabela 3.2.** Parâmetros estatísticos (SE – desvio padrão da estimativa; P – erro médio relativo;  $R^2$  – coeficiente de determinação; AIC – critérios de informação de Akaike; BIC – critérios de informação Bayesiano) para os modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade do pedúnculo de caju nos secadores 01 e 02

	Secador 01						Secador 02				
Mod.	SE	P (%)	<b>R</b> <sup>2</sup>	AIC	BIC	SE	P (%)	<b>R</b> <sup>2</sup>	AIC	BIC	
Experimento 01											
(3.2)	0,0075	0,7218	0,9926	-114,629	-123,234	0,0040	0,2720	0,9951	-134,656	-143,262	
(3.3)	0,0025	0,1575	0,9994	-124,025	-147,883	0,0028	0,2007	0,9981	-121,489	-145,347	
(3.4)	0,0085	0,7339	0,9914	-107,306	-118,946	0,0089	0,7176	0,9782	-106,239	-117,879	
(3.5)	0,0073	0,7331	0,9924	-117,922	-124,510	0,0061	0,5245	0,9878	-125,347	-131,934	
(3.6)	0,0078	1,1006	0,9914	-105,001	-111,589	0,0082	0,7063	0,9782	-110,878	-117,465	
(3.7)	0,0070	0,6286	0,9936	-118,791	-127,397	0,0032	0,9718	0,9969	-105,588	-114,193	
(3.8)	0,0076	1,0591	0,9913	-109,443	-114,643	0,0117	0,5616	0,9521	-126,765	-131,965	
(3.9)	0,0078	0,7445	0,9915	-117,382	-137,096	0,0035	0,3337	0,9960	-123,969	-143,684	
(3.10)	0,0053	1,7485	0,9954	-90,137	-98,742	0,0041	0,2702	0,9948	-133,954	-142,560	
					Experiment	o 02					
(3.2)	0,0079	0,8571	0,9963	-114,287	-122,892	0,0148	1,2650	0,9777	-100,125	-108,731	
(3.3)	0,1190	10,6953	0,3813	-26,122	-49,980	0,0069	0,5919	0,9964	-97,055	-120,913	
(3.4)	0,0083	6,5929	0,9963	-58,415	-70,055	0,0124	4,6711	0,9858	-65,017	-76,657	
(3.5)	0,0555	5,0717	0,8057	-70,096	-76,683	0,0419	4,0806	0,8067	-76,284	-82,871	
(3.6)	0,0260	2,3472	0,9574	-85,336	-91,923	0,0226	2,2551	0,9437	-89,154	-95,741	
(3.7)	0,0207	7,1036	0,9751	-62,370	-70,397	0,0120	4,6563	0,9854	-70,975	-79,003	
(3.8)	0,0535	5,1511	0,8057	-73,433	-78,633	0,0403	4,1741	0,8067	-79,679	-84,879	
(3.9)	0,0765	12,3077	0,8045	0,227	-6,361	0,0097	0,6802	0,9896	-117,687	-124,274	
(3.10)	0,0356	26,6246	0,9262	-28,183	-36,789	0,0197	1,1299	0,9604	-101,696	-110,301	
					Experiment	o 03					
(3.2)	0,0057	0,5129	0,9956	-123,280	-131,885	0,0051	0,3963	0,9948	-125,510	-134,115	
(3.3)	0,0055	0,6509	0,9951	-87,644	-111,502	0,0040	0,3181	0,9975	-112,028	-135,886	
(3.4)	0,0057	1,3461	0,9960	-93,678	-105,318	0,0053	3,3840	0,9948	-71,609	-83,249	
(3.5)	0,0083	0,6153	0,9898	-123,606	-130,193	0,0122	0,7647	0,9675	-113,702	-120,289	
(3.6)	0,0067	1,0085	0,9933	-109,297	-115,884	0,0088	1,3726	0,9831	-98,962	-105,549	
(3.7)	0,0069	0,6880	0,9935	-122,065	-113,459	0,0071	0,5600	0,9899	-112,532	-121,137	
(3.8)	0,0535	12,2244	0,8057	-48,845	-54,045	0,0403	1,5456	0,8067	-89,154	-94,354	
(3.9)	0,0077	1,6318	0,9870	-94,150	-100,737	0,0092	1,4526	0,9874	-99,619	-106,206	
(3.10)	0,0112	0,9179	0,9830	-107,209	-115,814	0,0112	0,6830	0,9699	-111,454	-120,059	

Mod. – modelo de regressão não linear; todos os modelos são significativos através do teste F: p <0,01. 3.2: Aproximação da Difusão; 3.3: Cavalcanti Mata; 3.4: Dois Termos; 3.5: Exponencial de Dois Termos; 3.6: Henderson e Pabis; 3.7: Logaritmo; 3.8: Newton; 3.9: Page; 3.10: Verma.

Observa-se que todos os modelos apresentaram um R<sup>2</sup> superior a 0,99 aos ajustes dos dados de razão de umidade para o secador 01, no Experimento 01. Contudo, no experimento 02, essa mesma tendência manteve-se apenas ao modelo de aproximação da difusão. No experimento 03, por sua vez, destacaram-se, neste critério estatístico, os modelos de Aproximação da Difusão, Cavalcanti Mata, Dois Termos, Henderson e Pabis e Logarítimo.

No que diz respeito ao secador 02, os modelos Aproximação da Difusão, Cavalcanti Mata, Logarítimo, Page e Verma apresentaram coeficiente de determinação superior a 0,99, para o experimento 01. No experimento 02, apenas Cavalcanti Mata manteve mesmo comportamento para esse parâmetro. Quanto ao experimento 03, os modelos de Aproximação da Difusão, Cavalcanti Mata e Dois Termos seguiram essa tendência.

De acordo com Kashaninejad et al. (2007), modelos com coeficientes de determinação acima de 0,95, indicam ajuste satisfatório, no estudo dos processos de secagem. No entanto, isoladamente este critério estatístico não é recomendado para selecionar modelos não lineares, no que tange o processo de secagem (MADAMBA et al., 1996; ZEVIANI et al., 2013)

Segundo Oliveira et al. (2019), a capacidade de um modelo descrever fielmente um processo físico é inversamente proporcional ao desvio padrão da estimativa (SE), caracterizando um melhor ajuste.

Considerando o secador 01, embora todos os modelos tenham apresentado valor de SE inferiores a 0,12 em todos os experimentos, os de Aproximação da Difusão e Dois Termos se diferenciaram por apresentar, para este parâmetro, valores inferiores a 0,0085. Já para o secador 02, os valores não atingiram 0,05, sendo que o modelo de Cavalcanti Mata demonstrou os menores valores, quando comparado aos demais, dentro de cada experimento (SE<0,007).

Considerando o erro relativo médio (P), os modelos de Cavalcanti Mata, Newton, Page e Verma obtiveram ajustes superiores a 10%, para o secador 01. Para os ajustes aos dados de razão de umidade do secador 02, todos os modelos demonstraram P<5%, ressaltando-se que, assim como no critério de SE, o modelo de Cavalcanti Mata foi o menor, considerando cada experimento (P<0,6%).

Mohapatra e Rao (2005) descrevem que modelos com P acima de 10% são impróprios para predição de fenômenos físicos, ou seja, indicando o aumento da distância entre o processo real e o predito pela equação à medida que se aumenta P. Assim sendo, o erro médio relativo representa o quanto os dados experimentais se desviam da curva do modelo estimado (KASHANINEJAD et al., 2007).

Apesar de se ter considerado três critérios estatísticos, o uso de mais critérios contribui para uma tomada de decisão mais assertiva. Deste modo, os critérios de informações Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) são empregados nesse intuito. Estes parâmetros consideram o princípio da parcimônia, ou seja, penalizam modelos matemáticos mais complexos, sendo que quando menor os valores determinados, melhor o ajuste, dos quais o BIC é mais rigoroso (SOUZA et al., 2019). Em vista disso, constata-se que os parâmetros de AIC e BIC foram inferiores a -110 em todos os ajustes para o modelo de Aproximação da Difusão, no secador 01. Analisando os dados do secador 02, embora o modelo de Cavalcanti Mata tenha seis parâmetros de ajuste, dentre os que se destacaram nos critérios discutidos anteriormente, este apresentou valores satisfatórios de AIC e BIC. Ainda que o critério de BIC faça penalização de modelos com maior número parâmetros de ajuste, os baixos valores obtidos para o modelo Cavalcanti Mata indicam que o erro do mesmo foi baixo (devido a presença do SQR na Equação 3.14).

Portanto, as equações selecionadas, para representar o fenômeno de secagem do pedúnculo de caju, foram estimadas pelos modelos de Aproximação da Difusão (Secador 01) e de Cavalcanti e Mata (Secador 02).

Lakshmi et al. (2018) selecionaram o modelo de Dois Termos para estimar a cinética de secagem de *Curcuma caesia*, em um secador solar com armazenamento de energia térmica a base de parafina. Atalay (2019) selecionaram o modelo de Midilli para a secagem de limão, tanto em secador com armazenamento de calor sensível, quanto no armazenamento com PCM (parafina). Azoubel et al. (2009) selecionaram o modelo de Page para a secagem de frutos de caju pré-tratados e secos.

Os parâmetros de ajuste dos modelos selecionados para a variação da razão de umidade em função do tempo de secagem, nos secadores 01 e 02, são expressos na tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros	do ajuste dos model	os de Aproximação	da Difusão (	Secador 01) e	Cavalcanti Mata
(Secador 02) para os Ex	perimentos 01, 02 e 03				

	Parâmetros do Modelo									
Exp.	Secador (01) Aproximação da Difusão			Secador (02) Cavalcanti Mata						
_	а	k	b	а	b	с	k	n	m	
01	0,5803	0,0008	4,24E-09	-0,2422	0,4264	0,8154	0,0119	0,9226	0,8319	
02	0,1010	0,1567	4,30E-03	0,2656	0,0453	0,6891	0,0021	1,0801	7,1495	
03	0,0172	0,2797	1,50E-03	0,0279	0,2368	0,7353	0,0005	43,7410	1,2228	

Exp. - Experimento

De modo geral os parâmetros "a", "b", "c", "n" e "m" não apresentam comportamento definido ou com aplicação teórica. O parâmetro "k", por sua vez, trata-se de uma variável empírica, chamada constante de secagem, que associa a redução do teor de água do produto com o tempo, relacionando-se a difusividade efetiva e à difusão líquida, empregada como uma estimativa da taxa de secagem (OLIVEIRA et al., 2015).

Logo, nota-se que nos Experimentos 02 e 03, a constante k, estimada pelo modelo 3.2 (Secador 01), sobressaiu-se sobre as estimativas deste parâmetro obtidas pelo modelo 3.3 (Secador 02), indicando uma maior taxa de secagem para o secador com armazenamento de

energia térmica, nos experimentos 02 e 03. Estes resultados confirmam os dados de eficiência mássica, calculados no Capítulo 02, no qual as secagens conduzidas nos dias 15 e 16 foram as de maior magnitude da  $\eta_{câmara}$ , no secador 01.

Os dados experimentais de razão de umidade, bem como os preditos pelos modelos de selecionados para cada secador, são expressos nas Figuras 3.7, 3.8 e 3,9, de forma respectiva aos experimentos 01, 02 e 03.



**Figura 3.7.** Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 01.



**Figura 3.8.** Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 02.



**Figura 3.9.** Dados experimentais e estimados da razão de umidade do pseudofruto de caju, para os secadores 01 e 02, no Experimento 03.

Observa-se que os menores valores de razão de umidade foram proporcionados no experimento 02. Nota-se também que o secador com armazenamento de energia térmica, à base de cera de palma, resultou em um produto mais seco em todos os experimentos. Apesar disso o experimento 02, proporcionou a maior diferença entre os secadores, não obstante, este ser o dia com menores T e UR para o secador 01. Isto se justifica pelos inúmeros fatores que influenciam o processo de secagem dos produtos agrícolas, como o tamanho e forma, velocidade do fluido de secagem, umidade inicial do produto.

Machado et al. (2010) ao estudarem o efeito da espessura de fatias de caju em diferentes temperaturas de secagem, concluíram que quanto maiores as temperaturas e mais finas as fatias, maior será a taxa de secagem. Sendo que, no presente estudo os frutos não foram préprocessados, ou seja, alocados com a forma natural no interior da câmara, o tamanho e forma destes frutos podem ter influenciado no processo da cinética de secagem.

#### **3.4. CONCLUSÕES**

Por meio dos presentes resultados conclui-se que:

O modelo de Aproximação da Difusão estimou adequadamente as curvas de cinética da secagem do pedúnculo de caju no secador solar indireto, com armazenamento de energia térmica, por calor latente, a base de cera de palma, dadas as condições do presente estudo.

O modelo de Cavalcanti Mata demostrou um ajuste satisfatório às curvas de cinética secagem, no secador solar indireto convencional.

As estimativas de taxa de secagem foram maiores para o secador com armazenamento de energia térmica, a base de palma, nos dias 15 e 16 de junho.

O secador com armazenamento de energia proporcionou produtos mais secos, em todos os dias de estudo.

# **3.5.LITERATURA CITADA**

ALVES, N. M. C.; ARRUDA-SILVA, T. A.; SANTOS, S. B.; GALLE, N. B. C.; SILVA, I. D. F.; SILVA, M. I. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of 'baru' almond flours. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, n.1, p.30-36, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p30-36.

ALVES, N. M. C.; RODRIGUES, J. O.; ARRUDA-SILVA, T. A.; GALLE, N. B. C.; SALINA, T. H. C.; MOURA, A. S.; SILVA, K. L. M.; BORGES, C. J. A. Performance of solar dryer with thermal energy storage in brazilian cerrado region. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.9, p.64220-64235, 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-016

ATALAY, H. Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system. **Energy**, v.172, p. 1037-1052, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.023.

ATALAY, H.; CANKURTARAN, E. Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a large scale solar dryer with PCM energy storage medium. **Energy**, v.16, 119221, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119221.

AZOUBEL, P. M.; EL-AOUAR, A. A.; TONON, R. V.; KUROZAWA, L. E.; ANTONIO, G. C.; MURR, E. X.; PARK, K. J. Effect of osmotic dehydration on the drying kinetics and quality of cashew apple, **International Journal of Food Science & Technology**, v.44, n.5, p.980-986, 2009. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01783.x

BANIASADI, E.; RANJBAR, S.; BOOSTANIPOUR, O. Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v.112, p.143-150, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.043.

FABIANI, C.; PISELLO, A. L.; BARBANERA, M.; CABEZA, L. Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. **Journal of Energy Storage**, v.28, 101129, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101129.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola:** Estatística da produção agrícola. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. 94p.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007. http://dx.doi.org/10.1016/j. jfoodeng.2005.09.007.

LAKSHMI, D. V. N.; MUTHUKUMAR, P.; LAYEK, A.; NAYAK, P. K. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. **Renewable Energy**, v.120, p.23-34, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053.

MACHADO, A. V.; OLIVEIRA, E. L.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, J. A.; FREITAS, L. M. Estudo cinético da secagem do pedúnculo do caju em um secador convencional. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.5, n.1, p.36-42, 2010.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996. http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3.

MADHANKUMAR, S.; VISWANATHAN, K.; WU, W. Energy, exergy and environmental impact analysis on the novel indirect solar dryer with fins inserted phase change material. **Renewable Energy**, v.176, p.280-294, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.085

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-518, 2005. http://dx.doi. org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023

OLALUSI, A. P.; ERINLE, O. Influence of drying temperature and pretreatment on the drying characteristics and quality of dried cashew (*Anacardium occidentale* L.) apple slices. **Croatian Journal of Food Science and Technology**, v.11, n.1, p.97-103, 2019. DOI: https://doi.org/10.17508/CJFST.2019.11.1.14

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedade termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 18, n.4, p. 314-321, 2015. http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.5315.

OLIVEIRA, G.; CORRÊA, P.; OLIVEIRA, A.; BOTELHO, F.; BOTELHO, S. Cinética de secagem de folhas de fumo e suas propriedades termodinâmicas. **Tecnología en Marcha**, v.32, Especial. XIII CLIA, p.71-77, 2019. DOI: https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4262

SILVA, Y. Y. V.; AMARAL, S. M. B.; MOURA, S. M. Utilização da farinha de caju na elaboração de biscoito integral tipo cookie. **Research, Society and Development**, v.10, n.6, e42610615527, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15527

SOUZA, D. G.; RESENDE, O.; MOURA, L. C.; FERREIRA JÚNIOR, W. N.; ANDRADE, J. W. S. Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (Ipomoea batatas L.). Engenharia Agrícola, v.39, n.2, p.176-181, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n2p176-181/2019

SOUZA, V. C. Caracterização de agroecossistemas utilizados por agricultores familiares em comunidades rurais no portal Amazônia – Mato Grosso: agrobiodiversidade, alimentação e geração de renda. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural), Universidade Federal de São Carlos, Araras.

ZEVIANI, W. M.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; BONAT, W. H. **Modelos de regressão não linear.** Laboratório de Estatística e Geoinformação, Departamento de Estatística. UFPR, 2013. 109p.

ZHAO, Y.; WANG, W.; ZHENG, B.; MIAO, S.; TIAN, Y. Mathematical modeling and influence of ultrasonic pretreatment on microwave vacuum drying kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds. **Drying Technology**, v.35, p.553-563, 2017. DOI https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1193512
## **CONCLUSÕES GERAIS**

Os resultados do presente estudo permitiram concluir que, embora a parafina ainda seja o material de mudança de fase mais estudado, para fins de armazenamento de energia térmica por calor latente, os materiais de base biológica demonstram-se como promissores e potenciais substitutos a esse derivado do petróleo. Posto isso, a cera de palma apresentou características térmicas superiores a este derivado do petróleo, além de uma maior adaptabilidade as condições de secagem solar na região Centro-Oeste brasileira. Assim, essa metodologia de secagem caracteriza-se como uma importante alternativa para elevar a eficiência e qualidade dos produtos oriundos da agricultura familiar.

Dentre os materiais de mudança de fase estudados, a cerca de palma apresentou faixa de temperatura de fusão adequada as temperaturas médias de secagem, além de acumular uma maior quantidade de calor.

Por meio da aplicação experimental da cera de palma em um secador solar indireto, com o objeto de se acumular calor, esta proporcionou ao equipamento uma maior eficiência térmica e mássica, quando comparado ao método convencional. Logo, potencialmente este método pode otimizar a secagem de produtos agrícolas, de origem familiar, tornando o processo mais rápido.

As curvas de secagem são importantes também no planejamento e dimensionamento da secagem de produtos agrícola. Logo, quando se trata de novas tecnologias, como no caso da secagem, com o armazenamento de energia térmica a base de cera de palma, essas equações são essenciais para futuros estudos. Assim sendo, o modelo de Aproximação da Difusão foi estatisticamente satisfatório para este método de secagem.