

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME DE SOUSA POLEGATO

SECAGEM E REIDRATAÇÃO DE FATIAS DE MAÇÃ

MEDIANEIRA

2023

GUILHERME DE SOUSA POLEGATO

SECAGEM E REIDRATAÇÃO DE FATIAS DE MAÇÃ

Drying and rehydration of apple slices

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia

Coorientadora: Profa. Dra. Elciane Regina Zanatta

MEDIANEIRA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME DE SOUSA POLEGATO

SECAGEM E REIDRATAÇÃO DE FATIAS DE MAÇÃ

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/junho/2023

Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia
Doutora em Engenharia e Ciências de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

Profa. Dra. Elciane Regina Zanatta
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

Profa. Dra. Daiane Cristina Lenhard
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

Ígor Henrique de Mello Rodrigues Ciolin
Mestrando em Engenharia Química
Universidade Federal de Santa Catarina

MEDIANEIRA

2023

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Rosimar e Fernando, minha irmã Gabriela e a minha namorada Gabriela, por todo amor e carinho e incentivo à conclusão desta etapa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer à Deus por ter me proporcionado força e sabedoria nesta caminhada.

Aos meus pais, Fernando Polegato e Rosimar Teixeira de Sousa Polegato, que sempre acreditaram em mim, foram meus pilares, principalmente nos momentos difíceis, permanecendo ao meu lado todo esse tempo, apoiando e incentivando. Nada disso seria possível sem eles.

Agradeço a minha irmã Gabriela Polegato, pelo amor e carinho durante essa trajetória, mesmo estando longe.

Agradeço a minha namorada Gabriela Batista por todo apoio, carinho, companheirismo, por ser amiga nas horas difíceis, suportar meu estresse. Obrigado por me apoiar a desenvolver o projeto, me acalmando a cada etapa, com muita paciência e amor.

Agradeço aos meus amigos e colegas que fizeram parte durante essa trajetória, que estiveram comigo durante boa parte dessa graduação.

Agradeço aos meus amigos de longa data, que mesmo longe se fizeram presente na minha vida.

Deixo registrado minha satisfação com a orientadora Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia e à coorientadora Profa. Dra. Elciane Regina Zanatta que me deram suporte e apoio para elaboração do presente trabalho. Muito obrigado.

Agradeço também a todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado e conhecimento até aqui.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

A maçã é uma fruta conhecida por sua textura crocante, sabor adocicado e polpa suculenta. Uma maneira de reduzir sua perecibilidade, aumentando sua vida de prateleira, é proceder à secagem. Muitos produtos secos, quando de sua utilização final, seja como insumos industriais ou utilizados pelo consumidor, são reidratados. Este trabalho teve como objetivo a secagem e a reidratação de fatias de maçãs de 1 cm de espessura. Fatias das frutas foram desidratadas até o equilíbrio em temperaturas de 50 e 70 °C, sendo pesadas em períodos regulares de tempo. Após a secagem a diferentes temperaturas, as maçãs foram reidratadas até o equilíbrio a 2 °C (temperatura de geladeira) e 25 °C (temperatura ambiente), sendo pesadas periodicamente. Os dados experimentais foram ajustados à Lei de Fick, possibilitando o cálculo do coeficiente efetivo de difusão da água, e a doze modelos empíricos/semi empíricos. A secagem das frutas resultou em alimentos com atividade de água suficientemente baixa para garantir sua segurança microbiológica ($< 0,6$); enquanto que a reidratação das amostras secas foi capaz de recuperar a umidade das frutas frescas. A influência da temperatura nas operações foi verificada, sendo que maiores taxas foram observadas para as maiores temperaturas de operação. A lei de Fick representou satisfatoriamente os dados experimentais de desidratação das maçãs ($R^2 > 0,82$, $P > 10\%$, $RMSE$ próximo de zero), mas não sua reidratação, pois $R^2 < 0,7$. O modelo de Wang e Sing foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem a ambas temperaturas. Para as maçãs desidratadas a 50 °C, o modelo da Aproximação da Difusão foi o que melhor representou os dados experimentais de reidratação a 25 e 2 °C. Para as maçãs desidratadas a 70 °C, o modelo de Page foi o que melhor representou a reidratação a 25 e 2 °C.

Palavras-chave: *Malus domestica*; massa – transferência; modelagem.

ABSTRACT

The apple is known for its crunchy texture, sweet flavor, and juicy pulp. One way to reduce its perishability by increasing its shelf life is to dehydrate the product. Before use on their end, many dry products, either as industrial inputs or used by the consumer, are rehydrated. This work aimed to dry and rehydrate apple slices 1 cm thick. Fruit slices were dehydrated to equilibrium at temperatures 50 and 70 °C and weighed regularly. After drying at different temperatures, the apples were rehydrated to equilibrium at 2 °C (refrigerator temperature) and 25 °C (room temperature), being weighed periodically. The experimental data were adjusted to Fick's Law, allowing the calculation of the effective coefficient of water diffusion, and to twelve empirical/semi-empirical models. The drying of the fruits resulted in foods with water activity sufficiently low to ensure their microbiological safety (< 0.6); while the rehydration of the dried samples was able to recover the moisture of the fresh fruits. The influence of temperature in the operations was verified, and higher rates were observed for the highest operating temperatures. Fick's law satisfactorily represented the experimental data of dehydration of apples ($R^2 > 0.82$, $P > 10\%$, $RMSE$ close to zero), but not their rehydration, since $R^2 < 0.7$. Wang and Sing's model was the one that best represented the drying data at both temperatures. For apples dehydrated at 50 °C, the Diffusion Approximation model was the one that best represented the experimental data of rehydration at 25 and 2 °C. For apples dehydrated at 70 °C, Page's model best-represented rehydration at 25 and 2 °C.

Keywords: *Malus domestica*; mass – transfer; modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 – Aspecto visual das fatias de maçã antes e após a secagem a 50 e 70 °C	28
Fotografia 2 – Aspecto visual das fatias de maçã frescas, secas a 70 °C e após sua reidratação a 25 e 2 °C	29
Figura 1 – Variação da razão de umidade média, adimensional, com o tempo para a secagem a 50 e 70°C de fatias de 1 cm de maçãs	30
Figura 2 – Variação da razão de umidade média, adimensional, com o tempo para a reidratação das fatias de maçãs a 2 e 25 °C.....	31
Figura 3 - Valores experimentais da razão de umidade, adimensional, e estimados pelo modelo de Wang e Sing para a secagem das maçãs a 50 e 70 °C.....	36
Figura 4 - Valores experimentais da razão de umidade, adimensional, e estimados pelos modelos da Aproximação da Difusão e de Page para a reidratação a 25 e 2 °C das maçãs secas a 50 e 70 °C, respectivamente.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição nutricional da maçã	14
Tabela 2 - Modelos empíricos/semi-empíricos utilizados para descrever o fenômeno de secagem.....	19
Tabela 3 - Umidade e atividade de água das maçãs frescas, secas e reidratadas...	27
Tabela 4 - Coeficientes de difusão efetivos da água, D_{ef} , em $cm^2 \cdot s^{-1}$, durante a secagem a 50 °C de fatias de 1 cm de maçã e após sua reidratação a 25 e 2 °C; e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à Lei de Fick.....	32
Tabela 5 - Coeficientes de difusão efetivos da água, D_{ef} , em $cm^2 \cdot s^{-1}$, durante a secagem a 70 °C de fatias de 1 cm de maçã e após sua reidratação a 25 e 2 °C; e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à Lei de Fick.....	32
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semi-empíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da secagem das maçãs a 50 °C	33
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semi-empíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da reidratação das maçãs secas a 50 °C.....	34
Tabela 8 - Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semi-empíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da secagem das maçãs a 70 °C	34
Tabela 9 - Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semi-empíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da reidratação das maçãs secas a 70 °C.....	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Maçã.....	14
3.2 Importância econômica.....	15
3.3 Secagem	17
3.4 Reidratação	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Matéria prima e caracterização das frutas frescas, secas e reidratadas ..	24
4.2 Cinética e modelagem da secagem.....	24
4.3 Cinética e modelagem da reidratação.....	25
4.4 Análises estatísticas.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A perda de frutas e hortaliças na colheita e pós-colheita traz preocupações para agricultores e agroindustriais. Neste sentido, são necessários métodos para minimizar esse desperdício de alimentos. Alguns produtos podem ser desidratados por meio de sistemas artificiais ou naturais, diminuindo o teor de água livre presente, o que é fator determinante para a conservação de alimentos.

O mercado produtivo da maçã destaca-se no cenário da fruticultura brasileira, sendo de grande relevância na cadeia agroalimentar, tanto no abastecimento interno quanto para exportações. As principais variedades comercializadas compreendem as maçãs Gala e Fuji, com sabor apreciado pelos consumidores brasileiros, europeus e americanos (KIST et al., 2018).

Outros cultivares também são plantados, como a *Eva*, *Golden Delicious*, *Brasil*, *Anna*, *Condessa*, *Catarina*, *Granny Smith*, porém, em menores quantidades (SEBRAE, 2022).

A secagem é uma operação unitária que se baseia na remoção parcial da água do alimento em um processo que envolve, principalmente, transferência de massa e energia. Dependendo da quantidade de água removida, é possível reduzir significativamente a velocidade de crescimento de microrganismos – por criar um ambiente desfavorável à sua adaptação – e as reações de escurecimento e oxidação, responsáveis pela deterioração e rejeição do produto pelo consumidor (BELL, 2020).

A desidratação é um dos métodos mais utilizados para a preservação de frutas, visto que ela pode aumentar o tempo de prateleira desses alimentos, reduzir o custo de empacotamento e o peso para transporte (ACHKAR et al., 2021). A maior parte da desidratação industrial de alimentos utiliza técnicas de desidratação por convecção, na qual uma corrente de ar insaturado atua como receptor de umidade (AMANOR-ATIEMOH et al., 2020).

A preservação de frutas, hortaliças e produtos similares por desidratação é um grande desafio, pois a remoção da umidade deve ser realizada de forma a minimizar os danos, garantindo assim a qualidade do produto. Desta forma, pretende-se que as características do produto desidratado após sua reidratação, sejam as mais próximas possíveis das do produto *in natura* (DEMIRAY; TULEK, 2017).

Estudos relacionados à cinética de secagem e reidratação de alimentos possibilitam o dimensionamento de equipamentos e a otimização de processos, pois, considera as taxas das operações e como o movimento das moléculas de água será afetado por variações no processamento. Os dados de secagem e reidratação fornecem informações sobre o mecanismo de transporte de água usado para determinar o coeficiente de difusão de água em produtos (DEMIRAY; TULEK, 2017).

Diante do exposto, objetivou-se no presente trabalho avaliar a cinética de secagem e de reidratação de fatias de maçã Fuji com 1 cm de espessura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a cinética de secagem e reidratação de fatias de maçãs com 1 cm de espessura.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar atividade de água e umidade das frutas frescas, secas e reidratadas;
- Realizar experimentos de secagem às temperaturas de 50 °C e 70 °C, para estudar a cinética de secagem de maçãs de espessura 1 cm;
- Ajustar os valores experimentais de secagem a diferentes modelos matemáticos referenciados em bibliografia;
- Realizar experimentos de reidratação das frutas secas à temperatura de geladeira (2 °C) e temperatura ambiente (25 °C) das fatias de maçã desidratadas;
- Ajustar os dados experimentais de reidratação obtidos a diferentes modelos matemáticos referenciados na bibliografia;
- Determinar o coeficiente de difusão das amostras durante a secagem e a reidratação nas diferentes temperaturas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Maçã

A maçã, de nome científico *Malus domestica Borkh*, é um fruto globoso, com uma profunda depressão no seu ponto de inserção da haste, que o prende aos ramos. Apresenta coloração vermelha ou verde e pode apresentar manchas esverdeadas ou amareladas, dependendo da variedade (IWANAMI et al., 2018; SEBRAE, 2022).

Típica de clima temperado, a macieira pertence à família Rosaceae e tem sua origem no Oriente Médio e Leste Asiático, exigindo frio para produzir adequadamente o fruto, sendo encontrada em parte do hemisfério norte e no sul do Brasil (SEBRAE, 2022).

A maçã é tão antiga quanto a história da humanidade e possui sabor doce-ácido e propriedades refrescantes e adstringentes, apresentando propriedades reguladoras únicas. A ingestão de uma maçã por dia ajuda na digestão, na moderação do apetite, no controle do colesterol e na prevenção de alergias e irritações físicas (ABPM, 2023).

As maçãs são boas fontes de vitaminas B2, B3, B5 e B6 e também contêm vitaminas A, B1 e E em quantidades menores (FERNANDES et al., 2015).

Está apresentada na Tabela 1, a composição nutricional de uma porção de 100 g de maçã.

Tabela 1 - Composição nutricional da maçã

(continua)

	Nutrientes	Valor por 100 g de maçã
Macro Componentes	Água	83,93 g
	Carboidratos	15,25 g
	Proteínas	0,19 g
	Lipídeos	0,36 g
	Fibra Alimentar	2,7 g
Minerais	Sódio	0 mg
	Cálcio	7 mg
	Ferro	0,18 mg
	Potássio	115 mg

Tabela 1 – Composição nutricional da maçã

		(conclusão)
Vitaminas	Vitamina A	58 µg
	Vitamina B1	0,01 µg
	Vitamina B2	0,01 µg
	Vitamina B5	0,06 µg
	Vitamina B6	0,04 µg
	Vitamina B9	2,9 µg
	Vitamina C	5,7 µg
	Vitamina E	0,32 µg

Fonte: ABPM (2023)

3.2 Importância econômica

A produção mundial de maçãs conta com dezenas de cultivares, com diferentes cores, aromas e sabores. No Brasil, em função de características climáticas, a produção fica concentrada na Região Sul e é dividida entre duas cultivares e seus diferentes clones: a neozelandesa Gala, com 60%, e a japonesa Fuji, com 35% da produção (EMBRAPA, 2022).

Chiarelli et al. (2011) afirmam que nos anos 70 a produção brasileira de maçã era de apenas 1.528 toneladas, nos anos 80 a produção aumentou em 48.715 toneladas e, no início da década de 90, já eram produzidas 33.000 toneladas, evoluindo para mais de 800.000 toneladas nos anos 2000. No ano de 2010, o Brasil já era considerado o quinto colocado no quesito qualidade da produção e sétimo colocado com relação a infraestrutura disponível frente ao mercado mundial.

A produção mundial de maçãs em 2019 foi de 87,24 milhões de toneladas com área cultivada de 4,7 milhões de hectares. A Ásia foi o continente que mais produziu (56,3 milhões de toneladas), com a China destacando-se como o maior produtor (42,4 milhões de toneladas). A Europa produziu, em 2021, 17,09 milhões de toneladas, sendo a Polônia responsável por 3,08 milhões de toneladas. A parcela das Américas foi de 9,8 milhões de toneladas com destaque para as produções dos Estados Unidos (4,9 milhões de toneladas), Chile (1,6 milhões de toneladas) e Brasil (1,2 milhões de toneladas). As regiões de menores produções mundiais foram a África (3,13 milhões de toneladas) e a Oceania (818 mil toneladas) (FAO, 2021).

O Brasil está entre os 12 maiores produtores de maçã do mundo; segundo dados do IGBE (2020), o Brasil produziu cerca de 983.247 toneladas da fruta em 2020.

Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Maçã, ABPM, até 1978 cerca de 95% das maçãs ingeridas no Brasil eram advindas de exportação, após a fundação da associação o país passou a ser um grande exportador das frutas para mais de 40 países (ABPM, 2023).

A colheita de maçãs concentra-se nos meses de fevereiro, março e abril, daí a necessidade de um sistema de armazenagem a frio para conservação da fruta durante o restante do ano (DIONELLO, 2009). Um grande problema enfrentado pelos fruticultores é a conservação dos frutos maduros, sendo que grande parte da colheita é desperdiçada. Estima-se cerca de 40% de perdas entre a colheita no campo até a chegada ao mercado consumidor. Este alto índice de desperdício é responsável por grandes aumentos de preço das frutas para o consumidor final. Uma das principais causas de perdas é a deterioração, devido à alta quantidade de água livre presente nos frutos (MACHADO, 2011). Portanto, a utilização de métodos de conservação a fim de que o alimento se torne estável à deterioração química e microbiana, reduzindo os percentuais de perda na colheita e pós colheita, são de interesse econômico.

Segundo Argenta et al. (2021), a maior parte (60% a 80%) da perda pós-colheita de maçãs no Brasil é causada por podridões e seu aumento expressivo no período pós armazenagem reforça a necessidade de manutenção da cadeia de frio durante o transporte e a comercialização. Esse fato aponta a necessidade de investimentos para desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para esse controle.

Segundo Wills et al. (1998), o principal fator que afeta o desenvolvimento de agentes causadores de perdas pós-colheita é o ambiente em torno do produto. Altas temperaturas e umidade favorecem o desenvolvimento de podridões e, geralmente, o dano por frio (*chilling*) predispõe alimentos tropicais e subtropicais ao problema. Ao contrário, temperaturas baixas, níveis baixos de oxigênio e altos de dióxido de carbono, associados a uma adequada umidade do ambiente, podem restringir a ocorrência de podridões, seja retardando o amadurecimento ou a senescência do produto, seja limitando o crescimento do patógeno, ou ambos (WILLS et al., 1998).

Argenta et al. (2021) caracterizaram e quantificaram as perdas pós colheita de maçãs no estado de Santa Catarina, Brasil, de 2007 a 2010. Os autores verificaram que durante o armazenamento, a deterioração por fungos foi responsável pelas maiores perdas, que variaram de ano para ano durante o período de estudo. Os autores apontam que as condições climáticas durante o crescimento das maçãs

influenciam as perdas pós-colheita, pela associação entre alta precipitação de chuva e alta incidência de podridões devido ao favorecimento da esporulação e dispersão de propágulos dos fungos.

O principal mercado para os frutos das macieiras é a venda *in natura* (70%), o que faz com que sejam estimadas perdas consideráveis de frutos que não atingem as especificações desse mercado. Aproximadamente 30% da produção mundial de frutos são processados para a obtenção de produtos como sucos, geleias, purês, sidras, vinagres e frutos desidratados (HE et al., 2021; ITO et al., 2017; SYMONEAUX et al., 2015; SHALINI, GUPTA, 2010).

3.3 Secagem

A secagem é um dos métodos mais antigos e utilizados para a conservação de alimentos, pois diminui a disponibilidade de água para reações de deterioração e promove uma considerável redução de custos em transporte e manipulação do produto (GARCIA et al., 2022; GARCIA et al., 2014). A secagem é uma operação complexa, pois envolve transferência de massa e de calor simultâneas, em regime transiente, juntamente com transformações bio-físico-químicas (MUJUMDAR, 2004).

A secagem visa remover a água dos alimentos para prevenir o crescimento e reprodução de microrganismos deteriorantes, retardar a ação enzimática e minimizar muitas das reações de deterioração mediadas pela água e as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante o armazenamento (GARCIA et al., 2022; GARCIA et al., 2014; MUJUMDAR, 2004).

O processo de secagem pode ser dividido em três etapas:

1 – Período de indução: no qual a temperatura do alimento e a pressão de vapor da água aumentam gradativamente até a temperatura de bulbo úmido do ar.

2 – Período de taxa constante: no qual a taxa de secagem é constante. Neste período ocorre a evaporação da água livre do alimento. Enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto for suficiente para acompanhar a perda de água na superfície do sólido, a taxa de secagem será constante. Segundo Tadini et al. (2019) para os materiais biológicos, é difícil a existência deste período, porque, devido às condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de massa encontram-se principalmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de

evaporação da superfície ao ambiente seja superior à taxa de migração da umidade do interior à superfície do material. Em vários estudos de secagem de frutas, não foi detectado o período de taxa constante (GARCIA et al., 2022; GARCIA et al., 2014; FRANCO et al., 2015).

3 – Período de taxa decrescente: A partir do momento em que a quantidade de água começa a ser deficiente na superfície do sólido, a velocidade de secagem diminui, o que caracteriza o início do chamado período de taxa decrescente. Neste período a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar de secagem. Esta redução da taxa de secagem ocorre pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície do sólido.

Na desidratação de frutas e hortaliças, o período de taxa decrescente é especialmente importante. Nessa fase as partes externas do material já estão secas, enquanto o interior ainda pode conter quantidades significativas de umidade. A partir desse ponto, o processo consome grandes quantidades de energia e os atributos físicos, sensoriais e nutricionais do produto podem ser prejudicados devido à elevação da temperatura (GARCIA et al., 2022; GARCIA et al., 2014). Este período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios.

Nos estudos de secagem é interessante descrever o processo matematicamente, representando-o como equações, utilizadas no estudo da cinética de secagem. Os modelos matemáticos podem ser bem diferentes dependendo do sistema considerado e das circunstâncias particulares de cada um deles e por isso um modelo pode ser mais adequado do que outros para representar os dados experimentais (OGATA, 2003). Na literatura há vários métodos teóricos, semi teóricos e empíricos para analisar a secagem de produtos (RESENDE et al., 2010; MARTINAZZO et al., 2007; AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

A partir dessas teorias e dos dados obtidos experimentalmente, podem-se calcular os coeficientes de transferência resultantes. Há trabalhos que utilizam modelos empíricos ou semiempíricos que relacionam a umidade adimensional (RU) como uma função do tempo, obtendo resultados aceitáveis. Dentre esses, alguns comumente citados na literatura são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos empíricos/semiempíricos utilizados para descrever o fenômeno de secagem

	Modelo	
$RU = 1 + at + bt^2$	Wang e Sing	(1)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Verma	(2)
$RU = e^{\left[\frac{-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}}{2 \cdot b}\right]}$	Thompson	(3)
$RU = e^{(-k \cdot t^n)}$	Page	(4)
$RU = e^{(-k \cdot t)}$	Newton	(5)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t^n)} + b \cdot t$	Midilli	(6)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + c$	Logarítmico	(7)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)}$	Henderson e Pabis	(8)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + b \cdot e^{(-k_0 \cdot t)} + c \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Henderson e Pabis modificado	(9)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot a \cdot t)}$	Exponencial de Dois Termos	(10)
$RU = a \cdot e^{(-k_0 \cdot t)} + b \cdot e^{(-k_1 \cdot t)}$	Dois Termos	(11)
$RU = a \cdot e^{(-k \cdot t)} + (1 - a) \cdot e^{(-k \cdot b \cdot t)}$	Aproximação da Difusão	(12)

***RU* é a razão de umidade, adimensional; *k*, *k₀*, *k₁* são constantes de secagem, em unidade de tempo; *a*, *b*, *c*, *n* são coeficientes dos modelos, adimensionais; *t* é o tempo de secagem, em s.**

Fonte: Sousa et al. (2011)

A razão de umidade (*RU*) durante a secagem nas diferentes condições de ar é calculada pela Equação 13.

$$RU = \frac{\bar{X}_t - X^{eq}}{X^0 - X^{eq}} \quad (13)$$

Em que: *RU* representa a razão de umidade do produto, adimensional; \bar{X}_t é teor de água do produto em um tempo *t* qualquer, em base seca; X^{eq} representa o teor de água de equilíbrio do produto com o ar de secagem, em base seca; X^0 , o teor de água inicial do produto, em base seca.

No período de taxa decrescente o mecanismo de transferência de massa dominante é a difusão da água do interior do sólido até sua superfície, portanto, a teoria utilizada para interpretar a secagem de alimentos é baseada na teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, descrita matematicamente pela segunda lei de Fick, apresentada na Equação 14.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot D_{ef} \cdot \nabla X \quad (14)$$

Em que: X representa a umidade, em base seca (b.s.); t , o tempo; D_{ef} , a difusividade efetiva da água.

Os coeficientes de difusão efetivos de umidade são determinados de acordo com a Lei de Fick em uma forma modificada que descreve a umidade em termos de frações de massa de água com base no peso seco. Para os cálculos dos coeficientes de difusão da água são utilizadas as soluções integradas de Crank (1975) da segunda Lei de Fick para placas planas, conforme apresentado na Equação 15.

$$RU = \left(\frac{\bar{X}(t) - X^{eq}}{X^0 - X^{eq}} \right) = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4 z^2} \right)} + \dots \frac{1}{9} e^{\left(\frac{-9 \pi^2 D_{ef} t}{4 z^2} \right)} + \frac{1}{25} e^{\left(\frac{-25 \pi^2 D_{ef} t}{4 z^2} \right)} + \dots \right] \quad (15)$$

Em que: RU representa o adimensional de umidade; $\bar{X}(t)$ representa o teor de água médio num tempo t , em base seca (kg de água/kg de material seco); X^{eq} representa o teor de água no equilíbrio, em base seca; X^0 representa o teor de água inicial, em base seca; D_{ef} representa a difusividade efetiva da água, em m^2/s ; t representa o tempo, em s; z representa a dimensão característica – meia espessura para placa plana, em m.

De acordo com Falade e Abbo (2007) a segunda Lei de Fick da difusão em estado estacionário, resultante da negligência dos efeitos da temperatura e dos gradientes de pressão total, é utilizada para descrever o transporte de água durante os processos de desidratação de alimentos que ocorrem durante o período de taxa decrescente, no qual a difusão da água do interior do produto até sua superfície é o mecanismo de transferência de massa predominante.

Para longos períodos de secagem/reidratação, a série representada pela Equação 15 converge rapidamente, sendo possível calcular o coeficiente de difusão graficamente a partir da linearização do primeiro termo da série representada pela Equação 16, como proposto por Ciolin et al. (2021).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} e^{-\left(\frac{\pi^2 D_{ef}}{z^2} \right) t} \quad (16)$$

Em que: RU representa a razão de umidade, adimensional; \bar{X}_t representa o teor de água médio num tempo t , em base seca; X^{eq} representa o teor de água no

equilíbrio, em base seca; X^0 representa o teor de água inicial, em base seca; D_{ef} representa a difusividade efetiva da água, em $m^2 \cdot s^{-1}$; t representa o tempo, em s; z representa a dimensão característica – meia espessura para placa plana, em m.

Na secagem convectiva pode-se controlar algumas variáveis do sistema, como a temperatura, velocidade do ar e massa dos frutos durante todo processo, podendo ao final, ter um produto seco com qualidade e uma boa aceitação, garantindo também a segurança alimentar.

Garcia et al. (2022) estudaram a secagem convectiva de fatias de mamão, tendo modelado os dados experimentais pela segunda Lei de Fick, considerando a dimensão características das amostras como a espessura inicial, um valor médio obtido entre os valores inicial e final de espessura das amostras e como uma função linear da umidade das amostras. Os autores verificaram melhores ajustes quando a espessura foi considerada variável. A secagem ocorreu no período da taxa decrescente, indicando que a difusão foi o mecanismo físico dominante que governou o movimento da umidade nas amostras durante a secagem.

Da Silva e Canavesi et al. (2010) estudaram a cinética de secagem da maçã em estufas pelos principais modelos empíricos da literatura, foram realizados. Para tanto, foram realizados experimentos de secagem em estufa com amostras de maçã em geometria de placa plana nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C, tendo sido todos os experimentos realizados com réplicas. A variação da umidade com o tempo foi determinada através do método gravimétrico, sendo as amostras pesadas e medidas em intervalos regulares de tempo. Com os dados experimentais, foi possível determinar os melhores modelos cinéticos para representar a secagem da maçã em estufa.

3.4 Reidratação

Em produtos desidratados, a água que foi removida do alimento não é substituída da mesma maneira durante sua reidratação, devido aos danos estruturais resultantes do processo de desidratação. Alimentos secos em condições ideais sofrem menos danos em suas estruturas (tecidos e células), o que facilita e torna o

processo de reidratação mais rápido e eficaz. Assim, a taxa e a extensão da reidratação podem ser utilizadas como indicadores de qualidade da secagem (FELLOWS, 2009).

Durante a operação de reidratação a difusão da água para o interior dos alimentos ocorre de maneira lenta e a textura do material fresco não é totalmente recuperada. A taxa de ganho de água ocorre mais rapidamente no início do processo e diminui gradualmente conforme a umidade do alimento vai aumentando, aproximando-se da umidade de equilíbrio (FELLOWS, 2009; LEE; FARID; NGUANG, 2006).

A reidratação de produtos desidratados ocorre principalmente antes do consumo. A operação acontece em três etapas simultaneamente: a embebição de água no material seco, o inchamento dos produtos reidratados e a perda de compostos solúveis do sólido. Atualmente existe uma grande variedade de produtos desidratados no mercado; devido a este fato, há necessidade e preocupação em atender as especificações de qualidade, e, portanto, no conhecimento da operação a fim de otimizar processos (LEE; FARID; NGUANG, 2006).

A reidratação de frutas desidratadas tem sido amplamente discutida, como pode ser verificado nos estudos conduzidos por Ciolin et al. (2021), para a reidratação de *cranberries* e *blueberries*, Agnieszka e Andrzej (2010) durante a reidratação de morangos, Garcia-Pascual et al. (2006) durante a reidratação de cogumelos e Lewick (1998) durante a reidratação de batata, maçã e raiz de salsa secas.

A conservação de frutas, hortaliças e similares por desidratação é um grande desafio, pois a remoção da umidade deve ser realizada de forma a minimizar os danos, garantindo assim a qualidade do produto. Desta forma, as características do produto desidratado após a reidratação serão as mais próximas possíveis das do produto natural (DEMIRAY; TULEK, 2017).

Na reidratação, a água vai difundir para dentro do tecido seco. Ao invés da ocorrência da difusão da água do interior do sólido úmido, como na secagem, na reidratação, a água deve difundir para o interior do sólido seco entrando nos tecidos. Assim, como o fenômeno de transferência de massa é o mesmo que ocorre na secagem de alimentos, a difusão de massa, a modelagem da reidratação utiliza os mesmos modelos matemáticos daquela operação (CIOLIN et al., 2021).

O estudo da cinética de reidratação de alimentos possibilita o projeto de equipamentos e a otimização do processo, pois considera a velocidade de absorção

da água e como ela será afetada pelas variações no processamento, possibilitando prever o tempo de saturação. Os dados de reidratação fornecem informações sobre o mecanismo de transporte de água usado para determinar o coeficiente de difusão de água em produtos (CIOLIN et al., 2021; DEMIRAY; TULEK, 2017).

De acordo com Ciolin et al. (2021), para a reidratação de *cranberries* em água, todos os modelos empíricos ou semiempíricos testados ajustaram-se aos dados experimentais, pois foram verificados altos coeficientes de correlação, $R^2 > 0,95$, valores de P abaixo de 10% e baixos valores de $RMSE$. Por outro lado, a adequação dos dados experimentais de reidratação de mirtilos desidratados em água aos modelos empíricos/semi-empíricos mostrou valores de R^2 inferiores a 0,90 e de P superiores a 10%, apontando um ajuste satisfatório. Quando a reidratação de *cranberries* foi realizada em leite, os autores verificaram que todos os modelos apresentaram R^2 maior que 0,90, valores de P menor que 10% e baixos valores de $RMSE$, indicando um bom ajuste aos dados experimentais. O mesmo não foi observado para a reidratação de mirtilos no leite, pois alguns modelos apresentaram R^2 menor que 0,90 e valores de P maiores que 10%.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria prima e caracterização das frutas frescas, secas e reidratadas

As maçãs foram obtidas em comércio local na cidade de Medianeira, PR, lavadas em água corrente e fatiadas na espessura de 1,0 cm com auxílio de um cortador de frios (Fun Kitchen, Rio de Janeiro – RJ). Em seguida, as fatias foram cortadas em pedaços de 2,76 x 1,77 cm utilizando um cortador retangular.

A umidade das frutas frescas, após secagem e reidratação, assim como as umidades de equilíbrio das fatias com o ar de secagem e com o meio de reidratação foram determinadas em triplicata segundo o método AOAC (2000), n° 968.11.

A atividade de água das frutas frescas, após a secagem e reidratação foi determinada em equipamento analisador de atividade de água (AquaLab 4TE, Meter, São José dos Campos, SP, Brasil).

4.2 Cinética e modelagem da secagem

A desidratação foi realizada em triplicata em estufa de secagem com controlador digital de temperatura (Quimis, Diadema – SP) e circulação de ar natural às temperaturas de 50 °C e 70 °C. As amostras foram pesadas em intervalos regulares até atingirem o equilíbrio com o ar de secagem (cerca de 240 min de operação a 50 °C e 210 min a 70 °C). Foi realizada a medição, utilizando paquímetro digital, da espessura de amostras aleatórias de maçã antes e após a operação.

A modelagem segundo a Lei de Fick, Equação 13, foi realizada considerando as maçãs como placa plana.

Além da Lei de Fick, outros modelos empíricos/semiempíricos foram utilizados para descrever a secagem das maçãs, os quais estão apresentados na Tabela 2, Equações 1 a 10.

O ajuste dos dados experimentais aos modelos propostos baseou-se no algoritmo de Levenberg-Marquardt, que foi utilizado para estimar os parâmetros não lineares dos modelos, Equações 1 a 10, Tabela 2, por meio do método dos quadrados mínimos (MARQUARDT, 1963), utilizando critério de convergência de $1 \cdot 10^{-6}$.

A Lei de Fick, Equação 13, foi ajustada aos dados experimentais por meio de sua linearização.

4.3 Cinética e modelagem da reidratação

Após a secagem, as maçãs foram reidratadas de acordo com metodologia proposta por Ciolin et al. (2021), adaptada de Demiray e Tulek (2017) e Falade e Abbo (2007), em triplicata, em béqueres, utilizando proporção de 1:24 de amostra para água.

Dessa forma, foram colocados 5 g da amostra fresca em béqueres, e adicionou-se 120 g de água destilada. Os experimentos de reidratação foram realizados a 2 °C em geladeira doméstica (Brastemp Frost Free Duplex, Medianeira, PR, Brasil), e a 25 °C em incubadora com temperatura controlada tipo BOD (DI 311, Dist, Florianópolis, SC, Brasil). As amostras foram pesadas em intervalos regulares de tempo durante a reidratação, até o equilíbrio na transferência de massa (cerca de 210 min), observado pelo não aumento de massa em três pesagens sucessivas. Os dados experimentais do ganho de massa das maçãs foram ajustados aos modelos matemáticos apresentados na Tabela 2, Equações 1 a 10.

Como para a modelagem da secagem, o mesmo procedimento foi utilizado para o ajuste dos dados de reidratação, por meio do algoritmo de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963) e com o mesmo critério de convergência.

A Lei de Fick, Equação 13, também foi ajustada aos dados experimentais através da linearização da Equação 13, como realizado para a modelagem da secagem das maçãs.

4.4 Análises estatísticas

Para avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias das umidades e atividades de água das amostras foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Para verificar o ajuste dos dados experimentais aos modelos propostos, Equações 1 a 10 da Tabela 2 e Equação 13, a magnitude do coeficiente de

determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e o erro médio relativo (P) foram avaliados, os dois últimos de acordo com as Equações 15 e 16.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{calc} - x_{exp})^2}{n}} \quad \text{Equação (15)}$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{exp} - x_{calc}|}{x_{exp}} \quad \text{Equação (16)}$$

Em que: x_{exp} é o valor experimental; x_{calc} é o valor previsto pelo modelo; n é o número de observações experimentais.

De acordo com Rudy et al. (2015), valores baixos de $RMSE$ e R^2 próximo a 1,0 denotam bom ajuste dos dados experimentais aos modelos. De acordo com Krokida e Marinos-Kouris (2003), o erro médio relativo indica o erro relativo das previsões e valores abaixo de 10% são indicativos de ajuste razoável.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade e a atividade de água das maçãs frescas, secas a 50 e 70 °C e reidratadas a 2 °C (temperatura de geladeira) e 25 °C (temperatura ambiente) estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Umidade e atividade de água das maçãs frescas, secas e reidratadas

Amostra	Umidade (%)	Atividade da água
T_{secagem} = 50 °C		
Fresca	86,04 ± 0,10 ^a	0,9842 ± 0,0027 ^a
Desidratada	34,52 ± 0,46 ^b	0,3851 ± 0,0164 ^b
Reidratada a 25 °C	92,13 ± 0,03 ^a	0,9943 ± 0,0024 ^a
Reidratada a 2 °C	93,94 ± 0,01 ^a	0,9943 ± 0,0008 ^a
T_{secagem} = 70 °C		
Fresca	85,88 ± 0,0050 ^a	0,9840 ± 0,0049 ^a
Desidratada	4,57 ± 0,0016 ^b	0,4517 ± 0,0250 ^b
Reidratada a 25 °C	94,10 ± 0,0013 ^a	0,9980 ± 0,0012 ^a
Reidratada a 2 °C	94,43 ± 0,0005 ^a	0,9977 ± 0,0008 ^a

**Resultados apresentados como média ± desvio padrão.
Letras diferentes na mesma coluna para a mesma temperatura indicam diferença significativa
ao nível de 95% de significância, segundo teste de Tukey.
Fonte: Autoria Própria (2023)**

Verificou-se que a umidade e a atividade da água das maçãs desidratadas apresentam valores significativamente menores que os das frutas frescas e reidratadas, o que era esperado. As maçãs secas a 50 °C apresentaram umidade final maior que a das frutas desidratadas a 70 °C, demonstrando que a temperatura influencia a operação, pois temperatura maior, acelera a migração da água do interior da fruta para sua superfície, resultando em perda de umidade maior para um mesmo intervalo de tempo.

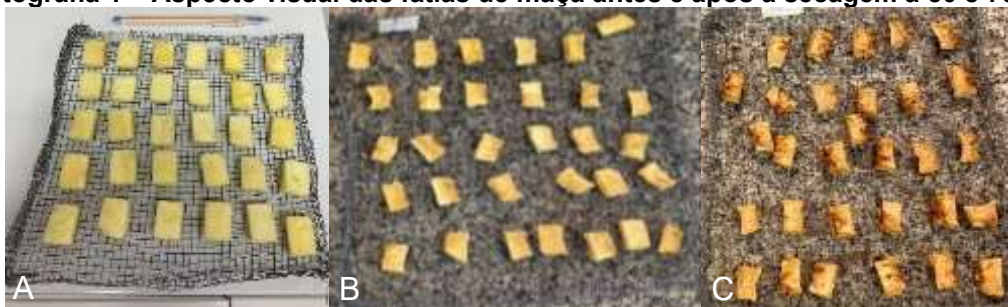
A atividade de água é um fator importante para a segurança microbiológica dos alimentos, sendo necessário controlar seu valor para limitar o crescimento de microrganismos indesejáveis, como bactérias, leveduras e bolores. Para garantir segurança microbiológica, a atividade de água tem que ser menor que 0,60, pois assim não ocorrerá proliferação microbiana (RIBEIRO; SERAVALLI, 2004). Após a secagem, as fatias de maçã apresentaram atividade de água menor do que 0,6, indicando segurança microbiológica. Além disso, as frutas desidratadas a 70 °C,

apesar de apresentarem menor umidade que as secas a 50 °C, resultaram em maior atividade de água, ainda que abaixo de 0,6, indicando que possivelmente a 70 °C ocorreram mais danos à estrutura celular, formando pontos de acúmulo de água que poderiam ser expostos quando do preparo das amostras para a determinação da atividade de água, resultando em maior atividade de água. Além disso, é possível que as amostras secas tenham absorvido umidade no curto intervalo de tempo entre terem sido retiradas do secador, armazenadas no recipiente para a análise de atividade de água e o momento de realização das análises, resultando numa atividade de água maior. Ressalta-se que esse intervalo de tempo não foi superior a 10 minutos.

Após a reidratação, verificou-se que a umidade e a atividade da água das frutas secas aumentaram, o que era o esperado, devido à absorção de água, atingindo valores significativamente iguais aos das frutas frescas. Esse fato pode ser correlacionado às Fotografias 1 e 2 das amostras, nas quais é possível observar que conforme as maçãs secas absorveram água, elas entumeceram e recuperaram o formato original, ficando até mesmo maiores, por estarem mais inchadas devido a danos estruturais mais intensos, que as frutas frescas.

Na Fotografia 1 são apresentadas imagens das frutas frescas e das secas a 50 e 70 °C, sendo possível avaliar seu aspecto visual.

Fotografia 1 – Aspecto visual das fatias de maçã antes e após a secagem a 50 e 70 °C



A: Fatias frescas de maçã; B: Fatias de maçã após a secagem a 50 °C; C: Fatias de maçã após a secagem a 70 °C.

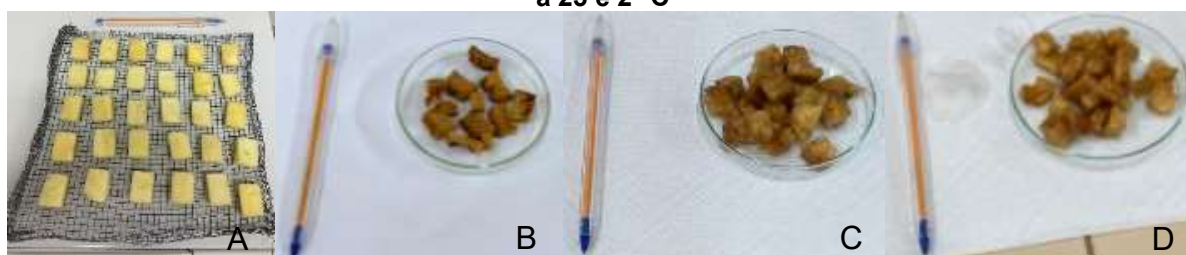
Fonte: Autorial Própria (2023)

A partir da Fotografia 1, comparando as fatias de maçãs frescas (A) com as secas (B e C), verificou-se que a secagem resultou em alterações de sua estrutura, notadamente da cor e do formato, apresentando escurecimento, encolhimento e ressecamento.

Comparando as amostras secas a 70 °C (Fotografia 1C) com as secas a 50 °C (Fotografia 1B), é possível observar que após a secagem de 70 °C, as amostras apresentaram-se mais escuras e mais ressecadas, corroborando a hipótese de que maiores danos estruturais aconteceram.

Na Fotografia 2 são apresentadas imagens das frutas frescas, secas a 70 °C e após sua reidratação a 2 e 25 °C, sendo possível avaliar seu aspecto visual.

Fotografia 2 – Aspecto visual das fatias de maçã frescas, secas a 70 °C e após sua reidratação a 25 e 2 °C



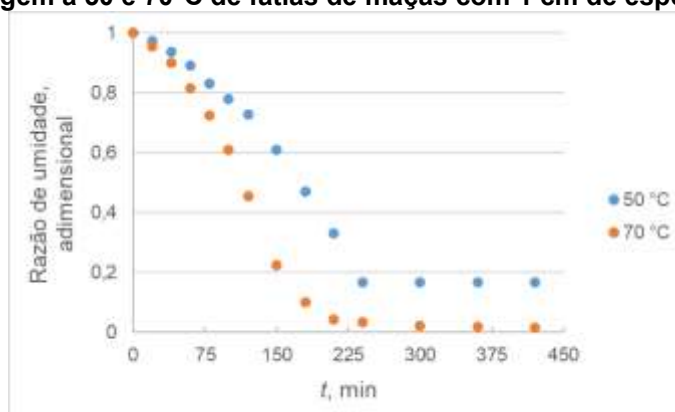
A: Fatias frescas de maçã; B: Fatias de maçã após a secagem a 70 °C; C: Fatias de maçã após a reidratação a 25 °C; D: Fatias de maçã após a reidratação a 2 °C.

Fonte: Autoria Própria (2023)

Após a reidratação das frutas secas, verificaram-se alterações no formato e cor das amostras (Fotografia 2). As frutas secas reidratadas em geladeira (Fotografia 2D) apresentaram-se visualmente mais claras que as reidratadas a 25 °C (Fotografia 2C), o que está possivelmente relacionado ao escurecimento não enzimático, tal como a reação de Maillard, que foi favorecida a temperaturas mais altas (DAMODARAN; PARKIN, 2019). O tamanho e especialmente a espessura das frutas reidratadas (Fotografia 2C e 2D) foi visualmente maior que a das frutas secas (Fotografia 2B), devido ao entumescimento pela absorção de água, apresentando-se inclusive maiores, mais inchadas, que as frutas frescas (Fotografia 2A), possivelmente por causa dos danos estruturais decorrentes da operação de desidratação.

As curvas de secagem com os valores médios da razão de umidade para as operações realizadas a 50 e 70 °C são apresentadas conjuntamente na Figura 1.

Figura 1 – Variação média da razão de umidade média, adimensional, com o tempo para a secagem a 50 e 70°C de fatias de maçãs com 1 cm de espessura



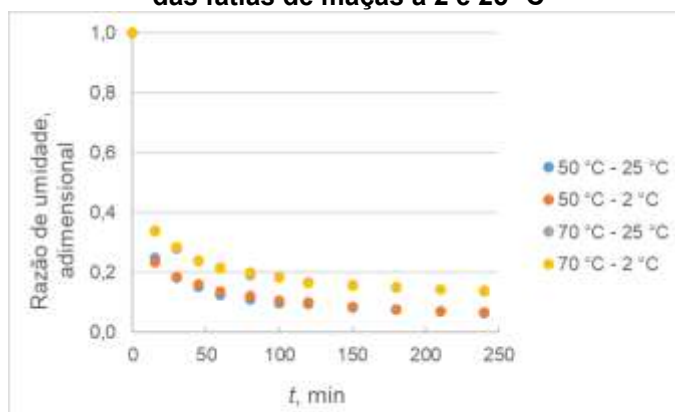
Fonte: Autoria Própria (2023)

É possível observar redução contínua exponencial da umidade das amostras nos primeiros 240 min quando a operação procedeu a 50 °C. Para a secagem a 70 °C o decaimento exponencial da umidade ocorreu por cerca de 180 min. Após esse período a taxa de secagem diminuiu e a operação ocorreu de maneira mais lenta até as amostras atingirem o equilíbrio com o ar de secagem, 240 min na secagem a 50 °C e 210 min na operação a 70 °C. Este comportamento é característico de operações de secagem convectiva e afirma que a temperatura influencia a operação, sendo que maiores temperaturas aceleram a migração da água do interior da fruta para sua superfície, acelerando a operação.

Resultados semelhantes foram encontrados por Garcia et al. (2022) ao estudar a secagem de fatias de mamão Formosa a 60 e 70 °C. Os autores reportaram não ter verificado período de taxa constante de secagem para as frutas e comportamento análogo ao do presente estudo no que se refere ao efeito da temperatura de secagem.

Os valores médios da razão de umidade em função do tempo de operação para a reidratação das frutas secas a 50 e 70 °C, nas temperaturas de 2 e 25 °C são apresentadas conjuntamente na Figura 2.

Figura 2 – Variação da razão de umidade média, adimensional, com o tempo para a reidratação das fatias de maçãs a 2 e 25 °C



50 °C – 2 °C: Fatias de maçã secas a 50 °C e reidratadas a 2 °C; 50 °C – 25 °C: Fatias de maçã secas a 50 °C e reidratadas a 25 °C; 70 °C – 2 °C: Fatias de maçã secas a 70 °C e reidratadas a 2 °C; 70 °C – 25 °C: Fatias de maçã secas a 70 °C e reidratadas a 25 °C.

Fonte: Autoria Própria (2023)

É possível verificar na Figura 2 que a reidratação das fatias de maçãs sofreu maior influência da temperatura em que as frutas frescas foram secas do que da temperatura de reidratação propriamente dita, já que as curvas a 2 e 25 °C estão praticamente sobrepostas, e que maiores umidades foram observadas para as amostras secas a 70 °C em comparação às desidratadas a 50 °C para um certo tempo. Esse fato está relacionado aos danos estruturais sofridos pelo tecido vegetal durante a secagem, reafirmando que maiores danos foram causados na operação à maior temperatura, os quais facilitaram a absorção de água pelas amostras durante a reidratação.

Falade e Abbo et al. (2007) estudaram a secagem e posterior reidratação de tâmaras. Os autores verificaram que o aumento da temperatura de operação resultou em aumento dos coeficientes de difusão efetivos da água e, conseqüentemente, em redução nas taxas, como ocorreu no presente trabalho.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os coeficientes de difusão efetivos da água durante as operações de secagem a 50 e 70 °C, respectivamente, e reidratação a 25 e 2 °C, obtidos através da linearização da Equação 13, juntamente com os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à Lei de Fick.

Tabela 4 – Coeficientes de difusão efetivos da água, D_{ef} , em $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, durante a secagem a 50 °C de fatias de 1 cm de maçã e após sua reidratação a 25 e 2 °C; e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à Lei de Fick

Amostra	$D_{ef}(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$	R^2	P (%)	$RMSE$
Seca a 50 °C	$9,82\cdot 10^{-8} \pm 1,36\cdot 10^{-8}$	0,85	67,62	0,35
Reidratada a 25 °C	$1,15\cdot 10^{-7} \pm 4,59\cdot 10^{-9}$	0,63	NC	NC
Reidratada a 2 °C	$1,15\cdot 10^{-7} \pm 4,83\cdot 10^{-9}$	0,66	NC	NC

Resultados apresentados como média \pm desvio padrão. NC – não calculado

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 5 – Coeficientes de difusão efetivos da água, D_{ef} , em $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, durante a secagem a 70 °C de fatias de 1 cm de maçã e após sua reidratação a 25 e 2 °C; e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos dados experimentais à Lei de Fick

Amostra	$D_{ef}(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})$	R^2	P (%)	$RMSE$
Seca a 70 °C	$2,25\cdot 10^{-7} \pm 7,56\cdot 10^{-8}$	0,82	54,9	0,10
Reidratada a 25 °C	$1,10\cdot 10^{-8} \pm 8,68\cdot 10^{-10}$	0,25	NC	NC
Reidratada 2 °C	$1,15\cdot 10^{-8} \pm 8,68\cdot 10^{-10}$	0,26	NC	NC

Resultados apresentados como média \pm desvio padrão. NC – não calculado.

Fonte: Autoria Própria (2023)

Segundo Rudy et al. (2015) e Krokida e Marinos-Kouris (2003), quando o coeficiente de determinação (R^2) é maior que 0,90, o erro médio relativo (P) é menor que 10 % e o erro médio estimado ($RMSE$) é próximo de zero, tem-se bom ajuste de modelos aos dados experimentais, indicando que os mesmos representam adequadamente o fenômeno.

Verificou-se nas Tabelas 4 e 5 que, embora o valor de P tenha sido maior que 10%, a Lei de Fick ajustou-se de forma satisfatória aos dados experimentais de secagem, pois os coeficientes de determinação (R^2) foram maiores que 0,80 e os valores de $RMSE$ foram próximos de zero.

De acordo com Lomauro (1985), valores de P superior a 10% são frequentemente encontrados para a secagem porque a Equação 13 é baseada nos valores relativos de resíduos, que amplificam os desvios nas etapas finais de secagem quando o teor de umidade é relativamente baixo.

Por outro lado, a lei de Fick não ajustou os dados experimentais de reidratação, que apresentaram baixos valores de R^2 (Tabelas 4 e 5) e, por esse motivo, os demais parâmetros estatísticos não foram calculados. É possível que esse fato esteja relacionado à rápida reidratação das amostras secas, já que após 15 min de reidratação a umidade das amostras reidratadas foi mais de 70% da umidade inicial

das frutas frescas, indicando que o intervalo de pesagem foi muito longo nos instantes iniciais dessa operação, o que afetou sua modelagem.

Santos et al. (2013) estudaram a cinética e a modelagem da secagem convectiva de carambolas em secador de bandejas e obtiveram coeficientes de difusão efetivos relativamente próximos aos encontrados no presente estudo. Os autores determinaram coeficiente de difusão efetivo da água para a temperatura de 50 °C de $6,18 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; para a temperatura de 60 °C foi de $1,12 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e para a temperatura de 70 °C, o coeficiente foi igual a $4,57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. No presente estudo, os valores do coeficiente de difusão efetivo foram de $9,82 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para as temperaturas de secagem de 50 e 70 °C, respectivamente.

Maldonado e Bertuzzi (2010) avaliaram os efeitos da temperatura e da aplicação de pré-tratamentos (desidratação osmótica em sacarose e glicose) previamente à secagem convectiva sobre o coeficiente de difusão efetivo da água durante a reidratação de mangas desidratadas. Foi verificado aumento no coeficiente de difusão com o aumento da temperatura de reidratação: $1,24 \cdot 10^{-10} \pm 0,03$ (25 °C), $1,6 \cdot 10^{-10} \pm 0,2$ (40 °C) e $6,8 \cdot 10^{-11} \pm 0,6$ (60 °C) $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esse fato era esperado porque com o aumento da temperatura, aumenta a energia cinética das partículas, aumentando assim, a taxa de difusão.

Os parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos, Equações 1 a 10, que representaram os dados experimentais da secagem e da reidratação das maçãs estão apresentados nas Tabelas 6 a 9.

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da secagem das maçãs a 50 °C

Modelo	R^2	P (%)	$RMSE$
Newton	0,92	22,07	0,1021
Henderson & Pabis	0,94	18,65	0,0878
Wang & Sing	0,99	1,48	0,0074

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 7 – Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da reidratação das maçãs secas a 50 °C

Modelo	R²	P (%)	RMSE
Reidratação a 25 °C			
Aproximação da Difusão	0,99	14,59	0,01
Dois termos	0,99	76,45	0,08
Henderson & Pabis modificado	0,99	54,25	0,05
Henderson & Pabis	0,94	78,78	0,08
Logarítmico	0,99	28,72	0,03
Newton	0,94	79,47	0,08
Verma	0,99	79,15	0,08
Reidratação a 2 °C			
Aproximação da Difusão	0,99	13,12	0,01
Dois termos	0,99	80,21	0,09
Henderson & Pabis	0,93	79,87	0,09
Logarítmico	0,99	28,49	0,03
Newton	0,93	72,26	0,09

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da secagem das maçãs a 70 °C

Modelo	R²	P (%)	RMSE
Henderson e Pabis	0,95	63,44	0,11
Newton	0,93	72,87	0,13
Wang & Sing	0,97	28,39	0,07

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos (Equações 1 a 10, Tabela 2) que se ajustaram aos dados experimentais da reidratação das maçãs secas a 70 °C

Modelo	R²	P (%)	RMSE
Reidratação a 25 °C			
Henderson & Pabis modificado	0,99	68,12	0,13
Logarítmico	0,99	16,13	0,04
Page	0,99	11,54	0,02
Reidratação a 2 °C			
Aproximação da Difusão	0,99	12,83	0,03
Logarítmico	0,99	17,34	0,04
Page	0,99	6,56	0,01

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os modelos apresentados nas Tabelas 6 e 8 representaram os dados da secagem a 50 e 70 °C de fatias de 1 cm de maçã, respectivamente, já que $R^2 > 0,90$ e que foram observados baixos valores de *RMSE*, apesar dos valores de *P* terem resultado em valores maiores que 10%. Como apontado anteriormente, valores de *P* acima de 10% são comuns em estudos de secagem, pois os desvios são amplificados nas etapas finais da operação (LOMAURO, 1985). O modelo de Wang e Sing foi o que melhor representou os dados experimentais das secagens a 50 e 70 °C das fatias de maçã, pois apresentou $R^2 > 0,97$ e os menores valores de *P* e *RMSE*. Para a secagem a 50 °C, os coeficientes calculados do modelo foram: $a = - 1,25 \cdot 10^{-3} \pm 0,01 \cdot 10^{-3}$ e $b = - 9,21 \cdot 10^{-6} \pm 0,01 \cdot 10^{-6}$. Para a secagem à temperatura de 70 °C, os coeficientes calculados foram: $a = - 3,57 \cdot 10^{-3} \pm 0,49 \cdot 10^{-3}$ e $b = - 4,46 \cdot 10^{-6} \pm 0,01 \cdot 10^{-6}$.

Sousa et al. (2011) estudaram a operação de secagem convectiva do nabo forrageiro às temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e umidades relativas de 47,3; 26,2; 12,0; 10,1 e 5,1%. Os autores utilizaram diversos modelos para ajustar os dados experimentais e verificaram que os modelos de Wang e Sing, de Page, de Midilli, Logarítmico e Aproximação da Difusão foram os que melhor representaram as operações.

Estão apresentados nas Tabelas 7 e 9 os parâmetros estatísticos dos modelos empíricos/semiempíricos que ajustaram os dados experimentais de reidratação das fatias de maçã secas a 50 e 70 °C, respectivamente, uma vez que $R^2 > 0,93$ e baixos valores de *RMSE* foram observados. Assim como para a secagem, os valores de *P* foram maiores que 10%, pela amplificação dos desvios nas etapas finais da operação.

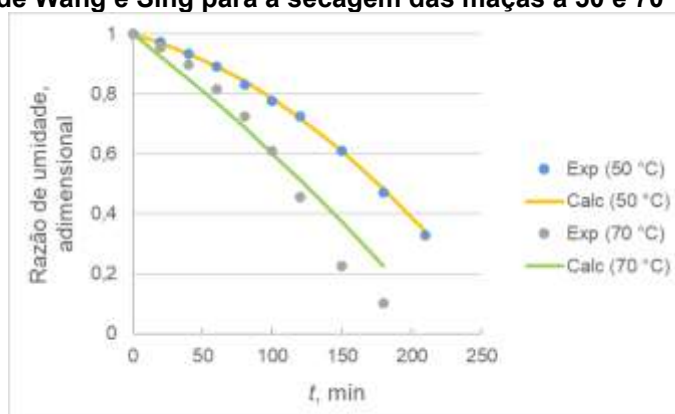
O modelo que melhor representou os dados da reidratação às temperaturas de 25 e 2 °C das frutas secas a 50 °C foi o da Aproximação da Difusão, por apresentar $R^2 = 0,99$, os menores valores de *P*, próximos de 10%, e os menores valores de *RMSE*, 0,01. Para a reidratação a 25 °C, os valores calculados dos coeficientes do modelo foram $a = 0,82 \pm 0,02$ e $b = 0,034 \pm 0,01$ e a constante foi $k = 0,1559 \pm 0,02$ min. Os valores dos coeficientes e da constante do modelo de Aproximação da Difusão para as frutas secas a 50 °C e reidratadas a 2 °C foram $a = 0,8 \pm 0,1$, $b = 0,03 \pm 0,01$ e $k = 0,18 \pm 0,03$ min.

Já a reidratação das frutas secas a 70 °C foi melhor ajustada pelo modelo de Page que resultou em $R^2 = 0,99$, valores de *P* próximos a 10% e *RMSE* < 0,02, independente da temperatura de operação. Para a reidratação a 25 °C, os valores

calculados do coeficiente e da constante do modelo foram $n = 0,19 \pm 0,05$ e $k = 0,64 \pm 0,02$ min, respectivamente. Quando a reidratação foi realizada a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, o coeficiente foi $n = 0,2 \pm 0,02$ e a constante foi $k = 0,67 \pm 0,05$ min.

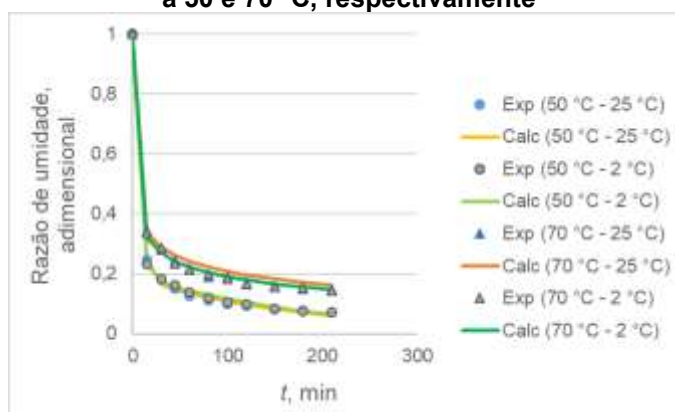
As curvas de secagem calculadas por meio dos modelos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais de secagem das fatias de 1 cm de maçãs a 50 e 70 $^{\circ}\text{C}$ estão apresentadas na Figura 3. As curvas de reidratação calculadas por meio dos modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais de reidratação a 25 $^{\circ}\text{C}$ e 2 $^{\circ}\text{C}$ das frutas previamente desidratadas a 50 e 70 $^{\circ}\text{C}$ estão apresentadas na Figura 4.

Figura 3 - Valores experimentais da razão de umidade, adimensional, e estimados pelo modelo de Wang e Sing para a secagem das maçãs a 50 e 70 $^{\circ}\text{C}$



Exp: Dados experimentais; Calc: Dados calculados pelo modelo de Wang e Sing.
Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 4 - Valores experimentais da razão de umidade, adimensional, e estimados pelos modelos da Aproximação da Difusão e de Page para a reidratação a 25 e 2 $^{\circ}\text{C}$ das maçãs secas a 50 e 70 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente



Exp: Dados experimentais; Calc: Dados calculados pelos modelos da Aproximação da Difusão, quando a secagem foi realizada a 50 $^{\circ}\text{C}$, e de Page, quando a secagem foi realizada a 70 $^{\circ}\text{C}$.
Fonte: Autoria Própria (2023)

Avaliando as Figuras 3 e 4 é possível afirmar que o modelo de Wang e Sing representou adequadamente os dados de secagem, e que os dados experimentais da reidratação foram bem ajustados aos modelos da Aproximação da Difusão e de Page, dependendo da temperatura de secagem das frutas frescas, como afirmado por meio dos dados das Tabelas 6 a 9. Para mais, as Figuras 3 e 4 também apontam a influência da temperatura nas operações, cujo aumento acelera a difusão de massa, reduzindo o tempo de operação, como discutido anteriormente.

6 CONCLUSÃO

A secagem das frutas a 50 e 70 °C por cerca de 240 min resultou em amostras com baixa atividade de água, garantindo a segurança microbiológica dos produtos. Quando conduzida a 70 °C foi observado menor tempo de operação para atingir determinada umidade final, pelo aumento da taxa de secagem, em função da aceleração da transferência de massa. Considerando os resultados da cinética das secagens e de umidade e atividade de água, foi possível inferir que as amostras desidratadas à maior temperatura sofreram maiores danos a estruturas celulares.

A reidratação das frutas secas a 25 e 2 °C por cerca de 200 min foi capaz de restaurar a umidade inicial das amostras, apesar de terem sido observadas alterações visuais da cor em função especialmente das altas temperaturas de secagem. As frutas secas a 70 °C reidrataram mais rapidamente que as desidratadas a 50 °C, corroborando a hipótese de maiores danos celulares.

A lei de Fick representou de modo satisfatório os dados de secagem das maçãs, sendo os valores dos coeficientes de difusão efetivos de $9,82 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a secagem a 50 °C e de $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a operação a 70 °C.

Os modelos empíricos/semiempíricos utilizados usualmente para descrever a secagem e a reidratação de alimentos, apresentaram bons ajustes aos dados experimentais da secagem e da reidratação de fatias de maçã. O modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de secagem foi o de Wang e Sing para as duas temperaturas avaliadas. Para a reidratação a 25 e 2 °C das maçãs secas a 50 °C o modelo da Aproximação da Difusão foi o que melhor representou a operação; enquanto que para a reidratação a 25 e 2 °C das maçãs secas a 70 °C, o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de Page.

Sugere-se para trabalhos futuros a secagem das frutas com outras espessuras e utilizando outras temperaturas do ar. Além disso, sugerem-se estudos sobre a reidratação sob agitação e a pesagem das amostras em intervalos menores de tempo.

REFERÊNCIAS

- ACHKAR, G.E.; BENNACER, R.; CHEN, A.; LIU, B. Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 292, p. 110-362, mar. 2021. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110362>.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, p.349-353, 1999.
- AGNIESZKA, C.; ANDRZEJ, L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 267-274, 2010.
- AMANOR-ATIEMOH, Robert et al. Effect of simultaneous dual-frequency ultrasound aided ethanolic pretreatment on drying kinetics, bioactive compounds, antioxidant activity, and physicochemical properties of apple slices using pulsed vacuum dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 11, 11 set. 2020. Doi: <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13535>.
- ARGENTA, L. C.; FREITAS, S. T.; MATTHEIS, J. P.; VIEIRA, M. J.; OGOSHI, C. Characterization and Quantification of Postharvest Losses of Apple Fruit Stored under Commercial Conditions. **HortScience**, v. 56, n. 5, p. 608-616, 2021.
- Associação Brasileira de Produtores de Maçã. **Sobre a maçã/ABPM**. Santa Catarina – 2023. Disponível em: <https://www.abpm.org.br/sobre>. Acesso em: 28/04/2023.
- BELL, Leonard N. **Moisture Effects on Food's Chemical Stability**. In: Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications: John Wiley & Sons, Inc. 2d ed., p. 227-253, 2020.
- CHIARELLI, P.V.; MATHIAS, J. C.; PEDRO, M. A. M. Efeito da desidratação osmótica como tratamento preliminar na secagem da maçã gala (*Malus domestica* Bork) e mamão formosa (*Carica papaya* L.). **Revista Científica UNILAGO**, v. 11, p. 239-308, 2012.
- CIOLIN, I. H. M. R.; ANTUNES, C. W.; LENHARD, D. C.; GARCIA, C. C.; Rehydration kinetics of dehydrated berries. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 3, p. 389-395, 2021.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion: 2d Ed**. Clarendon Press, 1975.
- DA SILVA, A. F. B.; CANAVESI, R. L. S. Previsão da cinética de secagem da maçã em estufa pelos principais modelos empíricos da literatura. In: Encontro Anual de Iniciação Científica, XIX., 2010, Guarapuava. **Anais...** Toledo: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.
- DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. **Química de alimentos de Fennema**. Porto Alegre: Grupo A, 2019. *E-book*. ISBN 9788582715468. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582715468/>. Acesso em: 22 mai. 2023.
- DEMIRAY, E.; TULEK, Y. Efeito da temperatura na difusão da água durante a reidratação de pimenta vermelha seca ao sol (*Capsicum annuum* L.). **Transferência de Calor e Massa**, v. 53, p. 1829-1834, 2017.
- DIONELLO, R. G.; BERBER, P. A.; MOLINA, M. A. B.; PEREIRA, R. C.; VIANA, A. P.; CARLESSO, V. Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por

- imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, vol. 29, n. 1, p. 232-240. 2009.
- EMBRAPA, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/68672196/pesquisadores-brasileiros-desenvolvem-maca-gala-100-vermelha>>. Acesso em: 28 mai. 2023.
- FALADE, O. K.; ABBO, S. E. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 2, p. 724-730, 2007.
- FAOSTAT. **Food agriculture organization of the United Nations**. Statistical database. Disponível em: <<https://faostat.fao.org/site/291/default>>. Acesso em: 24 de abr. 2022.
- FELLOWS, P. J. **Food processing technology: principles and practice**. 3rd. ed. Washington, DC: Elsevier, 2009.
- FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES S.; CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V. Ultrasound-Assisted Air-Drying of Apple (*Malus domestica* L.) and Its Effects on the Vitamin of the Dried Product. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, n. 7, p. 1503-1511, 2015.
- FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de Yacon pelo método de camada de espuma**. 192 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2015.
- GARCÍA P. S.; ANDRÉS A.B.; MARTÍNEZ J. M. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 480-488, 2011.
- GARCIA, C. C.; CAETANO, L. C.; CANIZARES, D.; SILVA, K. S.; MAURO, M. A. Blanching effects on convective air-drying and sorption properties of papaya. **Drying Technology**, v. 40, n. 16, p. 3509-3519, 2022. Doi: 10.1080/07373937.2022.2062378.
- GARCIA, C. C.; CAETANO, L. C.; SILVA, K. S.; MAURO, M. A. Influence of Edible Coating on the Drying and Quality of Papaya (*Carica papaya*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, p. 2828–2839, 2014. Doi: 10. 1007/s11947-014-1350-6.
- GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; MELIS, R.; MULET, A. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modelling. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 4, p. 346- 353, 2006.
- HE, W.; LIU, S.; HEAPONIEMI, P.; HEINONEN, M.; MARSOL-VALL, A.; MA, X.; YANG, B.; LAAKSONEN, O. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Schizo saccharomyces pombe* strains on chemical composition and sensory quality of ciders made from Finnish apple cultivars. **Food Chemistry**, v. 345, p. 128833, December 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128833>.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Produção Agrícola – Lavoura Permanente 2020**. Brasil: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/15/11863>> Acesso em: 06 mai. 2022.
- ITO, V. C.; FERREIRA ZIELINSKI, A. A.; AVILA, S.; SPOTO, M.; NOGUEIRA, A.; SCHNITZLER, E.; LACERDA, L. G. Effects of gamma radiation on physicochemical, thermogravimetric, microstructural and microbiological properties during storage of

apple pomace flour. **LWT - Food Science and Technology**, v. 78, p. 105–113, 2017.

IWANAMI, H.; MORIYA-TANAKA, Y.; HONDA, C.; HANADA, T.; WADA, M. A model for representing the relationships among crop load, timing of thinning, flower bud formation, and fruit weight in apples. **Scientia Horticulturae**, v. 242, p. 181–187, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.001>.

KIST, B.B. **Cartilha anuário brasileiro da maçã 2018** – Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2018. 56 p.: Maçã – Brasil. Disponível em <http://www.abpm.org.br/wp-content/uploads/2018/06/Anuario_maca_2018.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2023.

KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. Cinética de reidratação de produtos desidratados. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n. 1, p. 1-7, 2003.

LEE, K. T.; FARID, M.; NGUANG, S. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 1, p. 16-23, 2006.

LEWICKI, P. P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**, v. 36, n. 1, p. 81-87, 1998.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherms Equations. Part I: Fruit, Vegetables and Meat Products. **LWT**, v. 18, p. 111–117, 1985.

MACHADO, A.V.; OLIVEIRA, E.L.; SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, J.A. Estudo cinético da secagem do pedúnculo de caju e um secador convencional. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró** – RN, v.6, p. 44-51, 2011.

MALDONADO, S.; ARNAU, E.; BERTUZZI, M. A. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. **Journal of Food Engineering**, v. 96, p. 333-341, 2010.

MARQUARDT, D. W. na Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, p. 431–441, 1963. Doi: <https://doi.org/10.1137/0111030>.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 301-306, 2007.

MUJUMDAR, A.S. Role of IDS in promoting innovation and global R&D effort in drying technologies. *In*: Proceedings of 14th International Drying Symposium (IDS 2004), 2004, São Paulo. **Anais 14th International Drying Symposium**, São Paulo: Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, 2004, v. A, p. 101-118.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 940p.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, p. 171-178, 2010.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. **Química de alimentos**. 2004. São Paulo: Edgard Blücher, Instituto Mauá de Tecnologia, 2004. 184 p.

RUDY, S.; DZIKI, D.; KRZYKOWSKI, A.; GAWLIK-DZIKI, U.; POLAK, R.; RÓZYLO, R.; KULIG, R. Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of cranberries (*Vaccinium*

macrocarpon Ait.). **LWT-Food Science and Technology**, v. 63, n.1, p. 497-503, 2015.

SEBRAE, 2022. Disponível em: <<https://respostas.sebrae.com.br/cultivo-e-mercado-da-maca/>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

SHALINI, R.; GUPTA, D.K. Utilization of pomace from apple processing industries: A review, **Journal Food and Science Technology**, v. 47 p. 365–371, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0061-x>.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SYMONEAUX, R.; LE QUÉRÉ, J. M.; BARON, A.; BAUDUIN, R.; CHOLLET, S. Impact of CO₂ and its interaction with the matrix components on sensory perception in model cider. **LWT - Food Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 886–891, 2015.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. de A.; FILHO, P. de A. P. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos - Vol. 2**. Barueri: LTC. Grupo GEN, 2016. *E-book*. ISBN 9788521632689. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632689/>>. Acesso em: 28 mai. 2022.

TERRONI, H. C.; De JESUS, J. M.; ARTUZO, L. T.; VENTURA, L. V.; SANTOS, R. F.; DAMY-BENEDETTI, P. C. Liofilização. **Revista Científica Unilago**. v. 00, p. 271-284, 2013.

TIRMAZI, S. I. H.; WILLS, R. B. H. Retardation of ripening of mangoes by postharvest application of calcium. **Tropical Agriculture**, v. 58, n. 2, p. 137-141, 1981.