

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE ARARAQUARA**

Luis Rodrigo Meyagusku

**Comparação entre processos de secagem de fatias de maçã em estufa convencional e em
secador solar assistido por módulo fotovoltaico**

ARARAQUARA

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE ARARAQUARA

Luis Rodrigo Meyagusku

**Comparação entre processos de secagem de fatias de maçã em estufa convencional e em
secador solar assistido por módulo fotovoltaico**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Química da Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Químico.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves
Vieira

ARARAQUARA

2023

LUIS RODRIGO MEYAGUSKU

Comparação entre processos de secagem de fatias de maçã em estufa convencional e em secador solar assistido por módulo fotovoltaico

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Araraquara, 13 de dezembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

RESUMO

No mundo, uma grande quantidade de alimento é desperdiçada ainda no começo da cadeia produtiva, principalmente em países menos desenvolvidos. Uma alternativa para minimizar estas perdas é a utilização do processo de secagem, diminuindo a atividade de água nestes alimentos, que é responsável por promover reações ou processos que comprometam a qualidade do alimento. A remoção de água promove também uma diminuição do volume do alimento, fator importante quando se trata de armazenamento e transporte. O processo de secagem envolve, simultaneamente, a transferência de calor e massa. A secagem solar é uma técnica bastante utilizada na secagem de alimentos, a fim de aumentar o tempo de prateleira e preservar melhor os alimentos. Utiliza uma energia abundante, limpa e disponível para todos, que é a energia solar. Este trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem utilizando-se um secador solar assistido por células fotovoltaicas e uma estufa de secagem convencional. Foram realizados experimentos de secagem de fatias de maçãs, utilizando-se convecção forçada e natural, tanto no secador quanto na estufa. Neste trabalho foi observada a importância da espessura do material a ser seco e o comportamento de parâmetros importantes no processo de secagem, como Umidades em base seca e úmida Taxa e Fluxo de Secagem. Nos experimentos com secador solar, a menor umidade em base seca média obtida foi de 1,85 kg de água/kg de maçã seca e a menor umidade em base úmida média foi de 0,63 kg de água/kg de maçã úmida, ambos os valores obtidos no experimento 3 utilizando-se convecção natural. Nos experimentos de secagem em estufas, as amostras obtiveram as menores umidades (em base seca e úmida) no experimento com maior temperatura e com convecção forçada.

Palavras-chave: Água. Umidade. Secar. Fruta.

ABSTRACT

Around the world, a large amount of food is wasted at the beginning of the production chain, especially in less developed countries. An alternative to minimizing these losses is the use of the drainage process, promoting water activity in these foods, which is responsible for promoting reactions or processes that compromise the quality of the food. The removal of water also promotes a reduction in the volume of the food, an important factor when it comes to storage and transportation. The drying process simultaneously involves mass heat transfer. Solar drying is a technique widely used in food drying, in order to increase shelf life and better preserve food. Use abundant, clean energy available to everyone, which is solar energy. This work aimed to study the drying process using a solar dryer assisted by photovoltaic cells and a conventional drying oven. Apple slice drying experiments were carried out using forced and natural convection, both in the dryer and in the oven. In this work, the importance of the thickness of the material to be dried and the behavior of important parameters in the drying process, such as Humidity on a dry basis and Wet Rate and Drying Flow, were observed. In experiments with a solar dryer, the lowest average dry moisture content was 1.85 kg of water/kg of dry apple and the lowest average wet moisture content was 0.63 kg of water/kg of wet apple, both the values obtained in experiment 3 using natural convection. In the oven drying experiments, the samples obtained the lowest humidity (on a dry and wet basis) in the experiment with higher temperature and forced convection.

Keywords: Water. Moisture. Dry. Fruit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de secadores solares diretos (esq) e indiretos (dir).	19
Figura 4.1 – Secador solar.	25
Figura 4.2 – Secador solar.	26
Figura 4.3 – Interface da rotina de aquisição de dados do LabVIEW.	26
Figura 4.4 – Secagem de fatias de maçãs em secador solar. Posições das amostras representadas de A1 à A6; dos termopares, de T1 a T6; e dos transmissores de temperatura, por A e B.	28
Figura 5.1 – Monitoramento do Experimento 1.1 com secador vazio (convecção natural).	31
Figura 5.2 – Monitoramento do Experimento 1.2 com secador vazio (convecção forçada).	32
Figura 5.3 – Monitoramento do Experimento 1.3: secagem com convecção natural.	34
Figura 5.4 – Umidades em base seca e úmida, Taxa de secagem, e Razão de umidade em função do tempo, do Experimento 1.3.	37
Figura 5.5 – Monitoramento e grandezas calculadas Experimento 1.4: secagem com convecção natural.	38
Figura 5.6 – Monitoramento e grandezas calculadas no Experimento 1.5: secagem com convecção forçada.	39
Figura 5.7 – Experimento 2.1 (Secagem a 50°C com convecção natural): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.	41
Figura 5.8 – Experimento 2.1 (Secagem a 50°C com convecção natural): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.	42
Figura 5.9 – Experimento 2.2 (Secagem a 50°C com convecção forçada): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.	43
Figura 5.10 – Experimento 2.2 (Secagem a 50°C com convecção forçada): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.	43
Figura 5.11 – Experimento 2.3 (Secagem a 60°C com convecção natural): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.	44
Figura 5.12 – Experimento 2.3 (Secagem a 60°C com convecção natural): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.	45
Figura 5.13 – Experimento 2.4 (Secagem a 60°C com convecção forçada): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.	45
Figura 5.14 – Experimento 2.4 (Secagem a 60°C com convecção forçada): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	Revisão bibliográfica	17
2.1	Secagem	17
2.2	Umidade em base seca e úmida	18
2.3	Razão (Adimensional) de Umidade	18
2.4	Secagem Solar	18
2.5	Tipos de secadores solares	19
2.6	Secagem de maçã	20
3	Objetivos	23
4	Material e métodos	25
4.1	Secagem em secador solar assistido por módulo fotovoltaico	25
4.1.1	Secador solar	25
4.1.2	Processo de secagem de fatias de maçãs	26
4.2	Secagem em estufa de secagem	28
5	Resultados e discussão	31
5.1	Secagem em secador solar	31
5.2	Secagem em estufas de secagem	40
6	conclusões e sugestões para trabalhos posteriores	47
7	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos é um dos métodos mais antigos para preservar produtos agrícolas. Contribui para a obtenção de produtos de alta qualidade, prolongando o período seguro de armazenamento e reduzindo as perdas pós-colheita. Essa redução de perdas contribui para disponibilizar mais alimentos à crescente população mundial. A utilização da energia solar na secagem preserva as fontes convencionais de energia, mas também protege o produto contra intempéries, poeira, insetos e animais durante o processo de secagem (BARNWAL, 2008; CIPILENE, 2015).

Grande parte dos alimentos produzido no mundo são perdidos. Em países desenvolvidos, as perdas críticas acontecem já na fase de consumo. Já nos países menos desenvolvidos, as perdas costumam ocorrer no início da cadeia de valor, no manuseio e no processamento pós-colheita. Essas perdas contribuem para a subnutrição de pessoas em países menos desenvolvidos (UDONKUM, 2020).

Em geral, os alimentos possuem uma grande quantidade de água e isto possibilita a ocorrência de processos bioquímicos que podem degradar o alimento, tornando-os impróprios para o consumo. Com isso, a secagem de alimentos visa reduzir o teor de água e promover uma maior conservação de frutas e vegetais. A redução precisa ser feita até que a concentração de sais, ácidos, açúcares e outros componentes seja alta o suficiente para que ocorra uma redução na atividade de água e, assim, dificultar ou inibir as reações e mecanismos que possam deteriorar o alimento (SCHULTZ, 1999).

A secagem de frutas e vegetais constitui um processo complexo, caracterizado pela transferência simultânea de calor e massa, especialmente em condições transitórias. A compreensão dessa transferência no produto é crucial para aprimorar os parâmetros do processo de secagem, resultando em melhor qualidade. O comportamento da secagem é predominantemente influenciado por diversos parâmetros internos (como densidade, permeabilidade, porosidade, características de sorção-dessorção e propriedades termo-físicas) e externos (como temperatura, velocidade e umidade relativa do meio de secagem). (KAYA, 2007).

O processo de secagem visa remover termicamente o excesso de compostos voláteis. A secagem envolve tanto a transferência de massa quanto a transferência de calor, simultaneamente. No processo de secagem, quando o ar quente flui sobre um material úmido, ocorre transferência de calor para a superfície, evaporando a água. O vapor d'água se difunde através de uma camada limite, sendo transportado pela corrente de ar. Isso estabelece uma

região de baixa pressão de vapor de água na superfície do material, criando uma diferença de pressão de vapor de água entre o interior úmido do material e o ar seco (SCHULTZ, 1999).

A maçã é um alimento base muito consumido, cultivada em todo o mundo. Sua colheita concentra-se no início do ano e, para evitar perdas, é importante estabelecer condições ideais de preservação e armazenamento. Uma alternativa para melhorar sua conservação é a produção da furta passa, método de baixo custo para evitar perdas e agregar valor ao produto (MOURA, 2007; KAYA, 2007)

A prática da secagem ao sol persiste em diversas regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo. A energia solar destaca-se como uma crucial fonte alternativa, preferida por sua abundância, por ser inesgotável e caráter não poluente. Além disso, é uma opção renovável, acessível e ecologicamente amigável para processos que ocorrem a temperaturas mais baixas. Os secadores solares bem projetados não apenas atendem aos requisitos específicos de secagem de culturas, mas também contribuem para a eficiência energética e a conservação de práticas agrícolas (AKPINAR, 2010; MAHAPTARA, 2018).

Há diversos tipos de secadores solares. Uma classificação dos secadores é baseada na aplicação da radiação no processo de secagem. Quando a energia térmica é utilizada diretamente para secar o material a ser seco, ocorre o método direto. Já no método indireto, a radiação promoverá o aquecimento do ar de secagem. Outra classificação é em relação à movimentação do ar de secagem. Secadores em que o movimento do ar ocorre de maneira natural são classificados como de convecção natural (ou passivos) e secadores que possuem dispositivos que promovam a circulação do ar, de convecção forçada (ou ativos) (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2010).

Além da secagem solar, existem outros métodos que reduzem a umidade de um material. Em processos industriais, a depender das necessidades, o tempo de processo, qualidade final do produto e a eficiência do processo podem variar e demandar métodos de secagem distintos. Os mais comuns são: secagem ao sol, secagem por ar quente, secagem por contato, secagem por infravermelhos, liofilização, secagem por leito fluidizado e secagem dielétrica (SAIREN, 2023).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem

A desidratação, um processo complexo, envolve tanto a transferência de calor quanto a transferência de massa e quantidade de movimento, simultaneamente, onde o calor é transferido para o produto com umidade, que será removida na forma de vapor d'água para uma fase gasosa que esteja insaturada (SCHULTZ, 1999).

No processo de secagem, o calor que é transferido de uma fonte para um material ocorre por condução, convecção, radiação ou uma combinação destes (UDOMKUN et al., 2020).

Na secagem, a difusão superficial nas superfícies dos poros, a difusão de um fluido (líquido ou vapor) por conta de uma diferença de concentração de umidade e ação capilar por conta de forças superficiais em alimentos granulares são os principais mecanismos presentes (INYANG, 2018).

Durante uma desidratação, é possível dividir a secagem em dois momentos: no início, temos um período com taxa constante, uma vez que a secagem ocorre de maneira similar a evaporação de água pura, sem nenhuma resistência adicional; o outro momento apresenta taxa decrescente, já que o movimento da umidade é conduzido pela resistência interna do material. Em cada período, os fatores que balizam a taxa de secagem são diferentes. A temperatura, a velocidade e umidade relativa do ar são fatores que controlam a taxa de secagem no período constante. Já no período decrescente estes fatores não influenciam muito, sendo a temperatura do ar e a espessura do material os mais importantes (SCHULTZ, 1999).

O primeiro período decrescente inicia quando a película superficial de um produto seca e o teor de umidade diminui até um ponto chamado teor de umidade crítico. A medida que o processo de secagem continua, o material passa para o segundo período de taxa decrescente (INYANG, 2018).

O processo de secagem envolve a remoção de determinada umidade presente em um material que ocorre pelo aquecimento e pela passagem de ar para que transporte o vapor liberado. Este processo ocorre até o momento em que a pressão de vapor da umidade presente no material se iguale à da atmosfera. Nesta condição, a taxa de dessorção de umidade do material para a atmosfera e a absorção da umidade pelo ambiente encontram-se em equilíbrio, sendo o teor de umidade do sistema nesta situação chamado de teor de umidade de equilíbrio (EKECHUKWU, 1999).

O produto submetido a secagem irá contribuir para minimizar o tempo e custo do seu transporte, de seu armazenamento e de sua embalagem. Existem vários tipos de secagem, como

secagem ao sol, secagem por ar quente, secagem por contato, secagem por infravermelhos, liofilização, secagem por leito fluidizado, secagem dielétrica e outra, sendo que a decisão irá depender do material a ser seco e do nível sanitário que é exigido (INYANG, 2018).

2.2 Umidade em base seca e úmida

A umidade de um material pode ser expressa em base seca ou úmida. Em base seca (X_{bs}), representa a razão da massa de umidade pela massa do material seco, dada pela Equação 1(1) (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

$$X_{bs} = \frac{m_{umidade}}{m_{material\ seco}} = \frac{m_u}{m_s} \quad (1)$$

Já em base úmida (X_{bu}), é a razão da massa de umidade pela massa do material úmido, conforme a Equação 2 (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

$$X_{bu} = \frac{m_{umidade}}{m_{material\ seco} + m_{umidade}} = \frac{m_u}{m_s + m_u} \quad (1)$$

2.3 Razão (Adimensional) de Umidade

A Razão de umidade pode ser calculada a partir da Equação 3.

$$MR = \frac{(X_{bs,t} - X_{bs,e})}{(X_{bs,0} - X_{bs,e})} \quad (2)$$

em que $X_{bs,t}$ é a umidade em base seca em um tempo t , $X_{bs,e}$ é a umidade em base seca no equilíbrio e $X_{bs,0}$ é a umidade em base seca no início do processo, todos relacionados a um mesmo processo de secagem (AKPINAR, 2010).

2.4 Secagem Solar

A secagem ao sol é método que utiliza a energia do sol, que é limpa e renovável, para secar alimentos e outros materiais, sendo importante para a conservação destes alimentos. Porém, para a produção em larga escala, este método não é muito viável, por conta do material ficar exposto a chuva, animais, sujeira, orvalho, entre outros motivos. Além disso, é muito difícil controlar o processo de secagem nestas condições, correndo-se o risco de a secagem ocorrer de modo não homogêneo (TIWARI, 2016).

A secagem é uma técnica utilizada há muito tempo para a conservação de alimentos, a fim de prolongar sua vida útil. O método de secagem a céu aberto é utilizado em alguns locais, mas este tipo de processo pode acarretar em uma baixa qualidade do produto final além de ser

suscetível à contaminação de diversos tipos. A utilização de secadores solares fechados minimiza ou elimina a maioria destes problemas (SEERANGURAYAR, 2019)

A energia solar destaca-se como uma fonte alternativa, por sua abundância, ser inesgotável e por não ser poluente. Além disso, é uma opção renovável, acessível e ecológica. Secadores solares bem projetados atendem aos requisitos específicos de secagem das culturas e também contribuem para a conservação de práticas agrícolas e para a eficiência energética (AKPINAR, 2010).

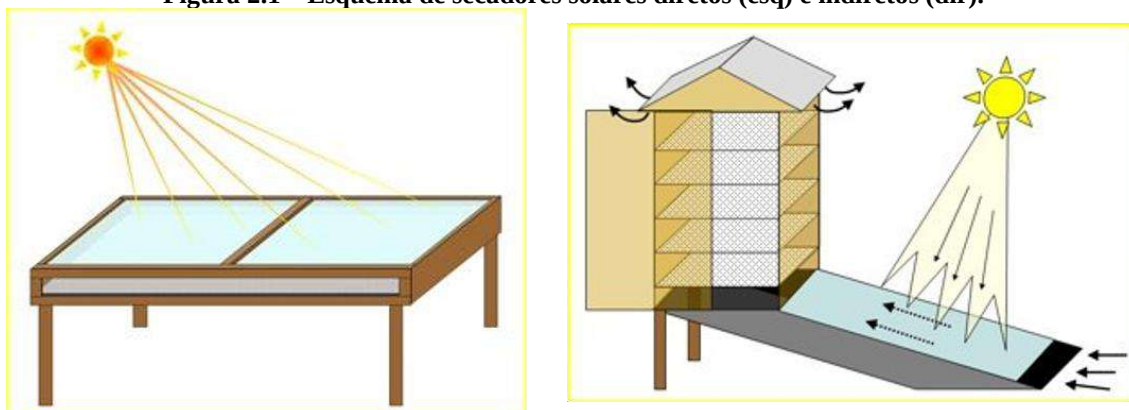
Um avanço da secagem ao sol é a utilização de sistemas de secagem solar onde os materiais são submetidos à secagem em um dispositivo fechado, onde a temperatura no seu interior é mais elevada. Assim, o material a ser seco não precisa ficar exposto às intempéries como ocorre na secagem ao sol (TIWARI, 2016)

2.5 Tipos de secadores solares

Os secadores solares podem ser classificados como diretos ou indiretos; ou ainda, de modo misto ou modo híbrido. Além dos secadores, os sistemas de secagem solar também possuem uma classificação geral, sendo os secadores solares de convecção natural ou convecção forçada (EL SEBAII, 2013).

Um esquema para ilustrar os secadores solares diretos e indiretos pode ser visto na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Esquema de secadores solares diretos (esq) e indiretos (dir).



Fonte: Sempre sustentável, 2020.

A secagem solar do tipo indireto, quando comparado à secagem a céu aberto, elimina problemas como a degradação do produto por microrganismos, perdas por conta de animais e contaminação em geral, além de diminuir o tempo de secagem. Este método de secagem utiliza energia térmica que é transferido de um coletor solar para o ar. O ar quente então passa entra em uma câmara onde o material a ser seco é colocado. Assim, os materiais são aquecidos para

que seja removida a umidade. Os secadores deste tipo podem ter seus desempenhos melhorados com a presença de dispositivos que promovam convecção forçada, como sopradores ou ventiladores (GOUD, 2019).

Alguns fatores importantes na estrutura utilizada de um secador são relacionados ao material que será seco, como o tipo, a quantidade e a aplicação do produto final, além da origem e da fonte de energia. Há uma grande variedade de secadores solares que foram desenvolvidos. Eles podem ser classificados de várias formas. Os secadores solares naturais têm como única fonte de energia a solar. Já os secadores semiartificiais possuem componentes que são acionados por motores elétricos para promoverem um fluxo de ar contínuo, utilizando assim energia solar e elétrica. Também existem os secadores semi-assistidos, que são capazes de operar, caso seja necessário, por fonte convencionais ou auxiliares (IMRE, 2006).

Além das classificações já vistas, uma outra classificação para os secadores solares leva em conta o modo em que a circulação de ar se comporta no equipamento. Secadores chamados passivos (ou de circulação natural), durante o processo de secagem, são aquecidos pela radiação do sol diretamente e operam com uma circulação de ar natural. Já os secadores ativos (ou de convecção forçada) apresentam ventiladores que promovem a circulação da ar. Para alimentar os ventiladores, há a possibilidade de utilização de energia convencional ou alternativa (BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

2.6 Secagem de maçã

No Brasil, a produção de maçã é relevante, ainda mais por ter uma exportação expressiva. A maçã (*Malus domestica* Borkh) é um alimento que é fonte de fibras, minerais e vitaminas. Os cultivares de maior destaque são a Gala e Fuji (MOURA, 2007)

A colheita da maçã concentra-se no início do ano, na época entre fevereiro e abril. Com isso, é necessário um sistema de armazenagem a frio para que a produção seja conservada ao longo do ano. Mesmo que a maçã seja consumida internamente e também tem espaço no mercado externo, há um excedente de produção, ainda mais por conta da sazonalidade. Com isso, uma alternativa seria a produção da fruta passa, uma solução para evitar perdas e agregar valor ao produto. A produção de maçã passa pode ser uma alternativa viável, de baixo custo, permitindo a conservação da maçã por mais tempo e em temperatura ambiente, além de preservar grande parte do valor nutricional (MOURA, 2007).

A maçã desempenha um papel crucial como matéria-prima em muitos produtos alimentares, sendo cultivada em plantações em todo o mundo. Estabelecer condições ideais de

preservação e armazenamento para maçãs frescas é fundamental, dado que métodos inadequados podem resultar em perdas de frutas e vegetais (KAYA, 2007).

3 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal estudar e comparar processos de secagem de maçãs realizados em diferentes equipamentos (secador solar assistido por módulo fotovoltaico e em estufa convencional) e modos de convecção (natural e forçada).

Além do objetivo principal, os objetivos específicos foram calcular a taxa de secagem dos processos realizados, a Razão de Umidade e Umidades Relativas e Absolutas ao longo do tempo, para comparar os diferentes processos de secagem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizados processos de secagem utilizando-se diferentes equipamentos. Na primeira fase, foi utilizado um secador solar assistido por módulo fotovoltaico. Já na segunda, foi utilizada uma estufa de secagem.

4.1 Secagem em secador solar assistido por módulo fotovoltaico

4.1.1 Secador solar

Para estes experimentos, foi utilizado um secador solar assistido por módulo fotovoltaico, que pode ser visto na Figura 4.1

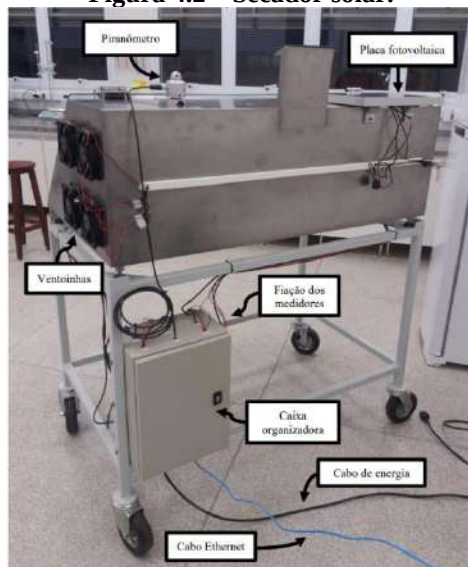
Figura 4.1 – Secador solar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

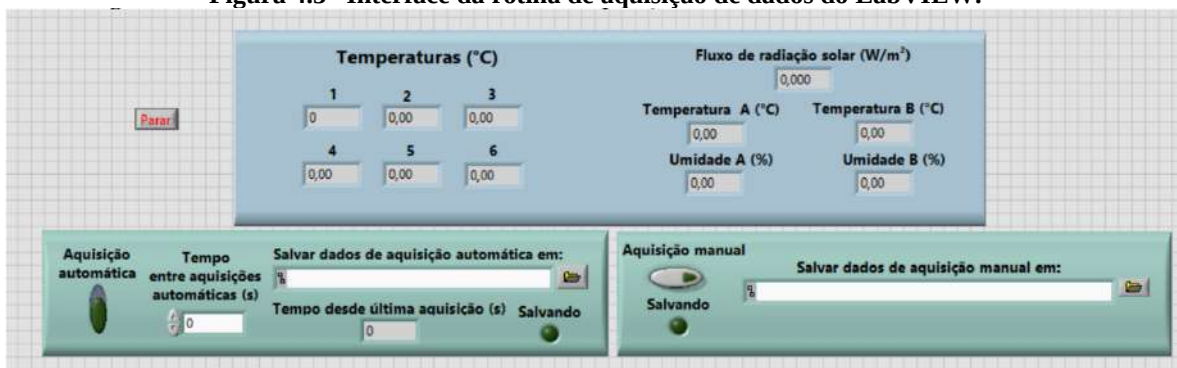
Na Figura 4.2, podemos ver um esquema onde é possível identificar os componentes do secador. O pirômetro foi utilizado para medir o fluxo de radiação do sol, a placa fotovoltaica para fornecer energia para as ventoinhas que, por sua vez, foram as utilizadas quando era necessário haver convecção forçada.

Além destes medidores, o equipamento possui dois transmissores de temperatura e umidade do ar e seis termopares. O piranômetro e os dois transmissores de temperatura e umidade do ar são conectados a uma fonte DC e, juntos dos termopares, são unidos ao sistema de aquisição de dados, que se encontra dentro da caixa organizadora. O sistema do secador era conectado a um computador, onde foram registrados os dados do experimento, por meio de um cabo Ethernet (HIDALGO, 2021).

Figura 4.2 – Secador solar.

Fonte: HIDALGO, 2021.

Os dados eram adquiridos em uma rotina no *software* LabVIEW 2018, A interface do sistema de aquisição de dados poder ser vista na Figura 4.3. Para iniciar o acompanhamento do processo de secagem, era necessário escolher o local onde o arquivo contendo as informações seria salvo e, para que o monitoramento fosse realizado automaticamente, era necessário alterar o modo para “Aquisição automática”. As informações das temperaturas medidas pelos termopares (1 a 6), do fluxo de radiação solar, das temperaturas dos transmissores (A e B) e das Umidades Relativas (A e B) eram acompanhadas e armazenadas continuamente e podiam ser extraídas em um arquivo de bloco de notas. Posteriormente, as informações eram tratadas no *software* Microsoft Excel.

Figura 4.3 –Interface da rotina de aquisição de dados do LabVIEW.

Fonte: HIDALGO, 2021.

4.1.2 Processo de secagem de fatias de maçãs

Antes do início os estudos de secagem com o secador solar, foram feitos dois experimentos com o secador vazio (Experimentos 1.1 e 1.2) para verificar o comportamento do secador e a temperatura em seu interior para auxiliar na escolha da temperatura em que os

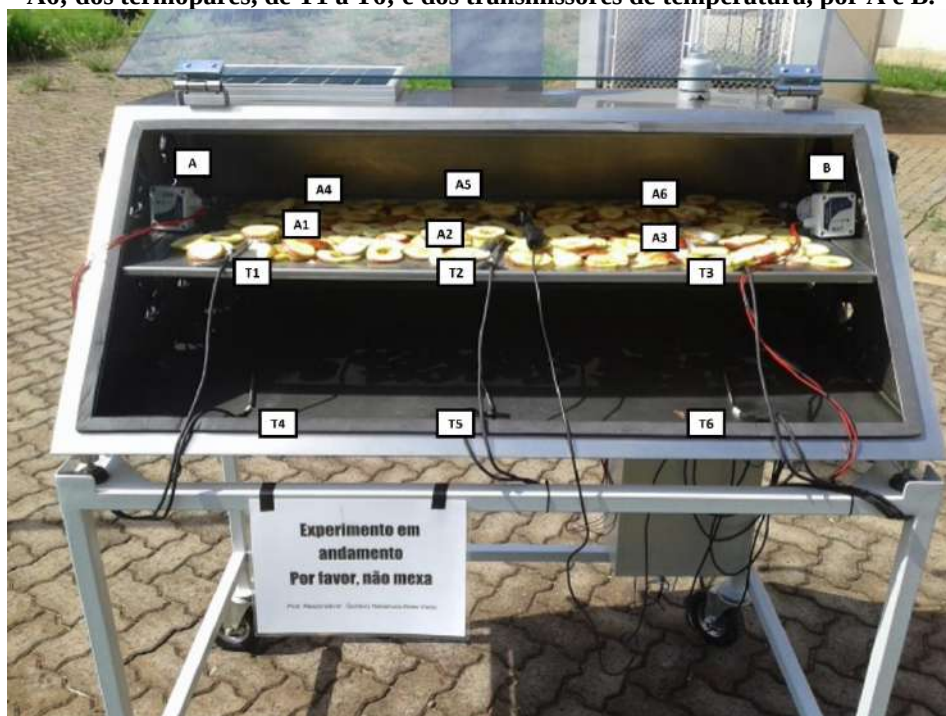
processos de secagem na estufa iriam ocorrer. Com o secador vazio, foi feito um experimento utilizando-se convecção natural e outro com convecção forçada. Os experimentos com o secador solar foram realizados na primavera do ano de 2021. Nestes experimentos, os secadores foram expostos ao sol e monitorados por aproximadamente 7 horas, tentando utilizar o maior tempo possível de exposição ao sol, levando-se em conta o tempo de preparo das maçãs e funcionamento do local.

Posteriormente, ainda no mesmo ano, foram realizados experimentos de secagem de fatias de maçãs utilizando-se o secador solar. Foram realizados dois experimentos com convecção natural (Experimentos 1.3 e 1.4) e, por último, um experimento de secagem no secador solar com convecção forçada (Experimento 1.5).

Nos experimentos com maçãs, inicialmente, as maçãs foram lavadas, cortadas ao meio e fatiadas com uma espessura aproximada de 7,00 mm utilizando-se um mandolim com espessura regulável. As fatias foram colocadas em uma bacia previamente pesada (ainda vazia) e tiveram suas massas medidas em uma balança de prato.

Em seguida, as fatias foram distribuídas na bandeja superior do secador e, então, foram escolhidas 6 fatias para terem suas massas tomadas de tempo em tempo ao longo do experimento de secagem. Como a taxa de secagem é maior no início da secagem, na primeira hora, as massas foram tomadas a cada 20 minutos e, após a primeira hora, foram tomadas a cada 30 minutos. Essas fatias foram colocadas em formas de alumínio previamente pesadas e dispostas ao longo do leito do secador. As formas 1 e 4 foram colocadas em uma posição mais à esquerda do secador, ao redor do termopar 1. As formas 2 e 5 foram colocadas mais ao centro do leito (próximas ao termopar 2) e as formas 3 e 6, mais à direita do leito (próximas ao termopar 3). As fatias 1, 2 e 3 ficaram em pontos mais expostos ao sol, enquanto as formas 4, 5 e 6 ficaram em uma região mais sombreada. Na Figura 4.4 podemos observar a configuração do secador utilizada no processo de secagem.

Figura 4.4 – Secagem de fatias de maçãs em secador solar. Posições das amostras representadas de A1 à A6; dos termopares, de T1 a T6; e dos transmissores de temperatura, por A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No primeiro experimento, o transmissor de temperatura A permaneceu no local indicado na Figura 4.4. Nos outros experimentos, este transmissor foi posicionado fora do secador, sobre sua estrutura, próximo à célula fotovoltaica. Nos experimentos em que foi utilizada convecção forçada, nos momentos em que as formas eram retiradas para o aferimento de suas massas, também era anotado a velocidade do ar medido pelo anemômetro colocado no interior do secador, em uma posição próxima ao centro do leito. As velocidades do ar foram tomadas a partir de função do próprio equipamento que calcula uma média ao longo de um determinado tempo. Nos experimentos com convecção forçada, o tempo determinado para o cálculo da velocidade média foi de 10 segundos.

Em todos os experimentos de secagem, após o processo completar aproximadamente sete horas, as amostras eram submetidas a um aquecimento de 150°C por 24 horas em uma estufa, para garantir que o material fosse seco completamente, possibilitando a determinação do valor da massa seca das amostras.

4.2 Secagem em estufa de secagem

Para estes experimentos, foram utilizadas duas estufas, uma com convecção forçada e outra com convecção natural.

Nos experimentos de secagem feitos em estufa, a preparação das maçãs foi igual às realizadas nos experimentos com o secador solar. As maçãs foram devidamente lavadas e

cortadas ao meio, utilizando-se uma faca. Com o mandolim, cada metade da maçã foi fatiada. Desta vez, foram selecionadas apenas quatro amostras para serem submetidas ao processo de secagem.

As fatias selecionadas foram colocadas no mesmo recipiente de alumínio utilizado nos experimentos de secagem com o secador solar. De tempos em tempos, ao longo do processo de secagem, as amostras eram retiradas da estufa e tinham suas massas aferidas em uma balança digital e suas espessuras e diâmetros medidos. No início da secagem, nas primeiras 3 horas, as massas foram tomadas a cada 10 minutos. Após a terceira hora, as medidas foram tomadas a cada 20 minutos.

Para a secagem na estufa, foram feitos quatro experimentos:

- Experimento 2.1: Secagem a 50°C com convecção natural;
- Experimento 2.2: Secagem a 50°C com convecção forçada;
- Experimento 2.3: Secagem a 60°C com convecção natural;
- Experimento 2.4: Secagem a 60°C com convecção forçada.

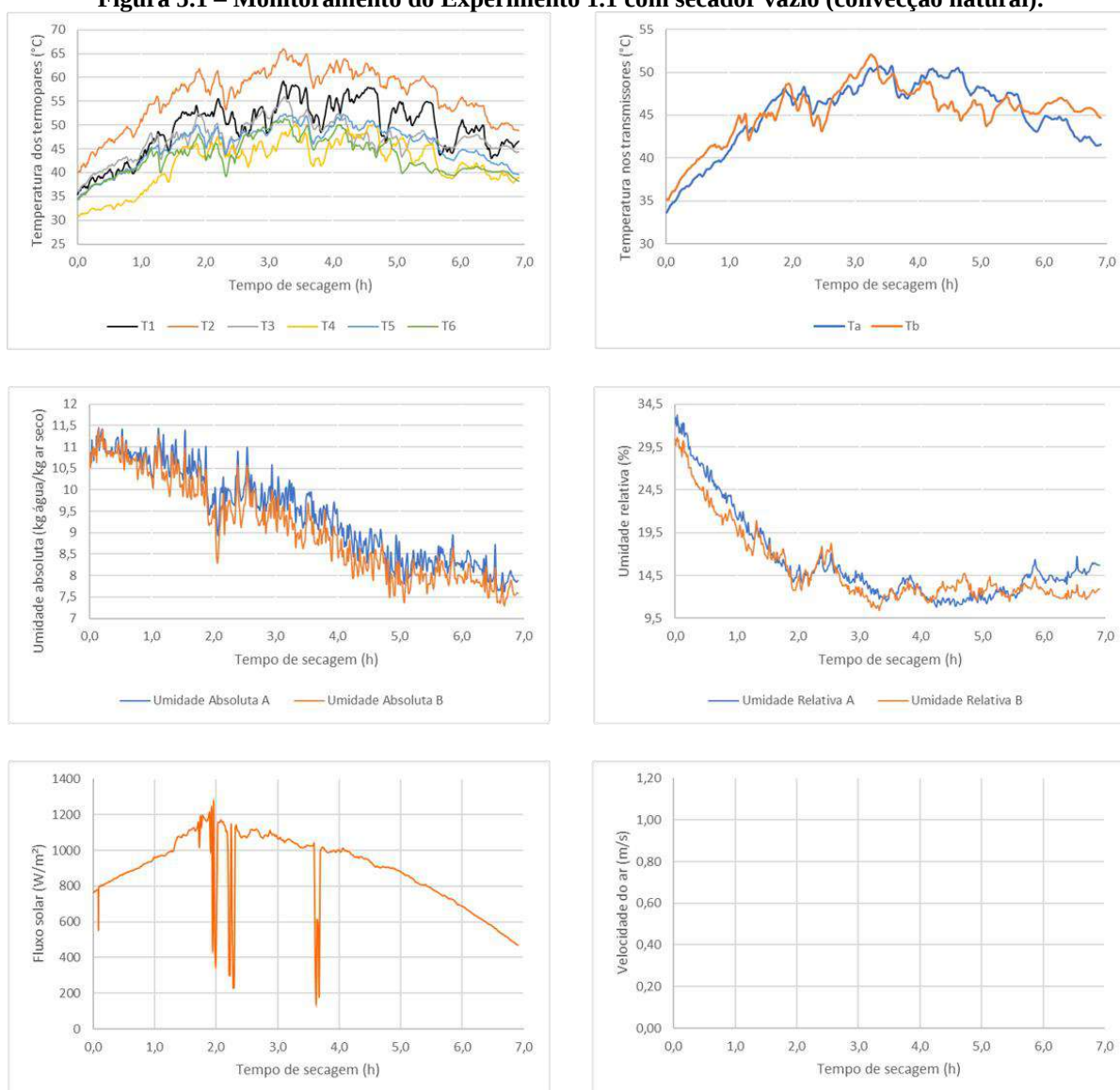
Após o monitoramento de cada secagem, as amostras eram submetidas a um aquecimento de 150°C por 24 horas, para garantir que o material fosse seco completamente, possibilitando a determinação do valor da massa seca das amostras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Secagem em secador solar

O primeiro experimento com o secador vazio (Experimento 1.1), foi feito com convecção natural. Os dados obtidos podem ser verificados nos gráficos da Figura 5.1

Figura 5.1 – Monitoramento do Experimento 1.1 com secador vazio (convecção natural).



Fonte: Elaborado pelo autor.

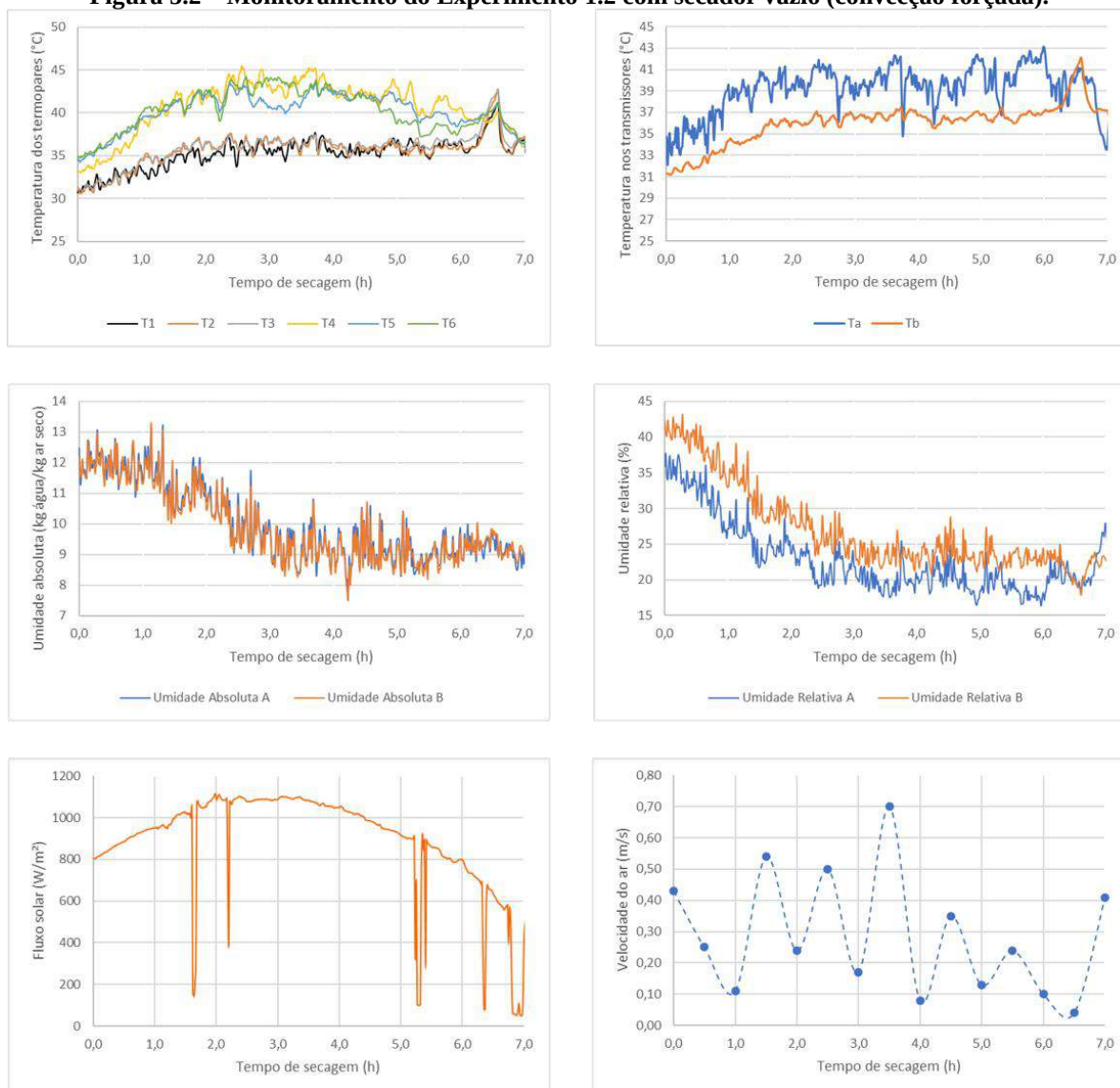
Com estes dados, é possível confirmar que a umidade relativa é função da temperatura, enquanto a absoluta não. Isto ocorre, pois, a umidade relativa é a quantidade de vapor de água presente até o ponto de saturação do ar, que depende da temperatura e pode ser observado que ela se comporta inversamente proporcional à temperatura no interior do secador. Notamos ainda que as temperaturas (tanto dos termopares quanto dos transmissores) e o fluxo solar variam ao longo do tempo. O fluxo solar vai aumentando no decorrer do experimento até atingir o pico

após aproximadamente 2 horas de secagem, quando o horário local era aproximadamente 12h, momento em que o sol está a pino. Assim, as temperaturas dos termopares e dos transmissores registram as maiores temperaturas perto deste momento. Em alguns momentos há uma queda repentina no fluxo solar, isto ocorre por conta de formação de nuvens que bloqueiam a incidência solar.

Outro detalhe é que as temperaturas nas posições de T_1 , T_2 e T_3 são as mais alta, uma vez que estão mais expostas ao sol, sendo que as posições T_4 , T_5 e T_6 estavam em regiões sombreadas.

O segundo experimento (Experimento 1.2), também foi realizado com o secador vazio, mas dessa vez foi utilizada convecção forçada. Os dados obtidos podem ser observados nos gráficos da Figura 5.2.

Figura 5.2 – Monitoramento do Experimento 1.2 com secador vazio (convecção forçada).

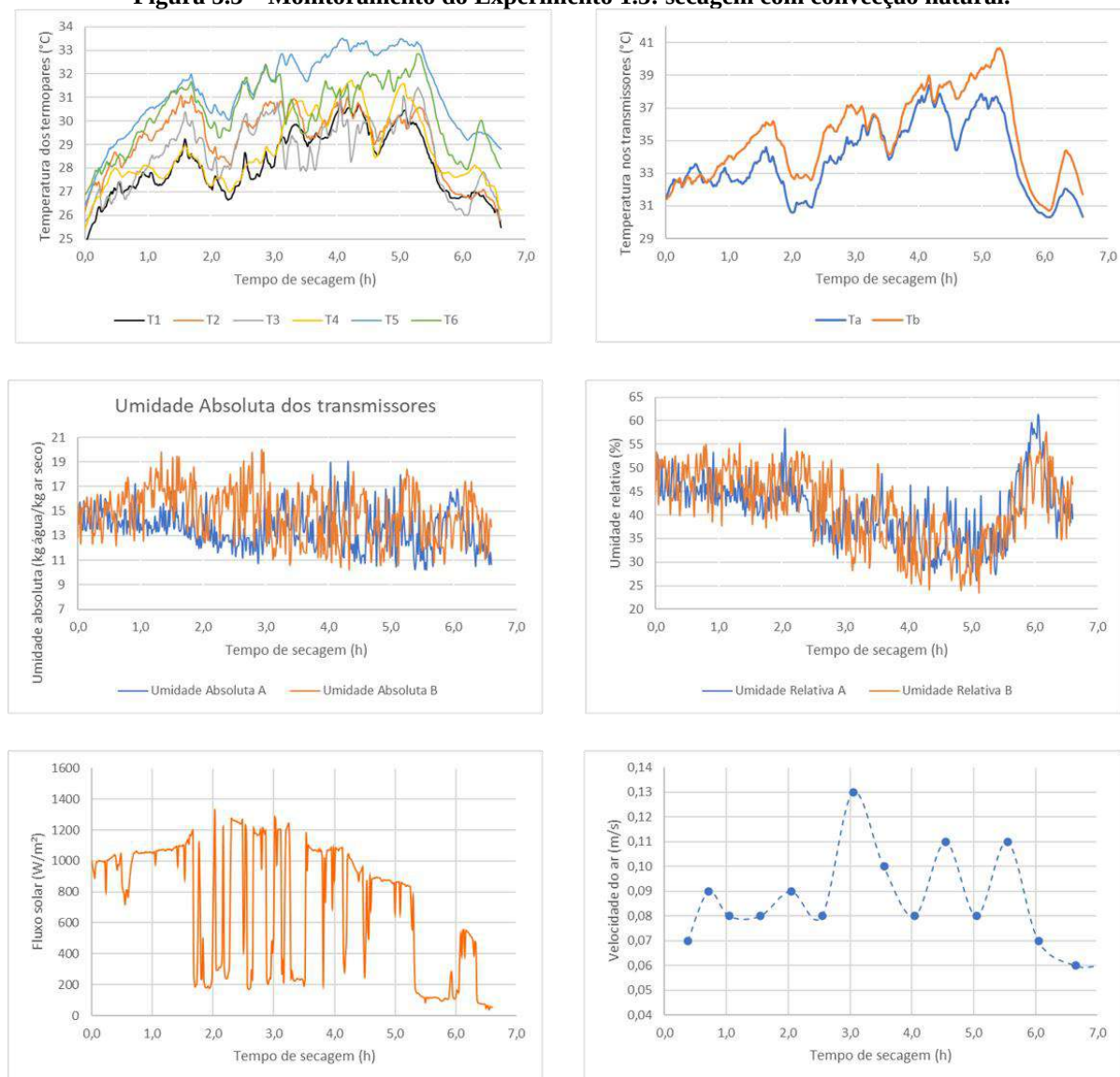


Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando com o experimento anterior, em que a principal mudança foi o tipo de convecção (natural e forçada), podemos observar que a temperatura, tanto dos termopares quanto nos transmissores, manteve-se mais constante e com picos menores. Isto ocorreu pois, com a convecção forçada, a troca de matéria e energia entre o interior e o exterior do secador foi favorecida, mantendo a temperatura no interior do secador mais baixa. A partir deste experimento, foi medida a velocidade do ar no interior do secador.

Neste experimento, o transmissor A foi colocado fora do secador, enquanto o transmissor B continuou na mesma posição, que pode ser vista na Figura 4.4. Neste experimento podemos verificar que a temperatura no interior do secador permaneceu mais baixa quando comparada ao ambiente externo.

Após os experimentos com o secador vazio, foram feitos três experimentos de secagem de maçãs utilizando-se o secador solar. O primeiro destes, Experimento 1.3, foi feito com convecção natural e iniciado por volta das 10 h. Foram monitorados os mesmos parâmetros mapeados nos experimentos anteriores. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 5.3

Figura 5.3 – Monitoramento do Experimento 1.3: secagem com convecção natural.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste processo com convecção natural, a secagem ocorreu com a temperatura interna mais alta que a externa, como pode ser visto no gráfico das temperaturas Ta e Tb.

Outro ponto que chama atenção, são as temperaturas medidas no processo de secagem. Quando comparado ao secador vazio, no primeiro experimento, as temperaturas no processo de secagem permaneceram mais baixas, demonstrando que parte desta energia foi utilizada na evaporação da umidade presente no material no interior do secador (maçãs). Por conta da secagem, as umidades absoluta e relativa no processo de secagem foram mais altas que as observadas no primeiro experimento, que apresentava o mesmo tipo de convecção, mas não havia processo de secagem.

Nos experimentos que envolviam secagem, os recipientes onde as amostras eram colocadas tinham suas massas tomadas. Na Tabela 1, temos as massas dos recipientes (m_{Ri}) deste primeiro experimento de secagem (Experimento 1.3), em que i varia de 1 a 6, correspondendo a cada amostra.

Tabela 1 - Massas dos recipientes de cada amostra.

m_{R1} (g)	m_{R2} (g)	m_{R3} (g)	m_{R4} (g)	m_{R5} (g)	m_{R6} (g)
7,2879	7,2848	7,2402	7,1924	7,2067	7,1489

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as massas das 6 amostras (m_1 a m_6) que foram monitoradas ao longo do processo de secagem, encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2 - Massas das amostras ao longo do processo de secagem

Horário	m₁ (g)	m₂ (g)	m₃ (g)	m₄ (g)	m₅ (g)	m₆ (g)
08:57	21,9464	20,3150	18,5416	19,3953	20,7095	21,2840
09:20	21,3713	19,6780	18,1683	19,1276	20,3321	20,9077
09:40	20,8047	19,1041	17,8049	18,8729	19,9918	20,5865
10:00	20,2307	18,4976	17,3970	18,6346	19,6793	20,2319
10:30	19,3249	17,5059	16,7293	18,2430	19,1110	19,6616
11:00	18,3773	16,4421	16,0009	17,8391	18,4862	19,0320
11:30	17,5526	15,5407	15,3981	17,4775	17,9307	18,4605
12:00	16,7266	14,6590	14,7680	17,1090	17,3789	17,8839
12:30	16,0818	13,9613	14,2803	16,7989	16,8589	17,3358
13:00	15,4469	13,2835	13,8175	16,4881	16,3641	16,8033
13:30	15,0019	12,8317	13,5109	16,2306	15,9845	16,3596
14:00	14,5970	12,4345	13,2294	15,9719	15,6067	15,9073
14:30	14,2466	12,1038	12,9922	15,7558	15,3003	15,5354
15:00	13,8348	11,7355	12,7200	15,4827	14,9091	15,0589
15:30	13,5347	11,4805	12,5072	15,2480	14,5870	14,6605

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o experimento, as amostras foram colocadas em uma estufa onde foram secas por 24h à 150°C, garantindo a secagem total do material. Após as 24h, as massas das amostras secas foram medidas, junto do recipiente em que estavam durante todo o processo. As massas das amostras secas e de seus recipientes (m_{SR1}) encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Massas das amostras secas e seus recipientes

m_{SR1} (g)	m_{SR2} (g)	m_{SR3} (g)	m_{SR4} (g)	m_{SR5} (g)	m_{SR6} (g)
0,7177	0,4999	0,5467	0,4793	0,7526	0,7147

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, os valores das massas das amostras secas ($m_{S,i}$) podem ser obtidos subtraindo-se os valores das massas de cada recipiente ($m_{R,i}$), mostrados na Tabela 1, dos valores das massas das amostras secas e seus recipientes ($m_{SR,i}$), que estão na Tabela 3. Este cálculo está representado na Equação 4:

$$m_{S,i} = m_{SR,i} - m_{R,i} \quad (3)$$

Os valores das massas das fatias ($m_{SU,i}$) de cada amostra durante o experimento, pode ser calculada subtraindo-se os valores dos respectivos recipientes ($m_{R,i}$), da Tabela 1, dos valores das massas das fatias (m_i), da Tabela 2. A Equação 5 representa este cálculo:

$$m_{SU,i} = m_i - m_{R,i} \quad (4)$$

Já para calcular as massas de umidade ($m_{U,i}$) em cada instante, é necessário subtrair os valores das massas secas de cada amostra ($m_{S,i}$) dos valores das massas das fatias ($m_{SU,i}$). O cálculo está representado pela Equação 6.

$$m_{U,i} = m_{SU,i} - m_{S,i} \quad (5)$$

Com as massas de umidade ($m_{U,i}$) e massas das amostras secas ($m_{S,i}$), podemos calcular as umidades em base seca e úmida, utilizando-se as Equações 1 e 2.

Tendo os valores de de umidade em base seca e úmida, é possível calcular a taxa de secagem (TS) a partir da Equação 7.

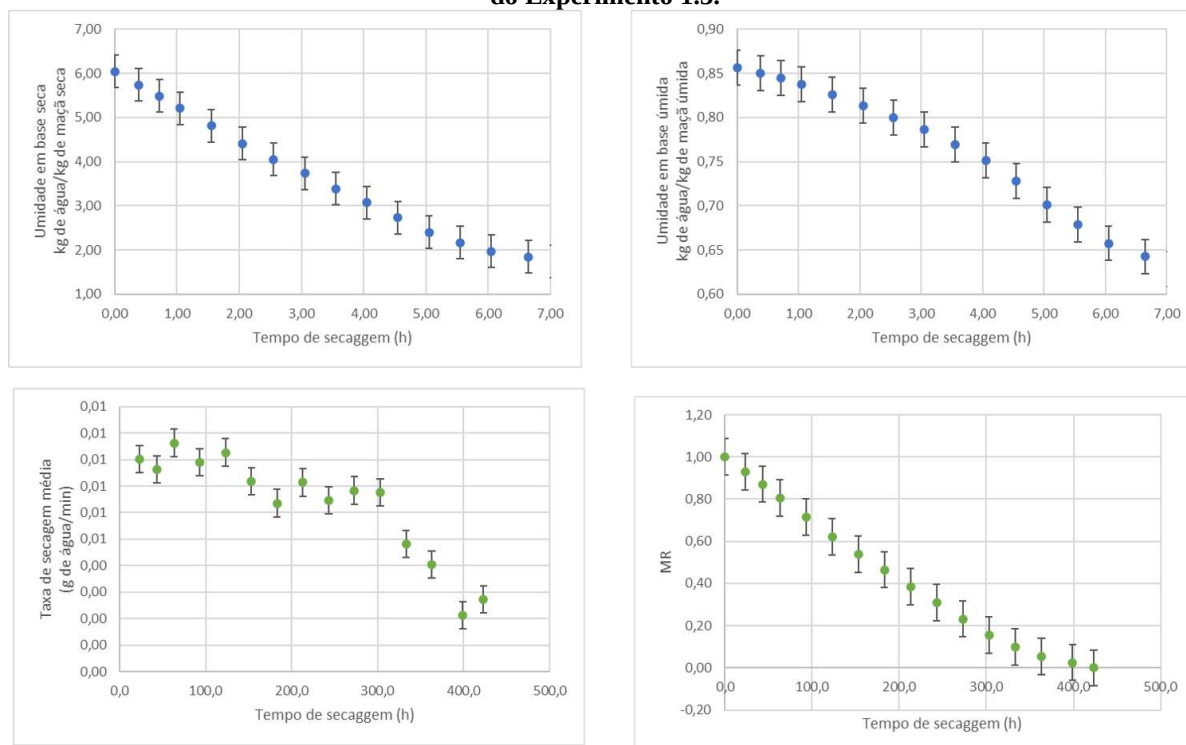
$$TS = m_{S,i} \left(\frac{\Delta X_{bs,t}}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

em que $\Delta X_{bs,t}$ é a variação da umidade em base seca em intervalo de tempo Δt de uma amostra i .

Tendo os valores de umidade em base seca ao longo do processo, também é possível calcular a Razão de Umidade (MR), utilizando-se a Equação 3.

Os valores das umidades em base seca (X_{BS}) e em base úmida (X_{BU}), das taxas de secagem (TS) e da Razão de Umidade (MR) foram calculados para cada ponto do processo de secagem em que foram tomadas as medidas das massas das amostras. Em seguida, foram calculados os valores médios de cada uma dessas grandezas e os resultados foram plotados em função do tempo de secagem decorrido. Os gráficos encontram-se na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Umidades em base seca e úmida, Taxa de secagem, e Razão de umidade em função do tempo, do Experimento 1.3.

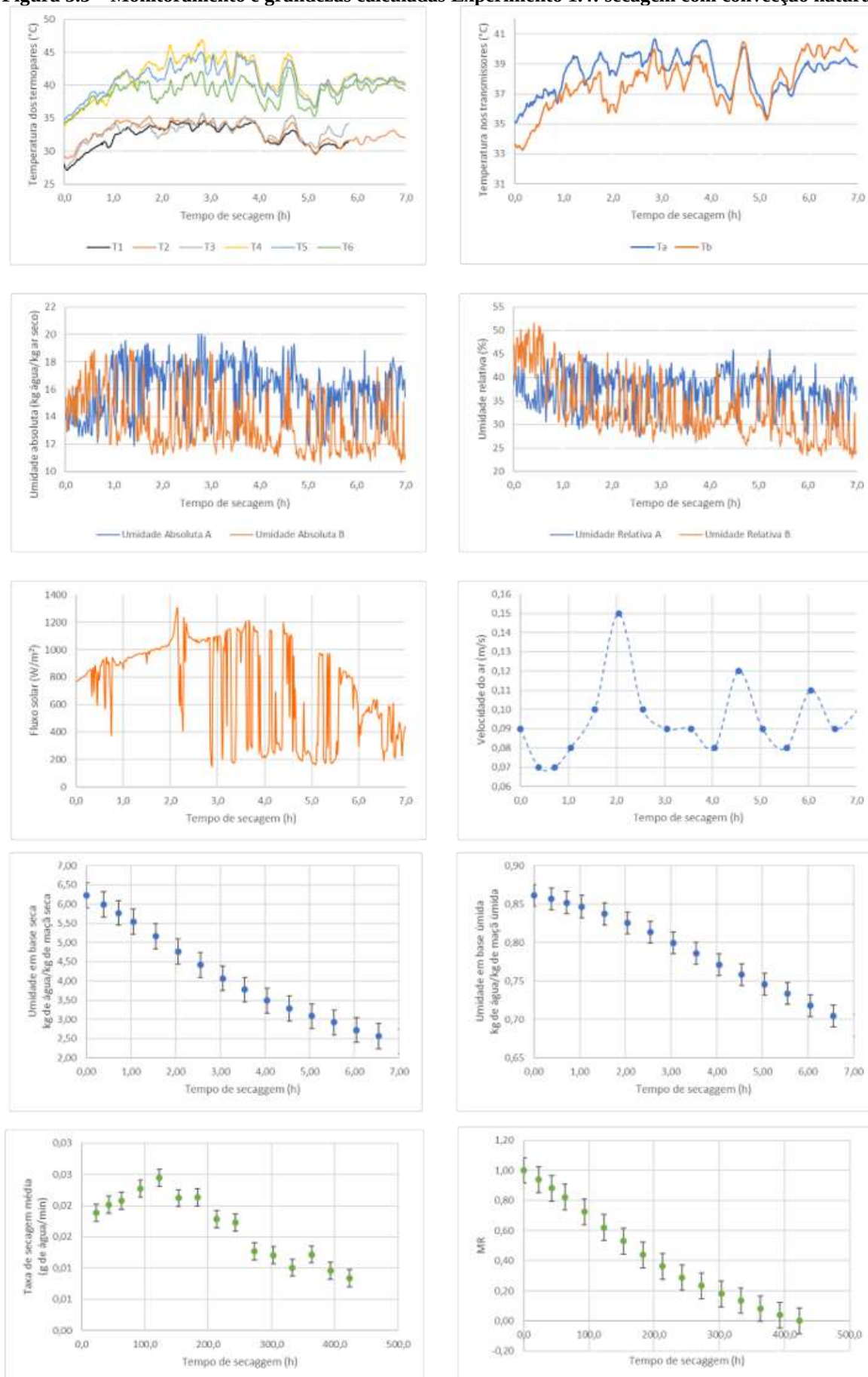


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os valores de umidade encontrados demonstram que o material no fim do processo ainda apresentava uma grande quantidade de água. A taxa de secagem foi decrescendo ao longo da secagem.

Já em relação ao Experimento 1.4, os resultados obtidos encontram-se na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Monitoramento e grandezas calculadas Experimento 1.4: secagem com convecção natural.

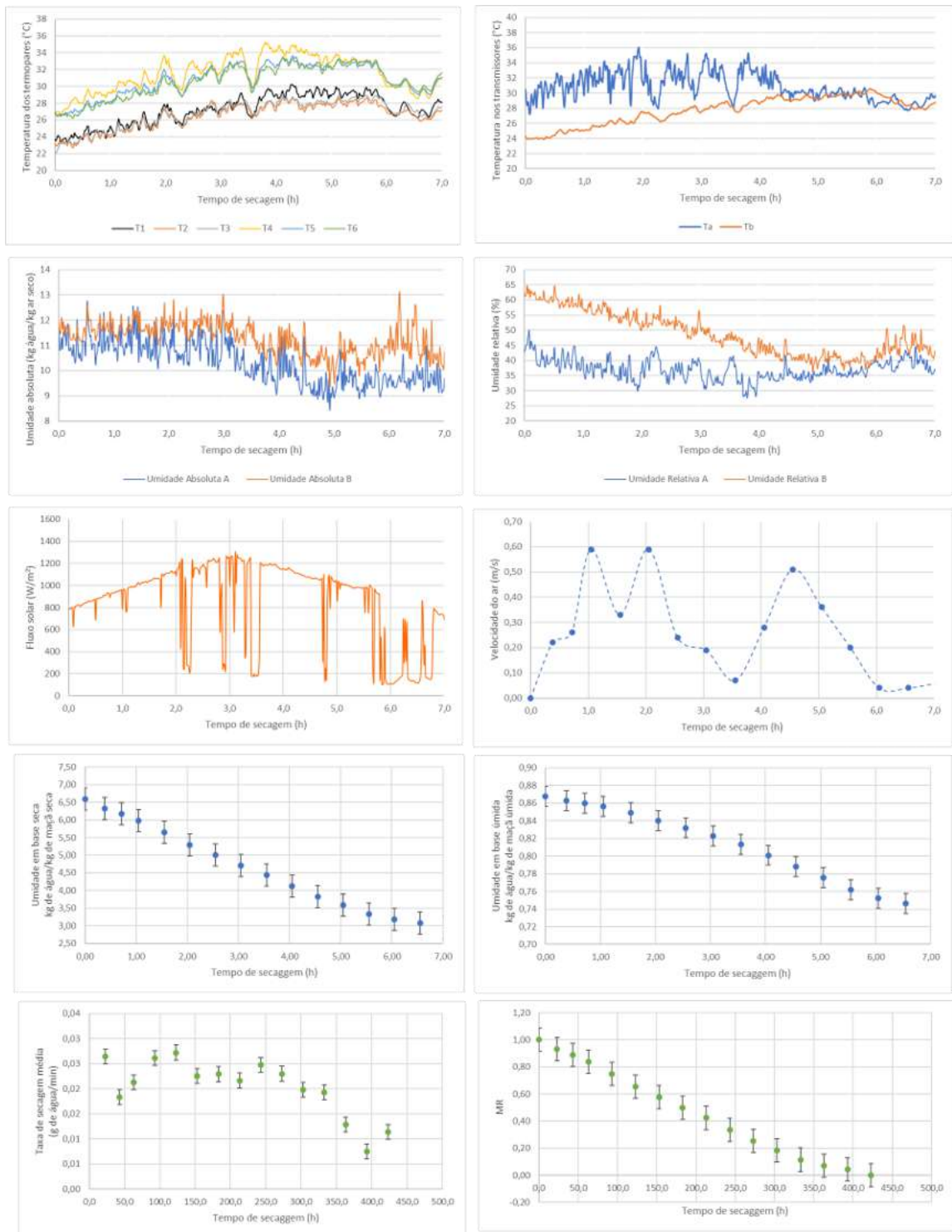


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observando-se os resultados, percebe-se que o processo de secagem foi bem similar ao anterior, visto que as condições do processo eram semelhantes.

Por fim, foi realizando o último experimento (Experimento 1.5) utilizando-se o secador solar. Dessa vez, a secagem ocorreu em meio à convecção forçada. Os resultados obtidos e calculados encontram-se na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Monitoramento e grandezas calculadas no Experimento 1.5: secagem com convecção forçada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como no outro experimento com convecção forçada, as temperaturas foram mais amenas quando comparadas às obtidas nos experimentos com convecção natural. Quando se compara as temperaturas obtidas no processo de secagem com convecção forçada com as obtidas no experimento com o secador vazio e com convecção forçada, as temperaturas da secagem são mais baixas, mostrando mais uma vez que parte da energia é utilizada na evaporação da água no interior do secador. Outro detalhe é que a temperatura e umidade do ambiente externo, próximos ao secador, que são medidas pelo transmissor A, tendem a equilibrar com o interior do secador, fazendo com que as grandezas fiquem com valores próximos, já que a umidade passa do material para o ar de secagem.

Após todos os experimentos com secador solar que estavam previstos serem realizados, é possível fazer um estudo em relação às diferentes configurações de processo. A menor umidade em base seca média obtida foi de 1,85 kg de água/kg de maçã seca. Este valor foi obtido na secagem com convecção natural, em que havia menos troca de massa, mas, em contrapartida, teve temperaturas mais altas. A menor Umidade em base úmida média, de 0,63 kg de água/kg de maçã úmida também foi obtida no mesmo experimento, de convecção natural (Experimento 1.3).

O menor valor de taxa de secagem encontrado nestes experimentos também foi no mesmo experimento em que foram obtidos as menores umidades. No Experimento 1.3, a taxa de secagem atingiu o valor 0,0027 g de água/min, situação de maior dificuldade para remover a água no interior do material encontrada nestes experimentos.

5.2 Secagem em estufas de secagem

No primeiro experimento de secagem em estufa, Experimento 2.1, a estufa foi programada para operar a 50°C e com convecção natural, por aproximadamente 7h.

Foram medidas as massas dos recipientes onde as amostras foram colocadas. Na Tabela 4, temos as massas dos recipientes (m_{Ri}) deste primeiro experimento de secagem, em que i varia de 1 a 4, correspondendo a cada amostra.

Tabela 4 - Massas dos recipientes de cada amostra.

m_{R1} (g)	m_{R2} (g)	m_{R3} (g)	m_{R4} (g)
40,6292	35,9536	32,2793	34,9251

Fonte: Elaborado pelo autor.

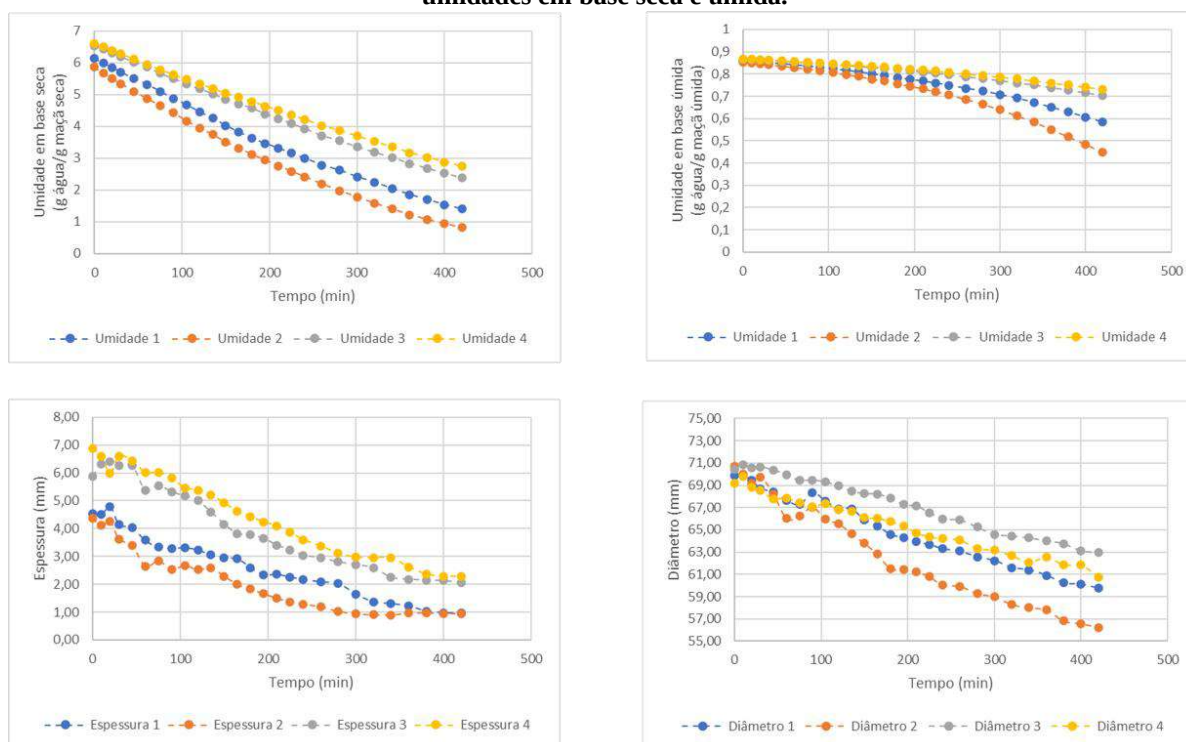
Da maneira análoga aos experimentos feitos no secador solar, as massas foram sendo medidas de tempo em tempo. Contudo, desta vez, foram medidos também a espessura e o

diâmetro de cada amostra. Os cálculos de umidade, taxa de secagem e razão de secagem foram calculados como nos experimentos anteriores.

Nesta parte do trabalho, foi calculada a área de secagem, por onde haverá troca de massa e calor. Para facilitar, a área de secagem da maçã foi aproximada a dois círculos, uma face superior e outra inferior. Dessa forma, sabendo o diâmetro, foi possível calcular a área das amostras nos momentos em que os parâmetros foram medidos. O valor da área de secagem foi útil para calcular o Fluxo de Secagem (FS), que é a razão da Taxa de Secagem (TS) pela área de secagem.

As medidas das espessuras e dos diâmetros das 4 amostras podem ser vistas nos gráficos da Figura 5.7. Além destes valores, temos também as umidades em base seca e úmida, que foram calculadas a partir das massas que foram medidas ao longo do experimento.

Figura 5.7 – Experimento 2.1 (Secagem a 50°C com convecção natural): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.



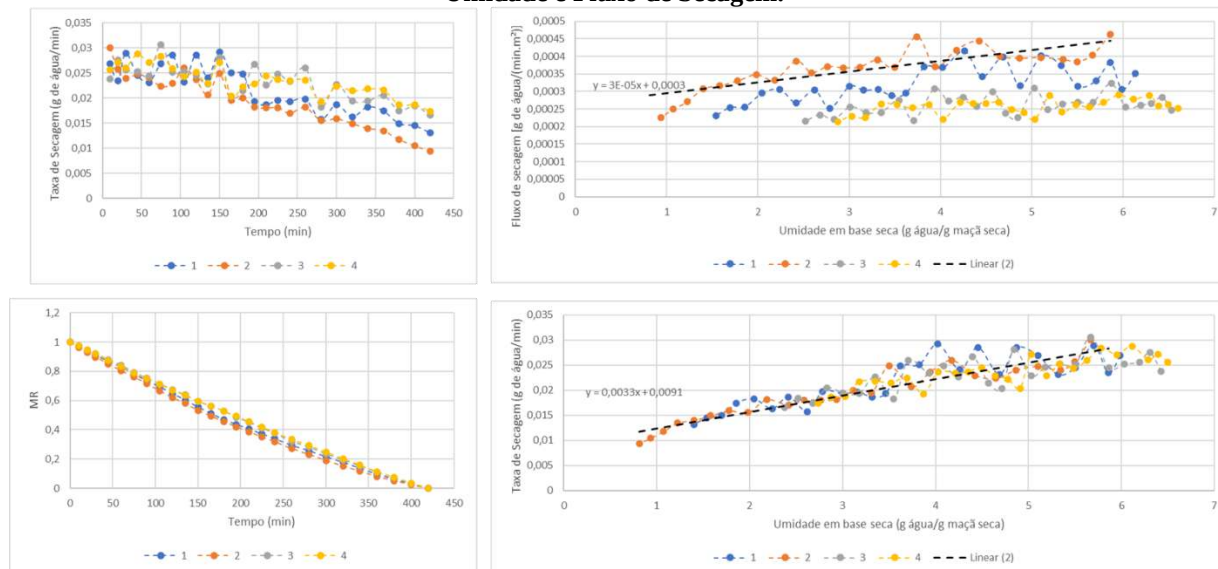
Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos constatar que, à medida que o processo de secagem ocorre, as amostras vão se deformando, tanta na espessura quanto no diâmetro. Assim, a superfície da maçã acaba se deformando e essa mudança altera o mecanismo de secagem que ocorre no material.

Outros valores calculados para cada uma das 4 amostras foram a Taxa de Secagem, a Razão de Umidade e o Fluxo de Secagem. A Taxa de Secagem foi plotada em função do tempo e da Umidade em Base Seca.

Estes valores encontram-se na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Experimento 2.1 (Secagem a 50°C com convecção natural): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.



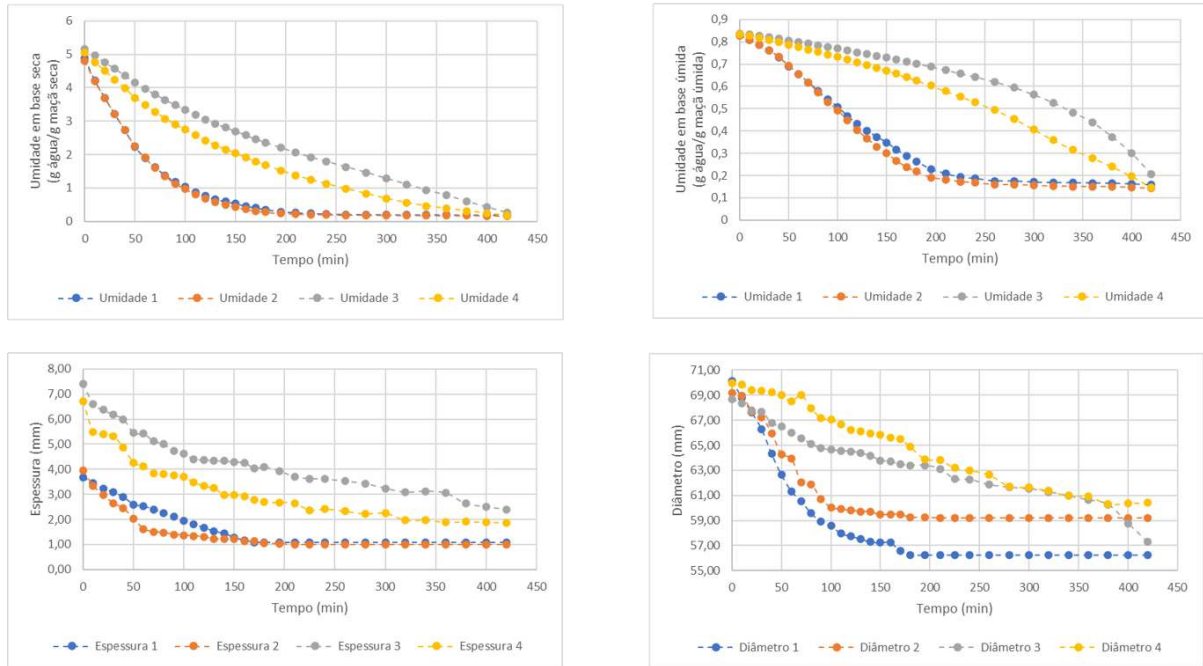
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando as curvas de secagem, podemos observar que a taxa de secagem vai diminuindo ao longo do tempo, sendo um sinal de que o processo de secagem está sendo governado por fatores internos do material. Além disso, o Fluxo e a Taxa de Secagem em função da Umidade em Base Seca encontram-se também em uma fase de taxa ou fluxo decrescente, momento em que a resistência à transferência de massa através do material é maior que a resistência de difusão do gás na camada limite.

De maneira análoga, foram feitos os outros experimentos nas estufas de secagem.

No segundo experimento de secagem em estufa, o processo foi realizado com convecção forçada, ainda a 50°C. Os valores da espessura e dos diâmetros medidos encontram-se na Figura 5.9, além das Umidades em base seca e úmida.

Figura 5.9 – Experimento 2.2 (Secagem a 50°C com convecção forçada): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.

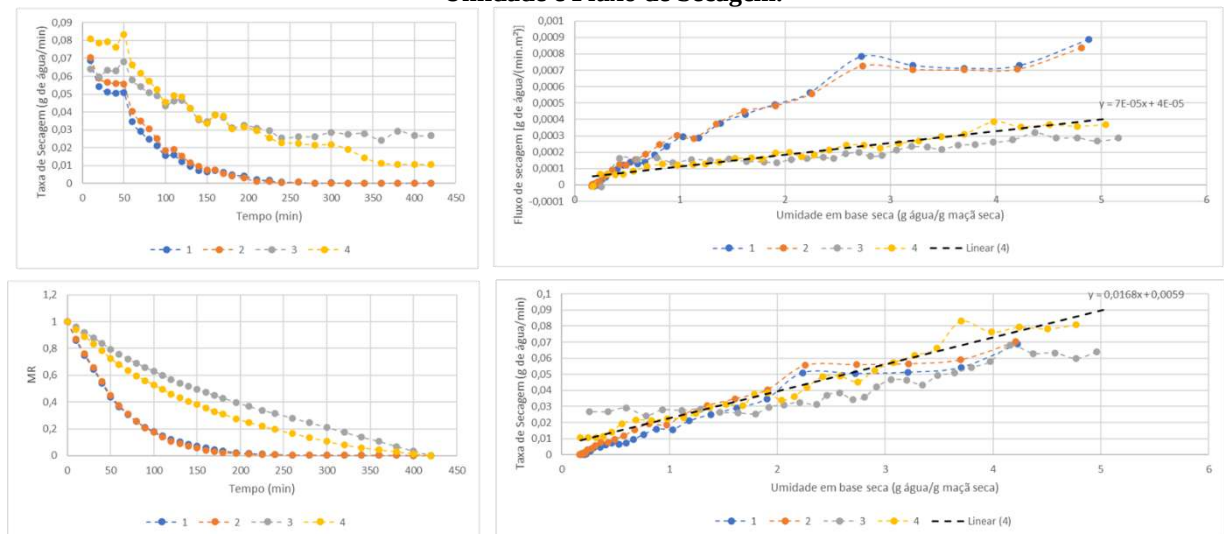


Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos, podemos notar novamente que as dimensões da amostra (espessura e diâmetro) diminuíram ao longo da secagem e que as amostras que apresentaram os menores valores de espessura inicial tiveram uma secagem mais rápida, em que a umidade de equilíbrio fosse atingida mais rapidamente. Contudo, neste experimento, as umidades finais apresentaram valores bem baixos, demonstrando que a secagem conseguiu remover grande parte da água.

Os valores da Taxa de Secagem, a Razão de Umidade e o Fluxo de Secagem encontram-se na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Experimento 2.2 (Secagem a 50°C com convecção forçada): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.



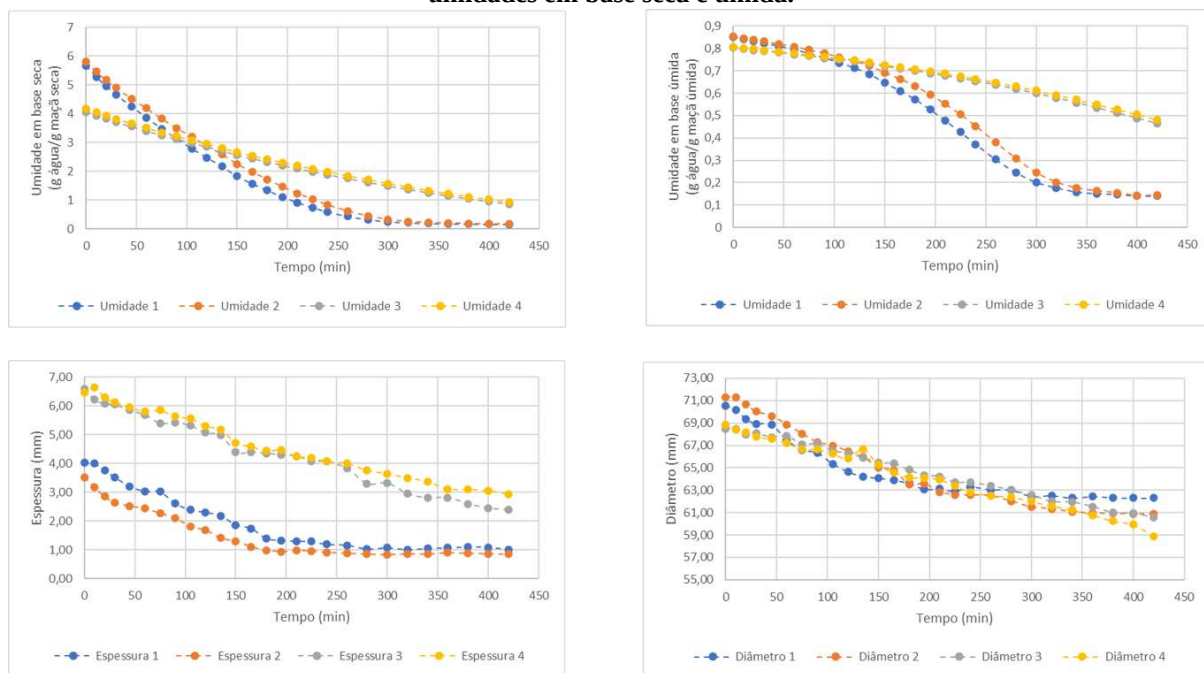
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os gráficos, de modo geral, percebemos que a secagem conseguiu atingir um teor de umidade muito baixo. Comparando-se com o experimento anterior, a temperatura de operação foi a mesma, porém neste, houve a presença de convecção forçada.

Observando na Figura 5.9 as espessuras das amostras e na Figura 5.10 o Fluxo de secagem, podemos dizer que as amostras com a menor espessura inicial apresentaram no gráfico do Fluxo de secagem ao longo do tempo o comportamento esperado de um processo de secagem, com um período de taxa constante no início da secagem, seguido por um período de taxa decrescente.

Os valores da espessura e dos diâmetros medidos no terceiro experimento de secagem em estufa (Experimento 2.3) encontram-se na Figura 5.11, além das Umidades em base seca e úmida.

Figura 5.11 – Experimento 2.3 (Secagem a 60°C com convecção natural): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.

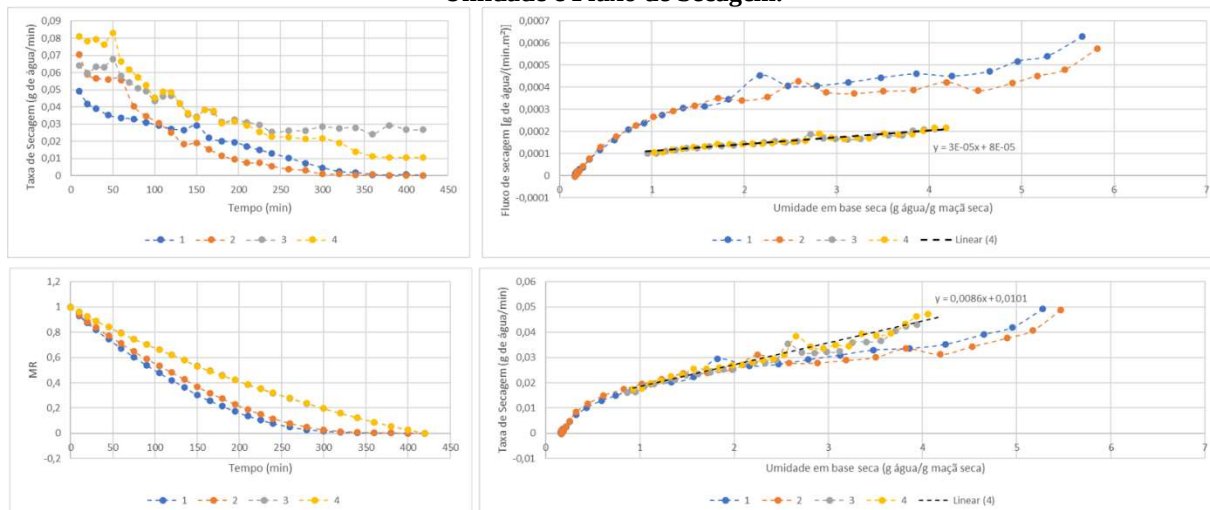


Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste experimento, o que chama atenção foi o fato das amostras que apresentaram as maiores espessuras iniciais terem chegado ao final da secagem com umidades tão altas. Isto pode ter acontecido pelo fato de as amostras possuírem, proporcionalmente, muito material seco e pouca água, como pode ser constatado na umidade em base seca inicial. Nos outros experimentos, as fatias com maiores espessuras apresentavam uma umidade próxima das outras amostras, diferente do que ocorreu neste experimento.

Os valores da Taxa de Secagem, a Razão de Umidade e o Fluxo de Secagem encontram-se na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Experimento 2.3 (Secagem a 60°C com convecção natural): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.

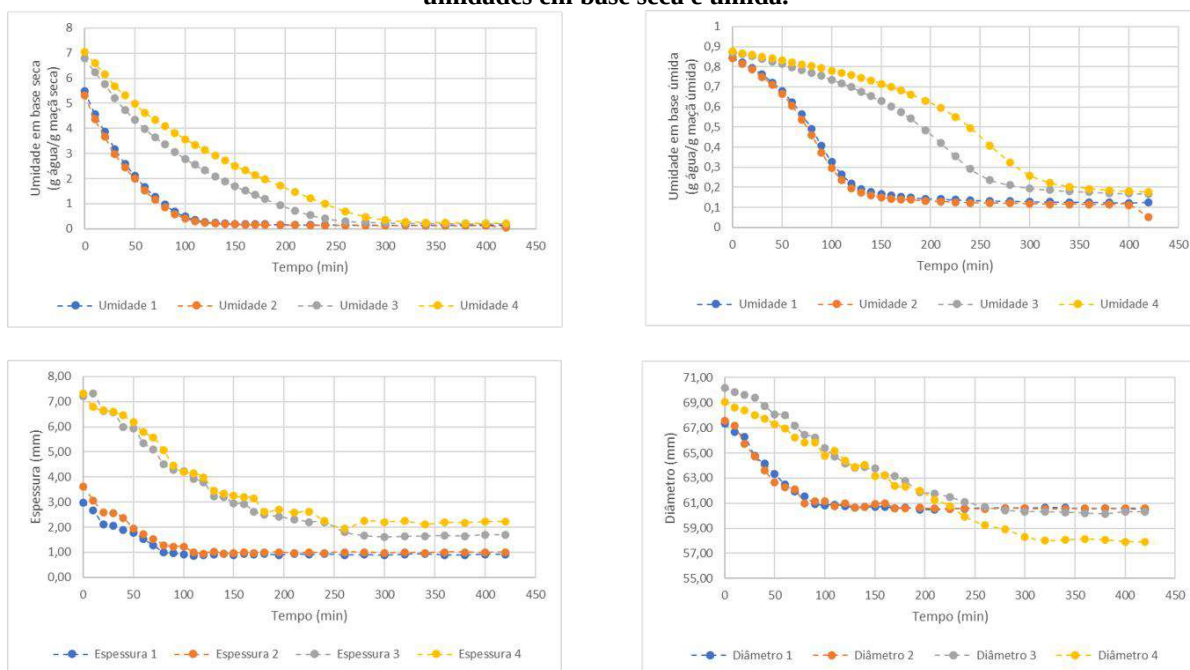


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme comentado antes, as amostras com maiores espessuras apresentaram maior resistência a remoção de água, uma vez que o Fluxo de secagem se manteve baixo e o MR demorou mais para atingir o ponto correspondente ao final da secagem.

Por fim, os valores da espessura e dos diâmetros medidos no Experimento 2.4 encontram-se na Figura 5.13, além das Umidades em base seca e úmida.

Figura 5.13 – Experimento 2.4 (Secagem a 60°C com convecção forçada): Espessuras, diâmetros e umidades em base seca e úmida.



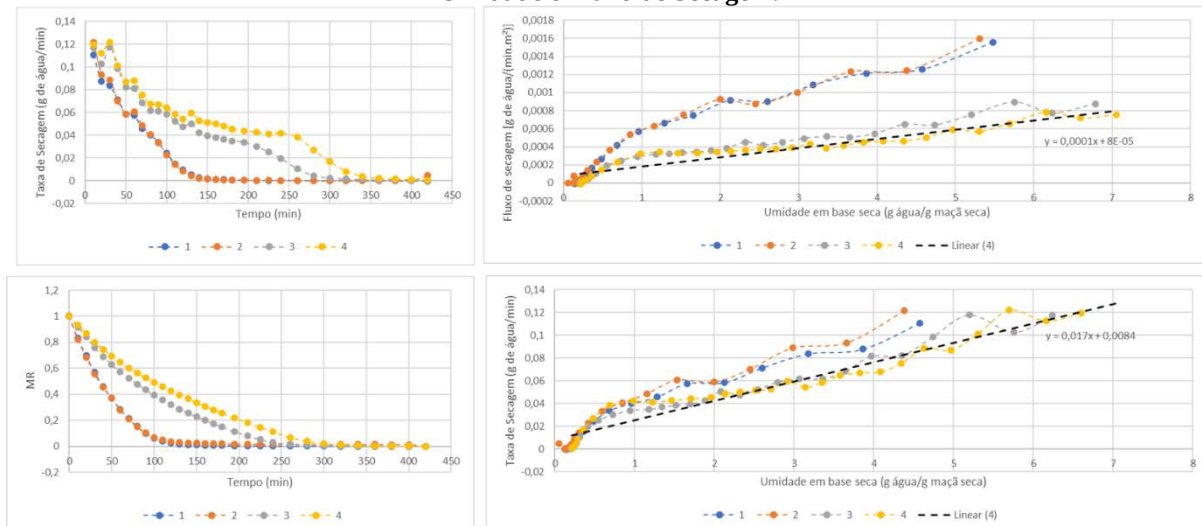
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como era esperado, por conta da temperatura ser a mais alta utilizada em todos os experimentos de estufa e utilizando convecção forçada, este experimento conseguiu atingir as menores umidades finais obtidas nesta série de experimentos. Isto pode ser explicado por conta

dos fenômenos envolvidos no processo de secagem, que é a difusão de água no ar de secagem e o fornecimento de energia para promover a evaporação da água.

Os valores da Taxa de Secagem, a Razão de Umidade e o Fluxo de Secagem encontram-se na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Experimento 2.4 (Secagem a 60°C com convecção forçada): Taxa de secagem, Razão de Umidade e Fluxo de Secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, as amostras que possuíam uma menor espessura foram as que obtiveram as menores umidades finais, o que já era esperado, por haver uma menor resistência interna para a remoção da água.

Com relação à influência da temperatura e do tipo de convecção (natural ou forçada) no processo de secagem, podemos observar os experimentos com a estufa a 50°C com convecção (Experimento 1.2) e com a estufa a 60°C sem convecção (Experimento 1.3). Tratando-se das umidades finais obtidas, o processo com convecção (Experimento 1.2), apesar de uma temperatura mais baixa, teve umidades finais mais baixas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Com este trabalho foi possível estudar e entender melhor os mecanismos envolvidos no processo de secagem, como a transferência de massa e de calor

Nos experimentos de secagem utilizando um secador solar, foi possível verificar que a temperatura no interior secador, quando está ocorrendo processo de secagem, permanece menor do que no exterior, uma vez que parte da energia é utilizada na evaporação da água presente no material.

Outro fato interessante constatado neste trabalho é a importância da espessura do material a ser seco. Materiais com espessura menor, no caso das maçãs, favorecem o processo de secagem, sendo possível atingir valores de umidade mais baixos quando compara a amostrar mais espessas. Isto pode ser explicado pelo fato de haver menos resistência físico-química ao movimento de remoção de água do interior do material.

A comparação entre os processos de secagem realizados em secadores solares e estufas foi importante para demonstrar na prática os impactos causados no processo de secagem em sistemas não controlados, ou pouco controlados.

Estes experimentos serviram também para observar com mais detalhes o comportamento das umidades em base seca e úmida durante o processo de secagem, além das umidades absoluta e relativa, esta última dependente da temperatura.

Nos experimentos com secador solar, a menor umidade em base seca média obtida foi de 1,85 kg de água/kg de maçã seca, a menor umidade em base úmida média foi de 0,63 kg de água/kg de maçã úmida e a menor taxa de secagem foi de 0,0027 g de água/min, todos estes parâmetros obtidos no Experimento 1.3, com convecção natural.

Como sugestão para trabalhos futuros, acredito que seria interessante viabilizar uma forma de medição mais fácil e precisa das dimensões das amostras que são submetidas à secagem, como a espessura e o diâmetro, além de aprofundar os estudos em relação à influência da variação do tamanho do material que passa pelo processo de secagem.

Além disso, acho que seria interessante realizar um estudo em relação à fluidodinâmica presente no interior dos secadores,

7 REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- HIDALGO, Letícia Ferraresi. **Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico: aplicação para secagem de alimentos.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, [S. l.], 2021.
- 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.
- KAYA, A. **Drying Kinetics of Red Delicious Apple.** In: BIOSYSTEMS Engineering. [S. l.: s. n.], 2007.
- 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.

- MOURA, S. C. R. S. **Determinação de vida-de-prateleira de maçã-passa por teste acelerados**. 2007. Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL.
- SAIREN. **Quais são as diferentes tecnologias de secagem industrial?**. 2023. Disponível em: <https://www.sairem.com/pt/the-different-industrial-drying-technologies>. Acesso em: 18/12/2023.
- 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.
- SEMPRE SUSTENTÁVEL. **Energia solar**. 2023. Disponível em: <http://www.sempresustentavel.com.br/solar.htm>. Acesso em: 18/12/2023.
- SCHULTZ, E. L.. **Influência das condições de secagem sobre o encolhimento e propriedades de transporte em fatias de maçã**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 1999.
- TIWARI, A. **A Review on Solar Drying of Agricultural Produce**. Journal of Food Processing and Technology, v. 7, n. 9, 1000623, 2016.
- 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.