

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Letícia Ferraresi Hidalgo

**Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico:
aplicação para secagem de alimentos**

**SÃO CARLOS
2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Letícia Ferraresi Hidalgo

**Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico:
aplicação para secagem de alimentos**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos, como
pré-requisito para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Nakamura
Alves Vieira**

SÃO CARLOS

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Letícia Ferraresi Hidalgo, realizada em 19/02/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Jose Teixeira Freire (UFSCar)

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua (UFSCar)

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Hugo Perazzini (UNIFEI)

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira (UNESP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

*Dedico este trabalho à minha mãe,
Ivanir de Lourdes Ferraresi Hidalgo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por abençoar minhas escolhas com sabedoria e por guiar cada momento ao longo deste trabalho.

À minha família, meus pais, Ivanir e Laertes, e meu irmão Gabriel por me apoiarem e serem meus exemplos na vida.

Ao Thiago, meu namorado, por estar ao meu lado diante de cada nova experiência pessoal e profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Teixeira Freire, por ter aceito compartilhar comigo sua enriquecedora experiência profissional. Foi uma honra tê-lo como orientador.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira, por ter me apresentado a linha de pesquisa e as melhores condições para realização do trabalho, sua constante presença e assistência foram essenciais.

A todos os colegas de pesquisa, por compartilharem os momentos de trabalho, assim como os resultados alcançados.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e contribuírem com seu conhecimento e experiência.

A UFSCar e a UNESP, seu corpo docente, direção e administração por garantirem a estrutura necessária para meu mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado concedida no processo 2018/23762-7 (Avaliação de processo em secador solar híbrido fotovoltaico: aplicação para secagem de alimentos) para completa realização dessa pesquisa e pelo projeto de auxílio à pesquisa regular no processo 2017/21890-5 (Monitoramento de variáveis de processo em secadores solares híbridos fotovoltaicos utilizando sensores virtuais: aplicação para secagem de alimentos).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a pesquisa.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

Entre as fontes de energia térmica que podem ser utilizadas para a secagem de alimentos, a energia solar apresenta como principal vantagem ser abundante, renovável e não monopolizada. O uso simultâneo da radiação solar e da convecção forçada do ar de secagem pode acarretar em um benefício para o processo. Para este fim, ventiladores simples e de baixa potência, alimentados por um módulo fotovoltaico, propiciam a operação do equipamento de forma autossuficiente em energia. Conhecido como secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, sua configuração é resistente ao uso em campo, prático para locomoção e capaz de processar alimentos em pequena escala por agricultores familiares. Esse secador foi construído, instrumentado e encontra-se em pleno funcionamento com a possibilidade de ser operado com convecção natural ou forçada do ar de secagem. Sob essas duas condições de operação, o secador foi testado em Abril e avaliado quanto à secagem de cebolinhas (*Allium schoenoprasium L.*) em Maio e Junho (Outono), Setembro (Inverno) e Outubro (Primavera) de 2019. A umidade e os parâmetros colorimétricos foram monitorados, uma vez que estão relacionados a critérios de qualidade do produto desidratado e de aceitação pelo consumidor final. As equações de Page e Overhults melhor descreveram as curvas de secagem que ocorreram em taxa decrescente, com R^2 maior que 0,900. Os experimentos com convecção de Maio e sem convecção de Junho apresentaram melhor desempenho em cada mês. Estes resultados podem estar relacionados com as condições climáticas, uma vez que não havia controle da temperatura interna. As secagens de Setembro não apresentaram desempenho satisfatório devido à instabilidade da radiação solar e condições do ar com alta umidade e baixa temperatura. Após melhorias na amostragem, foi observado um período de taxa constante seguido pelo período de taxa decrescente, nas secagens de Outubro. O experimento com convecção apresentou maior taxa em ambos os períodos. Durante a secagem à taxa constante, mecanismos externos podem ter controlado o processo, uma vez que os valores de temperatura média do leito e fluxo médio de radiação solar foram semelhantes para as duas condições de operação. Para o período de taxa decrescente, o valor de difusividade efetiva do leito foi de $5,02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para as secagens sem e com convecção. Nessa mesma sequência, as eficiências médias do secador solar foram de 34,2 % e 38,3 % e os consumos específicos de energia foram de 18,3 kWh/kg e 16,4 kWh/kg. Pouca variação de cor foi observada entre as cebolinhas frescas e secas nas duas condições de operação, o que condiz com a necessidade de manter a tonalidade verde do material.

ABSTRACT

Among the thermal sources that can be used for drying food, solar energy has as its main advantage being abundant, renewable and not monopolized. The simultaneous use of solar radiation and forced convection air drying can benefit the process. For this purpose, simple and low-power fans, powered by a photovoltaic module, provide the equipment with self-sufficient energy operation. Known as direct solar dryer assisted by photovoltaic module, its configuration is resistant to use in the field, practical for locomotion and capable of processing food on a small scale by family farmers. This dryer was built, instrumented and is fully operational with the possibility of being operated with natural or forced drying air convection. In both operating conditions, the dryer was tested in April and evaluated for the drying of green onions (*Allium schoenoprasium L.*) in May and June (autumn), September (winter) and October (spring) of 2019. Moisture and colorimetric parameters were monitored, since they are related to quality criteria of the dehydrated product and acceptance by the final consumer. The Page and Overhults equations best described the drying curves that occurred at a falling rate with R^2 greater than 0.900. The experiments with forced convection in May and natural convection in June performed better each month. These results may be related to climatic conditions, since there was no control of the internal temperature. Drying experiments in September did not show satisfactory performance due to the instability of solar radiation and air conditions with high humidity and low temperature. After sampling improvements, a constant rate period was observed followed by the falling rate period, during drying experiments in October. The forced convection experiment showed a higher rate in both periods. During drying at a constant rate, external mechanisms may have controlled the process, since the average values of the bed temperature and solar radiation flow were similar for both operating conditions. For the falling rate period, the effective diffusivity values of the bed were $5.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ for drying with natural and forced convection runs. In the same sequence, the average efficiencies of the solar dryer were 34.2 % and 38.3 % and the specific energy consumption was 18.3 kWh/kg and 16.4 kWh/kg. Little color variation was observed between fresh and dried chives in the two operating conditions, which is consistent with the need to maintain the green tint of the material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa global da irradiação solar horizontal.	18
Figura 2 – Esquema do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico.	29
Figura 3 – Esquema do secador solar com destaque para as posições dos medidores: piranômetro na face superior, transmissores de temperatura e umidade do ar nas posições A e B da câmara e os seis termopares na prateleira perfurada (T1, T2 e T3) e na face inferior (T4, T5 e T6).	31
Figura 4 – Folhas de cebolinha (<i>Allium schoenoprasum L.</i>) separadas manualmente e cortadas em pequenas fatias de forma circular.	32
Figura 5 – Lógica de programação da rotina para determinar a umidade crítica que sinaliza o final do período de taxa constante.	35
Figura 6 – Configuração do leito de cebolinhas analisado pelo modelo de placa plana sobre a prateleira perfurada do secador.	37
Figura 7 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico antes da instrumentação.	41
Figura 8 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico após a instrumentação.	42
Figura 9 – Interface do usuário na rotina de aquisição de dados desenvolvida em LabVIEW.	43
Figura 10 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido na rotina de aquisição de dados do software LabVIEW.	43
Figura 11 – Fluxo de radiação solar (a), condições do ar, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos com as ventoinhas desligadas (I) e ligadas (II) dos testes preliminares realizados no mês de Abril de 2019.	45
Figura 12 – Leito de cebolinhas sobre a prateleira perfurada do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico. Destaque para as posições dos termopares T1, T2 e T3 na prateleira perfurada e T4, T5 e T6 na face inferior, assim como as posições A e B da câmara do secador.	47
Figura 13 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico durante um experimento de secagem.	48
Figura 14 – Fluxos de radiação solar em função do tempo de secagem para os experimentos sem e com convecção forçada realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	49
Figura 15 – Condições do ar de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	50

Figura 16 – Temperaturas em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do ar, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	52
Figura 17 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Maio de 2019.	55
Figura 18 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Junho de 2019.	56
Figura 19 – Amostra de cebolinha com as diferenças de umidade existentes no interior do material.	57
Figura 20 – Adimensional de umidade médio em função do tempo e ajustado pela equação de cinética de secagem de Overhults, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, dos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	60
Figura 21 – Adimensionais de umidade calculados pela equação de Overhults ($MRO_{overhults}$) em função dos valores experimentais médios para essa grandeza para as secagens sem (I) e com (II) convecção forçada, realizadas nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	61
Figura 22 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta EE0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, dos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.	63
Figura 23 – Fluxo de radiação solar (a), umidade relativa (b) e temperatura (c) do ar nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Setembro de 2019.	65
Figura 24 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Setembro de 2019.	67
Figura 25 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta EE0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, do mês de Setembro de 2019.	69
Figura 26 – Fluxo de radiação solar (a), as condições do ar de secagem, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Outubro de 2019.	71

- Figura 27 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha do leite (a) e fixas (b) em função do tempo, nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019. 74
- Figura 28 – Retas (Linear MR_{exp}) definidas no período de taxa constante, curvas ajustadas pela equação de cinética de secagem de Overhults ($MR_{Overhults}$) no período de taxa decrescente e os valores médios do adimensional de umidade (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro de 2019. 77
- Figura 29 – Adimensionais de umidade calculados pela equação de Overhults ($MRO_{overhults}$) em função dos valores experimentais obtidos para essa grandeza (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro de 2019. 78
- Figura 30 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta EE0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, do mês de Outubro de 2019. 80
- Figura 31 – Eficiência do secador com a taxa de secagem (kg água/ kg material seco/ h) em função do tempo para o experimento sem convecção forçada realizado no mês de Outubro de 2019. 81
- Figura 32 – Eficiência do secador com a taxa de secagem (kg água/ kg material seco/ h) em função do tempo para o experimento com convecção forçada realizado no mês de Outubro de 2019. 82
- Figura 33 – Eficiência acumulada do secador em função do tempo de secagem para os experimentos sem e com convecção forçada realizados no mês de Outubro de 2019. 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de secagem para alguns produtos agrícolas.	26
Tabela 2 – Cronograma dos experimentos de secagem realizados no município de Araraquara-SP, no período das 9h às 16h.	33
Tabela 3 – Equações matemáticas para ajuste dos dados de secagem.	36
Tabela 4 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para os experimentos com as ventoinhas desligadas e ligadas no mês de Abril de 2019.	46
Tabela 5 – Médias e desvios-padrão dos valores de umidade relativa e temperatura nas posições A e B da câmara do secador, para as secagens sem e com convecção forçada realizadas nos meses de Maio e Junho de 2019.	51
Tabela 6 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Maio de 2019.	53
Tabela 7 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Junho de 2019.	53
Tabela 8 – Parâmetros cinéticos (k , n , a), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada, dos meses de Maio e Junho de 2019.	59
Tabela 9 – Comparação entre os valores médios dos parâmetros monitorados durante as secagens sem e com convecção forçada dos meses de Maio, Junho e Setembro de 2019.	66
Tabela 10 – Parâmetros cinéticos (k , n e a), o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) dos ajustes das equações de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Setembro de 2019.	68
Tabela 11 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Outubro de 2019.	72
Tabela 12 – Umidade inicial e final (b.s.) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Outubro de 2019.	73

Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE), teste do qui-quadrado (χ^2) e parâmetros cinéticos para o ajuste linear (α, β) e exponencial (k, n, a) dos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019. 75

Tabela 14 – Difusividade Efetiva. 78

Tabela 15 – Parâmetros colorimétricos médios L, a e b dos leitos de cebolinhas para as 7 horas de secagens dos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019. 80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Secagem	16
2.2	Secagem solar: vantagens e limitações	17
2.3	Classificação dos secadores solares	20
2.4	Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico	21
2.5	Agricultura familiar	24
2.6	Secagem de plantas alimentícias	25
3	OBJETIVOS	28
3.1	Objetivos gerais	28
3.2	Objetivos específicos	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico	29
4.2	Instrumentação	30
4.3	Planta alimentícia	31
4.4	Testes preliminares	32
4.5	Experimentos de secagem	33
4.6	Cinética de secagem	34
4.6.1	Período de taxa constante	35
4.6.2	Período de taxa decrescente	36
4.6.3	Difusividade efetiva	37
4.6.4	Densidade <i>bulk</i>	38
4.6.5	Semi espessura do leito	39
4.7	Análise energética do secador	39
4.8	Colorimetria	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41

5.1	Instrumentação e teste preliminar	41
5.2	Secagens em Maio e Junho de 2019	47
5.2.1	Ajuste das equações de cinética de secagem	58
5.2.2	Colorimetria	62
5.3	Secagens em Setembro de 2019	64
5.3.1	Ajuste das equações de cinética de secagem	67
5.3.2	Colorimetria	69
5.4	Secagens em Outubro de 2019	70
5.4.1	Ajuste das equações de cinética de secagem	75
5.4.2	Difusividade Efetiva	78
5.4.3	Colorimetria	79
5.4.4	Análise energética do secador	81
6	CONCLUSÕES	85
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	87
8	TRABALHOS E PARTICIPAÇÕES EM CONGRESSOS	88
8.1	Artigo aceito para publicação	88
8.2	Trabalhos completos publicados em anais de congressos	88
8.3	Apresentações de trabalhos em eventos	88
9	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem realizado pela exposição à radiação solar é uma das mais antigas aplicações da energia solar. Desde os tempos pré-históricos, no qual esta era a única fonte de energia térmica disponível, até os tempos atuais com a agricultura familiar, as pessoas utilizam a radiação para secar e conservar alimentos (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Como principal vantagem, a secagem solar emprega uma fonte de energia renovável, que substitui a queima de combustíveis fósseis ou o uso da eletricidade, além de ser abundante, não poluente e que não pode ser monopolizada (TUNDE-AKINTUNDE, 2011). Como consequência, os secadores solares possuem um menor custo operacional e são uma opção promissora para a secagem de produtos agrícolas a temperaturas relativamente baixas (MAHAPATRA; TRIPATHY, 2018; OKO; NNAMCHI, 2013).

Em secadores solares, a radiação aquece direta ou indiretamente o produto e o ar de secagem pode escoar por convecção natural ou forçada (CHAVAN et al., 2020). A circulação de ar na câmara do secador pode ter um efeito dominante na remoção da umidade da superfície do produto, quando a secagem é limitada por mecanismos externos e predominantemente convectivos. No entanto, essa condição não tem efeito significativo para produtos com alta resistência interna à transferência de umidade, nos quais a secagem é predominantemente limitada por mecanismos de difusão (EKKA et al., 2020; INYANG; OBOH; ETUK, 2018). Para produzir a convecção forçada do ar de secagem, ventiladores simples de baixa potência podem ser utilizados e alimentados por fontes alternativas de energia elétrica, como a própria energia solar por meio de um módulo fotovoltaico. Nessa configuração, trata-se de um secador solar assistido por módulo fotovoltaico, cuja operação é independente do fornecimento de energia por linhas de transmissão (BENNAMOUN, 2013). Esse equipamento possui potencial de aplicação no processamento de alimentos em pequena escala, melhorando a qualidade final do produto seco em relação à simples secagem a céu aberto (UDOMKUN et al., 2020).

Neste contexto, o presente trabalho baseia-se no desenvolvimento de um secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, resistente à aplicação em campo, autossuficiente em energia, prático para locomoção e capaz de processar frutas e hortaliças em pequena escala, direcionado para agricultores familiares ou pequenos produtores. A fim de avaliar o processo na ausência e na presença de convecção forçada do ar de secagem, variáveis importantes como umidade e cor foram monitoradas durante a secagem da cebolinha (*Allium schoenoprasum L.*), uma vez que estas variáveis estão relacionadas a critérios de qualidade e de aceitação pelo consumidor final.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem

A secagem consiste na remoção térmica de substâncias voláteis (geralmente água) contidas em um produto natural ou manufaturado a fim de obter um produto sólido seco. Essa operação unitária converte uma matéria-prima sólida ou líquida em um produto sólido seco, por meio da aplicação de calor para evaporação do líquido em uma fase vapor (CHEN, 2008; MUJUMDAR, 2006). No geral, ela é utilizada para obtenção de um valor de umidade ideal que contribui para a preservação e armazenamento dos produtos por mais tempo, uma vez que diminui a ação de enzimas, bactérias, leveduras e fungos (MARTINAZZO et al., 2016; THAM et al, 2017).

No processo de secagem, a remoção da umidade ocorre devido a transferência simultânea de calor e massa (INYANG; OBOH; ETUK, 2018). A transferência de calor para o produto a partir de uma fonte térmica ocorre por mecanismos de radiação, convecção ou condução, sendo que em alguns casos acontece a combinação desses efeitos (UDOMKUN et al., 2020). Diferentes fontes térmicas podem ser empregadas, sendo as mais comuns os combustíveis fósseis, a eletricidade e a energia solar (EKECHUKWU, 1999).

Como consequência da absorção de energia térmica, a massa de água da parte interna do produto é transferida para sua superfície e da superfície para o ar circundante, sob a forma de vapor d'água. Fisicamente, quando a energia térmica é absorvida pelo produto úmido, ocorre o aumento de sua temperatura até um valor suficiente para que a pressão de vapor da água na parte interna exceda a pressão de vapor no ar circundante, o que resulta na vaporização da água presente. Se a taxa de difusão de água no interior do produto é lenta, ela se torna o fator limitante no processo de secagem, mas se for suficientemente rápida, o fator limitante pode ser a taxa de vaporização na superfície (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

O processo de secagem é frequentemente descrito em dois períodos: o período de taxa constante e o período de taxa decrescente. No período de taxa constante, a secagem ocorre como se água pura estivesse sendo evaporada e a forma física do material, especialmente sua superfície, é afetada pelo processo. As condições externas do ar como temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do escoamento têm grande influência na superfície do material ao longo dessa etapa (INYANG; OBOH; ETUK, 2018; KOUHILA et al., 2020). Durante esse período, a água contida na superfície do material evapora até atingir um valor de umidade crítica que varia com a espessura do material e a taxa de secagem (BENNAMOUN; LI, 2018;

McCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). Geralmente, os produtos higroscópicos como areia úmida, solo, pigmentos e sementes lavadas são exemplos de materiais que inicialmente secam a uma taxa constante (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

No período de taxa decrescente, a secagem envolve o movimento da água dentro do material e a sua conseqüente remoção na superfície. Esse período é controlado pela difusão do líquido como conseqüência das diferenças de concentração de água e das condições internas do produto, como umidade, temperatura e estrutura, que desempenham um papel importante nessa etapa do processo (INYANG; OBOH; ETUK, 2018; McCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). Geralmente, os produtos agrícolas como frutas e vegetais secam durante os períodos de taxa decrescente, como conseqüência da forte ligação entre a água e a estrutura do material (BOUGHALI et al., 2009). O processo de secagem termina quando a umidade de equilíbrio é atingida (AKPINAR, 2010).

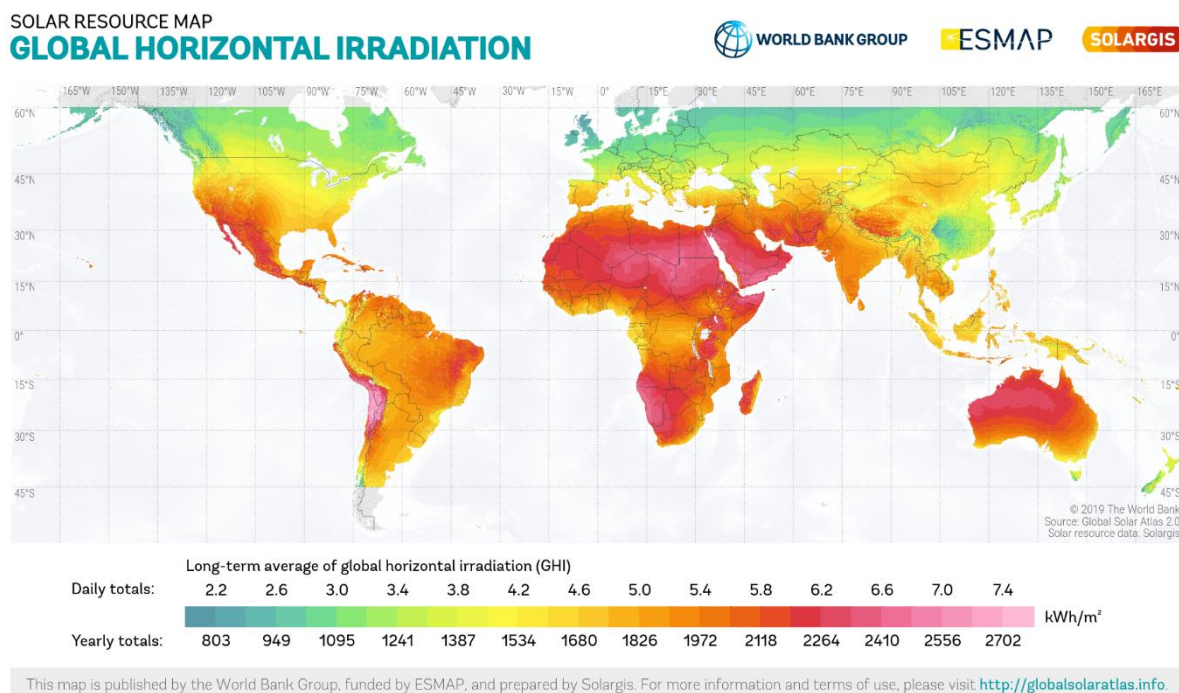
2.2 Secagem solar: vantagens e limitações

Na secagem solar, ocorre a exposição à radiação solar que aquece direta ou indiretamente o produto. A umidade é removida pela circulação natural ou forçada do ar, com a utilização de ventiladores (CHAVAN et al., 2020; LINGAYAT et al., 2020). Ambas as transferências de calor e massa dependem das condições climáticas e da intensidade da radiação solar, além da velocidade do ar de secagem (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

Entre as principais vantagens da secagem solar, pode-se ressaltar o fato de ser um processo tecnologicamente simples e não poluente, que utiliza uma fonte de energia renovável, abundante, livre e que não pode ser monopolizada (AKPINAR, 2010; TUNDE-AKINTUNDE, 2011). Segundo Bennamoun e Li (2018), a secagem solar permite obter produtos com qualidade desejada e com mínimo impacto ambiental.

Durante as últimas décadas, os países em desenvolvimento começaram a adotar políticas energéticas sustentáveis em detrimento à utilização de combustíveis não-renováveis (AMERI et al., 2018). Com algumas exceções, esses países estão situados em zonas climáticas do mundo onde a incidência da radiação solar possui valores relevantes, como pode ser observado no mapa da irradiação solar horizontal média do ano de 2019 apresentado na Figura 1, e o dia possui maior número de horas com a presença do sol (MOHANA et al., 2020). No Brasil, um país tropical e em desenvolvimento, existe um grande potencial para o uso da energia solar, uma vez que a quantidade de radiação incidente no país varia entre 2 a 6 kWh/m²dia, valores comparáveis aos maiores do mundo, encontrados em regiões desérticas (BRASIL, 2008).

Figura 1 – Mapa global da irradiação solar horizontal.



Fonte: Global Solar Atlas, 2019¹.

Em comunidades rurais da maioria desses países em desenvolvimento, o fornecimento de energia elétrica, bem como de outras fontes de energia não renováveis, ou estão indisponíveis ou apresentam altos custos para muitos agricultores. Nessas áreas, a utilização de secadores que empregam ventiladores ou aquecimento elétrico é inconveniente, tendo em vista os altos custos iniciais e de funcionamento desses equipamentos (EKECHUKWU; NORTON, 1999; TIWARI, 2016; TOMAR; TIWARI; NORTON, 2017). A substituição parcial ou total dos combustíveis tradicionais por processos de secagem com energia solar pode resultar em uma economia considerável de energia, reduzindo assim a emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global, como o CO₂ (REYES et al., 2013).

Além disso, a tradicional secagem a céu aberto que é amplamente utilizada pelos pequenos agricultores rurais tem limitações inerentes (KOUHILA et al., 2020; SEERANGURAYAR et al., 2019). Um procedimento inadequado pode resultar em altas perdas de safra, por ela estar sujeita a ataques de fungos, insetos, aves e roedores, assim como a alterações climáticas inesperadas como chuvas e geadas (DJEBLI et al., 2020; SALLAM et al., 2013; TÉLLEZ et al., 2018). Com tais considerações, secadores que utilizam energia solar de forma adequada se mostram cada vez mais atraentes para as comunidades rurais com proposições comerciais (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

¹ Disponível em: < <https://globalsolaratlas.info/download/world> >. Acesso em: 26 jun. 2020.

De forma geral:

- O uso de um secador solar, em comparação com a secagem a céu aberto, pode reduzir a área necessária para a secagem, melhorar a qualidade e a higiene do produto seco e tornar o processo mais eficiente (EL KHADRAOUI et al., 2019; SAMI; RAHIMI; ETESAMI, 2011).
- Além disso, o tempo de secagem pode ser reduzido significativamente, por meio do acompanhamento climático e otimização dos secadores (NOURHÈNE; MOHAMMED; NABIL, 2008; ROMULI et al., 2019);
- Os secadores solares podem ser empregados para vários tipos de produtos e esses podem ser preservados por colheitas sucessivas (BOUGHALI et al., 2009; ISLAM et al., 2019);
- Os agricultores podem ter um rendimento maior pela produção de culturas comercializáveis, uma vez que os custos adicionais envolvidos na instalação de secadores solares são recuperados pelo aumento dos lucros (TIWARI, 2016).

Por outro lado, algumas limitações para o uso dessa tecnologia estão relacionadas a inevitável periodicidade da radiação solar e as instabilidades climáticas (THAM et al, 2017). Como consequência, existe o interesse em empregar dispositivos para armazenamento de parte da energia adquirida durante os períodos de radiação e utilizar fontes auxiliares de energia (EL-SEBAII; SHALABY, 2013; HOSSAIN; AMER; GOTTSCHALK, 2008; RABHA; MUTHUKUMAR, 2017; REYES; MAHN; VÁSQUEZ, 2014).

Outro desafio da secagem solar diz respeito à baixa densidade energética da radiação na Terra em relação a outras fontes de energia, como por exemplo, combustíveis não-renováveis. Em outras palavras, deve-se compensar a pequena quantidade de energia por unidade de área proveniente da radiação solar com o aumento da área do secador, o que pode ser técnica e/ou economicamente inviável para grandes volumes de produção (IMRE, 2006).

É notável que a utilização da radiação solar tem problemas inerentes que requerem custos de investimento consideráveis para sua solução. Dessa forma, deve existir a correspondência entre o processo de secagem e as características específicas da radiação solar, a fim de controlar os custos de investimento e alcançar uma taxa de retorno aceitável e econômica (IMRE, 2006).

Por fim, para a melhor utilização da secagem solar, atualmente os processos necessitam ser padronizados e amplamente comercializados, uma vez que muitos secadores solares são

ainda construídos com base na experiência e não em projetos científicos e cálculos técnicos (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

2.3 Classificação dos secadores solares

O objetivo de um secador é fornecer ao produto maior quantidade de energia térmica do que a disponível sob condições ambientes, aumentando assim a pressão de vapor da água contida em seu interior e diminuindo significativamente a umidade relativa do ar de secagem. Conseqüentemente, o ar de secagem tem maior capacidade de transportar a água e assegurar um valor de umidade de equilíbrio suficientemente baixo (EKECHUKWU; NORTON, 1999; TIWARI, 2016).

Os secadores solares podem ser classificados com base na incidência da radiação solar sobre a câmara de secagem do produto em direto, indireto, misto e híbrido (MOHANA et al., 2020; VIJAYAVENKATARAMAN; INIYAN; GOIC, 2012).

No secador solar direto, o produto é colocado em uma câmara de secagem com cobertura transparente. Esta cobertura permite a passagem dos raios solares que atingem diretamente a superfície do produto submetido ao processo de secagem, transferindo energia térmica por mecanismos de radiação. Além disso, a cobertura transparente restringe o escape da radiação emitida pelo produto aquecido para a atmosfera. Nesse processo, a temperatura dentro da câmara aumenta e o produto aquece rapidamente, o que contribui para a remoção da umidade, mas pode implicar em uma perda significativa de qualidade (CHAVAN et al., 2020; MOHANA et al., 2020).

No secador solar indireto, a radiação solar incide sobre um coletor opaco que aquece o ar de secagem antes dele ser enviado à câmara do secador (LINGAYAT et al., 2020). A transferência de calor ocorre por mecanismos de convecção entre o ar aquecido e o produto úmido (MOHANA et al., 2020).

No secador solar misto, ocorre a combinação da secagem direta e indireta, uma vez que esse equipamento apresenta uma câmara de secagem com cobertura transparente e um coletor para pré-aquecer o ar. Em tais equipamentos, a transferência de calor ocorre por convecção do ar para a superfície do produto e por radiação direta na câmara de secagem (MOHANA et al., 2020).

No secador solar híbrido, um componente adicional é utilizado para armazenar a energia térmica proveniente do sol e permitir sua liberação e utilização durante o processo de secagem. No contexto mais amplo, esse secador combina a secagem solar com outras técnicas de secagem

e fontes de calor adicionais, como armazenamento térmico auxiliar assistido por energia solar, sistema de convecção forçada, bombas de calor mecânicas e materiais de mudança de fase. Dessa forma, esse sistema híbrido pode ser aplicado em processos nos quais a secagem contínua é necessária e a radiação solar não está disponível (EKECHUKWU; NORTON, 1999; REYES et al., 2013; MOHANA et al., 2020; SUHERMAN et al., 2020; TIWARI, 2016; UDOMKUN et al., 2020).

Com base na circulação do ar de secagem dentro do equipamento, os secadores solares também podem ser classificados em passivos ou naturais e ativos ou forçados (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; CHAVAN et al., 2020; MOHANA et al., 2020).

No secador solar de modo passivo (convecção natural), a circulação do ar de secagem ocorre naturalmente devido às diferenças de massa específica do ar entre uma superfície mais quente e outra região mais fria (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011). Na câmara do equipamento, há orifícios que permitem a entrada e a saída do ar. Esse secador é adequado para a secagem de frutas e vegetais em pequenos lotes, no entanto, há uma chance de superaquecimento e subsequente perda na qualidade do produto (MOHANA et al., 2020).

No secador solar ativo (convecção forçada), a circulação de ar aquecido é obtida artificialmente por meios externos como ventiladores ou exaustores. Com a melhor circulação de ar na câmara, esse equipamento alcança taxas de secagem mais significativas (MOHANA et al., 2020).

Outras classificações de secadores solares são realizadas com base no tamanho do equipamento, no design do sistema, no material usado para construção, nos sistemas de armazenamento de energia e unidades de aquecimento auxiliares (MOHANA et al., 2020; UDOMKUN et al., 2020).

2.4 Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico

Em um secador solar direto, o uso simultâneo da radiação solar e da convecção forçada do ar de secagem pode causar um aumento das taxas de transferência de calor e massa, se a secagem for limitada por mecanismos externos (predominantemente convectivos), e não internos (predominantemente difusivos). A circulação do ar na câmara do secador tem um efeito dominante na remoção da umidade superficial do material. No entanto, essa condição não apresenta efeito significativo para materiais com alta resistência interna à transferência de umidade (EKKA et al., 2020; INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

Como fonte de convecção forçada em um secador solar, podem ser empregados ventiladores simples e de baixa potência, uma vez que o escoamento de ar não necessita de alta velocidade ou superar uma grande queda de pressão. A baixa potência requerida pelos ventiladores viabiliza a sua alimentação por fontes alternativas de energia elétrica. Dentre estas fontes, destaca-se a própria energia solar, que tem sido utilizada em aplicações cotidianas de forma cada vez mais acessível, por meio de módulos fotovoltaicos (BENNAMOUN, 2013; LINGAYAT et al., 2020; MOHANA et al., 2020).

Desta maneira, a energia solar pode ser utilizada duplamente em secadores solares diretos: como fonte de energia térmica para aquecimento direto da superfície do material e como fonte de energia elétrica aos ventiladores, responsáveis pela transferência convectiva de calor e massa. Conseqüentemente, a operação de um secador com esta configuração o torna independente do fornecimento de energia elétrica por linhas de transmissão (BENNAMOUN, 2013; LAKSHMI et al., 2019). Em outras palavras, trata-se de um *secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico* ou *secador solar direto fotovoltaico*. Diferentes secadores solares que utilizam módulos fotovoltaicos têm sido desenvolvidos e aplicados principalmente na secagem de alimentos.

Nos trabalhos realizados por Barnwal e Tiwari (2008), foi utilizado um secador solar híbrido fotovoltaico (*hybrid photovoltaic-thermal integrated greenhouse dryer*) para a secagem de uvas *Thompson*. O secador foi integrado a dois módulos fotovoltaicos que alimentavam o ventilador responsável pela convecção forçada do ar e também produziam energia térmica no interior do equipamento. Os autores propuseram modelos físico-matemáticos para descrever as operações com convecção natural e forçada. Na operação com convecção forçada, a descrição da secagem com expressão multilinear melhor se ajustou aos dados experimentais. Enquanto que na operação com convecção natural, a expressão linear melhor descreveu o processo. O coeficiente de transferência de calor convectivo obtido para as uvas maduras foi maior que para as uvas verdes e, portanto, menor seu tempo de secagem.

Romano et al. (2009) usou um secador solar modular de gabinete (*modular solar cabinet dryer*) para processar maçãs (*Jonathan*) e cenouras (*Nanti*). Dois módulos fotovoltaicos foram conectados a um ventilador que permitiu a operação do secador de diferentes formas: com ventilação natural ou artificial do ar, o qual poderia ser pré-aquecido pelo coletor solar. Os períodos de secagem dos produtos foram influenciados pelas condições climáticas, uma vez que o tempo nublado retardou a secagem das cenouras. No caso das últimas, para as condições climáticas do processo, a secagem também foi influenciada pelo tamanho e forma da amostra, uma vez que fatias com menores espessuras secaram mais rápido.

Um secador solar híbrido fotovoltaico (*hybrid photovoltaic-thermal based greenhouse dryer*) foi avaliado por Nayak et al. (2011) para a secagem de folhas de hortelã sob convecção forçada. Nesse trabalho, foi analisada a operação deste secador quanto ao ganho em créditos de carbono e ilustrado, por meio de cálculos relativamente simples, um aumento em sua viabilidade econômica com a venda dos créditos gerados na operação. De fato, não havendo a necessidade da queima de combustíveis fósseis para a operação do secador solar, não há geração de CO₂ causada pela queima. O crédito de carbono obtido variou de um mínimo de US\$ 704,85 por tonelada de C e um máximo de US\$ 2.819,40 por tonelada de C. A eficiência do secador foi de 34,2 % e os resultados mostram que os valores nutricionais e caloríficos foram mantidos, quanto menor foi a variação de cor do material e maior foi a redução de umidade, resultando em um maior prazo de validade do produto seco.

No trabalho de Ceylan et al. (2013), um secador solar híbrido fotovoltaico (*photovoltaic cell-assisted solar dryer*) foi utilizado para a secagem de tomates. Durante o dia, uma célula fotovoltaica alimentava o ventilador de circulação e outra carregava as baterias das lâmpadas de halogênio, usadas para aquecer o ar de secagem à noite. Dessa forma, o período de secagem foi estendido e os parâmetros de operação do secador avaliados quanto aos ganhos energéticos. Seus resultados relacionaram o aumento da eficiência do secador ao aumento da radiação solar que, conseqüentemente, aumentou a carga das baterias que puderam ser utilizadas por um período maior.

Além de fornecer a energia necessária para alimentar os ventiladores na câmara de secagem, as placas fotovoltaicas foram utilizadas para mais dois propósitos no trabalho de Tiwari e Tiwari (2016): (i) o excesso de energia era armazenado ou usado em outro sistema e (ii) a cobertura feita por elas sobre o secador evitava a exposição direta da cultura e sua consequente descoloração. Foram realizados balanços energéticos e modelagem térmica no secador solar híbrido fotovoltaico (*photovoltaic-thermal mixed mode greenhouse solar dryer*) e avaliada sua viabilidade econômica, quanto ao ganho em créditos de carbono. Os resultados mostraram que o secador teve um bom desempenho em todas as condições climáticas do ano. Para uma projeção de 25 anos, a mitigação de CO₂ e o ganho em créditos de carbono ficaram em 81,75 toneladas e US\$ 817,50 respectivamente, o que torna o equipamento útil e ambientalmente sustentável.

Poonia, Singh e Jain (2018) projetaram e fabricaram dois secadores solares híbridos fotovoltaicos (*photovoltaic thermal hybrid forced convection solar dryer*) com a mesma estrutura e avaliou as características de secagem da ameixa indiana (*Zizyphus mauritiana*) nas operações com convecção natural e forçada. Sob a mesma condição climática, o valor de

umidade seguro foi atingido mais rapidamente na secagem com convecção forçada, a qual apresentou maior eficiência quanto a utilização da energia solar no processo.

Um sistema fotovoltaico foi usado por Eltawil et al. (2018) para carregar uma bateria conectada a um ventilador, o qual possuía controlador de fluxo para o ar de secagem. Em um secador de túnel de modo misto (*solar PV powered mixed-mode tunnel dryer*), o ventilador foi usado para auxiliar a convecção forçada entre o coletor solar e o túnel do equipamento durante a secagem de batatas. Foi verificado que a saída de energia do sistema fotovoltaico e sua temperatura eram diretamente proporcionais à radiação solar incidente e à temperatura ambiente. Além disso, a adição do ventilador à estrutura do secador melhorou o fluxo de ar e, conseqüentemente, aumentou as taxas de secagem do produto.

Goud et al. (2019) secaram pimenta verde (*Capsicum annum*) e quiabo (*Abelmoschus esculentus*) em um secador solar indireto (*indirect type solar dryer*) operado com convecção natural e forçada do ar. Nessa última, a energia elétrica necessária para os ventiladores foi fornecida por três painéis fotovoltaicos. Os resultados obtidos para as secagens foram melhores na operação com convecção forçada. Além disso, a temperatura média das bandejas do secador e a energia de ativação diminuíram em comparação com a convecção natural. Outras propriedades como a eficiência média do coletor solar e do secador, o coeficiente de difusividade efetiva e os coeficientes de transferência de massa e de calor aumentaram na operação com convecção forçada.

2.5 Agricultura familiar

Uma grande motivação para a aplicação da secagem solar direta fotovoltaica encontra-se no contexto da agricultura familiar. Segundo o Censo Agropecuário 2017, a agricultura familiar representa 77 % dos estabelecimentos agrícolas no Brasil, mas ocupam apenas o equivalente a 23 % da área agrícola total (IBGE, 2020). Caracterizada pela sua pequena produção de vários produtos e, em alguns casos, geograficamente afastadas dos centros consumidores, o uso da energia solar em processos de secagem pode ser uma alternativa interessante para o processamento de certos produtos agrícolas.

O emprego de tecnologias de processamento de alimentos que não dependam da distribuição de energia elétrica pode contribuir para a redução de custos operacionais e o aumento da qualidade do produto final seco, em relação à simples secagem a céu aberto (ANYANWU et al., 2012). Desta forma, existe o potencial de aumentar o valor de venda destes produtos no mercado local e, conseqüentemente, de melhorar a renda familiar destes

agricultores (UDOMKUN et al., 2020). O melhoramento da agricultura familiar contribui para a diminuição da desigualdade no meio rural e consequente desenvolvimento sustentável local (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2017, p. 25).

Além disso, o conceito de desenvolvimento sustentável assume que o desenvolvimento econômico deve ocorrer de forma equilibrada quanto às necessidades das pessoas e à proteção do meio ambiente. Em 2015, as Nações Unidas juntamente com chefes de Governo e representantes da sociedade civil definiram os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com base nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. Entre eles, vale destacar:

Objetivo 2. Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável (...) 2.3 Até 2030, dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos (...) 2.4 Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas (...) 2.a Aumentar o investimento, inclusive via o reforço da cooperação internacional, em infraestrutura rural, pesquisa e extensão de serviços agrícolas, desenvolvimento de tecnologia, e os bancos de genes de plantas e animais, para aumentar a capacidade de produção agrícola nos países em desenvolvimento, em particular nos países menos desenvolvidos (...) Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos (...) 7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global (...) 7.a Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa (...) Objetivo 12. Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (...) 12.a Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo (TRANSFORMANDO NOSSO MUNDO: A AGENDA 2030 PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2015, p. 20, 26 e 31).

Nesse contexto, fica ressaltada a importância social, sustentável e econômica da tecnologia utilizada em um secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, que condiz com os preceitos definidos nos objetivos 2, 7 e 12, respectivamente.

2.6 Secagem de plantas alimentícias

Os produtos agrícolas são muito sensíveis às condições impostas nos processos de secagem e suas características (cor, cheiro, sabor, forma, nutrientes e outras substâncias internas) são altamente dependentes dos processos térmicos, que incluem desde a colheita até a preservação e o período de secagem (IMRE, 2006; İSMAIL; AKYOL, 2016).

Duas das principais variáveis de processo mais importantes na secagem de produtos alimentícios destinados ao consumo humano são a umidade e a cor. A umidade está relacionada

com o tempo de prateleira do produto e com a quantidade de energia utilizada durante a secagem. Já a cor está relacionada com a possível aceitação do produto pelo consumidor final, portanto, alterações nela podem levar a uma diminuição na qualidade e no valor de mercado (BAHLOUL et al., 2009; CHEN, 2008; GARCÍA et al., 2010).

A umidade é comumente medida pela determinação da massa seca (gravimetria). Na Tabela 1 estão apresentados dados de secagem para alguns produtos agrícolas. Os grãos de cereais e leguminosas precisam ser secos de um valor inicial de umidade de cerca de 30 % (base úmida) na colheita para um nível de 12 %. Vegetais verdes folhosos e frutas têm um valor inicial de umidade de cerca de 60 - 80 % que são reduzidos para a faixa de 10 a 25 % para armazenamento seguro.

Tabela 1 – Dados de secagem para alguns produtos agrícolas.

Produto	Umidade (b.u.)		Temperatura do ar de secagem (°C)
	Inicial	Final	
Alho	80	4	55
Amendoim	45-50	13	35
Arroz	25	12	43
Aveia	20-25	12-13	43-82
Banana	80	15	70
Batata	75-85	10-14	70
Batata doce	75	7	75
Castanha de coco	75	5	35-40
Cebolas	80-85	8	50
Cevada	18-20	11-13	40-82
Folhas de espinafre	80	10	
Mandioca	62	17	70
Milho	28-32	10-13	43-82
Plantas medicinais	85	11	35-50
Pimenta	80	10	55
Sementes de café	65	11	45-50
Soja	20-25	11	61-67
Sorgo	30-35	10-13	43-82
Trigo	18-20	11-14	43-82
Uvas	74-78	18	50-60

Fonte: Adaptado de IMRE, 2006.

As cores de diferentes produtos são relacionadas por parâmetros colorimétricos. A proposição destes parâmetros está contextualizada na possível diferença entre a percepção visual por diferentes indivíduos. Uma das principais escalas utilizadas para a medição da cor

em alimentos é a escala CIELab, que permite a definição de cores específicas no espaço tridimensional. Nesta escala, utilizam-se três parâmetros, a luminosidade (*lightness*, *L*) e os parâmetros *a* e *b*, que medem a intensidade da cor vermelha/verde e amarela/azul, respectivamente (TÉLLEZ et al., 2018).

Tanto a umidade quanto a cor do produto são dependentes da temperatura na qual o processo de secagem foi conduzido. Segundo Belessiotis e Delyannis (2011), em temperaturas de secagem mais baixas, próximas a 30 °C, a taxa de secagem é muito lenta e há risco de deterioração ou mofo do produto. As temperaturas seguras do ar de secagem variam de 35 a 60 °C e, para alguns produtos, essas temperaturas devem ser mais altas na fase final da secagem (IMRE, 2006). Em geral, a maioria dos alimentos podem ser secos a uma temperatura média de 60 °C. Segundo Čipliene et al. (2015) e Lakshmi et al. (2019), no caso de plantas medicinais, a maioria requer temperaturas de secagem na faixa de 30 a 45 °C e umidade relativa não superior a 50 ou 60 % para uma secagem segura. Na secagem solar, as variações de temperatura estão sujeitas à intensidade da radiação solar e não são facilmente controladas. Em situações com altas intensidades de radiação, a temperatura de secagem pode ser regulada pela mistura do ar quente com uma quantidade suficiente de ar fresco da atmosfera (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; RABHA; MUTHUKUMAR, 2017).

A qualidade dos produtos secos tem um efeito sobre a economia do processo, influenciando a capacidade de comercialização e a receita obtida com sua venda, uma vez que preços mais altos podem ser alcançados com uma melhor qualidade. Na secagem de produtos alimentícios sensíveis, são necessários direcionamento tecnológico e controle do processo a fim de garantir as pré-condições necessárias para a melhor condição de secagem (IMRE, 2006). Além disso, as taxas de transferência de calor e massa devem ser controladas de perto e o método deve ser realizado de tal forma que não afete seriamente a cor, sabor, textura ou valor nutricional do produto (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2010; EKECHUKWU; NORTON, 1999).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico e avaliar sua atuação na secagem de produtos alimentícios, visando à utilização em pequena escala.

3.2 Objetivos específicos

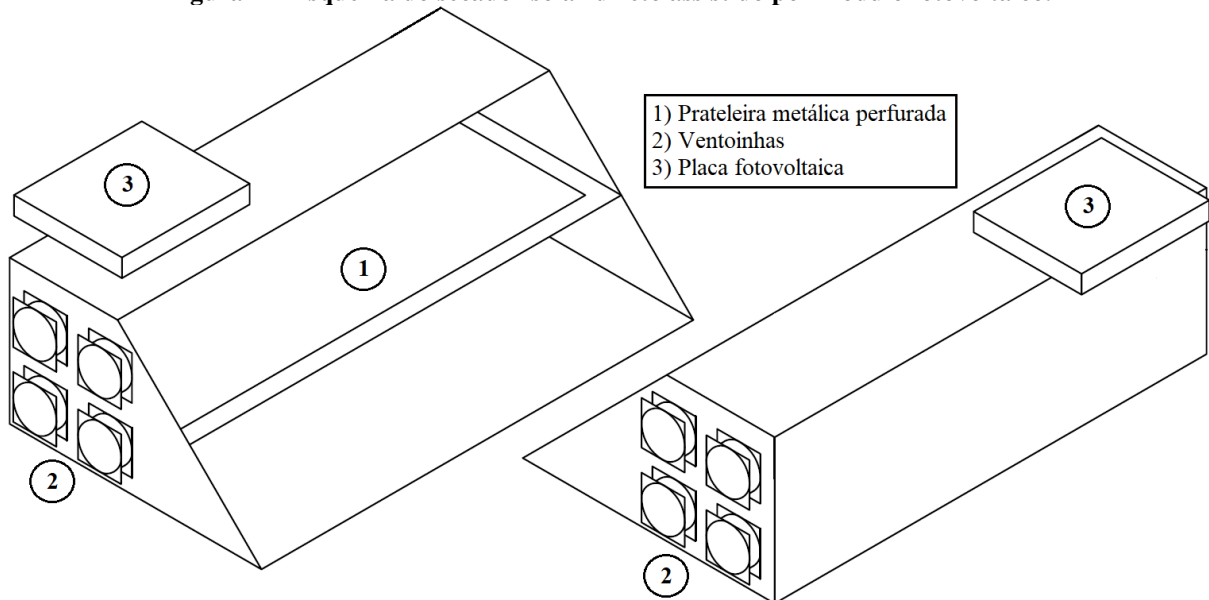
- Instrumentação de um secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico.
- Monitoramento de variáveis importantes na secagem de plantas alimentícias, tais como a umidade e parâmetros colorimétricos.
- Avaliação da secagem solar conduzida na ausência e na presença de convecção forçada do ar de secagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico

A Figura 2 apresenta um esquema do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico (ou secador solar direto fotovoltaico) utilizado para a execução deste trabalho. O secador propriamente dito consiste em um prisma de base trapezoidal construído em aço inox 304, com largura total de 1,20 m. A face trapezoidal tem 30 cm de base menor, 70 cm de base maior e 40 cm de altura. Os ângulos da base do trapézio são 90° (face posterior) e 45° (face anterior). Todo o secador está suportado em uma estrutura metálica com rodas, o que permite seu transporte do interior do laboratório para áreas ensolaradas e vice-versa.

Figura 2 – Esquema do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico.



Fonte: Próprio autor.

A face anterior (inclinada) do equipamento foi construída em vidro temperado (6 mm de espessura e $0,68 \text{ m}^2$ de área) e está fixa por dobradiças metálicas na face superior, permitindo a inserção e retirada do material no secador. Em seu interior, o material pode ser acomodado em uma prateleira metálica perfurada de malha 10 mesh suspensa a 20 cm da face inferior do secador, ou sobre a própria face inferior.

Sobre a face superior do secador, foi instalada uma placa fotovoltaica de 35,5 cm por 30,0 cm. Ela possui potência nominal de 10 W, tensão de circuito aberto de 21,5 V, corrente de curto-circuito de 0,65 A, tensão de potência máxima de 17,5 V e corrente de potência máxima de 0,58 A. A placa fotovoltaica fornece energia elétrica para oito ventoinhas (tipicamente

utilizadas em microcomputadores) de 12 cm de diâmetro nominal e tensão de 24 V, que estão fixadas nas faces laterais do secador (quatro em cada face), de forma a permitir a entrada do ar na câmara por uma das faces e a remoção do ar pela outra.

4.2 Instrumentação

Com a finalidade de analisar o processo de secagem de alimentos neste secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, foi necessário instalar instrumentos de medição relacionados à radiação solar, à corrente gasosa e ao leito de material.

Na face superior do secador, foi instalado um piranômetro da marca Hukseflux, modelo SR05-D2A2, responsável pela medição do fluxo de radiação solar em um intervalo de 0 a 1600 W/m² e sua conversão em um sinal analógico de corrente de 4 a 20 mA.

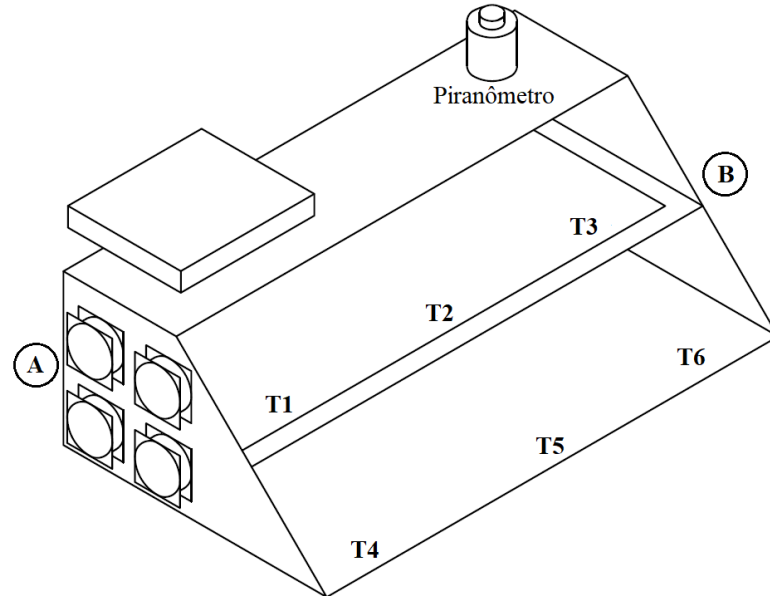
Dois transmissores de temperatura e umidade da marca Novus, modelo RHT-DM (UR-A e UR-B), foram instalados na lateral interna do secador, próximos as ventoinhas, para a medição da umidade do ar na posição A e B do secador, que correspondem a entrada e saída durante a operação com as ventoinhas ligadas.

Seis termopares tipo J foram instalados na parte interna do secador para a medição da temperatura do leito de material em função da posição ao longo da largura do secador. Dessa forma, três deles estão localizados na prateleira perfurada (T1, T2 e T3) e três na face inferior (T4, T5 e T6) a aproximadamente 36 cm de distância um do outro. Na Figura 3, estão destacadas as posições dos medidores instalados no secador solar.

Todos os medidores foram conectados à um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo cDAQ-9185, com os módulos de temperatura (NI 9212) e de entrada analógica (NI 9203). Para monitoramento das variáveis, foi elaborada uma rotina de aquisição de dados no software LabVIEW 2018. A rotina (*virtual instrument* ou VI) permitiu que a aquisição fosse feita automaticamente em intervalos de tempo determinados pelo usuário.

Para os medidores que requereram fonte de alimentação (transmissores de umidade e piranômetro, por exemplo), foi utilizada uma fonte DC de potência adequada. Além disso, todas as ligações elétricas foram feitas com cabos adequados; com destaque para a conexão entre os medidores e o sistema de aquisição de dados, que necessitou de ligação com cabos blindados. Desta forma, atenuaram-se possíveis interferências eletromagnéticas que poderiam prejudicar a medição das variáveis do processo. Outros materiais elétricos (bornes, conectores etc.) e ferramentas (chaves, elementos de fixação etc.) também foram utilizados para instalação adequada dos medidores.

Figura 3 – Esquema do secador solar com destaque para as posições dos medidores: piranômetro na face superior, transmissores de temperatura e umidade do ar nas posições A e B da câmara e os seis termopares na prateleira perfurada (T1, T2 e T3) e na face inferior (T4, T5 e T6).



Fonte: Próprio autor.

4.3 Planta alimentícia

A planta alimentícia escolhida para ser submetida ao processo de secagem no secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico foi a cebolinha (*Allium schoenoprasum L.*). Suas folhas são cilíndricas, lineares, alongadas, ocas e com pontas afiadas. Seus bulbos são delgados e arredondados. São plantas perenes e pequenas que atingem, no máximo, 30 cm de altura. Com relação ao habitat, a cebolinha é uma planta bem adaptada a climas secos e ensolarados e pode tolerar temperaturas frias e quentes (SINGH et al., 2018).

Esta hortaliça foi escolhida considerando sua importância econômica e suas propriedades nutricionais e medicinais (GARCÍA et al., 2010; VAZ et al.; 2007). As folhas frescas ou secas podem ser usadas para fins culinários. Segundo Singh et al., (2018), as avaliações científicas da cebolinha têm validado as alegações tradicionais e demonstrado diversos potenciais farmacológicos, incluindo ação anti-inflamatória, anticancerígena, antioxidante, anti-helmíntico e anti-hipertensivo.

As plantas *in natura* foram adquiridas em mercado local (Araraquara, São Paulo, Brasil) em 2019. As folhas de cebolinha foram separadas manualmente, cortadas em pequenas fatias de forma circular, conforme representado na Figura 4, e depositadas sobre a prateleira perfurada do secador (a face inferior não foi utilizada). Os talos próximos ao bulbo da cebolinha foram descartados.

Figura 4 – Folhas de cebolinha (*Allium schoenoprasum* L.) separadas manualmente e cortadas em pequenas fatias de forma circular.



Fonte: Próprio autor.

4.4 Testes preliminares

Com a instrumentação concluída, testou-se o funcionamento do equipamento e da interface de aquisição de dados em dois experimentos. No primeiro experimento, o secador foi exposto à radiação solar, com a placa de vidro voltada à direção norte, conforme recomendado por Tiwari (2016) para o hemisfério sul, e a convecção forçada do ar foi utilizada (ventoinhas ligadas). O segundo experimento foi realizado da mesma forma, mas sem a convecção forçada (ventoinhas desligadas). Nenhum material foi alimentado no secador em ambos os experimentos, portanto, não houve processo de secagem.

Os experimentos foram realizados no período das 9h às 16h, nos dias 03 e 04 de Abril de 2019, na Universidade Estadual Paulista (latitude de $-21,8^\circ$ e longitude de $-48,2^\circ$), do município de Araraquara-SP. Neste intervalo de tempo, todas as variáveis descritas anteriormente foram medidas periodicamente de forma automática pela rotina LabVIEW a cada 30 segundos. Cada ponto experimental equivale à média de 500 pontos medidos com uma frequência de 1,0 kHz.

4.5 Experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados em dois dias, sendo um o secador operado na ausência (ventoinhas desligadas) e outro na presença (ventoinhas ligadas) da convecção forçada do ar de secagem. Nos dois experimentos, o secador foi exposto à radiação solar, com a placa de vidro voltada à direção norte. Os experimentos foram realizados no município de Araraquara-SP, no período das 9h às 16h, nos dias apresentados na Tabela 2, nos meses de Maio, Junho (Outono), Setembro (Inverno) e Outubro (Primavera) de 2019.

Tabela 2 – Cronograma dos experimentos de secagem realizados no município de Araraquara-SP, no período das 9h às 16h.

Mês	Estação do ano	Dia	Experimento
Maio	Outono	27/05/2019	Sem convecção
		28/05/2019	Com convecção
Junho	Outono	12/06/2019	Sem convecção
		13/06/2019	Com convecção
Setembro	Inverno	04/09/2019	Sem convecção
		05/09/2019	Com convecção
Outubro	Primavera	04/10/2019	Sem convecção
		02/10/2019	Com convecção

Fonte: Próprio autor.

No início e em determinado intervalo de tempo, ao longo das 7 horas de cada experimento, pequenas amostras de cebolinha de aproximadamente 1 g foram retiradas em 3 posições ao longo da largura do secador (amostras consideradas suficientemente pequenas). Essas três posições de amostragem correspondem as posições dos três termopares instalados da prateleira perfurada do secador (T1, T2 e T3). Nos experimentos de Maio, Junho e Setembro, as amostras foram retiradas do leito de cebolinhas e pesadas a cada 15 minutos e, nos experimentos de Outubro, a cada 30 minutos, a fim de diminuir a perda de calor da câmara de secagem ao abrir o equipamento em cada amostragem. As medições de massa foram feitas em uma balança analítica Shimadzu, modelo ATX224 (0,0001 g).

Com exceção dos experimentos realizados em Maio, ao final de cada amostragem, o leito de cebolinhas era homogeneizado por meio da mistura manual das folhas, a fim de favorecer a secagem por igual ao longo da largura do secador.

Nos experimentos de Outubro, além das amostras retiradas do leito, três amostras fixas de cebolinhas foram colocadas em pequenos recipientes metálicos abertos, mantidas nas mesmas posições mencionadas anteriormente e avaliadas durante a secagem a cada 30 minutos.

Todas as amostras de cebolinha foram submetidas à medição da umidade, realizada por método gravimétrico em estufa de secagem e esterilização da marca ORION[®], modelo SL-100, a 105°C por 24 horas. Durante os experimentos, todas as variáveis descritas anteriormente foram medidas periodicamente de forma automática pela rotina LabVIEW a cada 10 segundos em Maio, Junho e Setembro; e a cada 30 segundos em Outubro (a fim de reduzir o ruído das medidas). Assim como mencionado no teste preliminar, cada ponto experimental equivale à média de 500 pontos medidos com uma frequência de 1,0 kHz.

4.6 Cinética de secagem

A configuração do leito fixo de material sobre a prateleira do secador foi avaliada segundo a cinética de secagem em camada delgada. Nessa classificação, o leito de material é caracterizado por uma camada homogênea e de espessura suficientemente pequena, a fim de considerar que as características do ar e do leito em toda a camada são identicamente uniformes e sem variação. Além disso, a secagem em camada delgada também pode ser avaliada como a secagem de uma camada de partículas ou fatias de amostra com quantidade suficiente de ar com características físicas apropriadas (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

A abordagem do processo de secagem em camada delgada considera a hipótese de parâmetros concentrados na modelagem do problema, uma vez que as variações de temperatura e umidade em relação à posição são desprezíveis quando comparadas as variações temporais (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2015). Isso significa que, em um determinado tempo experimental, o leito de material foi avaliado considerando a mesma temperatura e umidade ao longo de suas dimensões (inclusive nas posições T1, T2 e T3 de medição e amostragem).

Os dados experimentais de umidade foram analisados usando o adimensional de umidade (MR), calculado segundo a Equação 1:

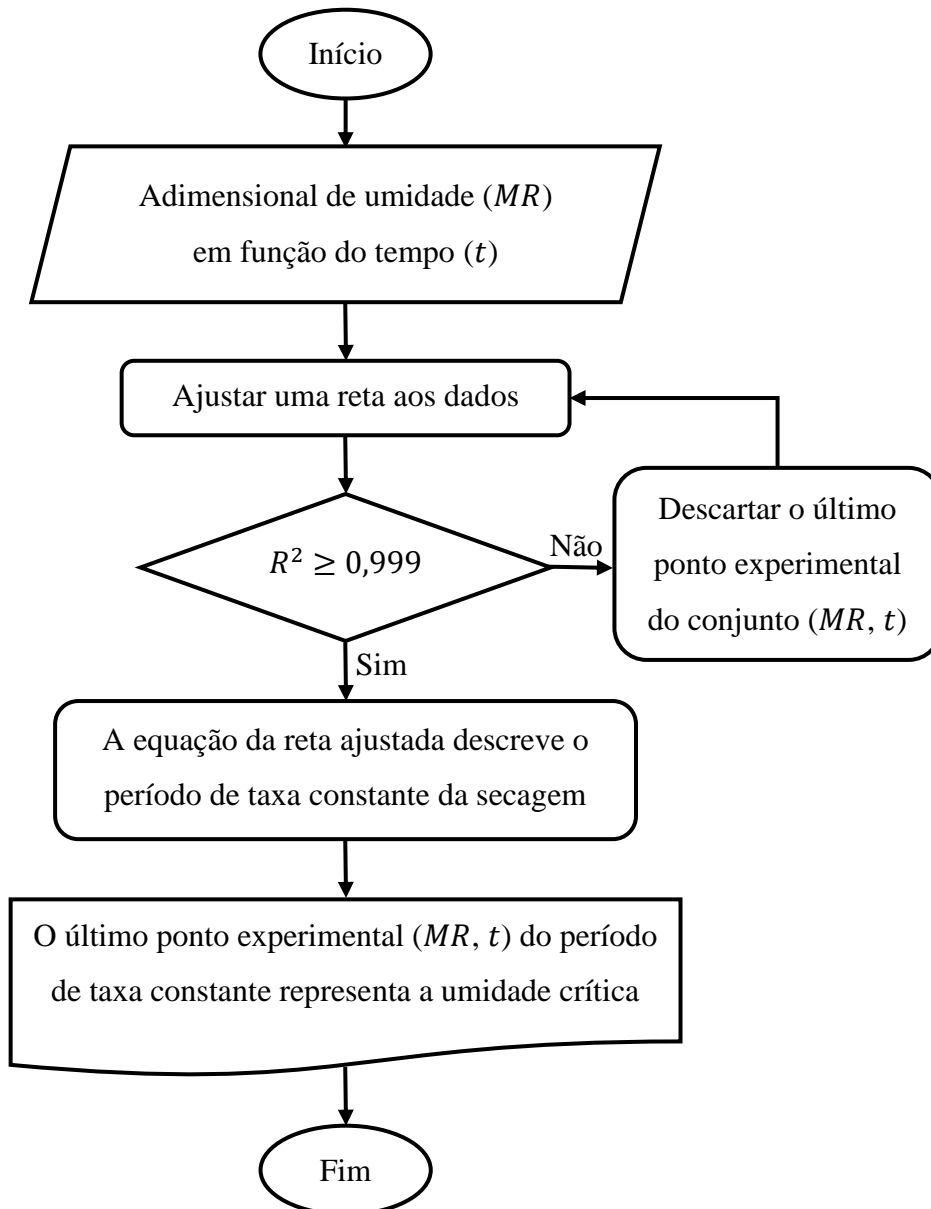
$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \approx \frac{X}{X_0} \quad (1)$$

onde X , X_0 e X_e são a umidade do material em base seca a qualquer momento, a inicial e a de equilíbrio, respectivamente. Como a umidade relativa e a temperatura do ar de secagem flutuam consideravelmente durante a secagem solar direta e, além disso, X_e possui um valor baixo comparado aos valores de X_0 e X , ele pode ser desconsiderado e o MR simplificado para X/X_0 (AKPINAR, 2006; DISSA et al., 2011; DJEBLI et al., 2020; EL KHADRAOUI et al., 2019; EL-SEBAII; SHALABY, 2013; GOUD et al., 2019; REYES; MAHN; VÁSQUEZ, 2014; SUHERMAN et al., 2020; THAM et al, 2017; YALDÝZ; ERTEKÝN, 2001).

4.6.1 Período de taxa constante

Para os experimentos nos quais foi possível identificar a presença do período de secagem à taxa constante, uma reta ($y = \alpha * x + \beta$) foi ajustada aos dados de adimensional de umidade ($y = MR$) em função do tempo ($x = t$), a fim de determinar a umidade crítica que evidencia o final desse período (sendo α e β os coeficientes angular e linear da reta ajustada). Nesse ajuste, os pontos experimentais no final do conjunto eram descartados em ordem decrescente no tempo até que o coeficiente de determinação (R^2) da reta fosse maior ou igual a 0,999. A lógica de programação para este ajuste está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Lógica de programação da rotina para determinar a umidade crítica que sinaliza o final do período de taxa constante.



Fonte: Próprio autor.

4.6.2 Período de taxa decrescente

Para o período de secagem à taxa decrescente de cada experimento, quatro equações empíricas de cinética de secagem foram utilizadas para ajustar as curvas de secagem (adimensional de umidade em função do tempo) da cebolinha durante os experimentos sem e com convecção forçada, conforme apresentado na Tabela 3 (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

Tabela 3 – Equações matemáticas para ajuste dos dados de secagem.

Equação	
Lewis	$MR = e^{-k t}$ (2)
Page	$MR = e^{-k t^n}$ (3)
Overhults	$MR = e^{-(k t)^n}$ (4)
Henderson e Pabis	$MR = a e^{-k t}$ (5)

Fonte: Próprio autor.

Nessas equações, k é a constante de secagem, t é o tempo de secagem, n e a são constantes empíricas adimensionais de ajuste. O valor da constante de secagem depende da temperatura, da velocidade do ar, da umidade, das condições e do método de secagem utilizados (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

Análises de regressão não-linear foram realizadas com a ferramenta “Solver” do MS Excel. O coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE), Equação 2, o teste do qui-quadrado (χ^2), Equação 3, foram utilizados para avaliar a qualidade das equações ajustadas aos dados experimentais (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (MR_{exp,i} - MR_{calc,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{calc,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

Onde $MR_{exp,i}$ e $MR_{calc,i}$ são os adimensionais de umidade experimentais e calculados em determinada observação i , N é o número total de observações e n é o número de parâmetros estimados. Quanto mais próximo de um o valor de R^2 e mais próximo de zero os valores de RMSE e χ^2 , melhor a qualidade do ajuste realizado.

4.6.3 Difusividade efetiva

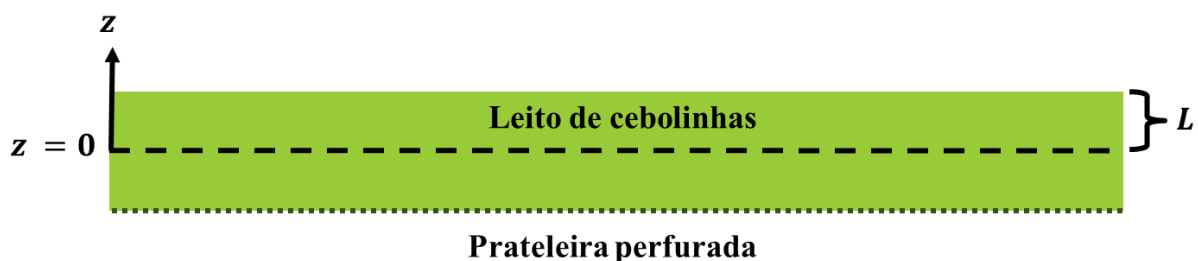
Os mecanismos de transporte de água do interior do material para sua superfície são descritos pela equação de difusão de Fick, Equação 4, a qual se refere aos processos de secagem que ocorrem no período de taxa decrescente baseados na difusividade mássica efetiva (D_{ef}) do material (GOUD et al., 2019; KOUHILA et al., 2020; REYES et al., 2013; ŞEVIK et al., 2019; SUHERMAN et al., 2020).

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 MR \quad (4)$$

Para a configuração do leito no secador em estudo, segundo ilustrado no esquema da Figura 6, as seguintes hipóteses foram consideradas para a resolução do modelo de transferência de massa difusiva unidimensional transiente em placa plana, com interface em equilíbrio (Crank, 1975):

- A difusividade mássica efetiva (D_{ef}) é constante;
- A área lateral é muito pequena em relação à superfície onde ocorre a transferência de massa (difusão unidimensional);
- A placa tem semi espessura conhecida (L) e não perde massa em $z = 0$;
- A umidade inicial (X_0) é conhecida e constante em toda a placa;
- A umidade de equilíbrio (X_e) é constante e atingida na interface em $z = L$ (resistência convectiva desprezível na interface);
- Não ocorre encolhimento da placa (geometria constante);
- As condições do ar são constantes.

Figura 6 – Configuração do leito de cebolinhas analisado pelo modelo de placa plana sobre a prateleira perfurada do secador.



Fonte: Próprio autor.

A partir destas hipóteses, de um balanço de massa e da lei de Fick, tem-se a Equação 5 com as seguintes condições de contorno:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 MR}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} MR(t = 0, \forall z) = 1 \\ MR(\forall t, z = L) = 0 \\ \frac{\partial MR}{\partial z}(\forall t, z = 0) = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o modelo, foi possível estimar a difusividade efetiva do leito de cebolinhas nos experimentos de secagem do mês de Outubro, a partir da solução analítica da Equação 6, na qual t é o tempo de secagem, L é a semi espessura do leito de material e n é um número inteiro positivo (SALLAM et al., 2013).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-\left[\frac{(2n+1)\pi}{2L}\right]^2 D_{ef} t\right\} \quad (6)$$

De acordo com o modelo, o valor do adimensional de umidade (MR) do material ao longo do tempo é exponencialmente decrescente, partindo da condição inicial (por definição, $MR(t = 0) = 1$) e eventualmente atinge o equilíbrio ($MR(t \rightarrow \infty) = 0$).

O ajuste da série foi truncado no décimo termo ($n = 10$), com um erro absoluto de 0,023 e percentual de 1,84 % do somatório. Uma análise de regressão não linear foi realizada com a ferramenta MS Excel “Solver” e o coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar a qualidade do modelo ajustado. Essa estimativa da difusividade efetiva foi realizada para os experimentos de secagem do mês de Outubro realizados na presença e na ausência da convecção forçada do ar.

4.6.4 Densidade *bulk*

Os cálculos de difusividade efetiva levam em consideração a semi espessura do leito (L), sendo que esse não perde massa em $z = 0$. Para obtenção dessa grandeza, foi necessário estimar a densidade *bulk* do leito ou massa específica.

A densidade *bulk* expressa a razão entre a massa de partículas e o volume do leito empacotado, o qual depende também dos espaços vazios entre as partículas do leito e não apenas do volume das mesmas e de seus poros (SOKHANSANJ; JAYAS, 2006). O valor da densidade *bulk* do leito de cebolinhas foi determinado manualmente inserindo uma massa do material em uma proveta com volume total de 1000 mL. Esse procedimento foi realizado em triplicata e o valor obtido para a densidade *bulk* foi de $0,14 \pm 0,01$ g/cm³.

Esse resultado representa a densidade *bulk* aerada ou “solta” do leito, a qual é definida com base em uma massa de partículas do material soltas sob a ação da gravidade em um

recipiente de volume conhecido. Quando o material sofre efeitos de compactação e as partículas são acomodadas em determinado volume, a densidade *bulk* é denominada compactada ou “densa”. Como o leito de cebolinhas sobre a prateleira perfurada do secador não sofreu acomodação por batidas mecânicas, optou-se por utilizar a densidade *bulk* aerada para o cálculo da semi espessura do leito.

4.6.5 Semi espessura do leito

A definição de densidade *bulk* do leito relaciona a massa de cebolinhas ($M_{cebolinhas}$) depositadas na prateleira perfurada do secador com o volume (V) ocupado por elas. Este último é definido como a área da prateleira perfurada ($S = 6000 \text{ cm}^2$) vezes a altura do leito de cebolinhas ($2L$), conforme apresentado na Equação 7.

$$\text{Densidade } bulk = \frac{M_{cebolinhas}}{V} = \frac{M_{cebolinhas}}{S \ 2L} \quad (7)$$

Vale destacar que a altura do leito representa duas vezes sua semi espessura L utilizada na definição do modelo, uma vez que a perda de massa pode ocorrer pela base (na prateleira perfurada, $z = -L$ pelo modelo) assim como na interface ($z = L$). Ou seja, a geometria do leito é simétrica em relação à reta $z = 0$.

Das definições citadas acima, é possível obter a semi espessura do leito de cebolinhas (L) a partir das massas utilizadas nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro. Para o experimento sem convecção, foram depositadas 2,62 kg de cebolinhas na prateleira perfurada e a semi espessura do leito estimada foi de 1,59 cm ($2L = 3,19$ cm). Para o experimento com convecção, a massa de cebolinhas foi de 2,65 kg e a semi espessura do leito estimada em 1,61 cm ($2L = 3,23$ cm).

4.7 Análise energética do secador

A eficiência do secador pode ser expressa pela razão entre o calor utilizado na evaporação da umidade do material e a radiação solar total incidente (DISSA et al., 2011; EL KHADRAOUI et al., 2019). As eficiências do secador solar direto fotovoltaico operado sem e com convecção forçada do ar de secagem foram calculadas para os experimentos de Outubro usando a Equação 8 (NAYAK et al., 2011; POONIA; SINGH; JAIN, 2018):

$$\eta = \frac{M_{ev} \lambda}{A \int_0^\theta I \ d\theta} \times 100 \quad (8)$$

onde M_{ev} é a quantidade de água removida do material (kg), λ é o calor latente da evaporação da água ($2,26 \times 10^6$ J/kg), I é o fluxo da radiação solar incidente no secador (W/m^2), A é a área da estrutura de vidro do secador ($0,68 \text{ m}^2$), e θ é o número de horas no sol (7 h). A integral ($\int_0^\theta I d\theta$) foi calculada numericamente pela regra dos trapézios com repetições, utilizando os dados de fluxo da radiação solar em função do tempo.

A razão entre as quantidades de energia utilizada e de umidade evaporada do material seco é definida como consumo específico de energia (*specific energy consumption, SEC*) do sistema de secagem (LAKSHMI et al., 2019; RABHA; MUTHUKUMAR, 2017; ŞEVIK et al., 2019). Para o secador em questão operado sem e com convecção forçada, esse consumo pode ser calculado pela Equação 9, na qual a energia utilizada é descrita pela radiação solar total incidente no equipamento.

$$SEC = \frac{A \int_0^\theta I d\theta}{M_{ev}} \quad (9)$$

Para essa análise foi desconsiderada a energia utilizada para aquecer o sólido.

4.8 Colorimetria

Além da umidade, também foram medidas antes e ao longo dos experimentos de secagem as coordenadas L (luminosidade ou eixo preto-branco), a (eixo verde-vermelho) e b (eixo azul-amarelo) da escala CIELab, nas mesmas três posições de amostragem do secador. Para estas análises, foi utilizado um colorímetro CIELab Delta Vista 450G.

A diferença total de cores (ΔE) foi calculada de acordo com a Equação 10 (TÉLLEZ et al., 2018):

$$\Delta E = [(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2]^{1/2} \quad (10)$$

onde o subscrito 0 corresponde aos parâmetros colorimétricos da amostra inicial. Quanto menor o valor de ΔE , menor a variação de cor sofrida e, conseqüentemente, melhor a qualidade do produto (MENNOUCHE et al., 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Instrumentação e teste preliminar

A Figura 7 apresenta o secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico construído para a realização do trabalho, antes da instalação das ventoinhas e instrumentos de medição.

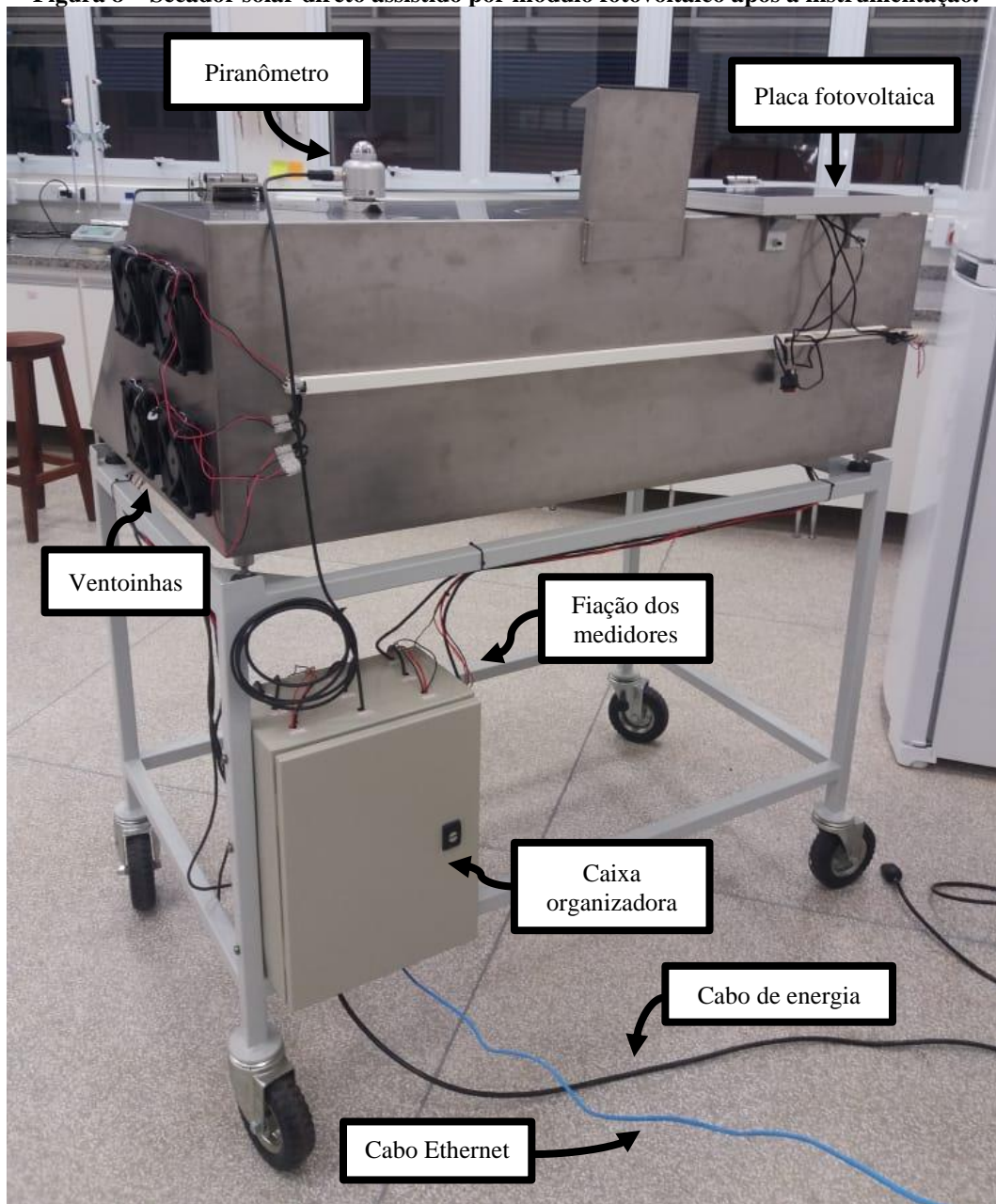
Figura 7 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico antes da instrumentação.



Fonte: Próprio autor.

Para a instrumentação do secador, as ventoinhas foram instaladas e conectadas à placa fotovoltaica. O piranômetro e os dois transmissores de temperatura foram ligados à fonte DC. Esses instrumentos foram unidos, juntamente com os seis termopares, ao sistema de aquisição de dados. A fonte DC e a placa foram armazenadas em uma caixa organizadora fixada próximo aos rodízios de transporte do secador. A conexão entre a aquisição e o computador foi feita através de um cabo Ethernet de 30 m de comprimento e um cabo de energia, a fim de facilitar o transporte do secador para a área externa, mesmo que distante do computador. A Figura 8 apresenta o secador com a instrumentação instalada.

Figura 8 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico após a instrumentação.

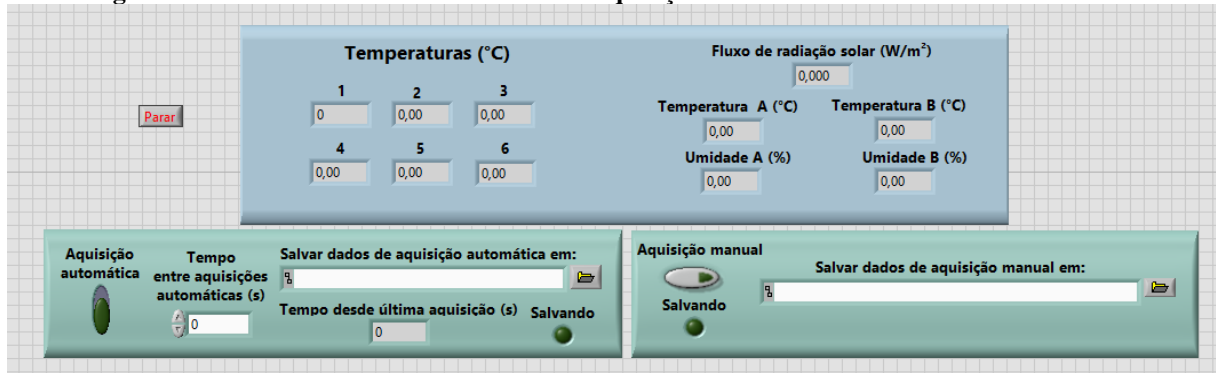


Fonte: Próprio autor.

A rotina de aquisição de dados foi desenvolvida no software LabVIEW 2018 de forma a permitir o monitoramento contínuo das variáveis do processo: o fluxo de energia solar, as seis temperaturas (T1, T2 e T3 na prateleira perfurada; T4, T5 e T6 na face inferior) e as temperaturas e umidades do ar nas posições A e B da câmara do secador.

A Figura 9 ilustra uma captura de tela da interface do usuário na rotina de aquisição de dados, na qual é possível observar as variáveis monitoradas continuamente. As duas caixas na porção inferior da interface foram utilizadas para salvar a média e o desvio-padrão de 500 medidas obtidas a 1,0 kHz de forma pontual (lado direito) ou periodicamente, com um intervalo de tempo determinado pelo usuário (lado esquerdo).

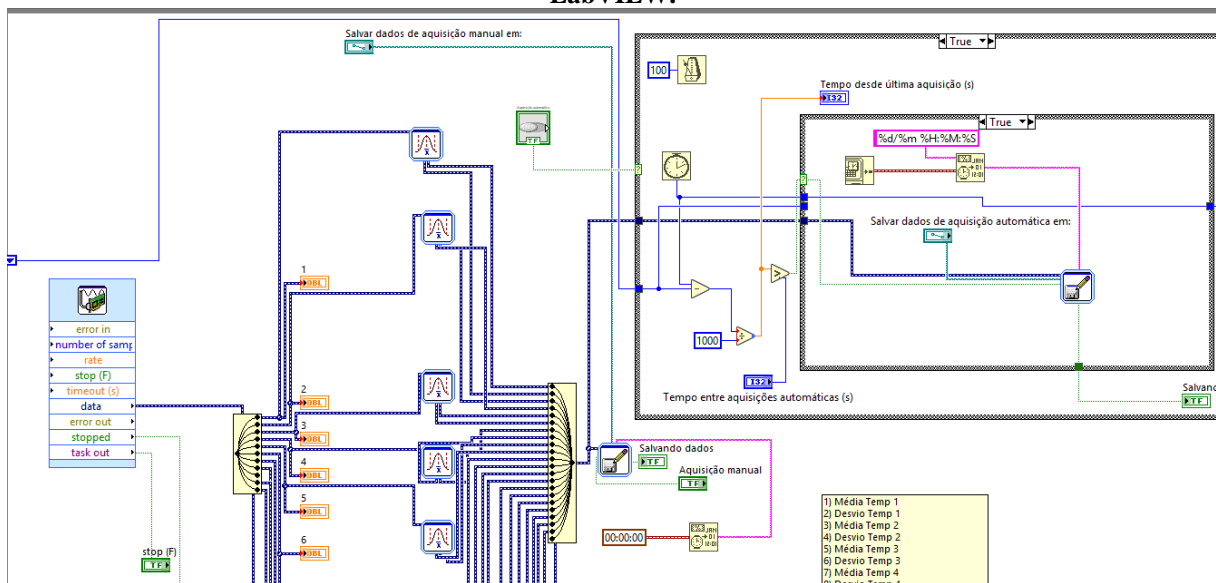
Figura 9 – Interface do usuário na rotina de aquisição de dados desenvolvida em LabVIEW.



Fonte: Próprio autor.

Essa interface do usuário é baseada em uma rotina desenvolvida na forma de diagrama de blocos (na linguagem LabVIEW). A Figura 10 ilustra uma parte do diagrama de blocos desenvolvido na rotina de aquisição de dados. A rotina tem seu início com o bloco *DAQ Assistant* responsável por receber os dados fornecidos pelos sensores instalados no secador, convertendo-os para a forma analógica. Esses dados são catalogados de acordo com a medida realizada e aparecem na interface do usuário durante o monitoramento.

Figura 10 – Parte do diagrama de blocos desenvolvido na rotina de aquisição de dados do software LabVIEW.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, cada aferição passa por operações de média e desvio-padrão para arquivamento dos dados, conforme citado anteriormente. Para esse fim, os dados são reunidos em um fio (*merge signals*), de onde seguem para dois sistemas de armazenamento dos dados: manualmente de acordo com a necessidade do usuário ou automaticamente, de acordo com o intervalo de tempo determinado pelo usuário.

As informações são gravadas pelo bloco *Write to Measurement File* em uma pasta especificada pelo usuário na interface. Optou-se por gravar os dados em arquivos do tipo bloco de notas (formato .lmv), os quais podem ser transferidos para outros softwares, como o Microsoft Excel ou similar, para realização de cálculos e geração de gráficos. O bloco *stop* interrompe a aquisição de dados.

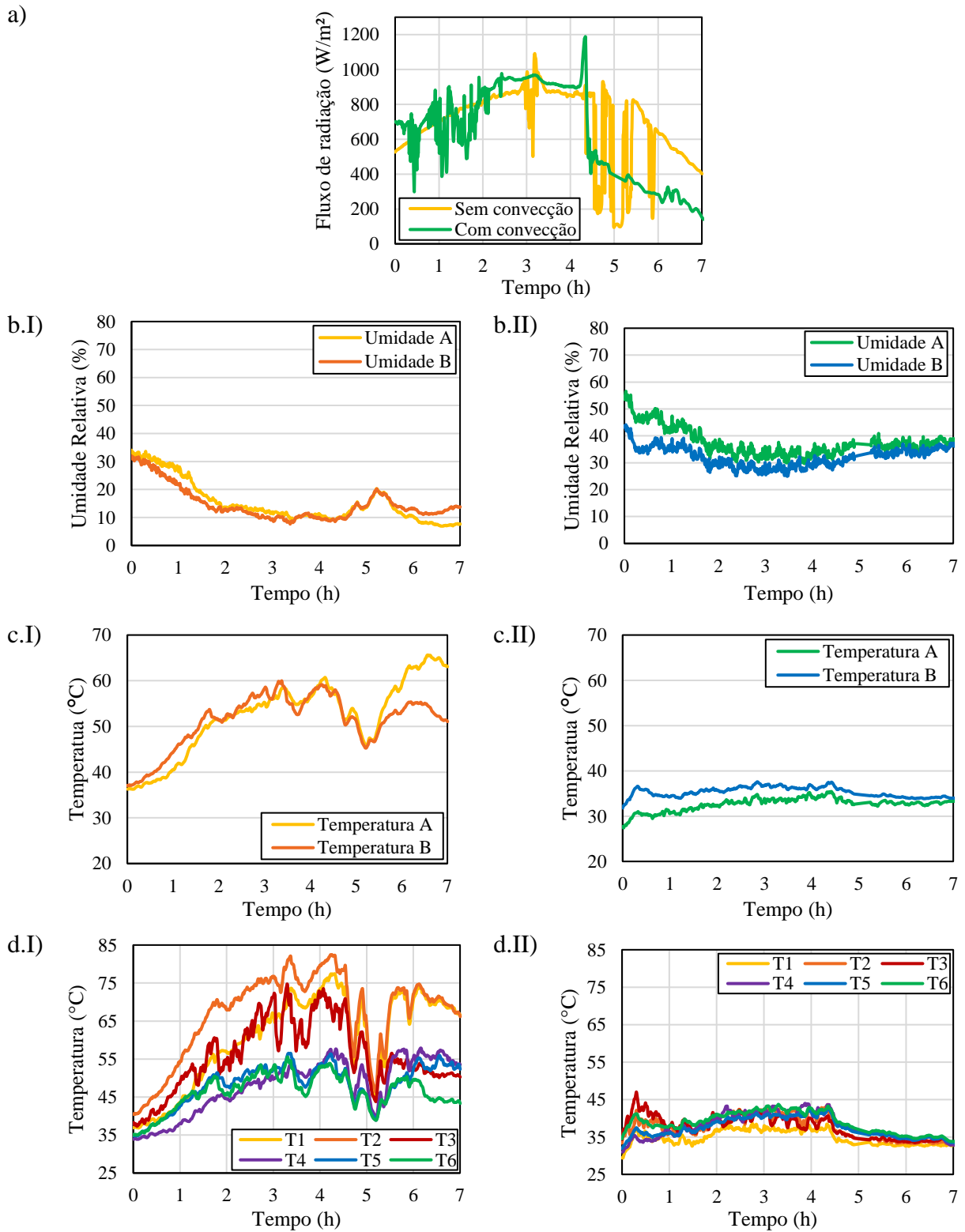
Como exemplo de conjunto de dados obtidos por esta rotina, a Figura 11 mostra os fluxos de radiação solar (a), as condições do ar, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos com as ventoinhas desligadas (I) e ligadas (II) dos testes preliminares realizados no mês de Abril de 2019.

Todas as variáveis monitoradas apresentaram variações, decorrentes da periodicidade natural da radiação solar, o que pode ser verificado principalmente na Figura 11.a. No início dos experimentos, próximo ao horário do amanhecer, o fluxo de radiação solar foi mais baixo. Os valores mais altos foram observados no período próximo do final da manhã e início da tarde, entre 3 e 4 horas de experimento, que correspondem ao horário de 12h às 13h do dia. Nesse intervalo, o fluxo de radiação solar teve média de $879 \pm 83 \text{ W/m}^2$ para o experimento com as ventoinhas desligadas e de $928 \pm 23 \text{ W/m}^2$ para o experimento com as ventoinhas ligadas. No final do experimento, próximo ao entardecer, o fluxo de radiação solar diminuiu, como esperado. As reduções bruscas no fluxo de radiação estão relacionadas com a formação de nuvens no período. Para as 7 horas de secagem, o fluxo de radiação médio foi de $691 \pm 209 \text{ W/m}^2$ e $642 \pm 271 \text{ W/m}^2$, para os experimentos com as ventoinhas desligadas e ligadas, respectivamente.

As variações de umidade relativa e temperatura do ar na câmara do secador estão exclusivamente relacionadas às variações climáticas, visto que não estava ocorrendo processo de secagem em ambos os experimentos. Para o experimento com as ventoinhas desligadas, a umidade relativa alcançou mínimas e máximas de 6,9 % e 34,1 % para a posição A e 7,6 % e 32,0 % para a posição B. Para as respectivas posições, a temperatura do ar variou de 36,3 a 65,6 °C e 37,1 a 60,0 °C, com médias de $52,2 \pm 8,0 \text{ °C}$ e $51,3 \pm 5,8 \text{ °C}$.

No experimento com as ventoinhas ligadas, os valores mínimos e máximos de umidade relativa foram de 29,7 % e 56,6 % para a posição A de entrada do ar e 25,0 % e 44,1 % para a posição B de saída. A temperatura do ar na entrada e na saída da câmara do secador variou de 24,4 a 35,4 °C e 31,8 a 37,6 °C, respectivamente, com médias de $32,6 \pm 1,4 \text{ °C}$ e $35,3 \pm 1,1 \text{ °C}$ para as mesmas posições.

Figura 11 – Fluxo de radiação solar (a), condições do ar, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos com as ventoinhas desligadas (I) e ligadas (II) dos testes preliminares realizados no mês de Abril de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Para os perfis de temperaturas de 1 a 6, os maiores valores também foram observados entre 3 e 4 horas de experimento, quando os fluxos de radiação solar foram mais intensos. Na

operação com as ventoinhas ligadas, foram observados menores valores de temperatura tanto para as posições A e B quanto para os termopares instalados ao longo da prateleira perfurada e da face inferior do secador. A Tabela 4 apresenta os valores mínimos e máximos, assim como as médias e os desvios-padrão das temperaturas, para as seis posições (T1, T2, T3, T4, T5 e T6), em ambos os experimentos do mês de Abril.

Tabela 4 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para os experimentos com as ventoinhas desligadas e ligadas no mês de Abril de 2019.

Ventoinhas	Temperaturas (°C)	Prateleira perfurada			Face inferior		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Desligadas	Mínima	36,8	40,4	37,3	33,9	34,8	35,0
	Máxima	77,5	82,5	74,8	57,9	56,5	55,6
	Média	60,5	66,9	55,7	47,9	48,3	46,4
	Desvio	11,8	11,0	9,0	7,1	5,6	4,7
Ligadas	Mínima	29,4	33,2	33,5	31,0	31,9	33,8
	Máxima	38,6	43,7	47,0	43,9	42,8	43,7
	Média	34,9	37,7	37,8	37,8	37,5	39,0
	Desvio	2,0	3,1	2,9	3,3	2,6	2,8

Fonte: Próprio autor.

A média de todas as temperaturas ao longo do secador foram inferiores para o experimento com as ventoinhas ligadas em relação ao experimento com as ventoinhas desligadas. O resultado era esperado, já que a constante retirada de ar do secador pelas ventoinhas da saída também corresponde à constante retirada de energia térmica do sistema (na forma de entalpia do ar na saída), reduzindo a taxa de acúmulo de energia na câmara do secador. Além disso, nota-se que os desvios-padrão são inferiores para o experimento com as ventoinhas ligadas, assim como também são menores as amplitudes térmicas, em relação ao experimento com as ventoinhas desligadas. Trata-se também de um resultado esperado, visto que a convecção forçada do ar auxilia na redução de gradientes de temperatura no secador.

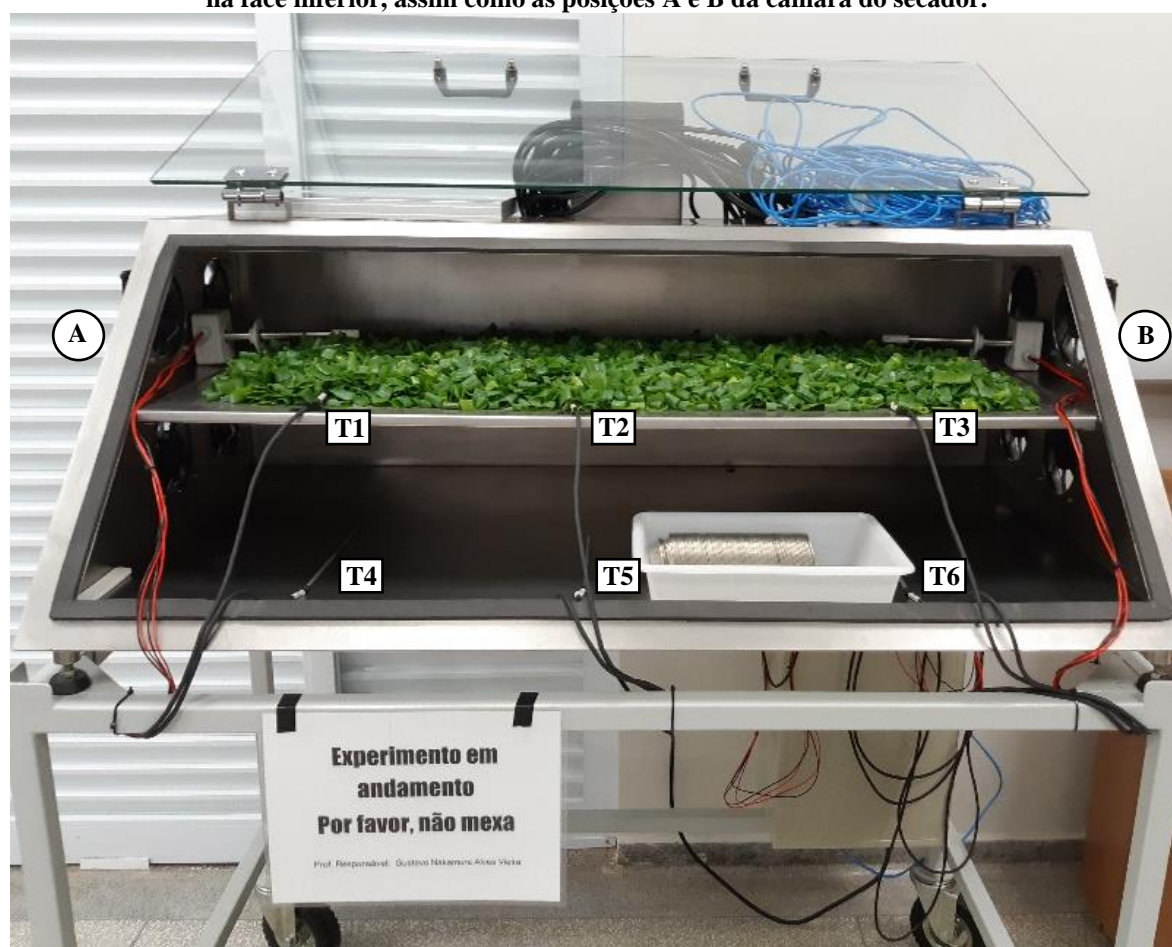
O processo de secagem mais adequado, sem ou com a utilização das ventoinhas, depende do tipo de mecanismo que controla a secagem dos materiais a serem avaliados no equipamento. A princípio, processos de secagem com convecção forçada ocorrem com taxas de secagem mais elevadas, se o processo for controlado por mecanismos externos (EKKA et al., 2020; SALLAM et al., 2013). No entanto, a redução da temperatura no secador com as ventoinhas ligadas pode desfavorecer cineticamente o processo de secagem, por reduzir as taxas de transferência de calor. Por outro lado, temperaturas mais baixas e mais uniformes também

podem contribuir para uma melhor qualidade do produto (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011; ELHUSSEIN; ŞAHIN, 2018).

5.2 Secagens em Maio e Junho de 2019

A Figura 12 apresenta a disposição do leito de cebolinhas sobre a prateleira perfurada do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico, na qual estão localizados os três termopares (T1, T2 e T3), assim como os transmissores de umidade do ar nas posições A e B da câmara do equipamento, que correspondem a entrada e saída do ar durante a operação com as ventoinhas ligadas. A Figura 13 ilustra o próprio equipamento durante um experimento de secagem.

Figura 12 – Leito de cebolinhas sobre a prateleira perfurada do secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico. Destaque para as posições dos termopares T1, T2 e T3 na prateleira perfurada e T4, T5 e T6 na face inferior, assim como as posições A e B da câmara do secador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 – Secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico durante um experimento de secagem.

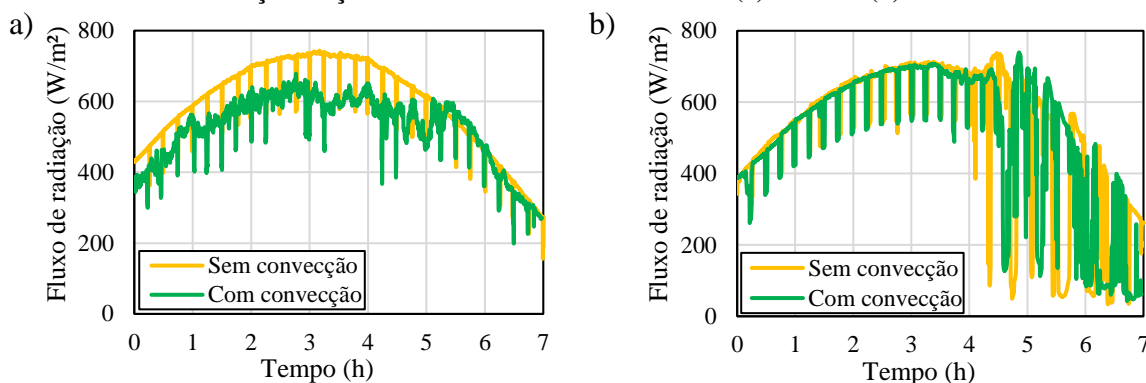


Fonte: Próprio autor.

Os fluxos de radiação solar em função do tempo de secagem para os experimentos sem e com convecção forçada do ar realizados nos meses de Maio e Junho de 2019 estão apresentados nas Figuras 14.a e 14.b, respectivamente. Como descrito no teste preliminar, o fluxo de radiação solar apresentou os maiores valores entre 3 e 4 horas de experimento (12h às 13h do dia). Nesse intervalo, o fluxo de radiação solar teve média de $720 \pm 37 \text{ W/m}^2$ e $603 \pm 26 \text{ W/m}^2$, para os experimentos sem e com convecção do mês de Maio e média de $674 \pm 54 \text{ W/m}^2$ e $667 \pm 54 \text{ W/m}^2$, para os respectivos experimentos do mês de Junho.

Próximo ao horário do amanhecer e ao entardecer, o fluxo de radiação solar foi mais baixo. As reduções bruscas na intensidade da radiação estão relacionadas com a passagem de nuvens durante o monitoramento ou quando o secador era aberto para amostragem a cada 15 minutos. Para as 7 horas de secagem, o fluxo de radiação médio no mês de Maio foi de $589 \pm 129 \text{ W/m}^2$ e $521 \pm 99 \text{ W/m}^2$, para os experimentos sem e com convecção. Enquanto que para o mês de Junho, esses valores médios foram de $517 \pm 193 \text{ W/m}^2$ e $507 \pm 200 \text{ W/m}^2$, para os experimentos sem e com convecção respectivamente.

Figura 14 – Fluxos de radiação solar em função do tempo de secagem para os experimentos sem e com convecção forçada realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



Fonte: Próprio autor.

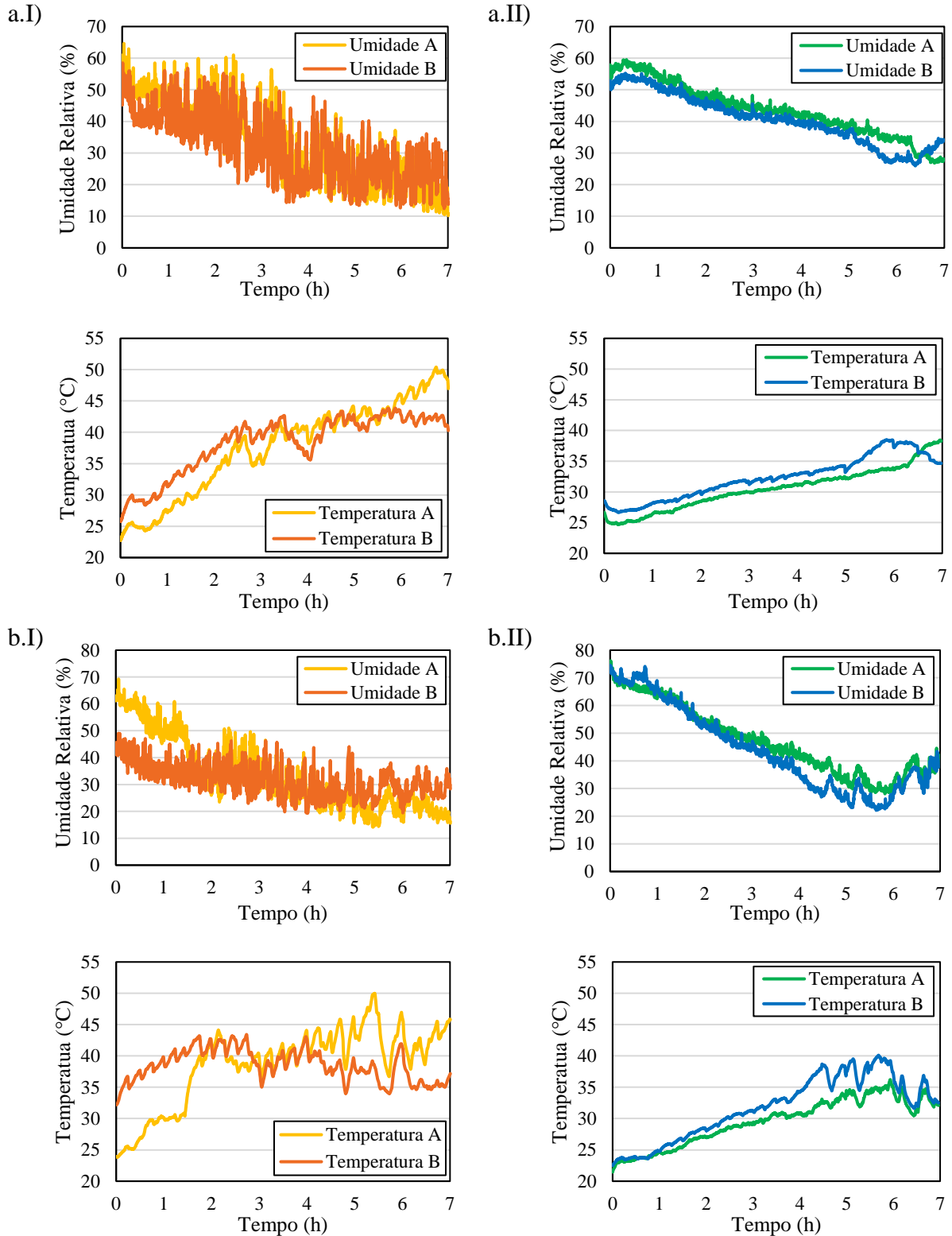
As condições do ar de secagem, umidade relativa e temperatura, durante os experimentos nos meses de Maio (a) e Junho (b) estão apresentados na Figura 15, para as operações sem (I) e com (II) convecção forçada. Na secagem, a transferência de massa envolve a perda de água do material submetido ao processo para o ar circundante, como consequência dos mecanismos de transferência de calor. No entanto, essa quantidade de água transferida não foi suficiente para provocar um aumento mensurável no valor da umidade relativa do ar de secagem, como pode ser observado nos resultados da Figura 15.

As reduções observadas nos valores de umidade relativa do ar têm relação com o aumento geral das temperaturas na câmara do secador ao longo do tempo de experimento, e não com a secagem propriamente dita, o que também foi observado por Yaldyz e Ertekyn (2001) e EL khadraoui et al. (2019) em seus trabalhos com secagem solar. De acordo com Chavan et al. (2020), a radiação solar que atinge diretamente o secador é responsável por aquecer o material e, simultaneamente, reduzir a umidade relativa do ar na câmara do equipamento, aumentando assim sua capacidade de transportar água. Consequentemente, essa capacidade do ar em transportar a umidade removida do material influencia na taxa de secagem e no tempo de processo segundo Lakshmi et al. (2019) e Şevik et al. (2019).

Assim como ocorrido nos testes preliminares, o ar alcançou menores temperaturas dentro da câmara do secador no experimento com convecção, comparado ao sem convecção. Nos experimentos de secagem com as ventoinhas desligadas, as temperaturas do ar na posição A da câmara do equipamento são inferiores às temperaturas na posição B até aproximadamente 3 e 4 horas de processo. Após esse horário, as temperaturas na posição A passaram a ter valores maiores do que em B, na maior parte do tempo, até o final do experimento. Esse comportamento também foi observado no teste preliminar (Figura 11.c.I) e pode estar relacionado com a posição do secador voltado à direção norte e com o caminho

percorrido pelo sol ao longo das horas de secagem. Esses fatores, influenciam o aquecimento de uma região do equipamento em detrimento de outra que, pode ter sido encoberta com sombra da parede da câmara do secador.

Figura 15 – Condições do ar de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Para os experimentos com as ventoinhas ligadas, o ar de secagem foi aquecido ao longo de seu deslocamento pelo equipamento, uma vez que sua temperatura na posição B de saída da câmara foi maior que na posição A de entrada em grande parte do tempo, para ambos os meses e também no teste preliminar (Figura 11.c.II). Em outras palavras, enquanto a massa de ar era deslocada dentro da câmara do secador pela atuação da convecção forçada, a mesma era aquecida pela radiação direta incidente sobre o vidro do equipamento.

Na Tabela 5, estão apresentados os valores mínimos e máximos, assim como as médias e os desvios-padrão de temperatura e umidade relativa do ar de secagem nas posições A e B da câmara do secador para os quatro experimentos realizados nos meses de Maio e Junho. Para a mesma condição de operação e comparando os resultados obtidos em cada mês, pouca diferença foi observada nos valores médios dessas grandezas, uma vez que os experimentos foram realizados na mesma estação do ano (Outono).

Tabela 5 – Médias e desvios-padrão dos valores de umidade relativa e temperatura nas posições A e B da câmara do secador, para as secagens sem e com convecção forçada realizadas nos meses de Maio e Junho de 2019.

Mês	Convecção	Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)		
		A	B	A	B	
Maio	Sem	Mínima	22,8	25,8	10,2	12,4
		Máxima	50,4	43,9	64,6	58,5
		Média	37,6	38,2	33,1	31,9
		Desvio	7,4	4,7	13,0	10,7
	Com	Mínima	24,7	26,6	26,8	25,9
		Máxima	38,4	38,5	59,5	55,2
		Média	30,5	32,3	43,5	40,6
		Desvio	3,4	3,4	8,4	8,1
Junho	Sem	Mínima	23,8	32,2	14,1	19,3
		Máxima	50,0	43,4	69,2	49,1
		Média	38,7	38,5	33,1	31,5
		Desvio	6,1	2,5	13,1	5,9
	Com	Mínima	21,4	22,5	28,1	22,1
		Máxima	36,2	40,1	76,1	74,4
		Média	29,5	31,7	47,0	44,0
		Desvio	3,7	5,0	12,5	15,0

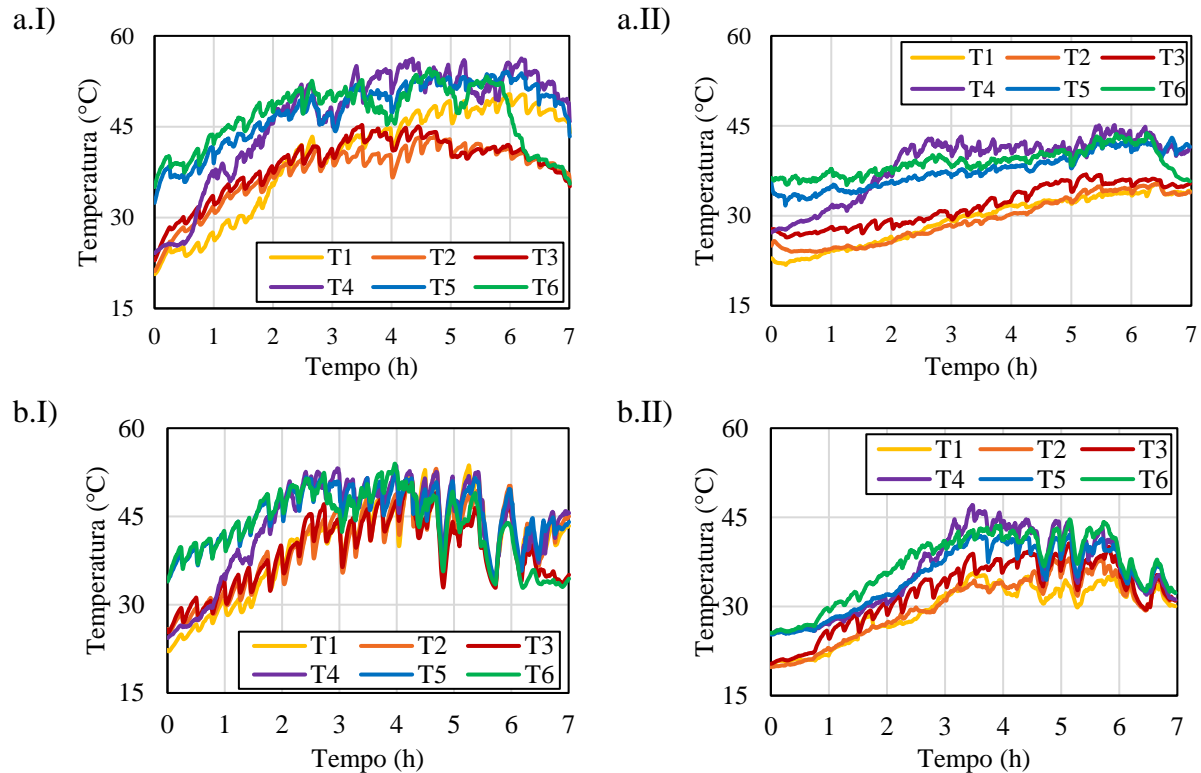
Fonte: Próprio autor.

Além disso, nos dois meses avaliados, as secagens sem convecção apresentaram menores médias para a umidade relativa do ar, com valores inferiores em 21 a 30 %

aproximadamente; enquanto as secagens com convecção forçada apresentaram menores médias de temperatura do ar na câmara do secador, com reduções de 15 a 24 % aproximadamente. Com relação a temperatura média do ar de secagem na câmara do equipamento, Goud et al. (2019) obteve uma redução de 9,8 % em seu valor durante a operação com convecção forçada em um secador solar indireto, durante a secagem de pimentão verde, uma vez que a energia térmica era removida da câmara pela corrente de ar.

As variações de temperatura em função do tempo na prateleira perfurada (T1, T2 e T3, onde as cebolinhas foram depositadas) e na face inferior (T4, T5 e T6) do secador para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) estão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Temperaturas em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do ar, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Bem como ocorreu para o ar de secagem, as temperaturas alcançadas dentro da câmara do secador pelos termopares da prateleira perfurada (T1, T2 e T3), assim como os instalados da face inferior (T4, T5 e T6), foram menores para o experimento com convecção. Nessa condição de operação, a constante renovação do ar realizada pelas ventoinhas reduz a taxa de acúmulo de energia térmica no equipamento (como relatado nos testes preliminares). Téllez et al. (2018) observou a mesma tendência na secagem de folhas de *Stevia (Rebaudiana Bertoni)* em um secador solar direto. Segundo ele, a estagnação térmica produzida na operação com convecção

natural é rompida pela maior velocidade do ar de secagem, que conseqüentemente reduz a temperatura e a torna mais homogênea na câmara do equipamento.

Além disso, como a secagem é um processo endotérmico e retira calor do ambiente, os termopares da prateleira perfurada, que permaneceram em contato com o leito de cebolinhas, apresentaram temperaturas mais baixas, comparadas às atingidas pela prateleira inferior para os quatro experimentos avaliados.

Nas Tabelas 6 e 7, estão apresentados os valores mínimos e máximos, assim como as médias e desvios-padrão das temperaturas nas seis posições dos termopares no secador (T1, T2, T3, T4, T5 e T6), para os experimentos sem e com convecção forçada realizados nos meses de Maio e Junho, respectivamente.

Tabela 6 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Maio de 2019.

Convecção	Temperaturas (°C)	Prateleira perfurada			Face inferior		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Sem	Mínima	20,7	21,2	23,0	24,1	32,4	35,1
	Máxima	50,4	43,7	45,3	56,3	54,1	54,6
	Média	39,9	37,4	38,7	46,6	47,5	46,7
	Desvio	8,8	5,0	4,9	9,0	5,3	5,1
Com	Mínima	21,8	24,0	26,4	27,2	31,7	35,1
	Máxima	35,7	35,3	36,9	45,1	43,0	43,8
	Média	29,3	29,4	31,7	38,7	37,6	38,9
	Desvio	4,1	3,9	3,4	5,0	2,9	2,2

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Junho de 2019.

Convecção	Temperaturas (°C)	Prateleira perfurada			Face inferior		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Sem	Mínima	22,1	25,4	25,3	24,3	34,1	32,9
	Máxima	53,7	53,1	51,4	53,6	52,7	54,0
	Média	39,4	39,8	38,8	43,3	45,1	43,6
	Desvio	7,7	6,7	6,0	7,8	4,6	5,7
Com	Mínima	20,2	19,8	20,4	25,5	25,3	25,5
	Máxima	35,7	38,1	40,6	47,1	42,1	44,7
	Média	29,4	30,1	32,3	35,9	35,0	36,8
	Desvio	4,6	5,2	5,5	6,5	5,3	5,5

Fonte: Próprio autor.

Entre as posições T1, T2 e T3, o valor médio de temperatura para a condição de operação com as ventoinhas desligadas foi de $38,7 \pm 3,8$ °C (Maio) e $39,4 \pm 4,0$ °C (Junho). Enquanto que para as ventoinhas ligadas, esse valor foi de $30,1 \pm 2,2$ °C (Maio) e $30,6 \pm 3,0$ °C (Junho), que representam reduções de aproximadamente 22 %.

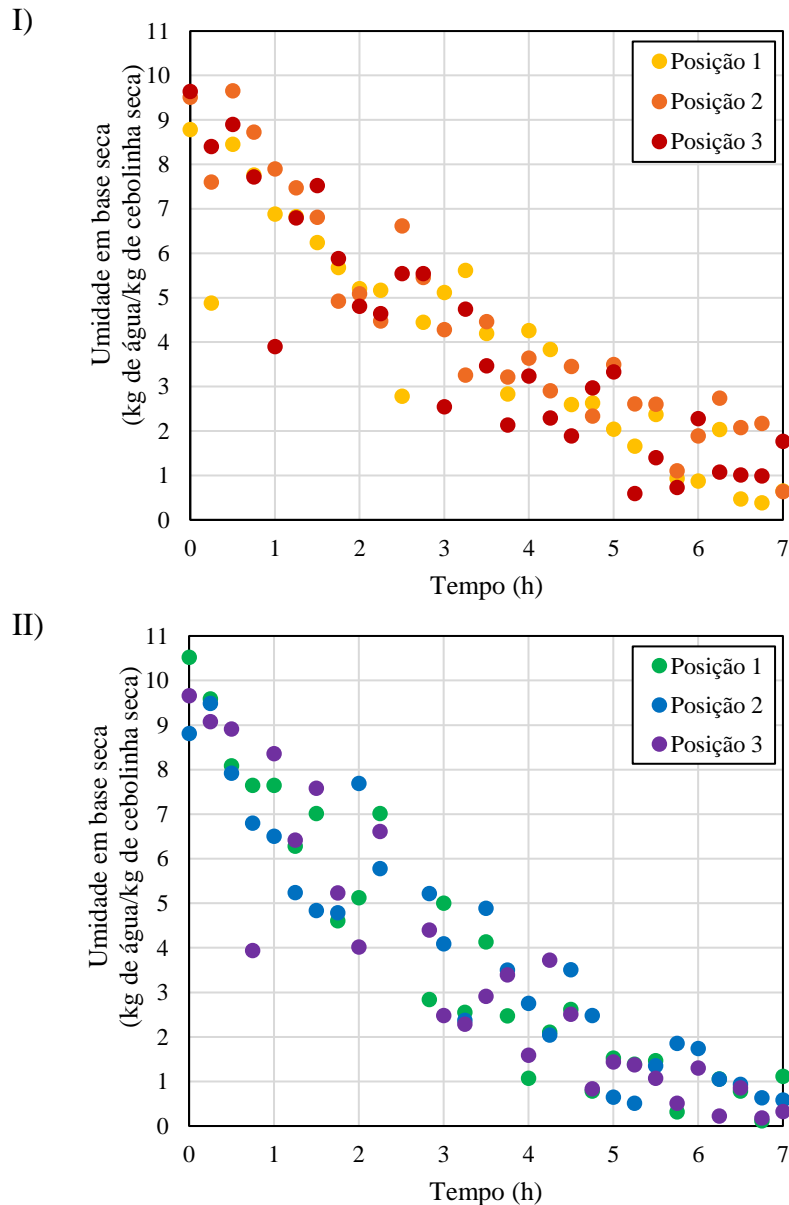
Do mesmo modo como relatado nos testes preliminares, na maioria das posições os desvios-padrão são inferiores para o experimento com convecção em relação ao experimento sem convecção, visto que a circulação do ar de secagem contribui para a redução de gradientes de temperatura dentro da câmara do secador.

Para cada amostra de cebolinha utilizada, os valores de umidade inicial variaram pouco de um experimento para outro. No mês de Maio, o leito de cebolinhas teve umidade inicial de aproximadamente $90,29 \pm 0,45$ % b.u. ($9,31 \pm 0,46$ b.s.) para o experimento sem convecção e $90,58 \pm 0,76$ % b.u. ($9,66 \pm 0,85$ b.s.) para o experimento com convecção forçada. No mês de Junho, esses respectivos valores foram de $92,08 \pm 0,31$ % b.u. ($11,64 \pm 0,49$ b.s.) e $90,73 \pm 0,46$ % b.u. ($9,81 \pm 0,53$ b.s.).

As variações de umidade em base seca (kg de água/ kg de cebolinha seca) das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada dos meses de Maio e Junho estão apresentadas nas Figuras 17 e 18, respectivamente. Foi possível observar que, do ponto de vista qualitativo, os processos de secagem apresentaram comportamento similar ao longo do tempo de experimento, para as duas condições de operação avaliadas. Devido as oscilações nos dados de umidade que os quatro experimentos apresentaram ao longo do tempo de secagem, não foi possível afirmar se o processo ocorreu no período de taxa decrescente ou se existiu um período anterior de taxa constante.

Na tentativa de reduzir os desvios observados nos valores de umidade da Figura 17, os meses de Maio e Junho divergiram em relação à amostragem do leito para medição de umidade e cor. No mês de Maio, as amostras foram retiradas diretamente do leito sem interferência externa na disposição das folhas ao longo do período de experimento. Já no mês de Junho, assim como nos meses de Setembro e Outubro, após a retirada de cada amostra do leito, o mesmo era homogeneizado por meio da mistura manual de suas folhas. Essa mudança foi realizada para garantir uniformidade do processo de secagem ao longo do comprimento e da largura do secador, mas não mostrou eficiência na redução das oscilações dos dados, como observado na Figura 18.

Figura 17 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Maio de 2019.

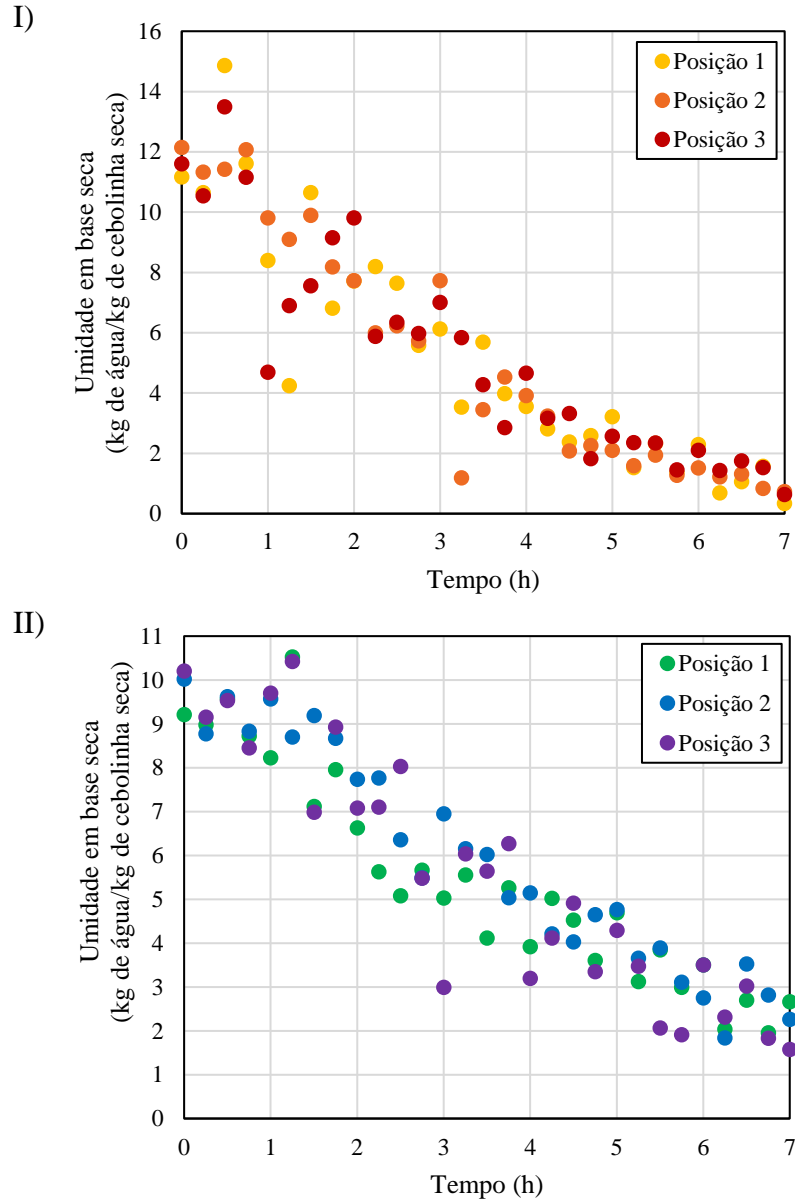


Fonte: Próprio autor.

Essas flutuações observadas nos gráficos podem ser decorrentes do procedimento de amostragem. Diferentes amostras podem evidenciar a existência de gradientes de umidade dentro do leito de cebolinhas, decorrentes das regiões do material que foram amostradas (próxima à base, ao topo ou ao centro do material). Isso significa que folhas de cebolinha com maior quantidade de água em seu interior podem ter acarretado em um valor de umidade maior do que o avaliado nas amostragens anteriores. Na Figura 19, é possível observar as diferenças de umidade existentes em uma pequena amostra do material. Observa-se que algumas regiões das folhas apresentam exsudação logo após o corte, havendo a formação de uma espécie de gel. Ainda que seja uma evidência sutil, é possível que esta seja uma das causas da formação de gradientes de umidade dentro do secador. Romuli et al. (2019) relatou que a presença de talos

e sombras influenciaram a secagem uniforme de folhas de amaranto (*Amaranthus* spp.) em um secador solar inflável alimentado por dois módulos fotovoltaicos.

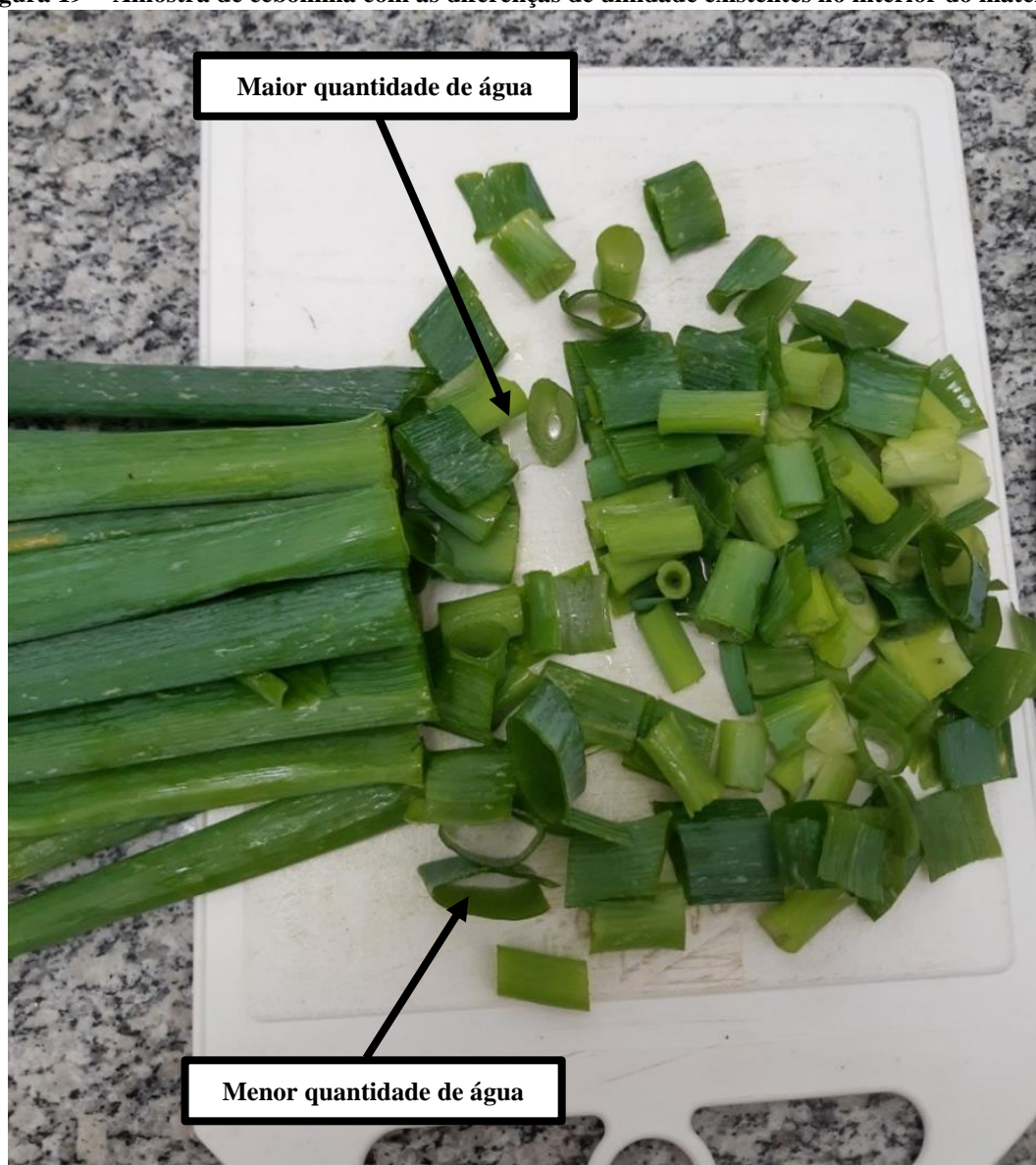
Figura 18 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Junho de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Retirar as regiões da cebolinha próximas ao talo e homogeneizar o leito a cada amostragem foram medidas adotadas, durante os experimentos, para garantir maior uniformidade do leito e menor gradiente de umidade ao longo de sua largura e comprimento. Somada a essas, outras medidas foram testadas para reduzir as variações de amostragem e assegurar melhores dados de secagem das cebolinhas e serão apresentadas nos resultados do mês de Outubro (amostras fixas de material depositadas em pequenas forminhas abertas de metal).

Figura 19 – Amostra de cebolinha com as diferenças de umidade existentes no interior do material.



Fonte: Próprio autor.

Além disso, o processo de secagem no secador solar direto ocorre em condições não uniformes que podem refletir na existência dos gradientes de umidade dentro do leito de cebolinhas. As condições do ar de secagem, temperatura e umidade relativa, assim como a intensidade de radiação solar incidente sobre o equipamento, variam ao longo das horas e secagem e influenciam na transferência de calor para o material. Como consequência, as temperaturas do leito de cebolinhas variam continuamente ao longo do processo (Figura 16) e influenciam diretamente na taxa de secagem do material. Também são observados, em um determinado instante do processo, valores ligeiramente diferentes de temperatura do leito em relação a posição de medição na prateleira perfurada do equipamento. Essas condições podem ter contribuído para os desvios de umidade em determinado tempo de amostragem.

5.2.1 Ajuste das equações de cinética de secagem

Para avaliação da cinética de secagem utilizando o adimensional de umidade (MR) simplificado para X/X_0 (Equação 1), foi utilizado o valor médio de umidade em base seca entre as três posições da prateleira perfurada do secador, para cada tempo de amostragem.

Uma vez calculados os valores para cada experimento realizado nos meses de Maio e Junho, foram feitos ajustes das equações cinéticas de secagem a estes dados, visando à verificação da influência do uso da convecção forçada sobre os valores dos parâmetros cinéticos ajustados. Em cada um dos ajustes, foi considerado que todo o processo de secagem da cebolinha ocorreu no período de taxa decrescente, em camada delgada, e as quatro equações empíricas da Tabela 3 (item 4.6.2) foram utilizadas.

Com essas considerações, a configuração do leito de cebolinhas sobre a prateleira do secador foi avaliada como uma camada homogênea e de espessura suficientemente pequena, na qual as características do ar em toda a camada eram supostas uniformes e sem variação. Além disso, segundo a hipótese de parâmetros concentrados, as variações de temperatura e umidade em relação à posição são desprezíveis quando comparadas as variações temporais (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2015). Dessa forma, o leito de cebolinhas foi avaliado considerando a mesma temperatura e umidade ao longo das posições T1, T2 e T3 de medição e amostragem, em um determinado tempo experimental.

Na Tabela 8, estão apresentados os parâmetros cinéticos (k , n e a), o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações de cinética de secagem de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada, dos meses de Maio e Junho de 2019.

Os coeficientes de determinação foram superiores a 0,900 para todos os ajustes realizados no período de taxa decrescente e oscilaram entre 0,920 a 0,955. Os valores de RMSE variaram de $5,39 \times 10^{-2}$ a $9,74 \times 10^{-2}$ e os valores de χ^2 ficaram entre $3,12 \times 10^{-3}$ a $9,82 \times 10^{-3}$. As equações de Page e Overhults, que contém dois parâmetros ajustados, descreveram melhor os experimentos sem e com convecção, em ambos os meses. Esses ajustes apresentaram os maiores coeficientes de determinação e os menores valores para a raiz quadrada do erro-médio.

O coeficiente de determinação, a raiz quadrada do erro-médio, o teste do qui-quadrado e o parâmetro n das equações de Page e Overhults apresentaram os mesmos valores em todos os ajustes. Esse resultado era esperado, visto que um rearranjo da equação de Overhults ($e^{-(k t)^n}$) e uma parametrização permite obter a equação de Page ($e^{-(k t^n)}$) e verificar que as

mesmas são equivalentes, conforme apresentado na Equação 10. Na literatura, a equação de cinética de secagem de Overhults também é conhecida como “modelo de Page modificado” (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

$$MR = e^{-(k t)^n} = e^{-(k^n t^n)} = e^{-(K t^n)} \quad (10)$$

A diferença entre as equações reside na dimensão do parâmetro k . Na equação de Page, sua dimensão é dependente do valor de n , enquanto que na equação de Overhults, esse parâmetro tem dimensão de inverso de unidade de tempo. Mesmo que o parâmetro k não tenha interpretação física em ambos os casos, o fato de sua dimensão em Overhults ser independente de n permite que esse parâmetro seja um indício da taxa de secagem, em analogia à equação de Lewis (VIEIRA, 2012).

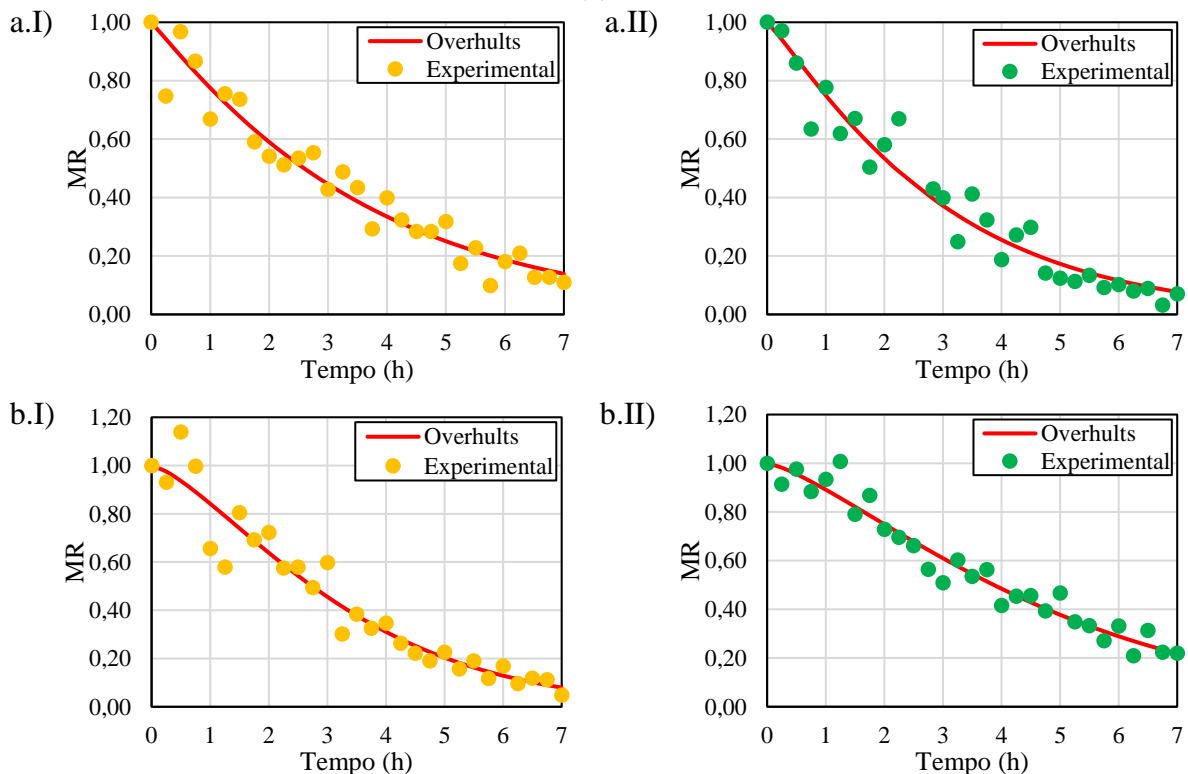
Tabela 8 – Parâmetros cinéticos (k , n , α), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada, dos meses de Maio e Junho de 2019.

Equação	Parâmetro	Maio		Junho	
		Sem convecção	Com convecção	Sem convecção	Com convecção
Lewis	R^2	0,941	0,944	0,925	0,945
	RMSE	$6,30 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-2}$	$9,74 \times 10^{-2}$	$6,84 \times 10^{-2}$
	χ^2	$4,10 \times 10^{-3}$	$5,15 \times 10^{-3}$	$9,82 \times 10^{-3}$	$4,84 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,272	0,334	0,280	0,183
Page	R^2	0,942	0,946	0,932	0,955
	RMSE	$6,24 \times 10^{-2}$	$6,78 \times 10^{-2}$	$8,10 \times 10^{-2}$	$5,39 \times 10^{-2}$
	χ^2	$4,19 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-3}$	$7,05 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$
	k (s^{-n})	0,254	0,287	0,172	0,115
	n	1,054	1,123	1,382	1,328
Overhults	R^2	0,942	0,946	0,932	0,955
	RMSE	$6,24 \times 10^{-2}$	$6,78 \times 10^{-2}$	$8,10 \times 10^{-2}$	$5,39 \times 10^{-2}$
	χ^2	$4,19 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-3}$	$7,05 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,272	0,330	0,280	0,196
	n	1,054	1,123	1,382	1,328
Henderson e Pabis	R^2	0,941	0,943	0,920	0,942
	RMSE	$6,28 \times 10^{-2}$	$7,00 \times 10^{-2}$	$8,83 \times 10^{-2}$	$6,13 \times 10^{-2}$
	χ^2	$4,24 \times 10^{-3}$	$5,28 \times 10^{-3}$	$8,38 \times 10^{-3}$	$4,03 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,268	0,342	0,316	0,204
	α	0,988	1,022	1,115	1,076

Fonte: Próprio autor.

Os valores do parâmetro k nos ajustes de Lewis e Overhults foram parecidos, uma vez que o parâmetro n de Overhults teve valores próximos da unidade. Para o mês de Maio, considerando o ajuste da mesma equação cinética para comparação, os valores de k e n foram maiores para o experimento com convecção comparados aos valores do sem convecção. No entanto, esse comportamento foi inverso para o mês de Junho, no qual o experimento sem convecção apresentou maiores valores de k e n para um mesmo ajuste. Esse resultado sugere que, no mês de Maio, o experimento com convecção forçada teve maior taxa de secagem. No mês de Junho, a queda na curva de secagem do experimento sem convecção foi mais rápida. Esse comportamento pode ser observado nas curvas ajustadas pela equação de Overhults e os valores do adimensional de umidade médio em função do tempo, que estão apresentados na Figura 20, para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b).

Figura 20 – Adimensional de umidade médio em função do tempo e ajustado pela equação de cinética de secagem de Overhults, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, dos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



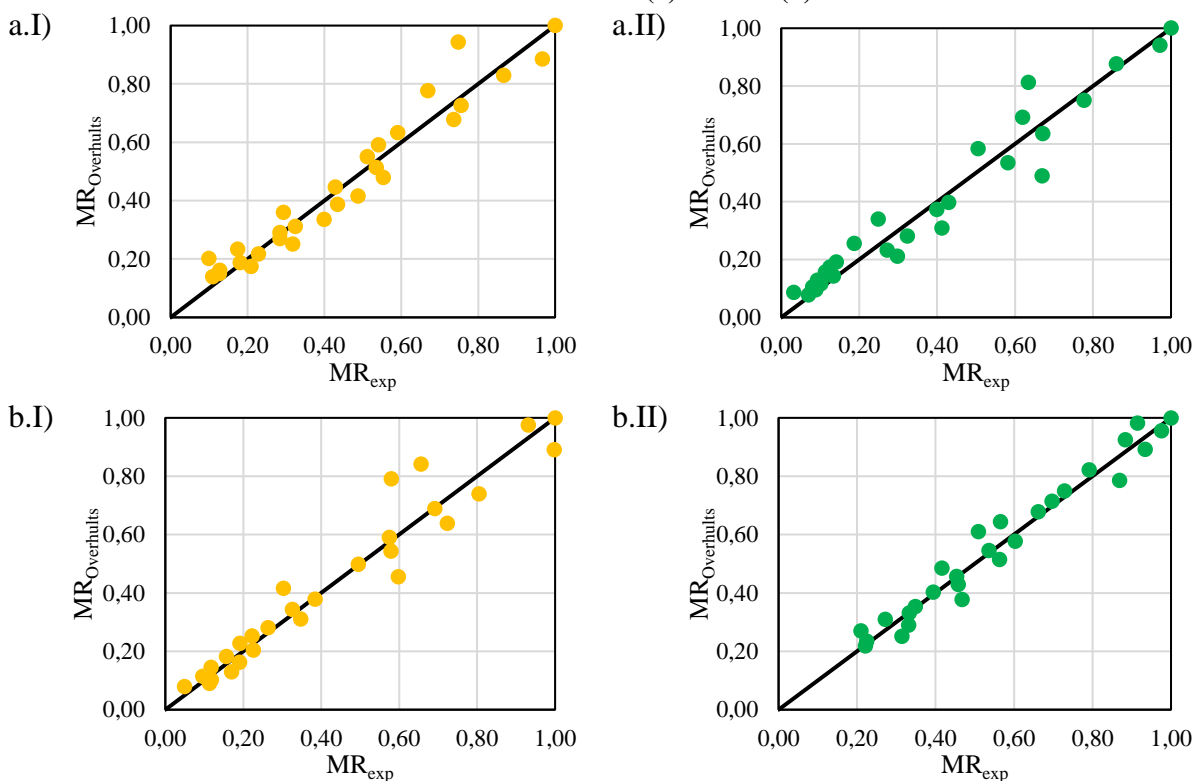
Fonte: Próprio autor.

Para 3 horas de experimento, no mês de Maio, o valor de MR está ligeiramente acima de 0,40 para o experimento sem convecção e abaixo de 0,40 para o com convecção. Enquanto que no mês de Junho, as 3 horas, o valor de MR está próximo de 0,40 para o experimento sem convecção e próximo de 0,60 para o com convecção. Possivelmente, estas variações na taxa de

secagem podem estar relacionadas com diferentes condições climáticas, uma vez que não havia controle da temperatura interna durante os experimentos.

A Figura 21 apresenta o MR calculado pela equação de Overhults ($MR_{Overhults}$) em função dos valores médios experimentais para essa grandeza (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b). No geral, uma boa concordância foi estabelecida entre os valores calculados e experimentais para ambas as condições de operação, uma vez que seus resultados se mantiveram em torno da linha reta de 45°.

Figura 21 – Adimensionais de umidade calculados pela equação de Overhults ($MR_{Overhults}$) em função dos valores experimentais médios para essa grandeza para as secagens sem (I) e com (II) convecção forçada, realizadas nos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



Fonte: Próprio autor.

No trabalho de GARCÍA et al. (2010), a cinética de secagem de cebolinhas (*Allium fistulosum*) foi avaliada em camada delgada com diferentes temperaturas do ar de secagem (50, 60 e 70 °C) e utilizando um escoamento de ar de 1,5 m/s. As curvas de secagem foram ajustadas a dez equações matemáticas de cinética de secagem que consideram período de taxa decrescente para todo o processo. A equação Henderson e Pabis modificada ($MR = a e^{-k t} + b e^{-g t} + c e^{-h t}$), a equação de Midilli ($MR = e^{-k t^n} + b t$) e uma abordagem para o modelo de difusão ($MR = a e^{-k t} + (1 - a) e^{-k b t}$) foram os que melhor descreveram as curvas de secagem das cebolinhas secas a 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Os formatos das curvas de secagem de outros produtos alimentícios, avaliados em camada delgada, também sugeriram que todo o processo de secagem ocorreu no período de taxa decrescente. Yaldýz e Ertekýn (2001) secaram abóbora, pimentões, feijão verde e cebola em um secador solar indireto de convecção forçada. Akpinar (2006) avaliou a secagem ao sol de plantas aromáticas como hortelã, salsa e manjeriço. Tunde-Akintunde (2011) secou pimenta Chilli, sem e com pré-tratamento, ao sol e em um secador solar direto do tipo gabinete. Sallam et al. (2013) secaram hortelã inteira em dois secadores solares (direto e indireto) com as mesmas dimensões e ambos operados com convecção natural e forçada. Ísmail e Akyol (2016) avaliaram a secagem solar ao ar livre de tomate cereja sem e com a realização de pré-tratamento.

Essa diminuição contínua da taxa, que ocorre no período de taxa decrescente, indica que o processo é controlado pela difusão interna ao produto. Nessa condição, a secagem envolve dois processos: o movimento da umidade no interior do produto para a superfície e a remoção da umidade na superfície (INYANG; OBOH; ETUK, 2018).

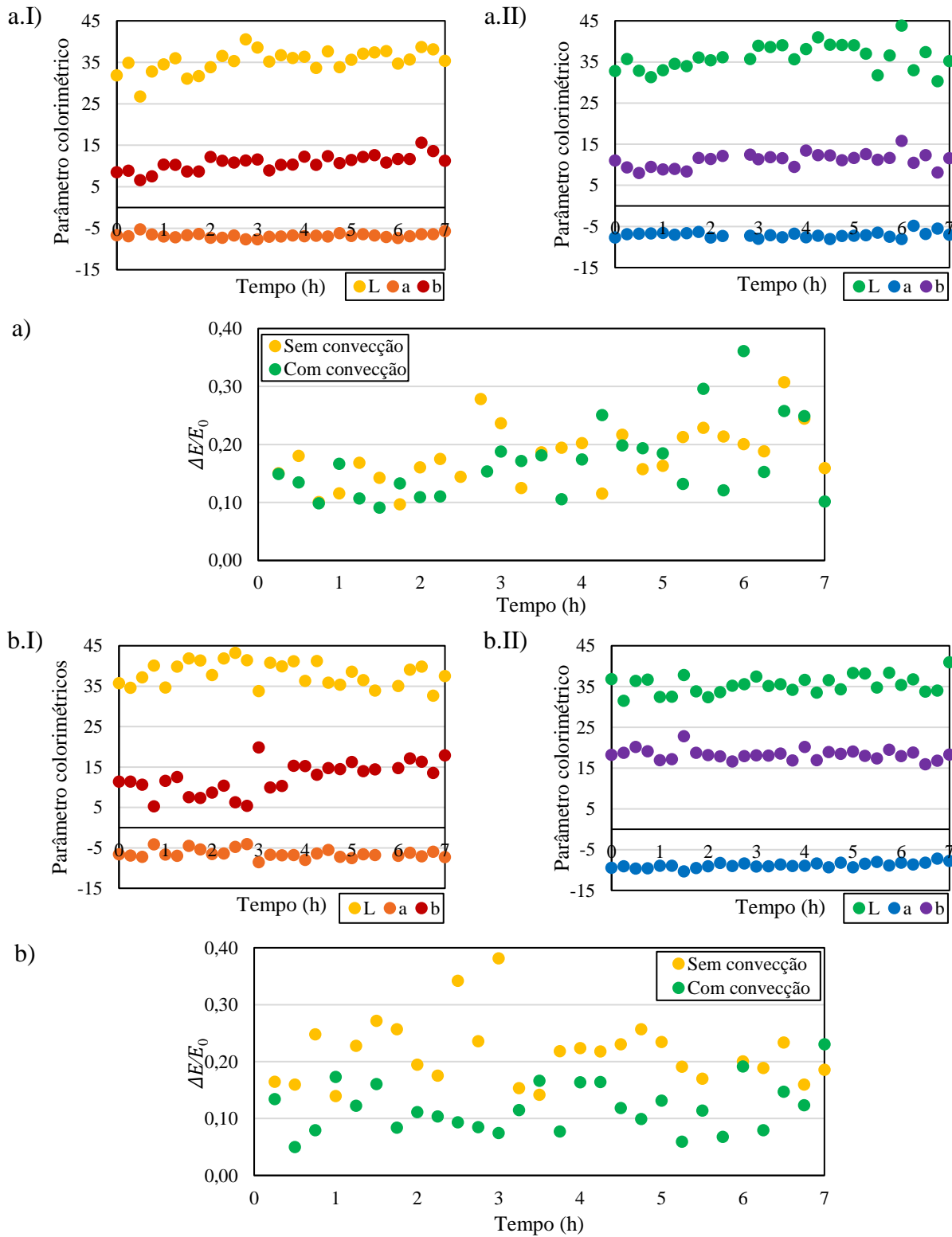
5.2.2 Colorimetria

A Figura 22 apresenta a variação dos parâmetros colorimétricos médios L (luminosidade ou eixo preto-branco), a (eixo verde-vermelho) e b (eixo azul-amarelo) da escala CIELab ao longo do tempo de secagem, assim como a diferença total de cores média padronizada pelo valor do ponto inicial ($\Delta E/E_0$), para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados nos meses de Maio (a) e Junho (b). Esses parâmetros colorimétricos médios foram calculados por média aritmética entre os valores obtidos para as três posições de amostragem do secador ao longo do tempo.

As flutuações nos gráficos podem ser decorrentes das regiões do material que foram amostradas. Assim como influenciaram os dados de umidade, as variações contínuas nas condições climáticas e nos valores de temperatura podem ter contribuído para as oscilações nos dados de cor ao longo dos processos de secagem.

Apesar das flutuações, não foram observadas variações significativas em relação aos parâmetros de cor durante os experimentos de secagem. Os valores negativos do parâmetro a indicam a cor verde do material que foi mantida ao longo do processo. García et al. (2010) relatou a importância de manter a tonalidade verde para a cebolinha, pois a cor dos alimentos é um considerável parâmetro de qualidade. Além disso, uma alta variação de cor pode diminuir a oportunidade de mercado do produto (ÍSMAIL; AKYOL, 2016).

Figura 22 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta E/E_0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, dos meses de Maio (a) e Junho (b) de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Esperava-se que houvesse alteração no ΔE do material, com base nos resultados de García et al. (2010) para a secagem de cebolinha em camada delgada sob diferentes temperaturas. Em seu trabalho, os parâmetros L foram maiores no produto seco e os parâmetros a foram menos negativos, indicando uma cor verde menos intensa após o processo. Além disso, como consequência dos diferentes valores obtidos para o parâmetro L , seus resultados para as diferenças totais de cores entre a cebolinha fresca e seca foram relativamente altos.

Porém, não foi possível observar tal tendência nos dados experimentais obtidos nas secagens realizadas com o secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico. As diferenças totais de cores padronizadas pelos valores dos pontos iniciais apresentaram valores baixos durante as secagens (menores que 40%), o que corresponde as pequenas variações de cor sofridas pelo leito de cebolinhas.

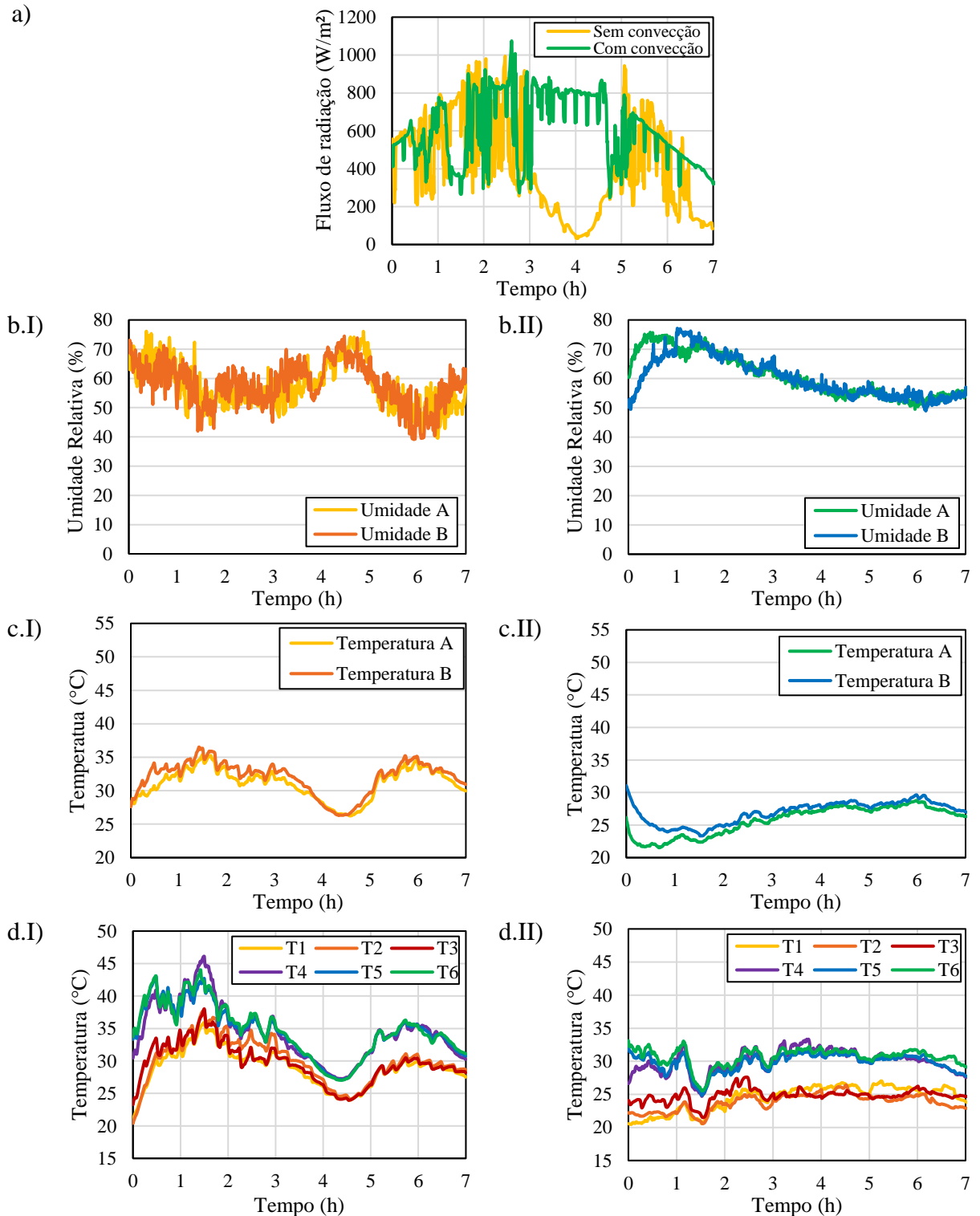
5.3 Secagens em Setembro de 2019

Para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Setembro de 2019, a Figura 23 apresenta os fluxos de radiação solar (a), as condições do ar de secagem, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo.

Durante o período de secagem, a passagem de nuvens provocou oscilações na intensidade da radiação solar que atingia o secador. Para a secagem sem convecção, a média da radiação solar chegou a $95 \pm 49 \text{ W/m}^2$ entre 3,5 e 4,5 horas de experimento, que corresponde a 12h30min e 13h30min do dia. Consequentemente, as temperaturas dentro do secador, tanto para a prateleira perfurada com cebolinhas (T1, T2 e T3) quanto para a face inferior (T4, T5 e T6), assim como as temperaturas do ar de secagem nas posições A e B da câmara apresentaram uma redução para o período.

Nos dois experimentos realizados, as condições do ar de secagem apresentaram poucas variações ao longo do tempo. Os valores de umidade relativa se mantiveram altos, enquanto que os valores de temperatura permaneceram baixos durante toda a secagem. Essa condição do ar com alta umidade e baixa temperatura, somada a instabilidade da radiação solar durante o dia, contribuíram para as menores temperaturas na câmara do secador.

Figura 23 – Fluxo de radiação solar (a), umidade relativa (b) e temperatura (c) do ar nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Setembro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9 apresenta uma comparação entre os valores médios dos parâmetros monitorados para os experimentos sem e com convecção dos meses de Maio, Junho e Setembro de 2019.

Tabela 9 – Comparação entre os valores médios dos parâmetros monitorados durante as secagens sem e com convecção forçada dos meses de Maio, Junho e Setembro de 2019.

Parâmetro		Mês/ Convecção					
		Maio		Junho		Setembro	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Fluxo de radiação (W/m ²)	Média	589	521	517	507	400	605
	Desvio	129	99	193	200	244	178
Temperatura do leito de cebolinhas (°C)	Média	38,7	30,1	39,4	30,6	29,5	24,4
	Desvio	6,1	3,7	6,7	5,1	3,1	1,3
Temperatura da face inferior (°C)	Média	47,0	38,4	44,0	35,9	34,6	30,1
	Desvio	5,9	3,2	5,6	5,7	4,1	1,4
Temperatura do ar de secagem (°C)	Média	37,9	31,4	38,6	30,6	31,5	26,3
	Desvio	5,9	3,3	3,5	4,3	2,4	1,9
Umidade relativa do ar de secagem (%)	Média	32,5	42,1	32,3	45,5	57,6	60,7
	Desvio	11,4	8,2	8,9	13,7	7,0	6,9

Fonte: Próprio autor.

Entre os experimentos sem convecção, o realizado no mês de Setembro teve a menor média de radiação incidente com o maior valor de desvio padrão, o qual reflete as oscilações observadas no gráfico da Figura 23.a. Além disso, o ar de secagem teve aproximadamente o dobro de umidade relativa que nos experimentos sem convecção de Maio e Junho.

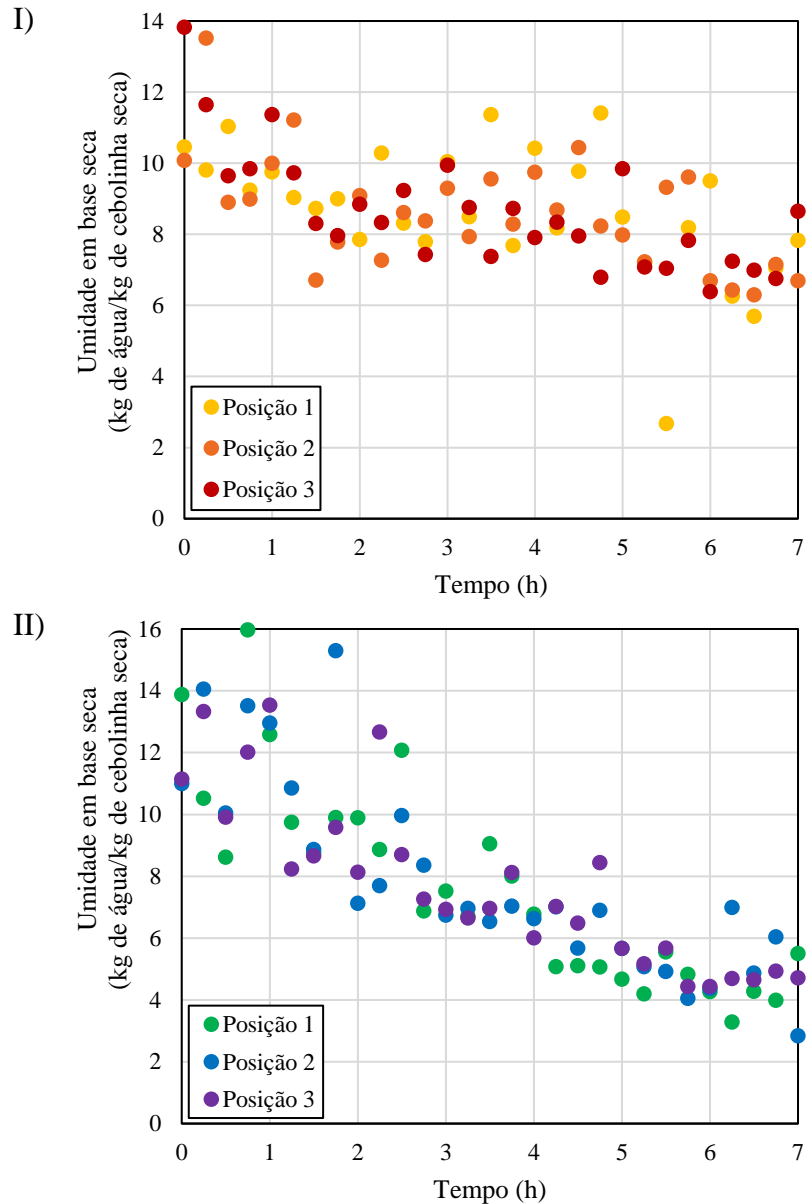
Com relação aos experimentos com convecção, o experimento do mês de Setembro apresentou os menores valores para as temperaturas do leito de cebolinhas e da face inferior, apesar de atingir a maior média de radiação incidente. Esse resultado pode ser explicado pela condição do ar de secagem que teve o maior valor médio de umidade relativa com a menor temperatura, comparando os experimentos com as ventoinhas ligadas.

Na Figura 24, estão ilustradas as curvas de secagem em função do tempo, para as três posições de amostragem nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Setembro. Para o experimento sem convecção, o leito de cebolinhas teve umidade inicial de aproximadamente $91,84 \pm 1,24$ % b.u. ($11,46 \pm 2,06$ b.s.) e, para o com convecção, esse valor foi de $92,24 \pm 0,91$ % b.u. ($12,01 \pm 1,63$ b.s.).

Como consequência das condições climáticas observadas, as reduções da umidade do leito de cebolinhas em função do tempo de secagem foram menores do que as relatadas nos meses de Maio e Junho, principalmente para o experimento sem convecção. Nesse último, o menor fluxo de radiação solar incidente no secador contribuiu para que o material perdesse

uma quantidade menor de água ao longo da secagem, comparado ao experimento com convecção forçada do mesmo mês.

Figura 24 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha em função do tempo, para as três posições de amostragem, nos experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mês de Setembro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

5.3.1 Ajuste das equações de cinética de secagem

Assim como realizado para os dados dos meses anteriores, foi utilizado o valor médio de umidade em base seca entre as três posições da prateleira perfurada do secador, para cada tempo de amostragem, a fim de calcular o adimensional de umidade médio em função do tempo. Uma vez calculados os valores para cada experimento realizado no mês de Setembro, as equações empíricas da Tabela 3 (item 4.6.2) foram ajustados a estes dados, considerado que

todo o processo de secagem da cebolinha ocorreu no período de taxa decrescente, em camada delgada.

Na Tabela 10, estão apresentados os parâmetros cinéticos (k , n e a), o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações de cinética de secagem de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Setembro de 2019.

Tabela 10 – Parâmetros cinéticos (k , n e a), o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) dos ajustes das equações de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Setembro de 2019.

Equação	Parâmetro	Setembro	
		Sem convecção	Com convecção
Lewis	R^2	0,582	0,859
	RMSE	$8,50 \times 10^{-2}$	$9,33 \times 10^{-2}$
	χ^2	$7,49 \times 10^{-3}$	$9,02 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,078	0,143
Page	R^2	0,619	0,858
	RMSE	$7,07 \times 10^{-2}$	$8,84 \times 10^{-2}$
	χ^2	$5,37 \times 10^{-3}$	$8,40 \times 10^{-3}$
	k (s^{-n})	0,162	0,100
	n	0,515	1,247
Overhults	R^2	0,619	0,858
	RMSE	$7,07 \times 10^{-2}$	$8,84 \times 10^{-2}$
	χ^2	$5,37 \times 10^{-3}$	$8,40 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,029	0,157
	n	0,515	1,247
Henderson e Pabis	R^2	0,580	0,859
	RMSE	$7,43 \times 10^{-2}$	$8,80 \times 10^{-2}$
	χ^2	$5,92 \times 10^{-3}$	$8,33 \times 10^{-3}$
	k (s^{-1})	0,056	0,162
	a	0,910	1,075

Fonte: Próprio autor.

Os coeficientes de determinação foram inferiores a 0,900 para todos os ajustes realizados sobre os dados do mês de Setembro e oscilaram entre 0,580 a 0,859. Os valores de RMSE variaram de $7,07 \times 10^{-2}$ a $9,33 \times 10^{-2}$ e os valores de χ^2 ficaram entre $5,37 \times 10^{-3}$ a $9,02 \times 10^{-3}$.

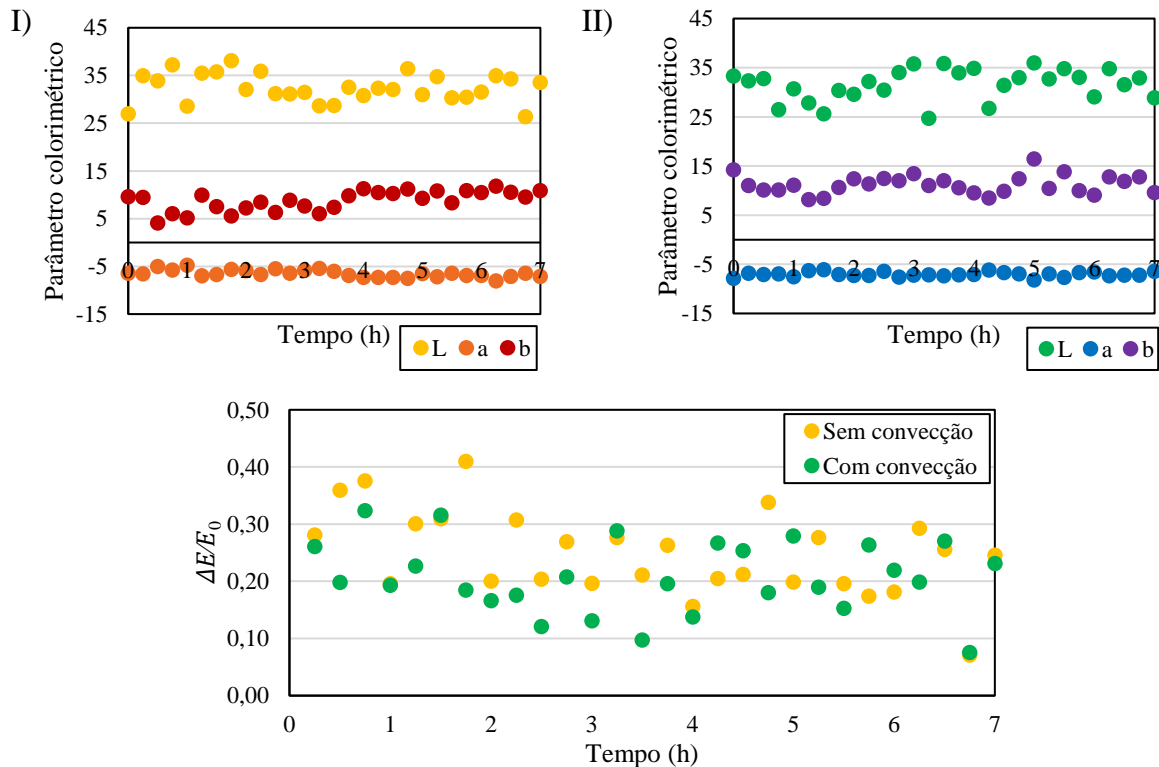
O experimento sem convecção não apresentou curva decrescente de secagem, como avaliado nos meses anteriores, e isso tem relação com as condições climáticas comentadas anteriormente. No experimento com convecção, a variabilidade dos dados no período inicial da secagem comprometeu a qualidade do ajuste. Além disso, o tempo de experimento sob as condições climáticas para esse dia não foi suficiente para que a secagem atingisse valores baixos de umidade.

Dessa forma, os resultados obtidos para a secagem do leito de cebolinhas nos experimentos sem e com convecção forçada do ar desse mês não podem ser representados pelas equações de cinética de secagem propostas.

5.3.2 Colorimetria

Na Figura 25, estão apresentados os parâmetros colorimétricos médios L , a e b da escala CIELab ao longo do tempo de secagem, assim como a diferença total de cores média padronizada pelo valor do ponto inicial ($\Delta E/E_0$), para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Setembro.

Figura 25 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta E/E_0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, do mês de Setembro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Bem como foi observado para os meses de Maio e Junho, os parâmetros colorimétricos sofreram pouca variação durante os experimentos. Assim também, as diferenças totais de cores padronizadas pelos valores dos pontos iniciais ficaram abaixo de 40% durante a maior parte dos experimentos.

5.4 Secagens em Outubro de 2019

Para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Outubro de 2019, a Figura 26 apresenta os fluxos de radiação solar (a), as condições do ar de secagem, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo.

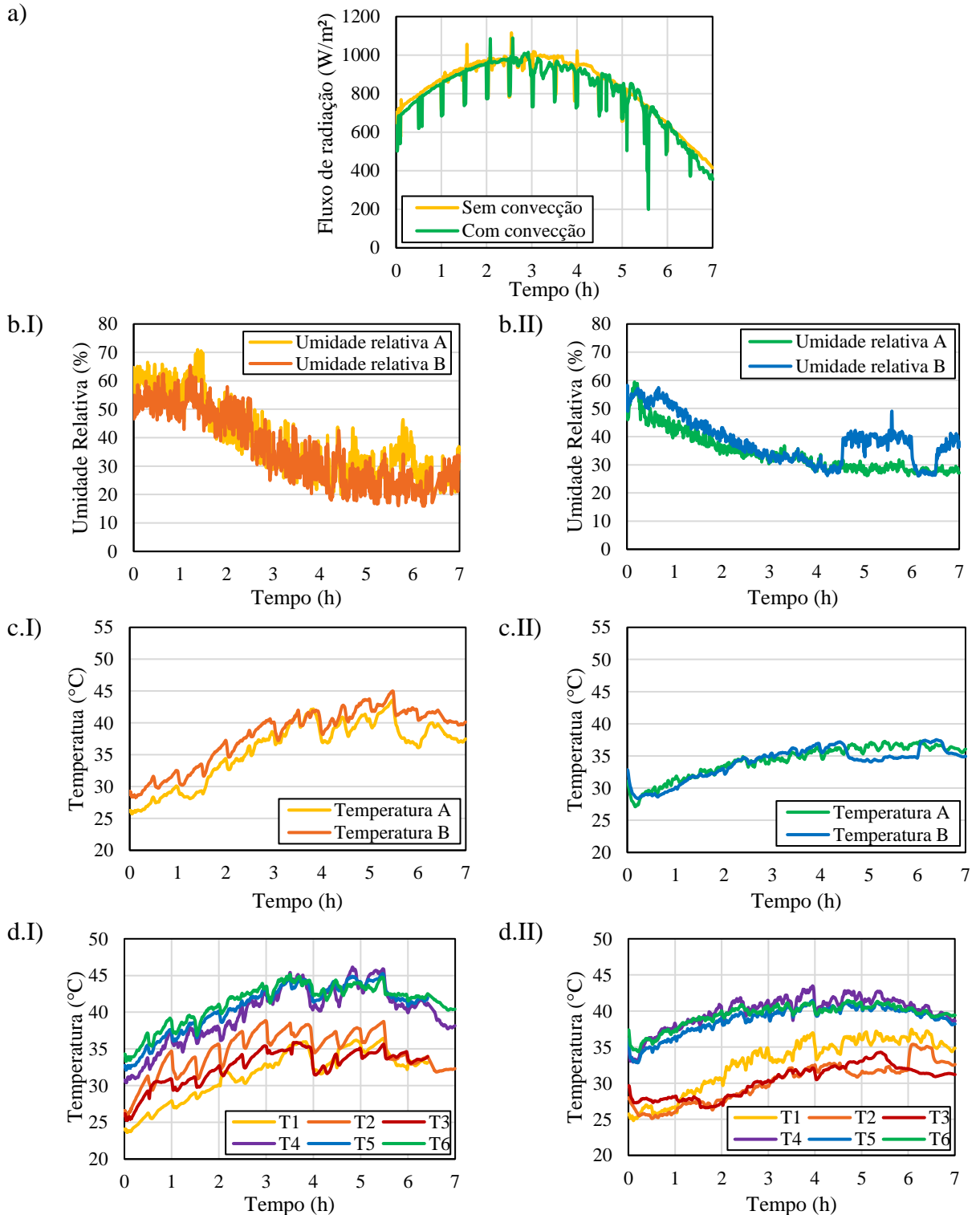
Os valores médios da radiação solar foram de $772 \pm 148 \text{ W/m}^2$ e $798 \pm 169 \text{ W/m}^2$ para os experimentos sem e com convecção forçada, respectivamente. As maiores intensidades foram observadas próximo ao final da manhã e início da tarde, entre 2 e 4 h de experimento, que correspondem ao horário de 11h às 13h do dia. Nesse período, os fluxos médios de radiação foram de $962 \pm 60 \text{ W/m}^2$ e $940 \pm 60 \text{ W/m}^2$ para os experimentos sem e com convecção, respectivamente. As reduções repentinas no fluxo de radiação estão relacionadas à formação de nuvens no período ou quando o secador era aberto para amostragem a cada 30 minutos.

Durante a operação sem convecção forçada, as temperaturas do ar de secagem nas posições A e B da câmara do secador variaram de 25,8 a 43,6 °C e 28,3 a 45,0 °C, respectivamente, com médias de $32,0 \pm 6,1 \text{ °C}$ e $34,4 \pm 5,8 \text{ °C}$ para as mesmas posições. Na maior parte do tempo, a temperatura do ar na posição B foi superior à da posição A, o que pode ser atribuído ao tempo de permanência do ar no interior do secador. Nesse sentido, a energia fornecida pela radiação para aquecer o ar era superior à energia removida pelo processo de secagem endotérmica, resultando em um pequeno acúmulo na câmara do equipamento e, consequentemente, em um aumento na temperatura. A umidade relativa variou de 19,9 a 71,0 % na posição A do secador e de 15,9 a 65,5 % na posição B.

Para o experimento com convecção forçada, a temperatura do ar de secagem variou entre 27,1 a 37,3 °C e 28,4 a 37,5 °C para as posições A de entrada e B de saída, respectivamente. As médias foram de $34,3 \pm 2,5 \text{ °C}$ e $33,9 \pm 2,5 \text{ °C}$ para as mesmas posições (valores próximos aos obtidos na secagem sem convecção). Os valores de desvio padrão foram mais baixos para a secagem com convecção forçada, como consequência da renovação do ar realizada pelas ventoinhas. A umidade relativa na posição A de entrada e B de saída variou de 26,1 a 59,4 % e

de 26,0 a 58,2 %, respectivamente. Reduções repentinas nos perfis de temperaturas estão relacionadas à abertura do secador para amostragem a cada 30 minutos.

Figura 26 – Fluxo de radiação solar (a), as condições do ar de secagem, umidade relativa (b) e temperatura (c) nas posições A e B da câmara do secador, assim como os perfis de temperaturas de 1 a 6 (d) em função do tempo para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada realizados no mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Nas Tabela 11, estão apresentados os valores mínimos e máximos, assim como as médias e desvios-padrão das temperaturas nas seis posições dos termopares no secador (T1, T2, T3, T4, T5 e T6), para os experimentos sem e com convecção forçada realizados no mês de Outubro.

Tabela 11 – Temperaturas mínimas e máximas, médias e desvios-padrão nas seis posições dos termopares (T1, T2, T3, T4, T5 e T6) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Outubro de 2019.

Convecção	Temperaturas (°C)	Prateleira perfurada			Face inferior		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Sem	Mínima	23,7	25,8	25,3	30,4	32,1	33,3
	Máxima	36,4	38,9	35,9	46,2	45,3	45,1
	Média	28,4	31,4	29,8	36,5	37,4	38,3
	Desvio	4,6	4,6	3,9	5,3	4,8	4,3
Com	Mínima	24,8	25,1	26,6	32,9	32,8	34,4
	Máxima	37,5	35,4	34,3	43,5	41,5	41,5
	Média	32,9	30,1	30,3	39,9	38,8	39,4
	Desvio	3,7	2,8	2,2	2,2	2,0	1,6

Fonte: Próprio autor.

Entre as posições T1, T2 e T3, o valor médio de temperatura para a condição de operação com as ventoinhas desligadas foi de $29,9 \pm 2,5$ °C; enquanto que para as ventoinhas ligadas, esse valor foi de $31,1 \pm 1,7$ °C, apenas 4,0 % maior. Para a face inferior sem material, a temperatura média (entre T4, T5 e T6) foi de $37,4 \pm 2,8$ °C para o experimento sem convecção e de $39,4 \pm 1,1$ °C para o com convecção forçada. Assim como foi observado nas secagens dos meses anteriores, o processo endotérmico contribuiu para que o leito de cebolinhas apresentasse menores temperaturas, quando comparadas às registradas na face inferior do equipamento.

A umidade inicial do leito de cebolinhas frescas era de aproximadamente $91,01 \pm 0,15$ % b.u. ($10,12 \pm 0,18$ b.s.) e $91,46 \pm 0,16$ % b.u. ($10,71 \pm 0,22$ b.s.) para os experimentos sem e com convecção forçada, respectivamente. Para as amostras fixas (depositadas em pequenas forminhas abertas de metal), a umidade inicial era de $91,30 \pm 0,63$ % b.u. ($10,54 \pm 0,82$ b.s.) e $90,84 \pm 0,33$ % b.u. ($9,93 \pm 0,39$ b.s.) para a mesma sequência de experimentos.

A umidade média inicial e final em base seca (kg de água/ kg de cebolinha seca) entre as três posições na prateleira perfurada do secador, para os experimentos sem e com convecção forçada, estão apresentados na Tabela 12. Apesar dos fluxos de radiação solar, as condições do ar de secagem e os perfis de temperaturas apresentaram comportamentos similares, os processos

de secagem atingiram resultados finais diferentes, sendo que a secagem com convecção alcançou valores menores de umidade final.

Tabela 12 – Umidade inicial e final (b.s.) para as secagens sem e com convecção forçada realizadas no mês de Outubro de 2019.

Convecção		Amostras do leito		Amostras fixas	
		Inicial	Final	Inicial	Final
Sem	Média	10,12	1,79	10,54	1,69
	Desvio	0,18	0,25	0,82	0,90
Com	Média	10,71	1,01	9,93	0,36
	Desvio	0,22	0,30	0,39	0,24

Fonte: Próprio autor.

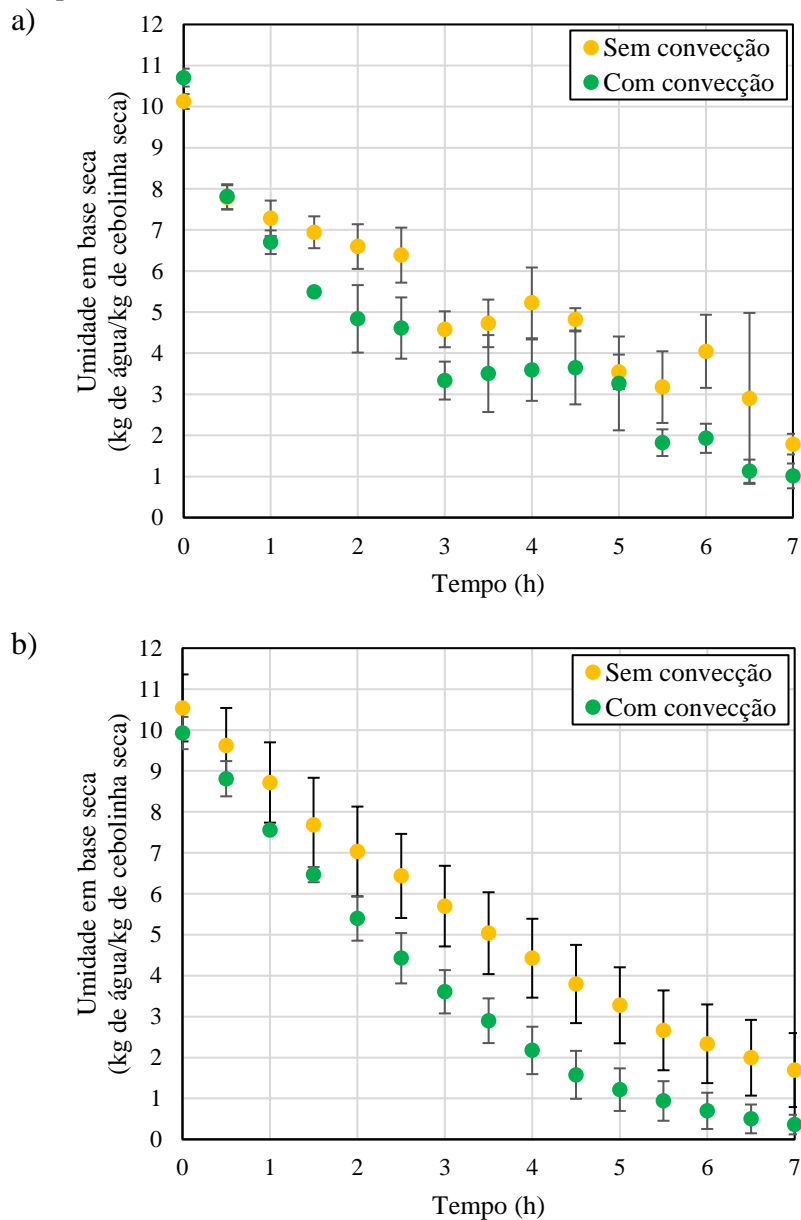
Na Figura 27, estão ilustradas as curvas de secagem em função do tempo para as amostras retiradas diretamente do leito de cebolinhas (a) e para as amostras fixas (b) nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro. Nesses gráficos, os valores médios de umidade do leito foram representados com barras de erro que sinalizam os desvios padrão entre as três posições de amostragem.

Assim como ocorreu nos meses anteriores para as amostras do leito, os valores de umidade apresentaram flutuações ao longo de todo o processo, o que pode ser observado pelas variações de tamanhos das barras de erros (Figura 27.a). Com base nesses resultados, não foi possível afirmar se a secagem apresentou um período de taxa constante ou se ocorreu totalmente no período de taxa decrescente. As três amostras mantidas fixas, nas posições de amostragem do leito, foram utilizadas a fim de diminuir as flutuações e aprimorar a análise do processo de secagem das cebolinhas. Ao realizar esse procedimento, as mesmas amostras de cebolinha tiveram seu conteúdo de umidade medido durante todo o processo de secagem (Figura 27.b).

Para o valor médio de umidade entre as amostras fixas, os formatos das curvas de secagem sugerem um período de taxa constante seguido por um período de taxa decrescente. Para determinar a umidade crítica que finaliza o período de secagem à taxa constante, uma reta foi ajustada aos dados de adimensional de umidade em função do tempo para as amostras fixas, conforme explicado no item 4.6.1. Para a secagem sem convecção forçada, a umidade crítica encontrada foi de $88,3 \pm 1,5$ % b.u. ($7,7 \pm 1,2$ b.s.) às 1,50 horas de experimento, o que representa $72,9 \pm 12,3$ % da umidade inicial. Para a secagem com convecção, esse valor foi de $81,4 \pm 2,1$ % b.u. ($4,4 \pm 0,6$ b.s.) no tempo de 2,50 horas, o que representa $44,6 \pm 6,4$ % da umidade inicial.

El-Sebaili e Shalaby (2013) também observaram duas etapas diferentes durante a secagem de hortelã em um secador solar indireto de convecção forçada, já que no início do processo a umidade na superfície do material foi evaporada. Eltawil et al. (2018) observou o mesmo comportamento na secagem de batatas em um secador de túnel de modo misto alimentado por sistema fotovoltaico. Segundo esses autores, parte da energia térmica transferida pelo fluxo de ar de secagem ao material é usada para evaporar a umidade em sua superfície. Outra parte da energia é transferida para o interior do material, causando um aumento em sua temperatura. Conseqüentemente, a água contida no interior é transferida para a superfície, repondo a umidade perdida naquela região.

Figura 27 – Umidade em base seca das amostras de cebolinha do leito (a) e fixas (b) em função do tempo, nos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

5.4.1 Ajuste das equações de cinética de secagem

Na Tabela 13, estão apresentados os parâmetros cinéticos para o ajuste linear (α , β) realizado sobre o período de taxa constante e para o ajuste exponencial (k , n e a) realizado sobre o período de taxa decrescente, assim como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado (χ^2) para os ajustes das equações de cinética de secagem de Newton/Lewis, Page, Overhults e Henderson e Pabis nos experimentos sem e com convecção forçada, do mês de Outubro de 2019.

Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro-médio (RMSE), teste do qui-quadrado (χ^2) e parâmetros cinéticos para o ajuste linear (α , β) e exponencial (k , n , a) dos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019.

Equação	Parâmetro	Sem convecção	Com convecção	
Taxa constante $y = \alpha * x + \beta$	R^2	0,999	0,999	
	α (s^{-1})	-0,178	-0,227	
	β	1,000	1,000	
Taxa decrescente	Lewis	R^2	0,993	0,997
		RMSE	$3,07 \times 10^{-2}$	$3,39 \times 10^{-2}$
		χ^2	$1,03 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-3}$
		k (s^{-1})	0,227	0,378
	Page	R^2	0,995	0,999
		RMSE	$1,32 \times 10^{-2}$	$4,69 \times 10^{-3}$
		χ^2	$2,09 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-5}$
		k (s^{-n})	0,169	0,223
	Overhults	n	1,209	1,387
		R^2	0,995	0,999
RMSE		$1,32 \times 10^{-2}$	$4,69 \times 10^{-3}$	
χ^2		$2,09 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-5}$	
Henderson e Pabis	k (s^{-1})	0,230	0,339	
	n	1,209	1,387	
	R^2	0,989	0,996	
	RMSE	$1,99 \times 10^{-2}$	$9,14 \times 10^{-3}$	
	χ^2	$4,76 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-4}$	
	k (s^{-1})	0,259	0,517	
	a	1,126	1,673	

Fonte: Próprio autor.

A taxa de secagem da cebolinha no experimento com convecção forçada foi maior do que no sem convecção, principalmente após a primeira hora de cada experimento. Percebe-se pela inclinação da reta ajustada no período de taxa constante (parâmetro α) que seu valor foi maior no experimento com convecção forçada do ar de secagem. Com esta operação, a temperatura média do leito de cebolinhas (entre as posições T1, T2 e T3) foi de $27,7 \pm 0,9$ °C e a radiação incidente média foi de 851 ± 106 W/m² durante as 2,50 horas do período de taxa constante. Para o experimento sem convecção forçada, essa temperatura média foi de $26,2 \pm 1,1$ °C e a radiação média foi de 718 ± 94 W/m² durante as 1,50 horas do período de taxa constante. Como as condições são aproximadas, estes resultados expressam que o período de taxa constante pode ter sido controlado pela convecção do ar de secagem.

Em relação à taxa de secagem, Sallam et al. (2013) obteve o mesmo resultado no primeiro dia de secagem solar de hortelã sob convecção natural e forçada. Segundo ele, as maiores taxas de secagem dos experimentos com convecção podem ser devido ao maior coeficiente de transferência de massa associado à essa condição de operação, uma vez que a maior velocidade do ar reduz a resistência à transferência de massa. Poonia, Singh e Jain (2018) avaliou a ameixa indiana sob secagem solar por convecção natural e forçada e obteve uma taxa de secagem superior para esta última condição operacional. Segundo Djebli et al. (2020) e Ekka et al. (2020), a velocidade do ar de secagem afeta positivamente a cinética de secagem durante as primeiras horas do processo. No entanto, essa influência se torna insignificante para produtos cuja cinética de secagem é controlada pela difusão interna de água.

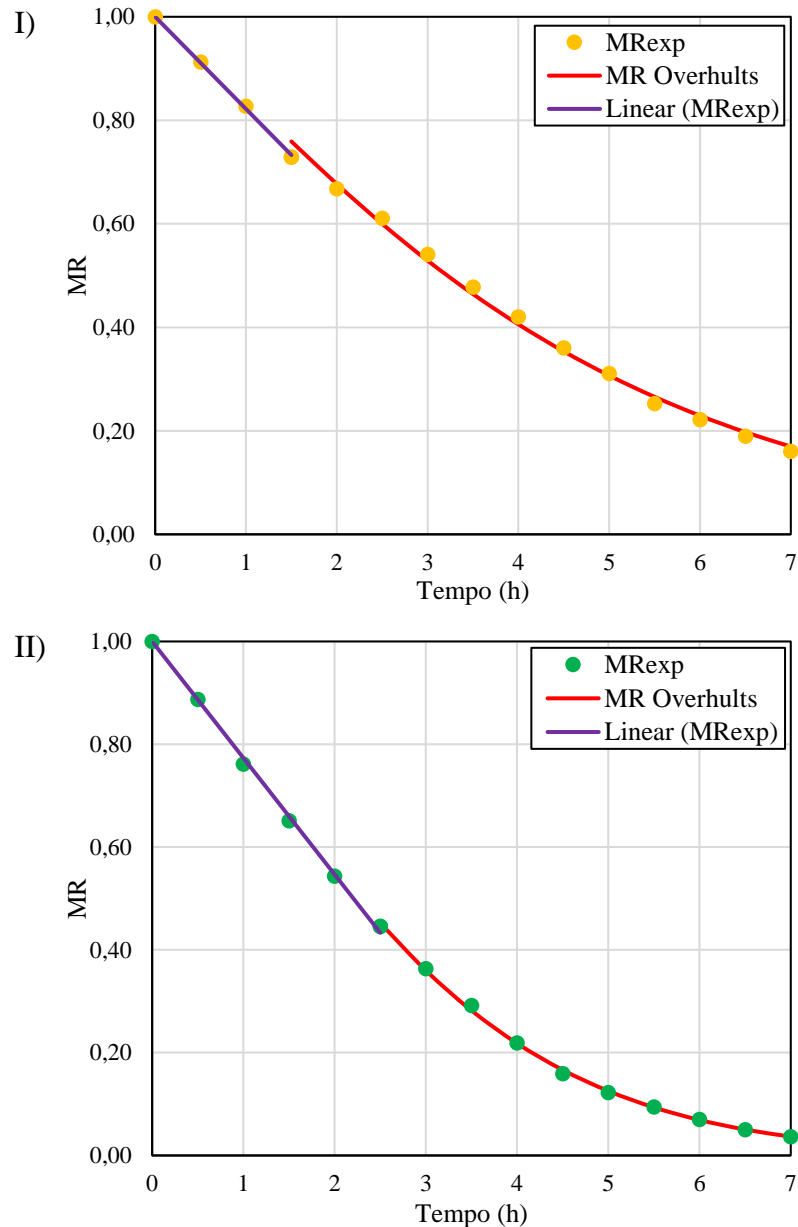
Os coeficientes de determinação foram superiores a 0,900 para todos os ajustes realizados no período de taxa decrescente e variaram de 0,989 a 0,999. O RMSE variou de $4,69 \times 10^{-3}$ a $3,39 \times 10^{-2}$ e o χ^2 variou de $2,75 \times 10^{-5}$ a $1,28 \times 10^{-3}$. As equações de Page e Overhults melhor descreveram os experimentos de secagem sem e com convecção forçada.

Assim como observado nos experimentos de Maio e Junho, os valores do parâmetro k nos ajustes de Lewis e Overhults foram semelhantes, uma vez que o parâmetro n de Overhults apresentou valores próximos à unidade. Para o experimento de secagem com convecção forçada, os valores de k e n foram maiores em comparação aos valores do experimento sem convecção, considerando o ajuste da mesma equação cinética para comparação. Esse resultado também sugere que o experimento com convecção forçada teve uma taxa de secagem mais alta.

As retas (Linear MR_{exp}) definidas no período de taxa constante, as curvas ajustadas pela equação de Overhults ($MR_{Overhults}$) no período de taxa decrescente e os valores médios do

adimensional de umidade (MR_{exp}) estão apresentados na Figura 28, para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro.

Figura 28 – Retas (Linear MR_{exp}) definidas no período de taxa constante, curvas ajustadas pela equação de cinética de secagem de Overhults ($MR_{Overhults}$) no período de taxa decrescente e os valores médios do adimensional de umidade (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro de 2019.

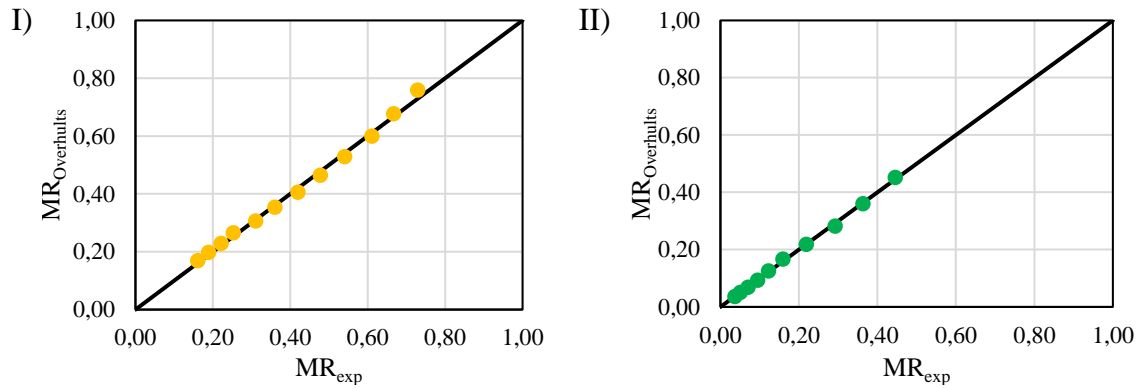


Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 apresenta os adimensionais de umidade calculados pela equação de Overhults ($MR_{Overhults}$) em função dos valores experimentais médios obtidos para essa grandeza (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada do mesmo mês. Como os resultados permaneceram em torno da reta de 45°, os adimensionais de umidade

calculados por essa equação cinética apresentaram uma boa concordância com os valores experimentais dessa grandeza.

Figura 29 – Adimensionais de umidade calculados pela equação de Overhults ($MR_{Overhults}$) em função dos valores experimentais obtidos para essa grandeza (MR_{exp}) para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Difusividade Efetiva

A equação de difusão de Fick (Equação 6) também foi ajustada aos dados de secagem das amostras fixas, com base no adimensional de umidade em função do tempo, para estimar a difusividade efetiva (D_{ef}) do leito de cebolinhas durante o período de taxa decrescente dos experimentos sem e com convecção forçada.

Para isso, os eixos de MR e t foram transladados, considerando apenas os dados de secagem que ocorreram no período de taxa decrescente. Dessa forma, respeitando as condições de contorno para as quais o modelo foi desenvolvido, a umidade crítica foi utilizada como condição inicial ($MR = 1$) e seu respectivo tempo como tempo inicial ($t = 0$).

Os valores obtidos para a difusividade efetiva estão apresentados na Tabela 14, truncando a Equação 6 no décimo termo ($n = 10$) e utilizando os valores de semi espessura do leito (L) apresentados no item 4.6.5.

Tabela 14 – Difusividade Efetiva.		
Convecção	R^2	Difusividade Efetiva (D_{ef}) (m^2/s)
Sem	0,952	$5,02 \times 10^{-9}$
Com	0,975	$1,17 \times 10^{-8}$

Fonte: Próprio autor.

O valor da difusividade efetiva para a secagem com convecção forçada do ar foi superior em 133 % ao obtido para a secagem sem convecção. Esses resultados estão de acordo com o

obtido por Park, Vohnikova e Brod (2002) e Sallam et al. (2013) para folhas de hortelã. Segundo os primeiros, a difusividade efetiva aumenta em função da temperatura e velocidade do ar, embora seja calculada negligenciando a resistência externa à transferência de massa. Os valores obtidos para a difusividade efetiva estão na faixa de difusividade para alimentos 10^{-12} - 10^{-8} m²/s relatada por Kouhila et al. (2020).

Goud et al. (2019) obteve valores mais elevados para os coeficientes de difusividade efetiva da pimenta verde (29,12 % superior) e do quiabo (15,97 % superior) durante a secagem com convecção forçada em um secador solar do tipo indireto com ventiladores alimentados por painéis solares fotovoltaicos. Além disso, o autor também observou que os coeficientes de transferência de massa e calor foram maiores durante a operação com convecção forçada: 48,2 % maior para a pimenta verde e 28,58 % maior para o quiabo. Seus resultados mostram que esses coeficientes de transferência são uma forte função da velocidade do ar.

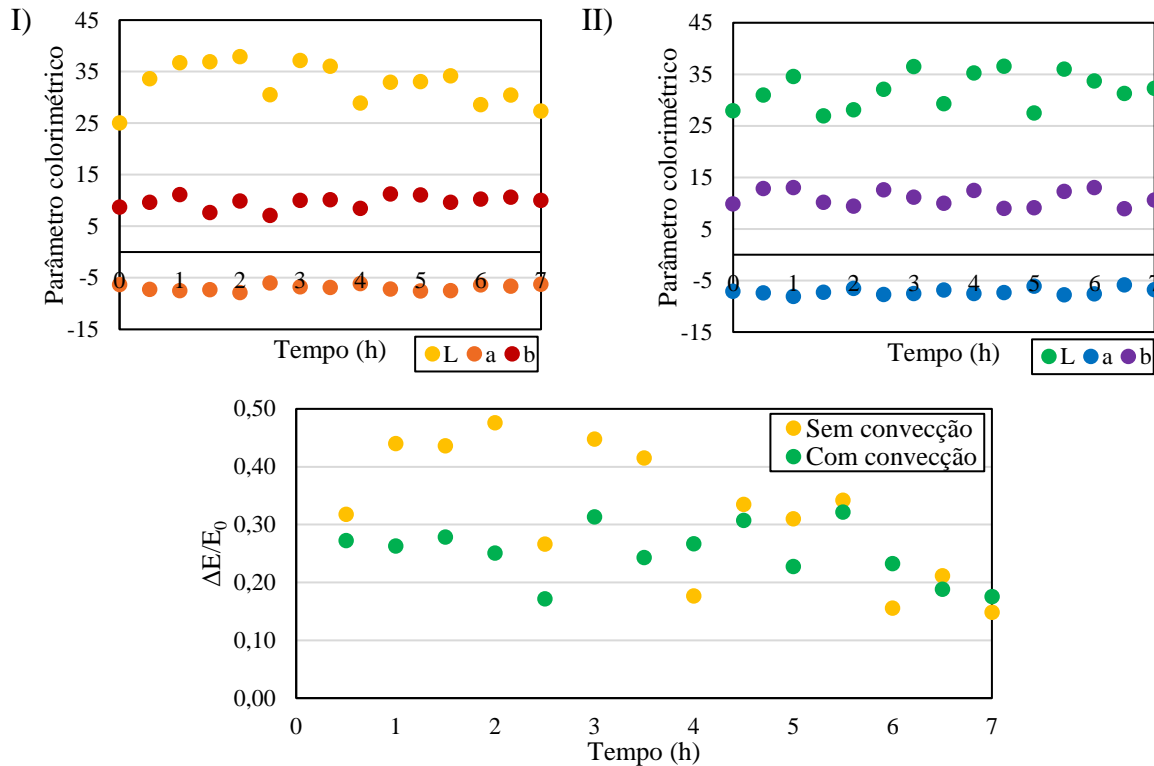
5.4.3 Colorimetria

Na Figura 30, estão apresentados os parâmetros colorimétricos médios L , a e b da escala CIELab ao longo do tempo de secagem, assim como a diferença total de cores média padronizada pelo valor do ponto inicial ($\Delta E/E_0$), para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, realizados no mês de Outubro.

Na Tabela 15, para cada condição de operação, estão apresentados os valores médios para as 7 horas de secagem dos parâmetros colorimétricos L , a e b dos leitos de cebolinhas, assim como a diferença total de cor média (ΔE). Os resultados obtidos para os parâmetros foram semelhantes nos dois processos de secagem avaliados, assim como ocorreu nos meses anteriores.

García et al. (2010) observou que a diferença total de cores entre cebolas verdes frescas e secas estava relacionada à temperatura de secagem. Téllez et al. (2018) concluiu que o efeito da temperatura é o parâmetro mais significativo na degradação da cor de folhas de Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) sob secadores diretos e indiretos. A temperatura média do ar de secagem na câmara do secador foi de $33,2 \pm 5,9$ °C e $34,1 \pm 2,4$ °C para os experimentos sem e com convecção forçada, respectivamente. Como a temperatura de secagem apresentou valores médios semelhantes nas duas condições de operação desse mês, a maior variação de ΔE observada na secagem sem convecção forçada pode estar relacionada aos maiores desvios-padrão nas temperaturas nesta condição de operação com as ventoinhas desligadas.

Figura 30 – Parâmetros colorimétricos (L , a e b) e diferença total de cor padronizada pelo ponto inicial ($\Delta E/E_0$) em função do tempo de secagem para os experimentos sem (I) e com (II) convecção forçada, do mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Parâmetros colorimétricos médios L , a e b dos leitos de cebolinhas para as 7 horas de secagens dos experimentos sem e com convecção forçada do mês de Outubro de 2019.

Convecção		L	a	b	ΔE
Sem	Média	32,67	-6,87	9,76	8,75
	Desvio	3,99	0,60	1,23	3,13
Com	Média	31,97	-7,13	11,00	7,66
	Desvio	3,42	0,63	1,59	1,48

Fonte: Próprio autor.

A variação total de cor também depende da natureza do material e, de acordo com Reyes, Mahn e Vásquez (2014), oscilações na umidade relativa do ar e a intensidade da radiação solar, que são fatores não controlados no processo de secagem solar, provavelmente influenciam a variação de cor dos materiais.

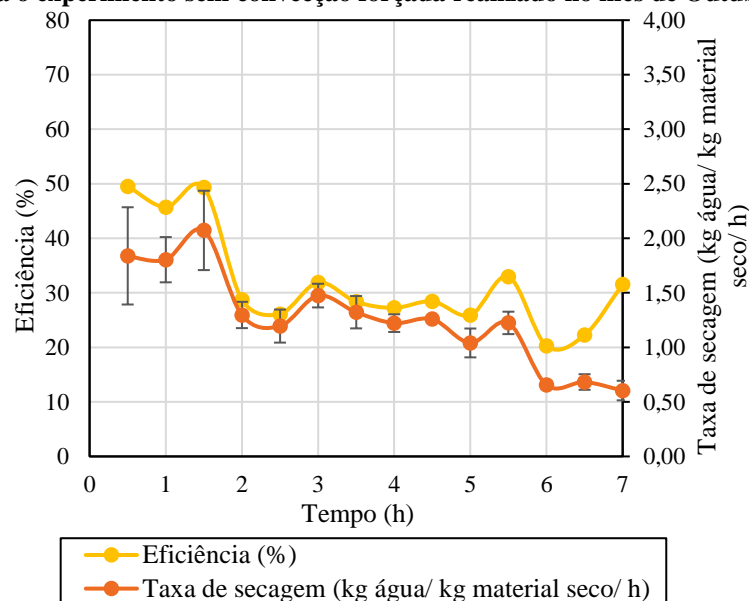
Na secagem solar convectiva de folhas de oliveira, Bahloul et al. (2009) observou que a luminosidade (parâmetro L) das folhas foi melhorada pela secagem solar, enquanto o verde (parâmetro a) foi reduzido. Seerangurayar et al. (2019) avaliou as alterações de cores das tâmaras em três estágios de maturação, processadas em três métodos de secagem solar: secagem

a céu aberto (OSD), secagem convectiva forçada (FCD) e secagem em “*greenhouse tunnel*” (GTD). Ele relatou que as tâmaras khalal secas em FCD tiveram a maior estabilidade de cor e mantiveram seu tom amarelado original. No entanto, as tâmaras dos estágios rutab e tamr mudaram para vermelho-marrom ao final de todos os métodos de secagem. Mennouche (2017), que também trabalhou com tâmaras, relatou que a variação da diferença total de cores depende principalmente de parâmetros climáticos como a temperatura ambiente a qual as amostras estão diretamente expostas, a temperatura do ar de secagem e o tempo de operação.

5.4.4 Análise energética do secador

Para os cálculos de eficiência, as variações de umidade das amostras fixas foram consideradas na Equação 8. As Figuras 31 e 32 mostram a eficiência do secador com a taxa de secagem (kg água/ kg material seco/ h) em função do tempo para os experimentos sem e com convecção forçada realizados no mês de Outubro, respectivamente.

Figura 31 – Eficiência do secador com a taxa de secagem (kg água/ kg material seco/ h) em função do tempo para o experimento sem convecção forçada realizado no mês de Outubro de 2019.

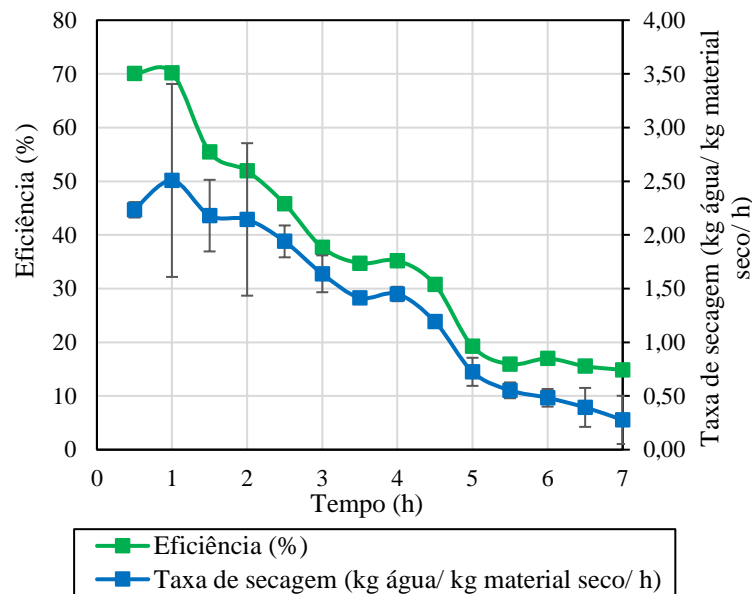


Fonte: Próprio autor.

Para ambas as condições de operação, os valores de eficiência são mais altos no início da secagem, período em que a taxa de secagem também é maior. Durante o processo, os valores de eficiência diminuem progressivamente à medida que a remoção de água do material se torna mais lenta. Segundo Boughali et al. (2009), a maior eficiência no início da secagem é provavelmente resultado da presença de água na superfície ou perto da superfície do produto. Portanto, menor quantidade de energia é necessária para a remoção de água. Posteriormente, a

eficiência diminui com a diminuição da umidade do material e é necessária maior quantidade de energia para retirar a mesma quantidade de água do produto. No trabalho de Dissa et al. (2011), a eficiência de secagem de um secador solar direto diminuiu fortemente com o tempo de secagem de mangas (variedades *Amelie* e *Brooks*), uma vez que a quantidade de água do produto estava cada vez mais ligada e mais difícil de ser removida.

Figura 32 – Eficiência do secador com a taxa de secagem (kg água/ kg material seco/ h) em função do tempo para o experimento com convecção forçada realizado no mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

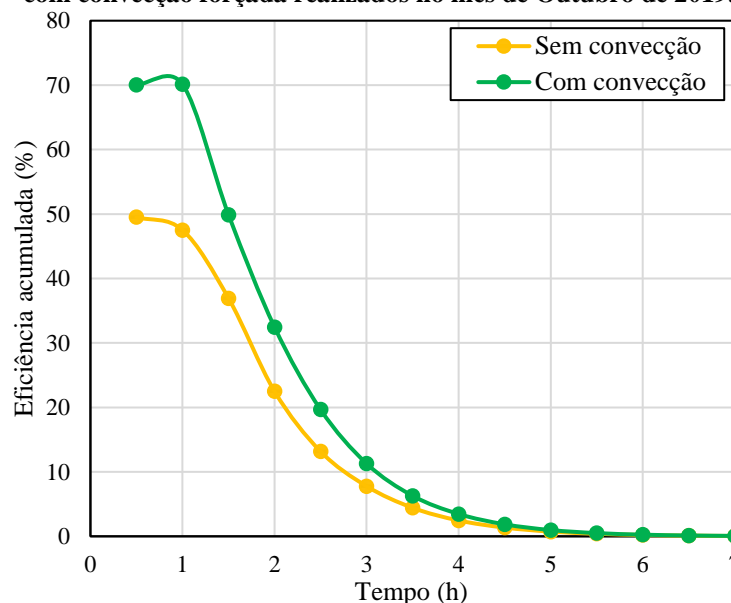
Na Figura 33, estão apresentados os valores de eficiência acumulada do secador em função do tempo para os experimentos sem e com convecção forçada realizados no mês de Outubro. Para essa análise, foram utilizadas na Equação 8 os valores acumulados ao longo das horas de secagem das quantidades de água removida do material (M_{ev}) e, conseqüentemente, do fluxo da radiação solar incidente no secador (I) até determinado momento.

Durante as primeiras horas de secagem, até aproximadamente 3 horas de processo, o experimento com convecção forçada do ar apresentou maiores valores acumulados para a eficiência do secador. Com o aumento do tempo de secagem, a diferença entre as curvas sem e com convecção diminui à medida que a remoção de umidade também diminui ao longo do período de taxa decrescente.

No mês de Outubro, a eficiência média de utilização da energia solar no secador operado sem convecção forçada foi de 34,2 %. Nesta condição de operação, 2,00 kg de água foram evaporados de 2,62 kg de cebolinha e a radiação solar média incidente no equipamento foi de 772 ± 148 W/m². Para a secagem com convecção forçada, a eficiência média foi de 38,3 %,

com 2,32 kg de água evaporada de 2,65 kg de cebolinha e a radiação solar média incidente de $798 \pm 169 \text{ W/m}^2$. Apesar desses valores não serem muito altos, eles resultam em uma economia de energia significativa, além de contribuir para a redução da emissão de CO_2 . Esses resultados provavelmente poderiam ser alterados com o aumento da carga de material no secador, visto que apenas a prateleira perfurada foi utilizada nas secagens.

Figura 33 – Eficiência acumulada do secador em função do tempo de secagem para os experimentos sem e com convecção forçada realizados no mês de Outubro de 2019.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados estão de acordo com os de Nayak et al. (2011), que obtiveram uma eficiência de secagem de 34,2 % para hortelã (*Mentha piperita*) seca sob convecção forçada em um secador solar híbrido fotovoltaico de estufa (PVT) com uma área de $6,5 \text{ m}^2$ e uma intensidade solar média de 520 W/m^2 durante um período de 3 dias. Poonia, Singh e Jain (2018) secaram ameixa indiana (*Zizyphus mauritiana*) em um secador solar híbrido fotovoltaico e obtiveram uma melhor eficiência térmica na operação com convecção forçada (16,7 %) do que na operação com convecção natural (15,6 %).

O consumo específico de energia (*SEC*) do sistema de secagem foi de 18,3 kWh por kg de umidade para o experimento sem convecção e 16,4 kWh por kg de umidade para o experimento com convecção forçada, o que representa uma redução de aproximadamente 10 %. Esses valores obtidos são maiores que a entalpia de vaporização da água ($2,26 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ou $0,628 \text{ kWh/kg}$). Esse resultado indica que o processo de secagem não é caracterizado apenas pela evaporação da água e que existem outros mecanismos que consomem energia (por exemplo a difusão no meio sólido, o alcance da interface sólido/gás, a convecção).

A maior eficiência na secagem solar com o menor consumo de energia obtidos pela operação com convecção forçada do ar podem estar relacionados ao fato de que o processo ocorreu inicialmente em um período de taxa constante. Assim, uma maior taxa de transferência de calor poderia ser fornecida ao material pelo fluxo de ar forçado causado pelas ventoinhas. Esses resultados sugerem que o secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico operado com convecção forçada do ar foi mais eficaz para a secagem de cebolinha sob as condições climáticas observadas nos experimentos do mês de Outubro.

6 CONCLUSÕES

O secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico foi desenvolvido, construído, instrumentado e encontra-se em pleno funcionamento, com a possibilidade de ser operado em convecção natural e forçada do ar de secagem para o processamento de diferentes materiais.

No geral, as temperaturas ao longo da largura do secador apresentaram médias e desvios-padrão inferiores para a operação com as ventoinhas ligadas. As maiores temperaturas foram alcançadas próximas ao horário de 12h às 13h do dia, entre 3 e 4 horas de experimento, quando os fluxos de radiação solar também foram mais intensos. Como consequência do processo endotérmico de secagem, as temperaturas da prateleira na qual o material foi depositado foram mais baixas, comparadas às atingidas pela prateleira inferior.

Do ponto de vista qualitativo, as curvas de secagem da cebolinha apresentaram comportamento similar ao longo do tempo para os experimentos sem e com convecção forçada dos meses de Maio e Junho. As equações de Page e Overhults foram os que melhor descreveram as curvas de secagem durante o período de taxa decrescente, com coeficientes de determinação entre 0,920 a 0,955. Comparando os valores dos parâmetros ajustados k e n , as secagens com convecção de Maio e o sem convecção de Junho foram as que apresentaram melhor desempenho em cada mês.

Nas secagens de Setembro, as condições climáticas desfavoráveis contribuíram para que os processos não apresentassem desempenho semelhante aos meses anteriores, especialmente para a secagem sem convecção que atingiu os menores valores de radiação solar entre os experimentos. Somada a instabilidade da radiação, as condições do ar com alta umidade e baixa temperatura foram as causas das menores temperaturas na câmara do secador e, conseqüentemente, resultaram em uma menor perda de umidade pelo material.

Após melhorias no processo de amostragem das cebolinhas, foi observada a presença de um período de taxa constante seguido pelo período de taxa decrescente, nas secagens de Outubro. A circulação do ar na câmara do secador influenciou positivamente o processo de secagem e o experimento com convecção apresentou maior taxa. Durante o período de taxa constante, mecanismos externos podem ter controlado o processo, uma vez que os valores de temperatura média do leito e fluxo médio de radiação solar foram semelhantes para as duas condições de operação. No período de taxa decrescente, as equações de Page e Overhults melhor se ajustaram aos dados com coeficientes de determinação entre 0,989 e 0,999. Os parâmetros k e n ajustados pela equação de Overhults foram maiores para o experimento com convecção.

Consequentemente, o valor de difusividade efetiva foi de $1,17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para a secagem com convecção forçada e de $5,02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para a secagem sem convecção. Esses resultados estão de acordo com o intervalo de valores relatado na literatura para a difusividade efetiva de alimentos. Além disso, no experimento com convecção, foi obtida a maior eficiência média do secador solar e o menor consumo específico de energia, com valores de 38,3 % e 16,4 kWh/kg comparados a 34,2 % e 18,3 kWh/kg para o experimento sem convecção. Ao longo do tempo de secagem, a eficiência do secador diminuiu progressivamente à medida que a remoção de água do material se tornava mais lenta.

Por fim, o monitoramento dos parâmetros colorimétricos em todos os experimentos realizados sugeriu que o material não sofreu significativa alteração de cor. Os valores negativos do parâmetro a indicaram a cor verde do material que foi mantida ao longo das secagens.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Para a continuidade da pesquisa iniciada nesse trabalho, sugere-se:

- Avaliação da secagem solar conduzida na ausência e na presença de convecção forçada do ar de secagem com material depositado sobre a prateleira perfurada e a face inferior do secador.
- Utilização de formas metálicas retangulares e com bordas pequenas. Três delas seriam utilizadas na prateleira perfurada e três na face inferior, para apoio do material submetido ao processo de secagem. Espera-se com essa medida melhorar a amostragem do leito, uma vez que as próprias formas com material poderiam ser pesadas a cada intervalo de tempo. Consequentemente, a variação de umidade do material depositado na forma seria acompanhada sem interferência da amostragem no processo.

8 TRABALHOS E PARTICIPAÇÕES EM CONGRESSOS

8.1 Artigo aceito para publicação

HIDALGO, L. F.; CANDIDO, M. N.; NISHIOKA, K.; FREIRE, J. T.; VIEIRA, G. N. A.
Natural and forced air convection operation in a direct solar dryer assisted by photovoltaic module for drying of green onion. Solar Energy. Manuscript Number: SE-D-20-02991

8.2 Trabalhos completos publicados em anais de congressos

HIDALGO, L. F.; CANDIDO, M. N.; AGUIAR, R. S.; FREIRE, J. T.; VIEIRA, G. N. A.
Avaliação de processo em Secador Solar Híbrido Fotovoltaico: secagem de cebolinha (*Allium schoenoprasium* L.). In: XXXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2019, 2019, Belém - PA. XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019. Campinas: GALOÁ, 2019. v. 2. p. -- 116115.

CANDIDO, M. N.; VIEIRA, G. N. A.; AGUIAR, R. S.; **HIDALGO, L. F.;** FREIRE, J. T.
Construção e instrumentação de um Secador Híbrido Fotovoltaico para processamento de alimentos em pequena escala. In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica - CobeqIC 2019, 2019, Uberlândia - MG. Blucher Chemical Engineering Proceedings. São Paulo: Editora Blucher, 2019. p. 2184-2190. DOI: 10.5151/cobecic2019-FTSP17

CANDIDO, M. N.; AGUIAR, R. S.; **HIDALGO, L. F.;** VIEIRA, G. N. A. Construção e instrumentação de um Secador Solar Híbrido Fotovoltaico na secagem de alimentos. In: 4ª Semana da Engenharia Química da UNESP, 2019, Araraquara - SP. Ofício DAWS nº 000/08, 2019.

8.3 Apresentações de trabalhos em eventos

HIDALGO, L. F.; CANDIDO, M. N. ; AGUIAR, R. S. ; FREIRE, J. T. ; VIEIRA, G. N. A.
Avaliação de processo em secador solar híbrido fotovoltaico: secagem de cebolinha (*Allium schoenoprasium* L.). ENEMP 2019. (Apresentação de Trabalho/Outra).

- HIDALGO, L. F.;** CANDIDO, M. N. ; AGUIAR, R. S. ; FREIRE, J. T. ; VIEIRA, G. N. A. Avaliação de processo em secador solar híbrido fotovoltaico: secagem de cebolinha (*Allium schoenoprasium* L.). WORKSHOP PPGEQ 2019. (Apresentação de Trabalho/Outra).
- CANDIDO, M. N.; VIEIRA, G. N. A.; AGUIAR, R. S.; **HIDALGO, L. F.;** FREIRE, J. T. Construção e instrumentação de um secador híbrido fotovoltaico para processamento de alimentos em pequena escala. COBEQ-IC 2019. (Apresentação de Trabalho/Congresso).
- CANDIDO, M. N.; AGUIAR, R. S.; **HIDALGO, L. F.;** VIEIRA, G. N. A. Construção e instrumentação de um secador solar híbrido fotovoltaico na secagem de alimentos. SEQ UNESP 2019. (Apresentação de Trabalho/Outra).
- AGUIAR, R. S.; VIEIRA, G. N. A.; CANDIDO, M. N.; **HIDALGO, L. F.** Estudo da secagem de cebolinha (*Allium schoenoprasium* L.) em um secador solar híbrido fotovoltaico. CIC UNESP 2019. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

9 REFERÊNCIAS

- AKPINAR, E. K. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 4, p. 864-870, 2006.
- AKPINAR, E. K. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2407-2418, 2010.
- AMERI, B. et al. Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. **Solar Energy**, v. 159, p. 722–732, 2018.
- ANYANWU, C. N. et al. Experimental Investigation of a Photovoltaic-Powered Solar Cassava Dryer. **Drying Technology**, v. 30, n. 4, p. 398-403, 2012.
- BAHLOUL, N. et al. Effect of convective solar drying on colour, total phenols and radical scavenging activity of olive leaves (*Olea europaea L.*). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, n. 12, p. 2561-2567, 2009.
- BARNWAL, P.; TIWARI, G. N. Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study. **Solar Energy**, v. 82, p. 1131- 1144, 2008.
- BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665–1691, 2011.
- BENAMOUN, L. Integration of Photovoltaic Cells in Solar Drying Systems, **Drying Technology** v. 31, n. 11 p. 1284-1296, 2013.
- BENAMOUN, L.; LI, J. Drying Process of Food: Fundamental Aspects and Mathematical Modeling. In: GRUMEZESCU, A. M.; HOLBAN, A. M. (ed.) **Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes**. Elsevier Inc. All, 2018. Cap 2, p 29-82.
- BOUGHALI, S. et al. Crop drying by indirect active hybrid solar – electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. **Solar Energy**, v. 83, n. 12, p. 2223-2232, 2009.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008, p. 85.
- CEYLAN, İ. et al. Energy analysis of a new design of a photovoltaic cell-assisted solar dryer. **Drying Technology**, v. 31, n. 9, p. 1077-1082, 2013.
- CHAVAN, A. et al. Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review. **Drying Technology**, p. 1-22, 2020.

- CHEN, X. D. Food drying fundamentals. In: CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. (ed.) **Drying Technologies in Food Processing**. 1. ed., © 2008 Blackwell Publishing Ltd, 2008. Cap. 1, p. 25-54.
- ČIPLIENE, A. et al. Usage of hybrid solar collector system in drying technologies of medical plants. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 399-405, 2015.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion, 2nd ed. Oxford University Press, London, 1975.
- DINÇER, İ.; ZAMFIRESCU, C. **Drying Phenomena: Theory and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.
- DISSA, A. O. et al. Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2517-2527, 2011.
- DJEBLI, A. et al. Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1494-1506, 2020.
- EL KHADRAOUI, A. et al. Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: Experimental and mathematical investigations. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 52, p. 262-270, 2019.
- EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 109-116, 2013.
- EKECHUKWU, O. V. Review of solar-energy drying systems, I: an overview of drying principle and theory. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 593-613, 1999.
- EKECHUKWU, O. V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 615-655, 1999.
- EKKA, J. P. et al. Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates. **Renewable Energy**, v. 152, p. 55-66, 2020.
- ELHUSSEIN, E. A. A., ŞAHIN, S. Drying behaviour, effective diffusivity and energy of activation of olive leaves dried by microwave, vacuum and oven drying methods. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 1901-1911, 2018.
- ELTAWIL, M. A., AZAM, M. M., ALGHANNAM, A. O. Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. **Renewable Energy**, v. 116, p. 594-605, 2018.

- GARCÍA, S. V. et al. Influence of Drying Temperature on the Physical and Microbiological Parameters and the Quality of Dried Green Onion. **Drying Technology**, v. 28, n. 12, p. 1435-1444, 2010.
- GOUD, M. et al. A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of *Capsicum Annum* and *Abelmoschus esculentus* with dryer performance. **Solar Energy**, v. 194, p. 871-885, 2019.
- HOSSAIN, M. A.; AMER, B. M. A.; GOTTSCHALK, K. Hybrid solar dryer for quality dried tomato. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1591-1601, 2008.
- IBGE, Censo Agropecuário 2017. Disponível em: < https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/pdf/agricultura_familiar.pdf>. Acesso em: Ago. 2020.
- IMRE, L. Solar Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed., Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 13, p. 307-361.
- INYANG, U. E.; OBOH, I. O.; ETUK, B. R. Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 8, n. 2, p. 27-48, 2018.
- ISLAM, M. et al. Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application. **Energy Procedia**, v. 160, p. 769-776, 2019.
- İSMAIL, O.; AKYOL, E. Open-air sun drying: the effect of pretreatment on drying kinetic of cherry tomato. **Sigma Journal Engineering and Natural Sciences**, v. 34, n. 2, p. 141-151, 2016.
- KOUHILA, M. et al. Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincilis*) type under forced convection. **Renewable Energy**, v. 147, n. 1, p. 833-844, 2020.
- LAKSHMI, D. V. N. et al. Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. **Solar Energy**, v. 188, p. 507-518, 2019.
- LINGAYAT, A. B. et al. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. **Applied Energy**, v. 258, n. 15, 114005258, 2020.
- MAHAPATRA, A; TRIPATHY, P. P. Experimental investigation and numerical modeling of heat transfer during solar drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 5, p. 1287–1300, 2018.
- MARTINAZZO, A. P. et al. Drying kinetics and microbiological quality of green onions. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, p. 769-774, 2016.

- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Drying of solids. In: _____. Unit Operations of Chemical Engineering. 5. ed., McGraw-Hill, Inc., 1993. Cap. 24, p. 767-809.
- MENNOUCHE, D. et al. Solar drying process to obtain high standard “deglet-nour” date fruit. *Journal of Food Process Engineering*, v. 40, n. 5, 40:e12546, 2017.
- MOHANA, Y. et al. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, v. 208, p. 321-344, 2020
- MUJUMDAR, A. S.; Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed., Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 1, p. 4-31.
- NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Documentos Temáticos. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 1 · 2 · 3 · 5 · 9 · 14, 2017. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/documentos-tematicos/> >. Acesso em: Ago. 2020.
- NAYAK, S. et al. Drying and testing of mint (*Mentha piperita*) by a hybrid photovoltaic-thermal (PVT)-based greenhouse dryer. *Drying Technology*, v. 29, n. 9, p. 1002-1009, 2011.
- NOURHÈNE, B.; MOHAMMED, K.; NABIL, K. Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. *Food and Bioproducts Processing*, v. 86, n. 3, p. 176-184, 2008.
- OKO, C. O. C.; NNAMCHI, S. N. Coupled heat and mass transfer in a solar grain dryer. *Drying Technology*, v. 31, n. 1, p. 82-90, 2013.
- PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa L.*). *Journal of Food Engineering*, v. 51, p. 193-199, 2002.
- POONIA, S.; SINGH, A. K.; JAIN, D. Mathematical modelling and techno-economic evaluation of hybrid photovoltaic-thermal forced convection solar drying of indian jujube (*Zizyphus mauritiana*). *Journal of Agricultural Engineering*, v. 55, n. 4, p. 74-88, 2018.
- 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.
- REYES, A. et al. Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer. *Energy Conversion and Management*, v. 70, p. 31-39, 2013.

- REYES, A.; MAHN, A.; VÁSQUEZ, F. Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. **Energy Conversion and Management**, v. 83, n. 11, p. 241-248, 2014.
- ROMANO, G.; KOCSIS, L.; FARKAS, I. Analysis of energy and environmental parameters during solar cabinet drying of apple and carrot. **Drying Technology**, v. 27, n. 4, p. 574-579, 2009.
- ROMULI, S. et al. Technical Performance of an Inflatable Solar Dryer for Drying Amaranth Leaves in Kenya. *Applied Sciences*, v. 9, n. 16, 3431, 2019.
- SALLAM, Y. I. et al. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. **Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 2, p. 171-178, 2013.
- SAMI, S.; RAHIMI, A.; ETESAMI, N. Dynamic Modeling and a Parametric Study of an Indirect Solar Cabinet Dryer. **Drying Technology**, v. 29, n. 7, p. 825-835, 2011.
- SEERANGURAYAR, T. et al. Effect of solar drying methods on color kinetics and texture of dates. **Food and Bioproducts Processing**, v. 116, p. 227-239, 2019.
- ŞEVIK, S. et al. Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. **Solar Energy**, v. 180, p. 537-549, 2019.
- SINGH, V. et al. *Allium schoenoprasum* L.: a review of phytochemistry, pharmacology and future directions. **Natural Product Research**, v. 32, n. 18, p. 2202-2216, 2018.
- SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of Foodstuffs. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.) **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed., Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 21, p. 522-546.
- SUHERMAN, S. et al. Energy–exergy analysis and mathematical modeling of cassava starch drying using a hybrid solar dryer. **Cogent Engineering**, v. 7, n. 1, 1771819, 2020.
- TÉLLEZ, M. C. et al. Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. **Solar Energy**, v. 159, p. 898-907, 2018.
- THAM, T. C. et al. Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump. **Drying Technology**, v. 35, n. 14, p. 1721-1732, 2017.
- TIWARI, S.; TIWARI, G. N. Exergoeconomic analysis of photovoltaic-thermal (pvt) mixed mode greenhouse solar dryer. **Energy**, v. 114, p. 155-164, 2016.
- TIWARI, A. A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. **Journal of Food Processing and Technology**, v. 7, n. 9, 1000623, 2016.
- TOMAR, V.; TIWARI, G. N.; NORTON, B. Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components. **Solar Energy**, v. 154, p. 2-13, 2017.

- TRANSFORMANDO NOSSO MUNDO: A AGENDA 2030 PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: Ago. 2020.
- TUNDE-AKINTUNDE, T. Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2139-2145, 2011.
- UDOMKUN, P. et al. Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. **Journal of Environmental Management**, v. 268, 110730, 2020.
- VAZ, A. P. A. et al. Cebolinha. **Repositório de Informação Tecnológica da Embrapa (Infoteca-e)**, 2007. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/786582/1/FOL105.pdf>>. Acesso em: Ago. 2020.
- VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum L.*) em leito fixo e fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar drying technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2652-2670, 2012.
- YALDÝZ, O.; ERTEKÝN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v. 19, n. 3-4, p. 583-597, 2001.