



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
CIÊNCIA DE ALIMENTOS

Área de concentração: Engenharia de Alimentos



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS

**SECAGEM DE ALIMENTOS POR MICRO-ONDAS:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SECADOR A VÁCUO,
ANÁLISE DO PROCESSO E APLICAÇÃO SOBRE DIFERENTES
TIPOS DE ALIMENTOS.**

Autor: M. Sc. Hudson Carlos Maia Santos Júnior

Orientador: Prof. D. Sc. Modesto Antônio Chaves

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
Março de 2021

HUDSON CARLOS MAIA SANTOS JÚNIOR

**SECAGEM DE ALIMENTOS POR MICRO-ONDAS:
DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SECADOR A VÁCUO, ANÁLISE
DO PROCESSO E APLICAÇÃO SOBRE DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTOS.**

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências na área de Engenharia e Ciência de Alimentos pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Orientador: Prof. D. Sc. Modesto Antônio Chaves

Co-orientadora: Prof^a. D. Sc. Silmara Almeida de Carvalho

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
Março de 2021

664.0284
S235s

Santos Júnior, Hudson Carlos Maia.

Secagem de alimentos por micro-ondas: desenvolvimento de um protótipo de secador a vácuo, análise do processo e aplicação sobre diferentes tipos de alimentos. / Hudson Carlos Maia Santos Júnior. – Itapetinga-BA: UESB, 2021. 95f.

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências na área de Engenharia e Ciência de Alimentos pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Sob a orientação do Prof. D. Sc. Modesto Antônio Chaves e coorientação da Prof^a. D. Sc. Silmara Almeida de Carvalho.

1. Alimentos desidratados. 2. Alimentos – Secagem – Micro-ondas a vácuo. 3. Secagem convectiva - Alimentos. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos, *Campus* de Itapetinga. II. Chaves, Modesto Antônio. III. Carvalho, Silmara Almeida de. IV. Título.

CDD(21): 664.0284

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Queijo de coalho – Secagem - Desidratação
2. Maçã Fuji - Secagem - Desidratação
3. Secador de micro-ondas a vácuo



Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB
Recredenciada pelo Decreto Estadual
Nº 16.825, de 04.07.2016



Governo do
Estado da Bahia

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: SECAGEM DE ALIMENTOS POR MICRO-ONDAS: DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SECADOR A VÁCUO, ANÁLISE DO PROCESSO E APLICAÇÃO SOBRE DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTOS.

Autor (a): HUDSON CARLOS MAIA SANTOS JÚNIOR

Orientador (a): Prof. Dr. Modesto Antonio Chaves

Coorientador (a): Prof.ª Dr.ª Silmara Almeida de Carvalho

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de **DOUTOR EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Prof. Dr. Nívio Batista Santana
UESB

Prof.ª Dr.ª Renata Cristina Ferreira Bonomo
UESB

Prof.ª Dr.ª Silmara Almeida de Carvalho
UESB

Prof. Dr. Ben-Hur Ramos Ferreira Gonçalves
Membro Externo - UFSB

Prof. Dr. Modesto Antonio Chaves
Orientador - UESB
Presidente da Banca

Itapetinga-BA, 16 de abril de 2021.

À minha mãe pelo amor imensurável;

À minha avó materna (em memória) pelos ensinamentos e carinho demonstrados nos gestos mais simples;

Ao meu avô paterno (em memória), por quem tenho uma das mais bonitas memórias de infância;

Ao meu irmão pelo amor e exemplo.

DEDICO

“A educação é o maior bem que você pode ter na vida”

Mércia Rocha

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque tudo vem dEle e é para Ele;

À minha família pelo amor e presença constantes;

À CAPES, FAPESB e UESB pelo apoio e financiamento da pesquisa;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos (PPGECAL), em especial à Jamile, Jaime e o prof. D. Sc. Rafael Fontan pela atenção com que responderam a cada pedido e dúvida que tive;

Aos meus orientadores, prof. D. Sc. Modesto Chaves e prof^a. D. Sc. Silmara Carvalho, pela solicitude em todas as etapas do projeto de pesquisa e pelos ensinamentos profissionais e pessoais nas inúmeras conversas que tivemos;

À Amanda Rocha pelo carinho e companheirismo nos quase dois anos que convivemos. A você o meu respeito e afeto;

Ao prof. M. Sc. William Soares pela recepção e ajuda durante o período de estágio em docência;

Aos membros das bancas de qualificação e defesa: prof. D. Sc. Sérgio Castro, prof^a. D. Sc. Renata Bonomo, prof. D. Sc. Leandro Soares, prof. D. Sc. Nívio Batista e prof. D. Sc. Ben-Hur Gonçalves. Suas observações foram essenciais para a qualidade final deste trabalho;

Aos colaboradores que fizeram ou fazem parte do CEDETEC, em especial Virgínia, Angelita, Kátia, Tom, Maicon e Rafael;

Aos colegas que fizeram parte do Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos, em especial Milton, Alexandra, Jaqueline e Tajjana;

Aos colaboradores do setor de transportes e de serviços gerais pela prestatividade em todos os momentos em que foram solicitados;

Aos colaboradores da Coordenação de Laboratórios do *campus* de Itapetinga, que sempre foram atenciosos e céleres nos pedidos dos materiais utilizados nos experimentos;

Aos membros do Laboratório de Ensaio de Materiais, em especial ao prof. D. Sc. Luciano Rodrigues, pela gentileza em autorizar o uso do equipamento de avaliação reológica;

Aos professores responsáveis pelas disciplinas oferecidas no PPGECAL pelos conhecimentos compartilhados;

A toda a turma de 2017 do PPGECAL;

Aos que, mesmo não sendo citados, fizeram parte deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT.....	v
CAPÍTULO 1: REFERENCIAL TEÓRICO.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. A cinética de secagem	3
2.2. Teor e atividade de água.....	6
2.3. Secagem convectiva	10
2.4. Secagem por micro-ondas	13
REFERÊNCIAS	26
OBJETIVO.....	31
1. Objetivo Geral.....	31
2. Objetivos específicos.....	31
CAPÍTULO 2: ADAPTAÇÃO DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO PARA OPERAÇÃO A VÁCUO E SUA APLICAÇÃO NA SECAGEM DE MAÇÃ FUJI E QUEIJO DE COALHO – PARTE 1	32
RESUMO	32
ABSTRACT.....	32
1. Introdução	33
2. Material e métodos	35
2.1. Matéria-prima.....	35
2.2. Procedimento de secagem	37
2.2.1. Ar quente convectivo	37
2.2.2. Micro-ondas a vácuo	38
2.2.2.1. Adaptação do forno de micro-ondas	38
2.2.2.2. Secagem em micro-ondas a vácuo	40
2.3. Análise das amostras	41
2.3.1. Atividade de água.....	41
2.3.2. Teor de água.....	41
2.3.3. Imagem de distribuição da umidade relativa.....	42
2.4. Avaliação dos dados.....	42

2.4.1.	Determinação do teor de água de referência	42
2.4.2.	Definição dos tempos de secagem.....	43
2.4.3.	Análise estatística.....	44
3.	Resultados e discussão	44
3.1.	Análise das isotermas de sorção e determinação do teor de água de referência.....	44
3.2.	Análise das curvas de cinética e determinação dos tempos de secagem	46
3.3.	Comportamento da atividade de água e imagens de umidade do produto	52
4.	Conclusão.....	56
REFERÊNCIAS		57
CAPÍTULO 3: ADAPTAÇÃO DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO PARA OPERAÇÃO A VÁCUO E SUA APLICAÇÃO NA SECAGEM DE MAÇÃ FUJI E QUEIJO DE COALHO – PARTE 2		60
RESUMO		60
ABSTRACT.....		60
1.	Introdução	61
2.	Material e métodos	63
2.1.	Matéria-prima.....	63
2.2.	Procedimento de secagem	64
2.2.1.	Ar quente convectivo	64
2.2.2.	Micro-ondas a vácuo	64
2.3.	Avaliação da matéria-prima e dos produtos	65
2.3.1.	Atividade de água.....	65
2.3.2.	Teor de água.....	65
2.3.3.	Reologia	66
2.3.4.	Cor.....	67
2.3.5.	Volume específico.....	68
2.4.	Análise estatística.....	68
3.	Resultados e discussão	69
3.1.	Atividade de água e volume específico.....	69
3.2.	Cor.....	71
3.3.	Reologia	73
3.4.	Aparência do produto	76
4.	Conclusão.....	77
REFERÊNCIAS		79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação de uma curva típica de cinética de secagem de alimentos.....	3
Figura 1.2. Diagrama de estabilidade dos alimentos.....	8
Figura 1.3. Desenho esquemático de uma estufa de secagem com circulação de ar.....	12
Figura 1.4. Representação do aquecimento gerado sobre moléculas de água a partir da aplicação de micro-ondas.....	14
Figura 1.5. Representação do processo de difusão de água do interior do alimento para o meio durante a secagem em (a) ar quente convectivo e (b) em micro-ondas.....	15
Figura 1.6. Imagens térmicas por infravermelho e perfil de temperatura obtidos após o aquecimento em micro-ondas (600 W por 30 segundos) de dezenove recipientes de plástico PEAD, contendo 5 ml de água cada, distribuídos sobre o prato de um forno doméstico: (a) O prato do forno manteve-se imóvel durante o aquecimento e (b) o prato girou em torno do próprio eixo a 6 rpm durante o aquecimento.	17
Figura 1.7. Diagrama de fases da água.....	19
Figura 2.1. Preparo da matéria-prima utilizada no experimento: (a) queijo de Coalho e (b) maçã Fuji.	36
Figura 2.2. Desenho esquemático do secador de micro-ondas a vácuo adaptado para o experimento.	39
Figura 2.3. Organização dos alimentos na câmara de vácuo do secador de micro-ondas.....	39
Figura 2.4. Isoterma de dessorção a 25°C do (a) queijo de Coalho e da (b) maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo.	45
Figura 2.5. Curvas de cinética de secagem para (a) queijo de Coalho e (b) maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo.....	47
Figura 2.6. Alteração da temperatura de superfície do (a) queijo de Coalho e da (b) maçã Fuji no decorrer do tempo de secagem em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo.....	48
Figura 2.7. Alteração da atividade de água do (a) queijo Coalho e (b) da maçã Fuji no decorrer do tempo de secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV) com diferentes densidades de potência.	53
Figura 2.8. Imagens de umidade relativa das fatias de queijo submetidas à secagem em (a) ar quente convectivo, (b) micro-ondas a vácuo a 8 W.g ⁻¹ e (c) micro-ondas a vácuo a 20 W.g ⁻¹	54
Figura 2.9. Imagens de umidade relativa das fatias de maçã submetidas à secagem em (a) ar quente convectivo, (b) micro-ondas a vácuo a 8 W.g ⁻¹ e (c) micro-ondas a vácuo a 20 W.g ⁻¹	55
Figura 3.1. Ensaios mecânicos utilizados na avaliação reológica das amostras de (a) queijo Coalho e da (b) maçã Fuji.	66
Figura 3.2. Forma de interpretação do diagrama força versus distância adotada para obter as medidas de análise reológica.	67
Figura 3.3. Aparência (a) do queijo Coalho e (b) da maçã Fuji frescos e após a secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Coleção de alguns dos modelos matemáticos que podem ser ajustados aos dados experimentais obtidos na curva de cinética de secagem.	7
Tabela 1.2. Coleção de alguns dos estudos desenvolvidos entre 2016 e 2020 que utilizaram a técnica de micro-ondas na secagem de alimentos.	21
Tabela 2.1. Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos alimentos.	43
Tabela 2.2. Parâmetros de ajuste dos modelos matemáticos de BET e GAB aos dados experimentais do queijo de Coalho e da maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo*.	46
Tabela 2.3. Estimativa para os parâmetros utilizados nos modelos ajustados às curvas de cinética do queijo submetido à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).	50
Tabela 2.4. Estimativa para os parâmetros utilizados nos modelos ajustados às curvas de cinética da maçã submetida à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).	51
Tabela 3.1. Análise das propriedades físicas do queijo e maçã frescos e submetidos à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).	70
Tabela 3.2. Análise das propriedades mecânicas do queijo e maçã frescos e submetidos à secagem em ar convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).	74

RESUMO

SANTOS JÚNIOR, Hudson Carlos Maia. **Secagem de alimentos por micro-ondas: desenvolvimento de um protótipo de secador a vácuo, análise do processo e aplicação sobre diferentes tipos de alimentos.** Itapetinga, BA: UESB, 2021. 81p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Engenharia de Alimentos).¹

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo de secador de micro-ondas a vácuo a partir de adaptações feitas em um forno de micro-ondas doméstico e avaliar a sua aplicação na secagem de queijo de Coalho e maçã Fuji. Os resultados foram comparados à secagem em ar quente convectivo, considerada como a técnica convencional. O trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira parte, foi feita a adaptação do forno de micro-ondas doméstico e a análise do processo de secagem do queijo e da maçã em micro-ondas a vácuo e ar quente convectivo por meio da construção de curvas de isoterma de sorção e cinética de secagem e do acompanhamento das alterações de temperatura e atividade de água com o tempo de operação. Baseando-se no diagrama genérico de estabilidade dos alimentos e nas características de cada matriz alimentícia, dois valores de referência para o teor final de água do produto seco foram então definidos: um para a maçã e outro para o queijo, assim como os respectivos tempos para alcançá-los utilizando as duas técnicas de secagem. Na segunda parte, foi feita a avaliação instrumental da cor, reologia, atividade de água e volume específico do produto desidratado no valor de referência. Os resultados demonstraram ser possível fazer a adaptação de um forno de micro-ondas doméstico para que ele opere a vácuo sem que isto influencie o movimento rotatório do prato de cocção do eletrodoméstico (responsável por tornar a distribuição de temperatura durante o aquecimento dos alimentos uniforme), empregando componentes simples e de baixo custo. Quando aplicado na secagem do queijo de Coalho, os produtos com melhor estabilidade ao armazenamento foram obtidos após 0,72 horas utilizando a densidade de potência de 8 W.g^{-1} e 0,23 horas utilizando a densidade de potência de 20 W.g^{-1} , tempos necessários para que o produto alcançasse um teor de água de aproximadamente $0,019 \text{ g de água.g}^{-1}$ de matéria seca e atividade de água em torno de 0,3. Na secagem da maçã, os tempos foram de 0,91 horas a 8 W.g^{-1} e 1,77 horas a 20 W.g^{-1} , necessários para alcançar aproximadamente $0,005 \text{ g de água.g}^{-1}$ de matéria seca e atividade de água em torno de 0,3. Comparada à secagem convectiva, a aplicação das micro-ondas a

¹ Orientador: Modesto Antônio Chaves, DSc. UESB e Co-orientadora: Silmara Almeida de Carvalho, DSc. UESB.

vácuo apresentou potencial para reduzir o tempo de secagem em até 96% e preservou de forma mais eficaz a cor dos alimentos que a secagem em ar quente convectivo. O efeito de sopro (*puffing*), característico do aquecimento por micro-ondas, foi observado apenas na secagem do queijo. De forma geral, houve melhoria no processo de secagem com o uso das micro-ondas a vácuo, sendo que o queijo de Coalho foi o alimento mais beneficiado pelo uso da técnica no que se refere às características de qualidade do produto após a desidratação.

Palavras-chave: Propriedades físicas de alimentos; Micro-ondas a vácuo; Alimentos desidratados; Secagem convectiva.

ABSTRACT

SANTOS JÚNIOR, Hudson Carlos Maia. **Secagem de alimentos por micro-ondas: desenvolvimento de um protótipo de secador a vácuo, análise do processo e aplicação sobre diferentes tipos de alimentos.** Itapetinga, BA: UESB, 2021. 81p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Engenharia de Alimentos).

This work aimed to develop a vacuum microwave dryer from a domestic microwave oven and evaluate its application in *Coalho* cheese and Fuji apple drying. The results were compared to convective hot air drying, considered the conventional method. The work consisted of two parts. The first part covered the modification of the domestic microwave oven and the analysis of the cheese and apple drying processes in vacuum microwaves and convective hot air through sorption isotherm and drying kinetic curves, and monitoring the changes in temperature and water activity along drying time. From that analysis, reference values of water content and respectively drying time for dried apple and cheese were defined based on the stability diagram of foods and the characteristics of each food matrix. The second part consisted of the instrumental evaluation of the color, rheology, water activity, and specific volume of the dried products at the reference value. The results showed that it is possible to adjust a domestic microwave oven employing simple and low-cost components without influencing the appliance's cooking plate movement (responsible for the temperature distribution during the heating). When applied to *Coalho* cheese drying, the product dried for 0.72 hours at 8 W.g⁻¹ and 0.23 hours at 20 W.g⁻¹ showed better stability, reaching the water content of 0.019 g water.g⁻¹ dry matter and water activity about 0.3. For apple, the drying times were 0.91 hours at 8 W.g⁻¹ and 1.77 hours at 20 W.g⁻¹, in which 0.005 g of water.g⁻¹ of dry matter was reached, and the water activity was about 0.3. The vacuum microwaves drying reduced approximately 96% of the drying time and preserved more effectively the food color compared to convective hot air drying. The puffing effect, characteristic of microwave heating, was observed only in cheese drying. In general, there was an improvement in the drying process with vacuum microwaves application, and dried *Coalho* cheese was the most benefited food by the drying method concerning the quality characteristics of the product after dehydration.

Keywords: Physical properties of food; Vacuum-microwave; Dried foods; Hot-air drying.

CAPÍTULO 1: REFERENCIAL TEÓRICO

1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária que se baseia na remoção parcial da água constituinte do alimento em um processo que envolve transferências de massa e de energia na forma de calor. Dependendo da quantidade de água removida, é possível reduzir significativamente a velocidade de crescimento dos 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). Na indústria, a secagem é também aplicada para facilitar o transporte e o armazenamento de produtos, reduzindo os custos dessas etapas.

A qualidade final dos produtos desidratados é influenciada por muitas variáveis, como o modo de armazenamento, as práticas de manipulação e, principalmente, o procedimento de secagem adotado. Atualmente, são várias as maneiras e equipamentos que podem ser empregados, desde os mais convencionais (secagem ao sol, por condução em tambor rotativo, por ar quente convectivo) aos mais sofisticados (por liofilização, por infravermelho). A possibilidade de combinar duas ou mais técnicas de secagem amplia ainda mais as alternativas para fornecer produtos de melhor qualidade.

Dos procedimentos que podem ser utilizados, a secagem convectiva por ar quente em secador de bandejas é a técnica mais bem consolidada na indústria (PU e SUN, 2017). O procedimento se baseia no aquecimento do alimento a partir da exposição a uma corrente de ar com alta temperatura em períodos que variam segundo o teor de água final desejado e o tipo de alimento a ser seco. A simplicidade da operação e o baixo custo do equipamento são algumas das vantagens encontradas no seu uso (SEREMET et al., 2016; DIAMANTE et al., 2010), sendo que a eficiência do procedimento pode ainda ser melhorada fazendo algumas alterações nas condições ambientais, como a redução da pressão dentro da câmara de secagem, por exemplo.

Apesar das vantagens oferecidas, os produtos obtidos a partir do ar quente convectivo podem apresentar alguns problemas de qualidade, tais como avarias na estrutura, encolhimento excessivo, baixa capacidade de reidratação, alterações indesejáveis de cor e perdas, em níveis significativos, de alguns nutrientes essenciais ou funcionais (ZHAO et al., 2014). Aliado a isto, os longos períodos normalmente exigidos para a operação e a baixa eficiência energética que apresentam têm aberto perspectivas para a busca de novas técnicas

que preencham essas limitações e possam substituir ou complementar o procedimento, aumentando a sua eficiência.

Nesse sentido, uma técnica que tem ganhado visibilidade nas últimas duas décadas é o uso de micro-ondas, cujo princípio envolve a geração de calor no interior do alimento por meio da sua exposição a um campo eletromagnético. Quando absorvidas pelas moléculas de água, as micro-ondas fornecem um aquecimento rápido, volumétrico e instantâneo, que eleva a taxa de secagem do alimento e pode conferir atributos únicos aos produtos obtidos, como alta porosidade, boa capacidade de reidratação, aumento do volume, entre outros (MONTEIRO et al., 2018; ZIELINSKA, ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2018; TIAN et al., 2016; BÉTTEGA et al., 2014). Devido a essas características, esta forma de secagem tem sido considerada como uma alternativa viável para contornar alguns dos problemas encontrados no uso exclusivo do ar quente.

Na literatura científica, uma adaptação frequentemente apresentada para o procedimento com micro-ondas é a redução da pressão dentro da câmara de secagem. O estabelecimento de um ambiente a vácuo durante a operação provoca a redução da temperatura de ebulição da água, evitando alterações passíveis de acontecer nos alimentos quando expostos a temperaturas mais elevadas. Dentre as propostas apresentadas para o uso de micro-ondas a vácuo, alguns dos protótipos de secadores desenvolvidos em escala de laboratório tomaram como base para o projeto fornos de micro-ondas domésticos, construindo linhas de vácuo na câmara interna do aparelho (PU e SUN, 2015; DAK e PAREEK, 2014).

Apesar de conseguirem cumprir com o objetivo, alguns dos secadores experimentais não relatam o uso do movimento giratório do prato localizado na câmara interna do forno (prato de cocção), que tem a importante função de tornar uniforme a distribuição de temperatura sobre os alimentos durante o aquecimento. Assim, a proposição de um secador que possa reduzir a pressão em que os alimentos são desidratados e, ao mesmo tempo, manter o movimento giratório do prato de cocção pode ajudar na compreensão de como as micro-ondas agem como fonte de energia na forma de calor durante o procedimento de secagem e como isto influencia a qualidade final do produto obtido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cinética de secagem

Uma forma comum de analisar e ter uma visão geral do comportamento de um alimento quando submetido à secagem é por meio das curvas de cinética, representações gráficas que apresentam a relação entre o teor de água do alimento e o tempo da operação (JAIN e PATHARE, 2007). Apesar das singularidades encontradas nessas curvas, que dependem das características de cada alimento, um comportamento genérico pode ser observado, o qual é normalmente dividido em três fases (Fig. 1.1) (PRACHAYAWARAKORN et al., 2008; ZHANG et al., 2006).

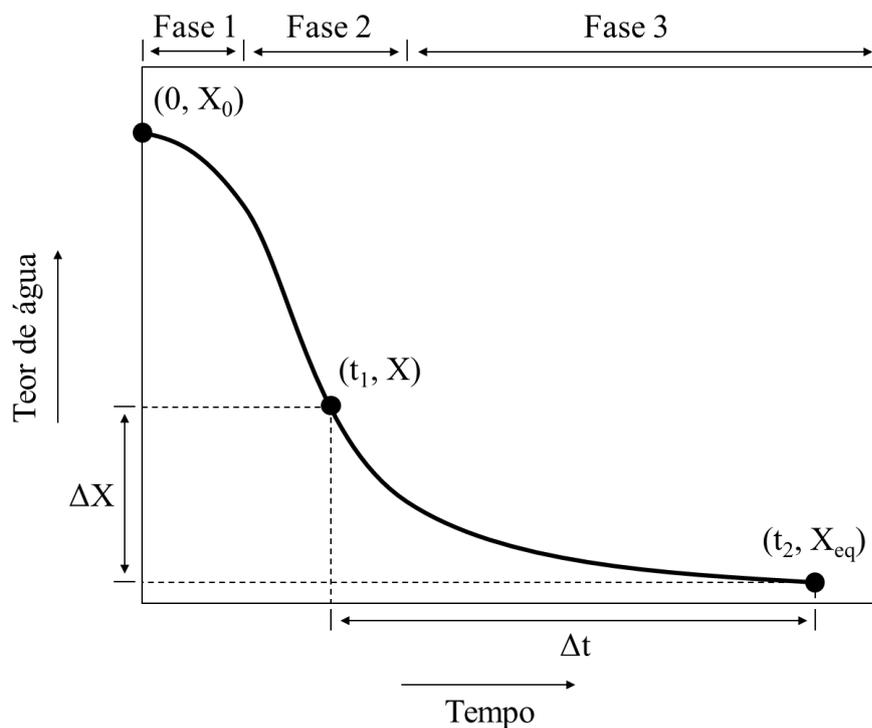


Figura 1.1. Representação de uma curva típica de cinética de secagem de alimentos.

Fonte: O autor (2021)

Na primeira fase da cinética de secagem, ocorre o aquecimento inicial (NUTHONG et al., 2011). Por apresentar-se mais fria que a temperatura do meio, a temperatura superficial do alimento eleva-se rapidamente nesta fase até que atinja um valor próximo à temperatura de bulbo úmido, entendida como a mínima temperatura que deve ser alcançada para que haja o

resfriamento do ar circundante a partir da evaporação de água a uma pressão constante. Neste primeiro momento, portanto, a transferência de energia é feita predominantemente sob a forma de calor sensível, de forma que o calor absorvido é utilizado tão somente para a variação de temperatura (adaptação às condições do ambiente), não havendo uma variação considerável no conteúdo de água do alimento com o tempo de secagem (EVIN, 2012).

Alcançada a temperatura de bulbo úmido, inicia-se a segunda fase da curva de cinética. Nesta fase, a água localizada nas camadas mais superficiais do alimento começa a evaporar e, conforme isto acontece, uma quantidade equivalente de água líquida migra do interior para a superfície do alimento (PRACHAYAWARAKORN et al., 2008), de modo que esta permaneça constantemente umedecida (ERBAY e ICIER, 2010). Com isto, é comum identificar um comportamento relativamente linear da cinética nesta fase, caracterizado por uma taxa de secagem constante ao longo do tempo, isto é, com o alimento perdendo quantidades regulares de água com o passar do tempo (MONTEIRO et al., 2018). Sendo assim, esta é a fase na qual o alimento tem a maior redução no seu conteúdo de água.

Na terceira fase, o balanceamento estabelecido entre a água em evaporação e a que migra do interior para a superfície é interrompido conforme as reservas de água do alimento se aproximam do fim (ERBAY e ICIER, 2010). Nesse momento, há um aumento gradual da temperatura da superfície, de modo que o alimento começa a entrar em equilíbrio termodinâmico com o meio (CURCIO et al., 2008). Quando o alimento atinge valores de temperatura próximos à temperatura de bulbo seco (temperatura de secagem), é então estabelecido o equilíbrio entre os processos de evaporação e condensação e o produto alcança o conteúdo de água de equilíbrio para as condições da operação (ROVEDO, SUAREZ e VIOLLAZ, 1995).

Uma prática que proporciona maior controle sobre as variáveis envolvidas nas curvas de cinética de secagem é o ajuste de modelos matemáticos (DADALI, KILIÇ APAR e ÖZBEK, 2007; SIMAL et al., 2005). Utilizando dados experimentais coletados ao longo da operação e técnicas estatísticas, é possível propor uma ou mais equações que sejam capazes de prever, com certa precisão, o valor do conteúdo de água associado a determinado tempo de secagem ou vice-versa. Das opções possíveis, a solução mais simples para esse tipo de aplicação foi proposta pelo químico norte-americano Warren K. Lewis em meados da década de 1920, tendo como base a lei do resfriamento de Newton (LEWIS, 1921).

Para entender o modelo de Lewis, considere um alimento que está sendo desidratado e que apresenta um conteúdo de água X no tempo t (Fig. 1.1, pg. 3). Do mesmo modo, considere que, antes de ser submetido à secagem, no tempo $t = 0$, o alimento possuía um

conteúdo de água inicial X_0 e que a operação seja conduzida até que o produto atinja o teor de água de equilíbrio (X_{eq}) no tempo t_2 . Com base nessas informações, do ponto em que se encontra o alimento até o ponto final de secagem, a taxa de perda de água pode ser expressa na forma:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X - X_{eq}}{t_2 - t_1}$$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = -\frac{(X - X_{eq})}{t_1 - t_2}$$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = -k(X - X_{eq}), \text{ sendo } k = -\frac{1}{\Delta t}$$

Para uma variação infinitesimal (KROKIDA et al., 2003):

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_{eq}) \quad (1)$$

A relação apresentada na Eq. (1) é análoga à lei do resfriamento de Newton, motivo pelo qual é chamada de modelo de Lewis e Newton (KALETA e GÓRNICKI, 2010). Esta relação tem embasamento empírico e expressa que a taxa de variação do teor de água do alimento durante a secagem é proporcional à diferença entre o teor de água em que ele se encontra e o teor de água de equilíbrio com o meio, de forma que quanto maior esta diferença, maior será a taxa de secagem (como pode ser observado na fase 2 da curva de cinética) e, quanto mais próximo o alimento estiver das condições de equilíbrio termodinâmico, menor será a taxa de secagem (fase 3 da curva de cinética).

Como mediadora desta relação, o termo k é denominado de constante de secagem, sendo o seu valor dependente do tipo de alimento que está sendo desidratado e das condições do meio, como a temperatura, umidade, entre outros (AKPINAR e BICER, 2005; AZZOUZ et al., 2002). Pela relação inversamente proporcional que tem com o tempo, a constante k é uma medida que indica a velocidade da operação, de forma que, quanto maior o seu valor, menor o tempo para que a operação seja concluída (GIRI e PRASAD, 2007).

Admitindo como verdadeiras as hipóteses de que o teor de água do alimento é uma variável que depende unicamente do tempo e tem o mesmo valor em todos os pontos de espaço do produto, isto é, $X(x,y,z) = \text{constante}$; que o valor a ser alcançado para o teor de água de equilíbrio (X_{eq}) não se altera no decorrer da operação; e que a taxa de variação do teor de água é proporcional à diferença entre o teor de água do alimento e o de equilíbrio, a Eq. (1) pode ser solucionada na forma:

$$\int \frac{dX}{(X - X_{eq})} = -k \int dt$$

$\ln(X - X_{eq}) = -kt + C$, sendo C a constante de integração.

$$X - X_{eq} = e^{-kt} \cdot e^C$$

$$X = X_{eq} + C' \cdot e^{-kt}, \text{ sendo } C' = e^C \quad (2)$$

Considerando que, no tempo $t = 0$, o teor de água é expresso por $X = X_0$, a substituição desta condição de contorno na Eq. (2) resulta em:

$$X_0 = X_{eq} + C' \cdot e^{-k \cdot 0}$$

$$C' = X_0 - X_{eq} \quad (3)$$

Substituindo a Eq. (3) na Eq. (2):

$$X = X_{eq} + (X_0 - X_{eq})e^{-kt} \quad (4)$$

A Eq. (4) apresenta o modelo básico da solução apresentada por Lewis e Newton para a cinética de secagem. Além desta forma, o modelo pode também ser apresentado com base no teor de água adimensionalizado, por meio do rearranjo de seus termos:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = e^{-kt}$$

$$X_{adm} = e^{-kt}, \text{ sendo } X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (5)$$

Na Eq. (5), a variável X_{adm} expressa uma quantidade relativa de água associada ao conteúdo presente no alimento e que pode ser removido a partir da operação de secagem. Assim, é uma medida cujo valor varia de 0 a 1, sendo zero o teor de água de equilíbrio dentro das condições estabelecidas para a operação e 1 o teor de água inicial do alimento.

A partir do modelo de Lewis e Newton, outras soluções foram propostas na literatura (Tabela 1.1). Em geral, essas soluções adicionaram novos parâmetros ao modelo original que, apesar de não possuírem um significado físico, ajudaram a melhorar a qualidade do ajuste nos casos em que foram aplicados.

2.2. Teor e atividade de água

O conteúdo e a atividade de água, apesar de serem propriedades vinculadas a um mesmo objeto (isto é, a água), não se confundem. Enquanto o conteúdo indica a quantidade de água presente em um alimento, a atividade expressa o seu estado energético (MATHLOUTHI, 2001).

Tabela 1.1. Coleção de alguns dos modelos matemáticos que podem ser ajustados aos dados experimentais obtidos na curva de cinética de secagem.

Nome do modelo	Equação	Referência
Lewis e Newton	$X_{adm} = e^{-kt}$	De Lima et al. (2016) Horuz et al. (2017)
Page	$X_{adm} = e^{-kt^n}$	De Lima et al. (2016)
Henderson e Pabis	$X_{adm} = ae^{-kt}$	Gupta et al. (2011)
Logarítmico	$X_{adm} = ae^{-kt} + c$	Gupta et al. (2011)
Page modificado	$X_{adm} = e^{(-kt)^n}$	Horuz et al. (2017)
Midilli-Kucuk	$X_{adm} = ae^{-kt^n} + ct$	Midilli et al. (2002)
Weibull	$X_{adm} = a + ce^{-kt^n}$	Babalís et al. (2006)
Abordagem da difusão	$X_{adm} = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$	Horuz et al. (2017)
Dois termos	$X_{adm} = ae^{-kt} + ce^{-gt}$	Midilli et al. (2002)
Exponencial de dois termos	$X_{adm} = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$	Horuz et al. (2017)
Verma	$X_{adm} = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-gt}$	Horuz et al. (2017)

Fonte: O autor (2021)

Nos processos de secagem, o acompanhamento de ambas as propriedades fornece importantes informações que definirão a estabilidade do produto gerado durante o período de armazenamento, visto que a velocidade das principais reações de degradação dos alimentos tem vínculo com o teor e o nível de energia da água no produto (MALTINI et al., 2003). Este acompanhamento pode ser feito por meio de ferramentas de análise como as isotermas de sorção, gráficos que relacionam ambas as propriedades, dividindo as diferentes formas de apresentação da água no alimento em três zonas (Fig. 1.2).

A primeira zona caracteriza-se pela predominância no alimento de água em elevado estado de energia. Isto significa dizer que a maior parte das moléculas de água tem alta liberdade de movimentação como consequência do estabelecimento de interações mais fracas, normalmente feitas por meio de ligações de hidrogênio das próprias moléculas de água entre si (BASU, SHIVHARE e MUJUMDAR, 2006). Isto torna mais fácil a remoção da água nesta zona, sendo necessário empregar baixa quantidade de energia na forma de calor para romper essas interações (ARSLAN-TONTUL, 2020).

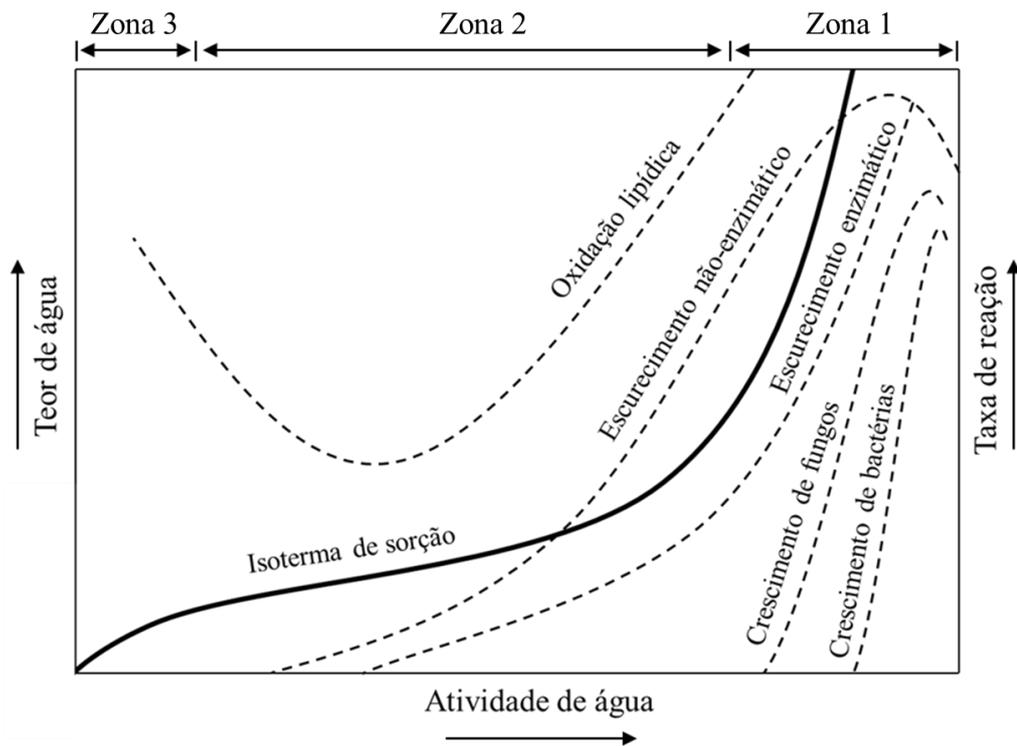


Figura 1.2. Diagrama de estabilidade dos alimentos.

Fonte: Adaptado de Labuza et al. (1972)

Na operação de secagem, a primeira zona está relacionada com a fase de taxa de secagem constante, havendo alterações mais sutis da atividade de água se comparado à variação que ocorre no teor de água. Nos alimentos, o conteúdo de água que apresenta estas características frequentemente localiza-se em espaços confinados, como os espaços intercelulares e espaços vazios na estrutura da matriz alimentícia, ou na superfície do produto (KHAN, NAGY e KARIM, 2018).

Na segunda zona, o alimento apresenta a maior variação da atividade de água conforme o seu teor de água reduz (MONTEIRO et al., 2018). Diferente do caso anterior, a água que caracteriza esta zona estabelece interações mais fortes com outros dipolos, o que restringe a mobilidade e dificulta a sua remoção (RAHMAN, 2009). Por esta razão, a água que caracteriza esta zona está relacionada com a última fase na curva de cinética, na qual há o estabelecimento do equilíbrio termodinâmico do alimento com o meio.

Já na terceira zona, o alimento apresenta o menor conteúdo e a menor atividade de água devido às interações de alta intensidade estabelecidas com íons ou dipolos que compõem a estrutura do alimento. Em virtude das suas características, esta água é denominada como um constituinte do produto (ARSLAN-TONTUL, 2020). Como consequência dessa aproximação, a água forma a chamada monocamada, na qual as suas moléculas estão adsorvidas na

superfície da estrutura sólida – formada pelos componentes não aquosos (carboidratos, proteínas, sais minerais) – em uma única camada (AL-MUHTASEB, MCMINN e MAGEE, 2002). Logo, esta água é difícil de ser removida por procedimentos convencionais de secagem, sendo necessário empregar alta quantidade de energia na operação, o que pode torná-la cara, inviável ou até mesmo desnecessária a depender do objetivo.

Em cada uma de suas três zonas, a isoterma de sorção está associada com a velocidade de algumas das reações mais comuns que provocam a deterioração dos alimentos, reduzindo o tempo de vida útil dos produtos formados. De forma geral, a redução da atividade de água retarda a taxa de crescimento de microrganismos e das reações de escurecimento, tanto enzimáticas quanto não enzimáticas (MALTINI et al., 2003). Uma exceção a este padrão, no entanto, é a oxidação de lipídeos, que apresenta um formato parabólico com vértice entre os valores de atividade de água de $a_w = 0,3$ e $a_w = 0,4$ (LABUZA et al., 1972). O aumento observado na taxa de oxidação para valores de atividade de água abaixo de $a_w = 0,3$ pode estar associado à maior exposição dos lipídeos ao oxigênio atmosférico por causa da retirada da água.

Para que haja um maior controle sobre as variáveis envolvidas na construção das isotermas de sorção e, conseqüentemente, das reações que possam originar, modelos matemáticos foram propostos a fim de descrever a relação entre o teor e a atividade de água (SHIVHARE et al., 2004; KALEEMULLAH e KAILAPPAN, 2004; HOSSAIN et al., 2001). Entre os modelos desenvolvidos, os que foram propostos por Brunauer, Emmett e Teller, conhecido como modelo de BET (Eq. 6), e o de Guggenheim, Anderson e De Boer, conhecido como modelo de GAB (Eq. 7), são os mais utilizados.

$$X = \frac{(X_m \cdot c \cdot a_w) \cdot (1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (c-1) \cdot a_w - c \cdot a_w^{n+1})} \quad (6)$$

$$X = \frac{X_m \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + c \cdot k \cdot a_w)} \quad (7)$$

Sendo X o conteúdo de água, X_m o conteúdo de água da monocamada, a_w a atividade de água, c uma constante relacionada com o calor de sorção da monocamada quando comparado às camadas superiores (modelo de GAB) ou à água pura (modelo de BET), k uma constante relacionada com o calor de sorção nas multicamadas e n um valor característico do material.

Apesar de normalmente proporcionarem bons níveis de ajuste sobre dados experimentais, ambos os modelos possuem limitações de precisão, havendo faixas de atividade de água nos quais o seu uso é indicado. Quanto a isso, uma análise desenvolvida por Timmermann, Chirife e Iglesias (2001) identificou que, enquanto o modelo de BET aplica-se

com confiabilidade no intervalo de atividade de água entre $a_w = 0,1$ e $a_w = 0,4$, o modelo de GAB apresenta boa capacidade de predição em uma faixa mais ampla, que vai de $a_w = 0,1$ a $a_w = 0,8$. Portanto, na escolha do modelo, é preciso considerar, além dos parâmetros de qualidade de ajuste obtidos por meio da análise estatística dos dados, a faixa de atividade de água de interesse para, assim, escolher o modelo que forneça os resultados mais adequados.

2.3. Secagem convectiva

A secagem convectiva é uma simulação controlada da secagem solar, método primitivo que utiliza a radiação emitida pelo sol como fonte de energia na forma de calor. No procedimento, uma massa de ar com fluxo contínuo, temperatura constante e de baixa umidade é direcionada ao alimento, iniciando processos de transferência de calor e massa responsáveis pela migração da água constituinte do alimento para o meio externo (SAXENA et al., 2012).

Para que isso seja possível, uma fonte de calor artificial é utilizada e todo o procedimento é desenvolvido dentro de uma câmara fechada e devidamente projetada a fim de proporcionar ao usuário controle sobre alguns parâmetros de ajuste do processo que melhorem a sua eficiência (VEGA-MERCADO, GÓNGORA-NIETO e BARBOSA-CÁNOVAS, 2001). Tendo isto em vista, compreender alguns dos aspectos tecnológicos e de engenharia envolvidos no procedimento, como os fenômenos de transporte, detalhes sobre o funcionamento do equipamento empregado neste tipo de secagem e as vantagens e desvantagens de sua utilização, são pontos importantes para entender as situações nas quais a técnica pode ser empregada.

Durante a operação de secagem convectiva, o principal mecanismo de transferência de calor é a convecção. Formada a partir do movimento forçado de correntes de ar aquecido dentro da câmara de secagem, a transferência de energia nesse tipo de mecanismo é feita inicialmente pelo contato do fluido com a superfície do alimento, iniciando um processo de trocas gasosas responsáveis pela redução do teor de água no produto (CURCIO et al., 2008). Com o passar do tempo, o fluxo de calor é então orientado para o centro geométrico do material, elevando continuamente a temperatura do alimento até que este atinja a temperatura de bulbo seco do meio, momento a partir do qual o conteúdo de água de equilíbrio é estabelecido (KUMAR, MILLAR e KARIM, 2015).

Apesar da predominância do processo convectivo, a atuação secundária de processos de transferência por condução também podem estar presentes, por exemplo, por meio do

contato do alimento com a bandeja ou suporte no qual será comportado. Por serem normalmente constituídos de material metálico, esses acessórios agem como condutores térmicos e podem, por essa característica, provocar o superaquecimento da área do alimento com a qual estão em contato. Para reduzir essa influência, duas alternativas que podem ser utilizadas é o uso de bandejas feitas com material de baixa condutividade térmica, como redes de nylon, ou o reposicionamento periódico do alimento, alterando o lado exposto à bandeja ou suporte.

Quanto aos processos de transferência de massa, o principal mecanismo responsável pelo transporte das moléculas de água do interior do alimento para a sua superfície é a difusão molecular (AVERSA et al., 2007). Utilizando a energia fornecida na forma de calor ao alimento, a movimentação das moléculas de água energizadas induz a sua dispersão, migrando de um meio altamente concentrado - região interna da matriz do alimento - para um meio de menor concentração, encontrado na superfície exposta às correntes de ar circundantes (CURCIO et al., 2008).

Essa dispersão tem como principal força motriz a mudança de fase da água, que passa da forma líquida para a gasosa devido à elevação da temperatura do sistema, aumentando assim a pressão de vapor. Desse modo, o aumento da pressão impulsiona o transporte da água para o meio externo, proporcionando uma redução gradual do conteúdo de água do alimento com o tempo de operação (KHAN, NAGY e KARIM, 2018).

Para estabelecer as melhores condições no procedimento de desidratação, pode ser feito o controle de alguns parâmetros que influenciam a qualidade do produto obtido. Fatores como a temperatura, a umidade presente na câmara de secagem e a velocidade do ar devem ser devidamente ajustados conforme as peculiaridades de cada alimento, tais como o seu conteúdo de água, sua resistência ou sensibilidade térmica, aspectos de composição, de geometria e de estrutura (DEMIRAY e TULEK, 2014; MRAD et al., 2012; BABALIS e BELESSIOTIS, 2004).

Na literatura, alguns trabalhos descreveram a influência desses fatores tanto sob a perspectiva de melhorias sobre a qualidade do produto quanto sobre a eficiência do processo (TELLO-IRELAND et al., 2011; VEGA et al., 2007; DOYMAZ, 2007; MWITHIGA e OLWAL, 2005). Assim, a formação de um ambiente favorável à remoção da água e que, concomitantemente, possa preservar ou possibilitar a mudança controlada de características que se deseja obter no produto final é essencial para alcançar bons resultados no uso desta técnica de secagem.

Entre os equipamentos em que é possível desenvolver a secagem convectiva, o uso da estufa é o mais comum. Nesse tipo de secador, o aparelho é projetado de maneira que os alimentos sejam posicionados sobre bandejas organizadas uma abaixo da outra, em uma estrutura normalmente construída na parte interna da câmara de secagem (Fig. 1.3). A partir da ação de uma ventoinha, ar da parte de fora do equipamento é aspirado e, antes de entrar em contato com os alimentos, é aquecido e tem sua umidade reduzida na passagem por uma fonte de calor. Na sequência, o ar aquecido é direcionado para cada uma das bandejas e, ao fim do trajeto, deixa a estufa por uma saída de ar. Caso a estufa trabalhe com um sistema de recirculação, uma parte do ar úmido retorna à ventoinha a partir de uma canaleta lateral, sendo novamente aquecido e posto em circulação sobre as bandejas.

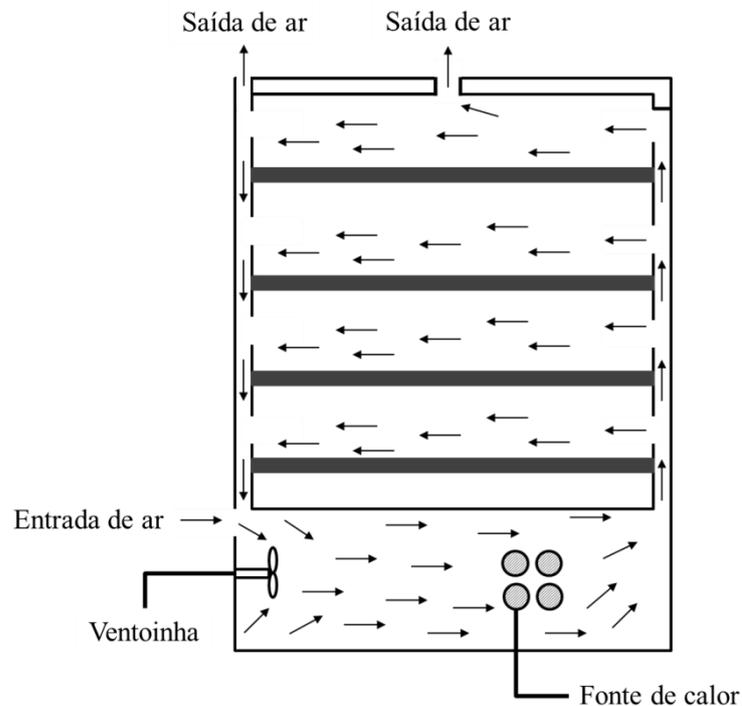


Figura 1.3. Desenho esquemático de uma estufa de secagem com circulação de ar.

Fonte: O autor (2021)

Um aspecto relevante para a condução da secagem em estufa é estar atento ao posicionamento do alimento durante a operação, isto porque é comum haver variações de temperatura na câmara de secagem, seja na direção horizontal (lados direito e esquerdo) ou vertical (a base da câmara mais aquecida que o topo). Essas variações podem estar associadas com o posicionamento da fonte de calor no equipamento e/ou a direção do fluxo de ar. De qualquer modo, práticas como a rotação das bandejas e o reposicionamento da ordem em que

são distribuídas na câmara durante a operação ajudam a manter a uniformidade na distribuição de temperatura sobre os alimentos.

Apesar dos cuidados necessários, a secagem convectiva em estufa é um procedimento simples e que não exige mão-de-obra especializada para operá-la. O baixo custo para aquisição do equipamento também é uma vantagem encontrada no emprego da técnica e que a faz ser a mais utilizada até hoje na indústria (MOSES et al., 2014). No entanto, o longo tempo exigido na operação é um fator limitante, que pode tornar o seu emprego pouco prático e reduzir a eficiência do procedimento (GIRI e PRASAD, 2007). Ademais, a influência que pode provocar sobre as características do produto, como volume, cor, textura, sabor e valor nutricional tem aberto oportunidade para o estudo de técnicas que possam substituí-la, total ou parcialmente (ONWUDE et al., 2019; ZHOU et al., 2019; KROEHNKE et al., 2018; ZHOU et al., 2016).

2.4. Secagem por micro-ondas

O uso de micro-ondas como meio de aquecimento é uma tecnologia que remete a meados de 1945, ano em que foi realizado seu registro de patente. A elevada taxa de aquecimento oferecida a partir do seu uso despertou rapidamente o interesse de alguns setores industriais, em especial o de alimentos, que a empregou em operações comuns de transferência térmica, como branqueamento, cocção, pasteurização, descongelamento e secagem (TAPE, 1970). Dentro dos documentos eletrônicos atualmente disponíveis, as primeiras publicações científicas que utilizaram as micro-ondas para a secagem de alimentos foram feitas no fim da década de 1960 (DECAREAU e KENYON, 1970; AREF, BRACH e TAPE, 1969).

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequência que varia de 0,3 a 300 GHz, correspondendo a comprimentos de onda entre 1 mm e 1 m. Para fornos domésticos, a frequência permitida é de 2,45 GHz, correspondendo a 12,2 cm de comprimento de onda no vácuo (DROUZAS e SCHUBERT, 1996).

Diferente do ar quente convectivo, no qual o fluxo de calor é orientado das bordas para o centro do alimento, a absorção das micro-ondas gera um aquecimento volumétrico (SONG et al., 2017; MONTEIRO et al., 2015; CHONG et al., 2014), isto é, sobre todo o volume do material. Essa forma de aquecimento é possível devido à capacidade de penetração das micro-ondas e caracteriza-se pela indução de movimentos de rotação e translação sobre as moléculas de água (naturalmente polares) como resposta à presença do campo eletromagnético que as

circunda (Fig. 1.4). O atrito produzido durante essa movimentação dissipa energia na forma de calor instantaneamente sobre o alimento, dando início ao processo de evaporação da água quando as condições de temperatura e pressão de saturação são alcançadas.

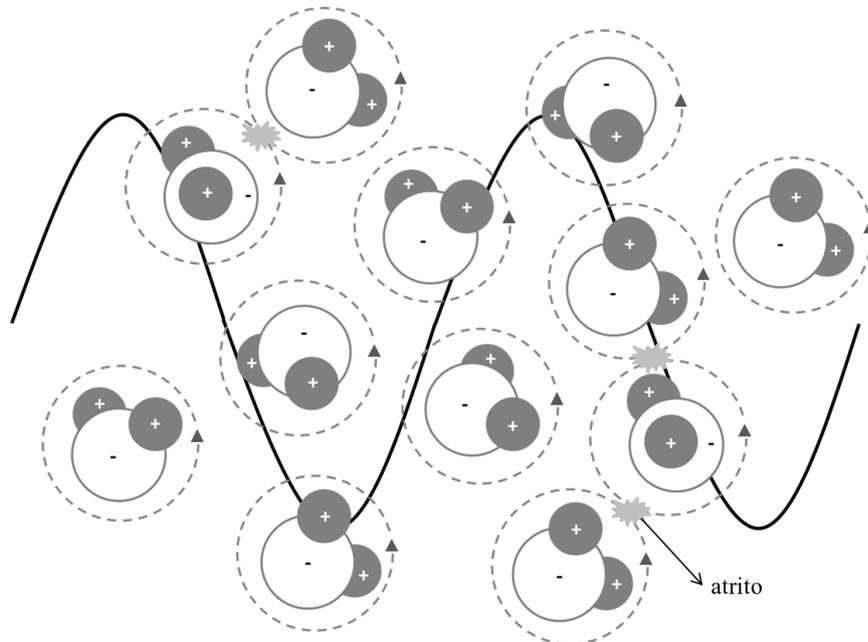


Figura 1.4. Representação do aquecimento gerado sobre moléculas de água a partir da aplicação de micro-ondas.

Fonte: O autor (2021)

Nas camadas mais internas do alimento, a geração de vapor d'água eleva a pressão sobre as paredes do material, expandindo-o (Fig. 1.5) (MOTHIBE et al., 2014). Esse fenômeno de expansão é conhecido como efeito de sopro ou efeito *puffing* (MONTEIRO et al., 2015) e é o principal responsável por impulsionar a difusão da água e elevar a taxa de secagem (JUNQUEIRA, CORRÊA e ERNESTO, 2017; MONTEIRO et al., 2016). Entre as características do produto formado pela secagem em micro-ondas, é comum o relato na literatura de um maior número ou definição dos poros, preservação da integridade da estrutura natural do alimento e boa capacidade de reidratação, em alguns casos comparável a produtos obtidos por liofilização (JIANG et al., 2017, MONTEIRO et al., 2015), empregando menos tempo e tendo menor custo de operação.

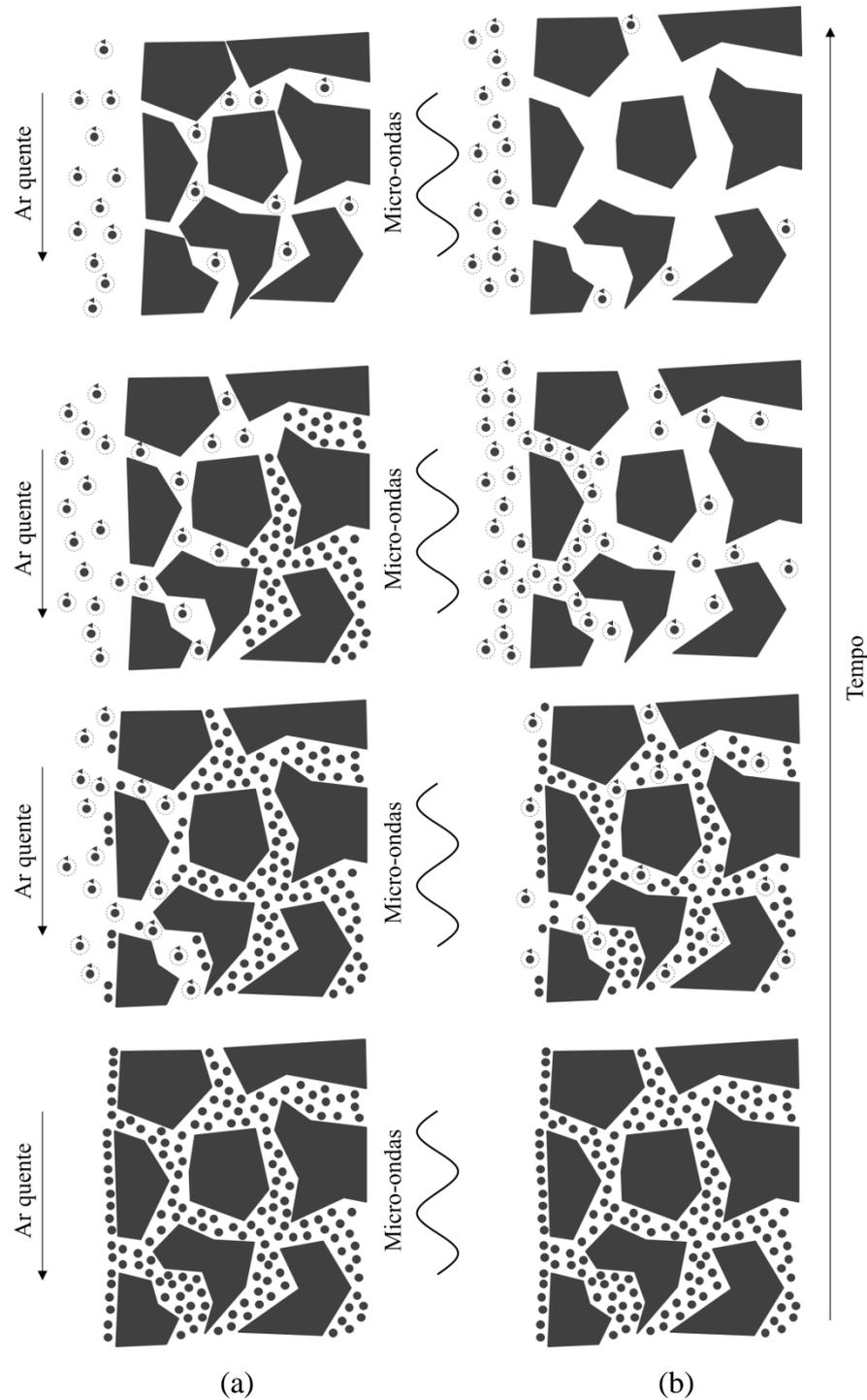


Figura 1.5. Representação do processo de difusão de água do interior do alimento para o meio durante a secagem em (a) ar quente convectivo e (b) em micro-ondas.

Fonte: O autor (2021)

Apesar de proporcionar celeridade ao processo de remoção de água, a velocidade de difusão na secagem em micro-ondas é influenciada por alguns fatores, como a potência

empregada, a massa e a geometria do alimento. Dak e Pareek (2014) relataram a relação existente entre a potência de micro-ondas e a massa do alimento tendo como objeto de estudo arilos de romã. Segundo os autores, o acréscimo da potência ou a redução da massa do alimento elevou a difusividade de água do fruto, reduzindo o tempo da operação de secagem. Esta informação enfatizou um conceito metodológico utilizado como base em várias pesquisas que utilizam as micro-ondas como meio de secagem: a densidade de potência. Segundo o conceito, um determinado tratamento em micro-ondas não é definido apenas pela potência utilizada na operação, mas sim pela razão entre a potência e a massa do material a ser desidratado. A esta razão foi dado o nome de densidade de potência, cujo valor é expresso em unidade de potência por unidade de massa.

Com relação à geometria, Pu e Sun (2016) relataram que a forma da amostra influenciou a uniformidade na distribuição de água sobre a superfície de manga submetida à secagem em micro-ondas. Os autores encontraram padrões não uniformes em todas as formas testadas, com similaridades da distribuição de umidade em amostras quadradas e retangulares. Das formas testadas, os melhores resultados foram obtidos usando geometrias arredondadas e os piores usando geometrias triangulares.

Além destes fatores, na prática da secagem em micro-ondas, o posicionamento do alimento na câmara influencia a qualidade da operação (GEEDIPALLI, RAKESH e DATTA, 2007). Essa influência pode ser percebida visualmente a partir de uma imagem térmica obtida após o aquecimento de pequenos recipientes circulares contendo água que estão espalhados sobre o prato de cocção localizado na parte interna de um forno de micro-ondas doméstico (Fig. 1.6).

Na imagem à esquerda (Fig. 1.6a), obtida mantendo o prato fixo, a falta de uniformidade na distribuição de temperatura é perceptível. Isso acontece porque, durante a propagação, as ondas eletromagnéticas passam através do prato em pontos específicos no espaço, isto é, nos pontos em que os recipientes com água apresentaram maior temperatura na imagem. Para melhorar a distribuição térmica, uma solução para o problema é movimentar o prato em torno do próprio eixo durante a propagação das micro-ondas (MONTEIRO et al., 2015), de forma que o material exposto mude constantemente a sua posição durante o aquecimento (Fig 1.6b). Esta solução, contudo, tem limitações, pois é preciso atentar-se ao fato de que a uniformidade da temperatura ocorre apenas na direção radial do prato, havendo variações quanto à distância em relação ao seu centro (ao longo da linha P apresentada na figura).

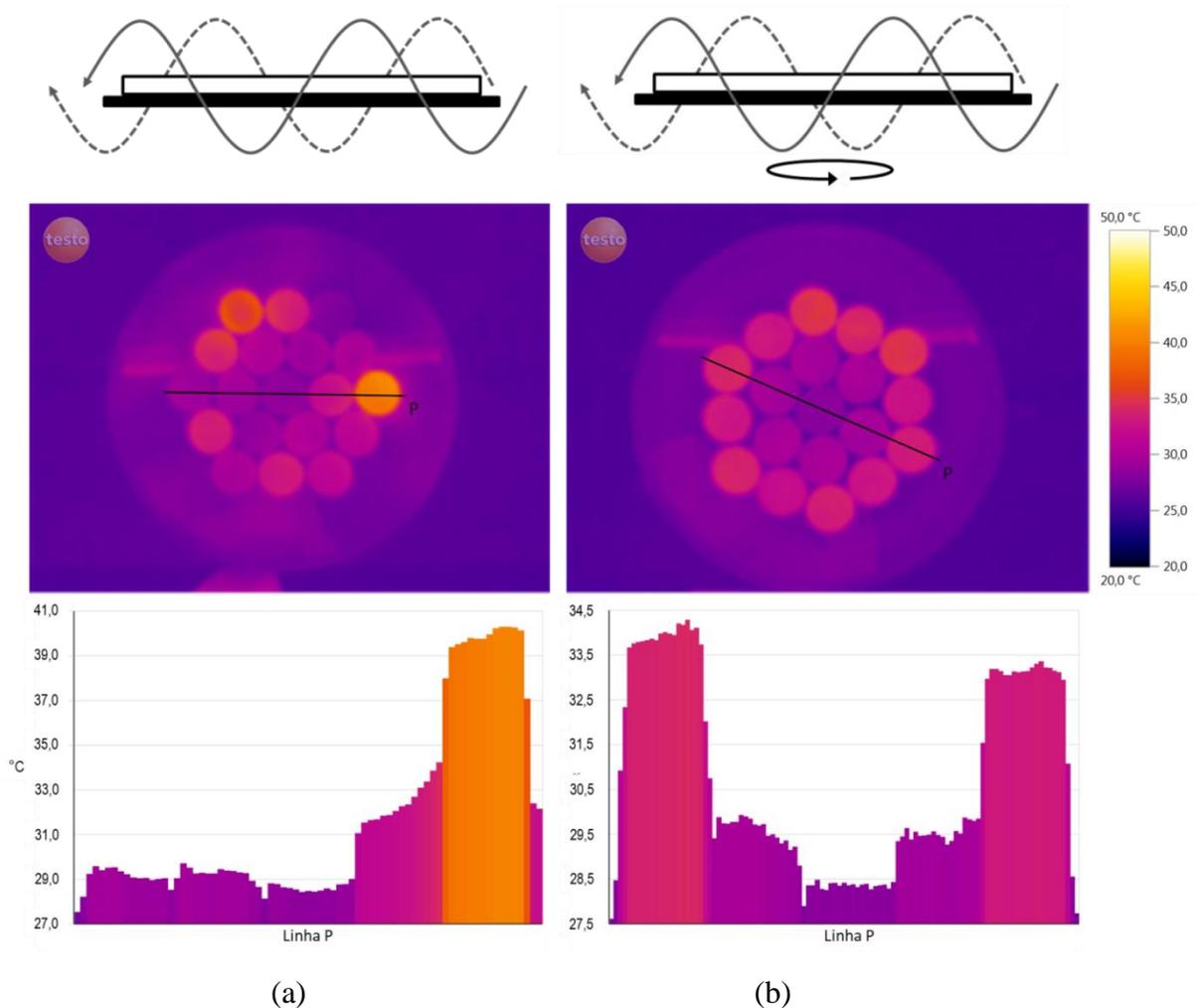


Figura 1.6. Imagens térmicas por infravermelho e perfil de temperatura obtidos após o aquecimento em micro-ondas (600 W por 30 segundos) de dezenove recipientes de plástico PEAD, contendo 5 ml de água cada, distribuídos sobre o prato de um forno doméstico: (a) O prato do forno manteve-se imóvel durante o aquecimento e (b) o prato girou em torno do próprio eixo a 6 rpm durante o aquecimento.

Fonte: O autor (2021)

No que se refere à aplicação, a secagem em micro-ondas pode ser empregada de forma isolada ou como pré ou pós-tratamento de outras técnicas de secagem, como a convectiva, por infravermelho, a desidratação osmótica, entre outros. Quando utilizada em conjunto com outras técnicas, o método é denominado híbrido ou em multi-estágio (ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2016) e tenta cobrir lacunas e limitações que existem no uso isolado das micro-ondas, como a falta de uniformidade na distribuição de temperatura ao longo da área superficial do material aquecido (PU e SUN, 2015; JIANG et al., 2014; VADIVAMBAL e JAYAS, 2010), gerando pontos quentes (*hotspots*) e frios (*coldspots*), e o superaquecimento

do material, que pode gerar queimaduras superficiais (CHONG et al., 2014; KANTRONG, TANSAKUL e MITTAL, 2014). Essa forma de aplicação é particularmente interessante para alimentos com alto teor de água inicial, pois o uso isolado das micro-ondas, sem uma secagem parcial prévia, pode colapsar a estrutura devido à pressão excessiva gerada na parte interna do alimento durante o efeito *puffing*.

Das ordens possíveis, é comum o uso da secagem por micro-ondas como complemento (pós-tratamento) da secagem por ar quente convectivo. Apesar das suas vantagens, a secagem convectiva costuma possuir baixa eficiência energética (ZIELINSKA, SADOWSKI e BŁASZCZAK, 2015), principalmente nos períodos de baixa taxa de secagem (WOJDYŁO et al., 2014). Além disso, a possibilidade de formação de uma densa e rígida camada após a rápida evaporação da água de superfície (chamado fenômeno *case-hardening*) pode obstruir os poros e atuar como barreira aos processos de transferência de calor e massa no período final da operação (após o período de taxa de secagem constante), dificultando a remoção da água contida nas camadas internas do produto (SIEBERT et al., 2019; HU et al., 2006; RAHMAN, 2001).

Nesse contexto, a aplicação complementar das micro-ondas antes que haja a formação deste tipo de crosta pode ajudar na remoção do conteúdo interno de água por acelerar a difusão de umidade da região interna para a superfície do alimento (PU e SUN, 2017; 2016; 2015; JUNQUEIRA, CORRÊA e ERNESTO, 2017; PEI et al., 2014a; 2014b). Isto é possível devido à forma de aquecimento gerada, que concentra maior quantidade de energia sobre as partes nas quais há alto teor de água e menor quantidade nas que possuem baixo teor de água, o que proporciona uma remoção efetiva na região central do volume do produto e reduz a possibilidade de aparecimento de barreiras ao processo de transferência de massa. Ademais, a ação das micro-ondas pode reduzir consideravelmente o tempo e o consumo de energia quando a operação se aproxima da zona de equilíbrio termodinâmico (JIANG et al., 2017; ZIELINSKA, SADOWSKI e BŁASZCZAK, 2016), aumentando, assim, a eficiência da operação.

Além do uso como complemento de outras técnicas de secagem, a adaptação do ambiente de secagem utilizado durante a aplicação das micro-ondas tem sido o foco de alguns dos estudos da área. Uma das propostas que se destaca é o emprego de ambientes a baixa pressão (ou “a vácuo”). Nesse tipo de adaptação, são utilizadas pressões abaixo da atmosférica, no intuito de reduzir a temperatura de ebulição da água.

Para ilustrar a influência da pressão sobre o ponto de vaporização da água, considere o diagrama de fases apresentado na Figura 1.7. Nela, existem três regiões que identificam

condições de temperatura e pressão nas quais a água apresenta-se em estado sólido, líquido ou gasoso, todas mediadas por linhas que indicam as condições para a ocorrência das transições de fase. Ao analisar a linha de transição do estado líquido para o gasoso, é possível perceber que a redução da pressão do sistema de um determinado ponto arbitrário (1) para o ponto (2) implica, necessariamente, em uma redução proporcional sobre a temperatura de ebulição. Portanto, com essa mudança, é possível alcançar as condições necessárias para que o processo de evaporação ocorra de maneira que o alimento seja submetido a uma temperatura mais branda durante a operação.

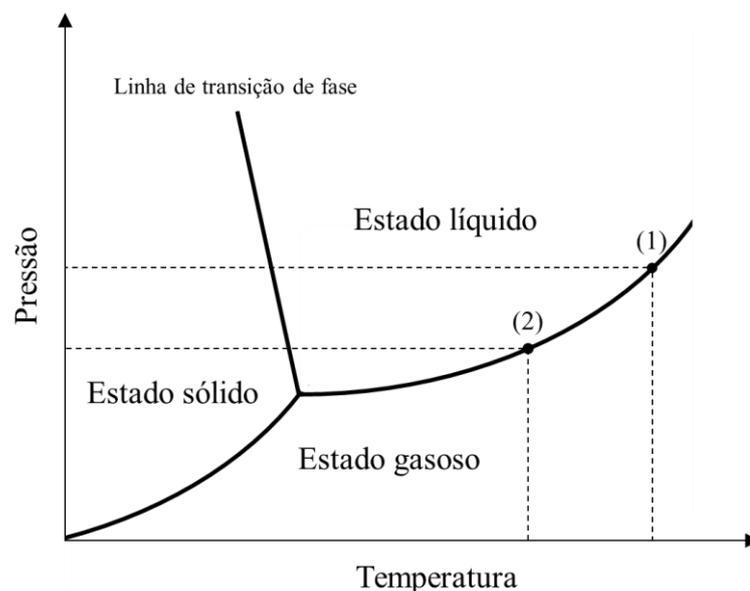


Figura 1.7. Diagrama de fases da água.

Fonte: Adaptado de FELLOWS (2000)

Entre as vantagens obtidas com o uso das micro-ondas a vácuo, foi relatado que essa redução da pressão ajuda a preservar nutrientes funcionais (JIANG et al., 2017; ZIELINSKA e MICHALSKA, 2016; CHONG et al., 2014; WOJDYLO et al., 2014), aromas voláteis (TIAN et al., 2016), a cor do alimento (PU e SUN, 2017; TIAN et al. 2016; SONG et al., 2017) e outros componentes termossensíveis (SCHULZE, HUBBERMANN e SCHWARZ, 2014), além de proporcionar baixo encolhimento (BÉTTEGA et al., 2014; ZIELINSKA, SADOWSKI e BLASZCZAK, 2016), baixa densidade aparente e alta capacidade de reidratação (ZIELINSKA, SADOWSKI e BLASZCZAK, 2016) ao produto seco. Esses efeitos podem ser potencializados a depender da forma de condução da operação, adaptações e combinação com outras técnicas de secagem. Uma coleção com alguns dos artigos

publicados nos últimos cinco anos que empregaram a técnica de micro-ondas a vácuo, a metodologia empregada nesses trabalhos e conclusões selecionadas são apresentadas na Tabela 1.2.

A literatura indica, portanto, o uso das micro-ondas em ambientes a vácuo como uma opção de tecnologia com capacidade para fornecer produtos de alta qualidade, cobrindo lacunas que existem nas técnicas mais consolidadas e atualmente utilizadas em escala industrial. Sua eficiência, assim como nas demais técnicas, depende dos meios utilizados na operação e considera as peculiaridades de cada alimento, tanto em relação à composição quanto à estrutura.

Tabela 1.2. Coleção de alguns dos estudos desenvolvidos entre 2016 e 2020 que utilizaram a técnica de micro-ondas na secagem de alimentos.

Autor	Alimento	Técnica	Informações sobre o método adotado	Conclusões selecionadas
Monteiro et al. (2018)	Abóbora	Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem intermitente de três ciclos, compostos pelo aquecimento da amostra a 1.000 W até 60°C sob pressão atmosférica seguido de descompressão para 5 kPa/11 s a 0 W. Na sequência, foi feita secagem contínua em três diferentes potências (tratamentos): (1) 200 W/60 min, (2) 300 W/10 min e (3) 1.000 W/7 min, todas sob pressão de 3-5 kPa.	Comparado à secagem por liofilização e em ar quente convectivo, o uso das micro-ondas a vácuo aumentou em 53 e 22 vezes a taxa de secagem da abóbora, respectivamente, reduzindo o tempo de operação em pelo menos 12 vezes. Além disso, as micro-ondas proporcionaram um produto final com estrutura mais porosa e boa capacidade de reidratação.
Zielinska, Zielinska e Markowski (2018)	Mirtilo	Micro-ondas a vácuo	Pré-tratamento das amostras composta por 4 etapas em sequência: (1) congelamento das amostras a -18°C/24 h, (2) descongelamento a 21°C/24 h, (3) desidratação contínua em micro-ondas a vácuo com densidade de potência de 0,67 W.g ⁻¹ e potência de 100 W por 20 min sob pressão de 5 kPa, (4) desidratação osmótica a 65 °Brix a 21°C/6 h. Secagem: Operação contínua em micro-ondas a vácuo a 0,67 W.g ⁻¹ (admitindo a temperatura de 40°C como limite de temperatura superficial da amostra durante o procedimento) sob pressão de 5 kPa até 0,17 kg H ₂ O/kg b.s.	A adoção da secagem parcial em micro-ondas a vácuo na potência de 100 W (pré-tratamento) aumentou em até três vezes a perda de água e o ganho de sólidos na desidratação osmótica, preservou o conteúdo de compostos fenólicos, a atividade antioxidante, o teor de antocianinas, flavonoides e a cor do mirtilo em níveis comparáveis à secagem por liofilização.
Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016)	Banana	Micro-ondas a vácuo	Modo <i>multiflash</i> : Secagem com três ciclos iniciais, compostos pelo aquecimento da amostra até que atingisse temperatura superficial de 60°C sob pressão atmosférica seguido de descompressão para 8kPa a 0 W até constatar redução da temperatura para 40°C. Após os três ciclos, as amostras foram aquecidas continuamente sob pressão de 4-8 kPa. Formas de aquecimento utilizadas (tratamentos): ciclos intermitentes de 400 W/11 s + 0 W/18 s, ciclos intermitentes de 700 W/20 s + 0 W/9 s ou exposição contínua a 1.000 W.	O uso da secagem em micro-ondas a vácuo no modo <i>multi-flash</i> aumentou o tamanho e o número de poros (porosidade 20% a 50% maior) na estrutura da banana seca se comparado à secagem em micro-ondas a vácuo convencional. Além disso, os produtos obtidos a partir desta técnica apresentaram teor de água, atividade de água e propriedades físicas semelhantes a produtos liofilizados, além de uma crocância notável.

(continua na próxima página)

Tabela 1.2. Continuação

Autor	Alimento	Técnica	Informações sobre o método adotado	Conclusões selecionadas
Pu e Sun (2016)	Manga	Micro-ondas a vácuo	Operação intermitente em ciclos, compostos pelo aquecimento da amostra a 250 W/1 min seguido de redução da potência para 0 W/2 min sob pressão constante de 20 mbar.	--
Tian et al. (2016)	Cogumelo	Micro-ondas a vácuo	Secagem contínua a 15 W.g ⁻¹ sob pressão de 20 kPa até atingir teor de água de 13 kg.kg ⁻¹ b.u.	A secagem por micro-ondas a vácuo preservou a cor, os compostos voláteis e a estrutura de cogumelo com melhor eficiência que o ar quente convectivo, o ar quente a vácuo e as micro-ondas sob pressão atmosférica.
Monteiro et al. (2015)	Banana, cenoura e tomate	Micro-ondas a vácuo	Foram utilizados três potências de micro-ondas (tratamentos): secagem contínua a 1.000 W, secagem intermitente com ciclos de 700 W/20 s + 0 W/9 s e secagem intermitente com ciclos de 400 W/11 s + 0 W/18 s. Nos três casos, a pressão foi mantida a 4 kPa durante a secagem.	--
Pu e Sun (2015)	Manga	Micro-ondas a vácuo	Processo intermitente com 10 ciclos de 250 W/1 min + 0 W/2 min sob pressão de 2 kPa	--
Bétega et al. (2014)	Cenoura	Micro-ondas a vácuo	Processo contínuo em potências que variaram de 1 a 2 W.g ⁻¹ sob pressão de 450 mmHg	Não houve alterações significativas no tempo de secagem quando comparado à secagem em micro-ondas sob pressão atmosférica, mas o uso de vácuo preservou mais a estrutura do cenoura, proporcionando menor encolhimento e maior porosidade.
Dak e Pareek (2014)	Romã	Micro-ondas a vácuo	Processo contínuo em potências que variaram entre 25 e 95 W sob pressão de 25-195 mmHg.	--

(continua na próxima página)

Tabela 1.2. Continuação

Autor	Alimento	Técnica	Informações sobre o método adotado	Conclusões selecionadas
Mothibe et al. (2014)	Maçã	Micro-ondas a vácuo	<p>Modo “pulsos de jorro”: adaptação à secagem em leito de jorro na qual as amostras “jorram” em um período intermitente durante a exposição às micro-ondas.</p> <p>Forma de aquecimento: Processo contínuo a 2,25 W.g⁻¹ sob pressão de 7,5 kPa.</p>	<p>O modo “pulsos de jorro” proporcionou melhores características de cor e altos escores na avaliação sensorial quando comparado à secagem em ar quente a vácuo e micro-ondas a vácuo convencional.</p>
Schulze, Hubbermann e Schwarz (2014)	Maçã	Micro-ondas a vácuo	<p>Processo contínuo de secagem dividido em 4 fases, desenvolvidas em sequência, sendo: (1) aquecimento da amostra a 500 W/25 min, (2) exposição a 0 W/5 min, (3) aquecimento a 1.000 W/1 min e (4) aquecimento a 100 W/100 min. Durante todas as fases, a pressão foi mantida sob 2 kPa.</p>	<p>Apesar da menor porosidade e o encolhimento proporcionado ao produto, as micro-ondas a vácuo preservaram os derivados de quercetina (polifenol termossensível naturalmente presente na casca da fruta) de forma tão eficiente quanto a liofilização, utilizando menor tempo de operação.</p>
Wojdylo et al. (2014)	Cereja	Micro-ondas a vácuo	<p>Processo contínuo, iniciado a 480 W até que a amostra atinja teor de água de 1 kg.kg⁻¹ b.s. e finalizado a 120 W até a condição de equilíbrio. Durante a operação, a pressão foi mantida a 4-6kPa.</p>	<p>O emprego da redução de potência durante a secagem garantiu a manutenção de compostos fenólicos, derivados da quercetina, da capacidade antioxidante e da cor do produto seco de modo semelhante à liofilização e de modo mais eficiente que na secagem em ar quente convectivo.</p>
Pu e Sun (2017)	Manga	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	<p>Pré-secagem convectiva a 60°C/4 h seguida de micro-ondas a vácuo em processo intermitente com 10 ciclos de 250 W/1 min + 0 W/2 min. Durante a operação, a pressão foi mantida a 2 kPa.</p>	<p>As fatias de manga desidratadas com o uso em conjunto (multi-estágio) do ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo apresentaram distribuição do teor de água mais uniforme, estrutura porosa e maior retenção de cor que no uso das técnicas isoladas.</p>

(continua na próxima página)

Tabela 1.2. Continuação

Autor	Alimento	Técnica	Informações sobre o método adotado	Conclusões selecionadas
Zielinska, Sadowski e Blaszcak (2016)	Mirtilo	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem convectiva a 80°C até que a amostra atingisse teor de água de 1,95 kg.kg ⁻¹ b.s. e finalização em micro-ondas a vácuo a 0,67 W.g ⁻¹ sob pressão de 5 kPa.	A difusão do teor de água, e consequentemente a taxa de secagem, aumentou 15 vezes com a aplicação das micro-ondas a vácuo como pós-tratamento dos mirtilos submetidos à secagem em ar quente convectivo. O uso da técnica em multi-estágio preservou a cor, provocou menor encolhimento e maior capacidade de reidratação que no uso das técnicas isoladas.
Zielinska e Markowski (2016)	Mirtilo	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem a 80°C e 1 m.s ⁻¹ até que a amostra atingisse teor de água de 1,95 kg.kg ⁻¹ b.s. e finalização em micro-ondas a vácuo a 0,7 W.g ⁻¹ sob pressão de 3-5 kPa.	A secagem em multi-estágio melhorou a capacidade de reidratação dos mirtilos secos, resultando em altas taxas de ganho de peso do produto nos períodos iniciais da reidratação e menor perda inicial de sólidos solúveis.
Zielinska e Michalska (2016)	Mirtilo	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem em ar quente convectivo a 90°C e 1 m.s ⁻¹ até que a amostra atingisse teor de água de 2 kg.kg ⁻¹ b.s. e finalização em micro-ondas a vácuo a 1,3 W.g ⁻¹ sob pressão de 4-6 kPa.	Mirtilos secos obtidos a partir da secagem em multi-estágio apresentaram maior retenção do conteúdo de polifenóis, da capacidade antioxidante e do conteúdo de antocianinas quando comparado ao produto obtido pelo uso das técnicas isoladas.
Zielinska, Sadowski e Blaszcak (2015)	Mirtilo	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem em ar quente convectivo a 80°C até que a amostra atingisse teor de água de 2 kg.kg ⁻¹ b.s. e finalização em micro-ondas a vácuo a 0,7 W.g ⁻¹ sob pressão de 4-6 kPa.	--
Chong et al. (2014)	Maçã	Ar quente convectivo + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem em ar quente convectivo a 70°C e 1 m.s ⁻¹ até que a amostra atingisse teor de água de 1,05 g.g ⁻¹ b.s. e finalização em micro-ondas a vácuo em processo contínuo a 240 W sob pressão de 4-6 kPa.	O uso da técnica em multi-estágio aumentou em cerca de 40 vezes a difusividade efetiva de água da maçã e reduziu em 50% o tempo de processo se comparado ao uso das técnicas de ar quente convectivo de forma isolada.

(continua na próxima página)

Tabela 1.2. Continuação

Autor	Alimento	Técnica	Descrição	Conclusões selecionadas
Jiang et al. (2017)	Quiabo	Liofilização + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem por liofilização a 25°C sob pressão de 20 Pa por 10 horas e finalização em micro-ondas a vácuo a 1.536 W sob pressão de 70 kPa.	A combinação da liofilização com as micro-ondas a vácuo preservou os principais componentes antioxidantes e a cor do quiabo com maior eficiência que as técnicas de ar quente convectivo (AD), micro-ondas a vácuo (VMD) e a combinação AD + VMD, apresentando resultados comparáveis ao uso apenas da liofilização, utilizando cerca de 75% menos tempo e consumindo 72% menos energia.
Pei et al. (2014b)	Cogumelo	Liofilização + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem por liofilização a 40°C/8 h sob pressão de 100 Pa e finalização em micro-ondas a vácuo a 60W/g ⁻¹ sob pressão de 12 kPa por 9 min.	Cogumelos submetidos à secagem em multi-estágio aumentaram em cerca de dez vezes a difusividade efetiva de água e apresentaram capacidade de reidratação similar ao produto obtido apenas pelo emprego da liofilização.
Song et al. (2017)	Abóbora	Micro-ondas a vácuo + Liofilização	Pré-secagem contínua em micro-ondas a vácuo a 4-8 W.g ⁻¹ sob pressão de 12-52 kPa por 6 min e finalização por liofilização a -50°C sob pressão de 15 Pa até 5 kg.kg ⁻¹ .b.u.	A abóbora desidratada utilizando a técnica em multi-estágio apresentou maior retenção do teor de carotenóides (cerca de 90%) e da cor natural do alimento quando comparado ao uso da técnica de ar quente convectivo.
Kantrong, Tansakul e Mittal (2014)	Cogumelo	Micro-ondas a vácuo + Infravermelho	Processo contínuo a 267 W de potência sob pressão de 18,66 kPa trabalhando simultaneamente com a emissão de radiação infravermelha a 200 W.	O uso simultâneo de micro-ondas a vácuo e radiação por infravermelho preservou a cor e melhorou a capacidade de reidratação dos cogumelos, quando comparado ao uso isolado das micro-ondas a vácuo. Os autores também relataram aumento da taxa de secagem com o aumento da potência de micro-ondas, da radiação infravermelha ou na redução da pressão do sistema.
Lech et al. (2018)	Abóbora	Desidratação osmótica + Micro-ondas a vácuo	Pré-secagem osmótica em suco de marmelo de Maule a 40°Brix e 45°C por 3-6 horas seguido de finalização em micro-ondas a vácuo em processo contínuo a 480W/8 min + 120W/40 min; a pressão utilizada na operação não foi relatada.	--

Fonte: O autor (2021)

REFERÊNCIAS

- AKPINAR, Ebru Kavak; BICER, Yasar. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 40, n. 3, p. 273-281, 2005.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and Bioproducts Processing**, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002.
- AREF, M. M.; BRACH, E. J.; TAPE, N. W. A pilot-plant continuous-process microwave oven. **Canadian Institute of Food Technology Journal**, v. 2, n. 1, p. 37-41, 1969.
- ARSLAN-TONTUL, Sultan. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. **Heat and Mass Transfer**, p. 1-8, 2020.
- AVERSA, Maria et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 922-932, 2007.
- AZZOUZ, S. et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.
- BABALIS, Stamatios J. et al. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 2, p. 205-214, 2006.
- BABALIS, Stamatios J.; BELESSIOTIS, Vassilios G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.
- BASU, Santanu; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: a review. **Drying Technology**, v. 24, n. 8, p. 917-930, 2006.
- BELL, Leonard N. **Moisture Effects on Food's Chemical Stability**. In: *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*: Jonh Wiley & Sons, Inc. 2 ed., p. 227-253, 2020.
- BÉTTEGA, R. et al. Comparison of carrot (*Daucus carota*) drying in microwave and in vacuum microwave. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 403-412, 2014.
- CHONG, Chien Hwa et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 4, p. 975-989, 2014.
- CURCIO, Stefano et al. Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, v. 87, n. 4, p. 541-553, 2008.
- DADALI, Gökçe; KILIÇ APAR, Dilek; ÖZBEK, Belma. Microwave drying kinetics of okra. **Drying Technology**, v. 25, n. 5, p. 917-924, 2007.
- DAK, Manish; PAREEK, N. K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying. **Journal of Food Engineering**, v. 122, p. 117-121, 2014.
- DECAREAU, Robert V.; KENYON, Ernest M. Microwave energy in food processing applications. **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**, v. 1, n. 2, p. 199-224, 1970.
- DE LIMA, Marla Mateus et al. Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. **LWT-Food Science and Technology**, v. 72, p. 501-509, 2016.
- DEMIRAY, Engin; TULEK, Yahya. Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. **Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 6, p. 779-786, 2014.
- DIAMANTE, Lemuel M. et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.
- DOYMAZ, Ibrahim. Air-drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 4, p. 1291-1297, 2007.
- DROUZAS, A. E.; SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 28, n. 2, p. 203-209, 1996.

- ERBAY, Zafer; ICIER, Filiz. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010.
- EVIN, Duygu. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. **Food and Bioprocess Technology**, v. 90, n. 2, p. 323-332, 2012.
- FELLOWS, Peter John. Food processing technology: principles and practice. 2. ed. Boca Raton: **CRC Press LLC**, 2000.
- GEEDIPALLI, S. S. R.; RAKESH, V.; DATTA, A. K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 3, p. 359-368, 2007.
- GIRI, S. K.; PRASAD, Suresh. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 2, p. 512-521, 2007.
- GUPTA, Shilpi; COX, Sabrina; ABU-GHANNAM, Nissreen. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. **LWT-Food Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 1266-1272, 2011.
- HORUZ, Erhan et al. Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, n. 230, p. 295-305, 2017.
- HOSSAIN, M. D. et al. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 2, p. 103-107, 2001.
- HU, Qing-guo et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 4, p. 977-982, 2006.
- JAIN, Dilip; PATHARE, Pankaj B. Study the drying kinetics of open sun drying of fish. **Journal of food Engineering**, v. 78, n. 4, p. 1315-1319, 2007.
- JIANG, Ning et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption. **LWT-Food Science and Technology**, v. 82, p. 216-226, 2017.
- JIANG, Hao et al. Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 9, p. 1827-1834, 2014.
- JUNQUEIRA, João Renato de Jesus; CORRÊA, Jefferson Luiz Gomes; ERNESTO, Dovel Branquinho. Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, p. e13250, 2017.
- KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Moisture sorption isotherms of red chillies. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 1, p. 95-104, 2004.
- KALETA, Agnieszka; GÓRNICKI, Krzysztof. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.
- KANTRONG, Hataichanok; TANSAKUL, Ampawan; MITTAL, Gauri S. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 12, p. 3594-3608, 2014.
- KHAN, Md Imran H.; NAGY, Szilvia Anett; KARIM, M. A. Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. **Food Research International**, v. 105, p. 772-781, 2018.
- KROEHNKE, Joanna et al. Ultrasound-and microwave-assisted convective drying of carrots—Process kinetics and product's quality analysis. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 48, p. 249-258, 2018.

- KROKIDA, Magdalini K. et al. Drying kinetics of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 4, p. 391-403, 2003.
- KUMAR, Chandan; MILLAR, Graeme J.; KARIM, M. A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. **Drying Technology**, v. 33, n. 2, p. 227-237, 2015.
- LABUZA, T. P. et al. Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid oxidation. **Journal of Food Science**, v. 37, n. 1, p. 154-159, 1972.
- LECH, Krzysztof et al. The Effect of Selected Fruit Juice Concentrates Used as Osmotic Agents on the Drying Kinetics and Chemical Properties of Vacuum-Microwave Drying of Pumpkin. **Journal of Food Quality**, v. 2018, 2018.
- LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Journal of Industrial & Engineering Chemistry**, 13, 427-432, 1921.
- MALTINI, E. et al. Water activity and the preservation of plant foods. **Food Chemistry**, v. 82, n. 1, p. 79-86, 2003.
- MATHLOUTHI, Mohamed. Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. **Food Control**, v. 12, n. 7, p. 409-417, 2001.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.
- MONTEIRO, Ricardo L. et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 232, p. 1-10, 2018.
- MONTEIRO, Ricardo L.; CARCIOFI, Bruno AM; LAURINDO, João B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11, 2016.
- MONTEIRO, Ricardo Lemos et al. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 276-284, 2015.
- MOSES, J. A. et al. Novel drying techniques for the food industry. **Food Engineering Reviews**, v. 6, n. 3, p. 43-55, 2014.
- MOTHIBE, Kebitsamang Joseph et al. Microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying of apple cubes. **Drying Technology**, v. 32, n. 15, p. 1762-1768, 2014.
- MRAD, Nadia Djendoubi et al. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 3, p. 433-441, 2012.
- MWITHIGA, Gikuru; OLWAL, Joseph Ochieng. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 4, p. 373-378, 2005.
- NUTHONG, Paradorn et al. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. **Journal of Food Engineering**, v. 102, n. 3, p. 233-239, 2011.
- ONWUDE, Daniel I. et al. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. **Journal of Food Engineering**, v. 241, p. 75-87, 2019.
- PEI, Fei et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying. **Food Chemistry**, v. 165, p. 547-554, 2014a.
- PEI, Fei et al. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 6, p. 1629-1639, 2014b.
- PRACHAYAWARAKORN, Somkiat et al. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 4, p. 509-517, 2008.

- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 33, p. 348-356, 2016.
- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Vis–NIR hyperspectral imaging in visualizing moisture distribution of mango slices during microwave-vacuum drying. **Food Chemistry**, v. 188, p. 271-278, 2015.
- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. **Biosystems Engineering**, v. 156, p. 108-119, 2017.
- RAHMAN, M. Shafiur. Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. **Drying Technology**, v. 19, n. 1, p. 1-13, 2001.
- RAHMAN, Mohammad Shafiur. Food stability beyond water activity and glass transition: macro-micro region concept in the state diagram. **International Journal of Food Properties**, v. 12, n. 4, p. 726-740, 2009.
- ROVEDO, Clara O.; SUAREZ, Constantino; VIOLLAZ, Pascual E. Drying of foods: evaluation of a drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 26, n. 1, p. 1-12, 1995.
- SAXENA, Alok et al. Degradation kinetics of colour and total carotenoids in jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb slices during hot air drying. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 2, p. 672-679, 2012.
- SEREMET, Liliana et al. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. **Food Chemistry**, v. 195, p. 104-109, 2016.
- SHIVHARE, U. S. et al. Moisture adsorption isotherms for mushroom. **LWT-Food Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 133-137, 2004.
- SCHULZE, Beate; HUBBERMANN, Eva Maria; SCHWARZ, Karin. Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. **LWT-Food Science and Technology**, v. 57, n. 1, p. 426-433, 2014.
- SIEBERT, Tim et al. Visualization of crust formation during hot-air-drying via micro-CT. **Drying Technology**, v. 37, n. 15, p. 1881-1890, 2019.
- SIMAL, S. et al. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 3, p. 323-328, 2005.
- SONG, Jiangfeng et al. Degradation of carotenoids in pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) slices as influenced by microwave vacuum drying. **International Journal of Food Properties**, v. 20, n. 7, p. 1479-1487, 2017.
- TAPE, Norman W. Application of microwave energy in food manufacture. **Canadian Institute of Food Technology Journal**, v. 3, n. 2, p. 39-43, 1970.
- TELLO-IRELAND, Cristian et al. Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phyco-biliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. **LWT-Food Science and Technology**, v. 44, n. 10, p. 2112-2118, 2011.
- TIAN, Yuting et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms. **Food Chemistry**, v. 197, p. 714-722, 2016.
- TIMMERMANN, Ernesto O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 1, p. 19-31, 2001.
- VADIVAMBAL, R.; JAYAS, D. S. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—A review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 3, n. 2, p. 161-171, 2010.

- VEGA, Antonio et al. Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. **LWT-Food Science and Technology**, v. 40, n. 10, p. 1698-1707, 2007.
- VEGA-MERCADO, Humberto; GÓNGORA-NIETO, M. Marcela; BARBOSA-CÁNOVAS, Gustavo V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 271-289, 2001.
- WOJDYŁO, Aneta et al. Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 3, p. 829-841, 2014.
- ZHAO, Dandan et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 8, p. 2308-2318, 2014.
- ZHANG, Min et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 10, p. 524-534, 2006.
- ZHOU, Linyan et al. Degradation kinetics of total phenolic compounds, capsaicinoids and antioxidant activity in red pepper during hot air and infrared drying process. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 51, n. 4, p. 842-853, 2016.
- ZHOU, Xu et al. Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 56, p. 102182, 2019.
- ZIELINSKA, Magdalena; MARKOWSKI, Marek. The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Food Chemistry**, v. 196, p. 1188-1196, 2016.
- ZIELINSKA, Magdalena; MICHALSKA, Anna. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. **Food Chemistry**, v. 212, p. 671-680, 2016.
- ZIELINSKA, M.; SADOWSKI, Piotr; BŁASZCZAK, Wioletta. Freezing/thawing and microwave-assisted drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **LWT-Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 555-563, 2015.
- ZIELINSKA, Magdalena; SADOWSKI, Piotr; BŁASZCZAK, Wioletta. Combined hot air convective drying and microwave-vacuum drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.): Drying kinetics and quality characteristics. **Drying Technology**, v. 34, n. 6, p. 665-684, 2016.
- ZIELINSKA, Magdalena; ZIELINSKA, Danuta; MARKOWSKI, Marek. The effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, color and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 3, p. 585-602, 2018.

OBJETIVO

1. Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo de secador de micro-ondas a vácuo com prato de cocção giratório e avaliar a sua aplicação na secagem de queijo de Coalho e maçã Fuji.

2. Objetivos específicos

- Fazer a adaptação de um forno de micro-ondas doméstico para que a câmara interna do aparelho possa operar a vácuo sem interromper o movimento do prato de cocção do eletrodoméstico;
- Definir valores de teor de água de referência com base no diagrama de estabilidade dos alimentos que proporcionem maior estabilidade ao armazenamento para os alimentos-alvo escolhidos para a pesquisa e determinar os tempos necessários para alcançá-los durante a secagem em micro-ondas a vácuo e por convecção (tratamento controle);
- Comparar as propriedades físicas dos produtos obtidos pela secagem em micro-ondas a vácuo e convecção no conteúdo de água de referência no que se refere à cor, textura, volume e atividade de água.

CAPÍTULO 2: ADAPTAÇÃO DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO PARA OPERAÇÃO A VÁCUO E SUA APLICAÇÃO NA SECAGEM DE MAÇÃ FUJI E QUEIJO DE COALHO – PARTE 1

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um secador de micro-ondas a vácuo em escala laboratorial e avaliar a sua aplicação na secagem de queijo de Coalho e maçã Fuji. A avaliação consistiu na construção de isotermas de sorção e curvas de cinética de secagem, bem como o acompanhamento da temperatura superficial e atividade de água dos alimentos durante a desidratação com base em medidas do teor de água, atividade de água e temperatura superficial do produto. Os resultados foram comparados à secagem em ar quente convectivo, considerado como tratamento controle. A temperatura de secagem do queijo em ar quente convectivo foi 70°C e a temperatura de secagem da maçã foi 80°C, ambas com a velocidade de circulação de ar ajustada para 1 m.s⁻¹. A secagem do queijo e da maçã em micro-ondas a vácuo foi feita nas densidades de potência de 8 W.g⁻¹ e 20 W.g⁻¹ sob pressão de 15 a 19 kPa (pressão relativa). Os resultados indicaram que é possível adaptar um forno de micro-ondas doméstico para que seja capaz de aquecer o alimento abaixo da pressão atmosférica, mantendo uniforme a sua distribuição de temperatura. De modo geral, o uso das micro-ondas a vácuo reduziu em até 96% o tempo de secagem dos alimentos a depender das condições empregadas. Com base nas informações do diagrama de estabilidade dos alimentos, os tempos mais adequados para a secagem do queijo de Coalho foram 5,4 horas em ar quente convectivo, 0,72 horas em micro-ondas a vácuo a 8 W.g⁻¹ e 0,23 horas em micro-ondas a vácuo a 20 W.g⁻¹. No caso da maçã, os tempos foram de 7,9 horas em ar quente convectivo, 0,91 horas em micro-ondas a vácuo a 8 W.g⁻¹ e 1,77 horas em micro-ondas a vácuo a 20 W.g⁻¹.

Palavras-chave: Correlação; Propriedades físicas de alimentos; Secagem por micro-ondas a vácuo; Produtos desidratados.

ABSTRACT

This work aims to develop a lab-scale vacuum microwave dryer and evaluate its application in *Coalho* cheese and Fuji apple drying. The evaluation includes sorption isotherms, drying

kinetics, and surface temperature profile based on water content and water activity measures. The results were compared to convective hot air drying, considered the control treatment. The temperature of the cheese drying in convective hot air was 70 ° C and the temperature of the apple drying was 80 ° C, both with the air circulation speed set to 1 m.s⁻¹. The vacuum microwave drying was done at 8 W.g⁻¹ and 20 W.g⁻¹ under 15 to 19 kPa (relative pressure). The results indicated that it is possible to adjust a domestic microwave oven so that it is able to heat the food below atmospheric pressure and keep its temperature distribution uniform. In general, vacuum microwaves reduced the drying time of the foods by up to 96% depending on the conditions employed. Based on food stability diagram, *Coalho* cheese dried for 5.4 hours in convective hot air, 0.72 hours in vacuum microwave at 8 W.g⁻¹, and 0.23 hours in vacuum microwave at 20 W.g⁻¹ showed better results. For apples, the times were 7.9 hours in hot convective air, 0.91 hours in vacuum microwave at 8 W.g⁻¹, and 1.77 hours in vacuum microwave at 20 W.g⁻¹.

Keywords: Correlation; Food physical properties; Vacuum-microwave drying; Dried products.

1. Introdução

A secagem é um método físico de conservação cujo objetivo é prolongar o tempo de vida útil de um alimento a partir da redução do seu conteúdo e atividade de água. Nesse processo, o alimento é normalmente exposto a uma variação de temperatura que promove a migração de água do interior do produto para o meio externo por meio de mecanismos de difusão molecular (AVERSA et al., 2007). Apesar de tornar o produto mais estável, o alimento pode sofrer algumas alterações físicas e químicas durante o procedimento. Devido ao importante papel que exerce sobre a estrutura do alimento, a perda de interações da água com componentes não aquosos e o esvaziamento de espaços inter e intracelulares presentes na matriz alimentícia podem promover modificações em características de qualidade, como textura e volume, além de influenciar a cor, sabor e valor nutricional do produto a depender do conteúdo removido e das condições de operação utilizadas (VEGA-GÁLVEZ et al., 2008; DOYMAZ, 2007). Nesse sentido, o estudo do comportamento do alimento durante a secagem pode gerar informações para determinar as condições mais adequadas para que o procedimento ocorra, assim como o "ponto de parada" para o processo. Duas ferramentas

analíticas comumente utilizadas nessa forma de estudo são as curvas de cinética e as isotermas de sorção.

As curvas de cinética são representações gráficas do conteúdo de água do alimento em função do tempo de secagem. A partir delas, é possível obter uma visão holística do processo e aproximar-se do tempo necessário para que o produto alcance determinado conteúdo de água de interesse nas condições de operação sobre as quais as curvas foram construídas (KROKIDA et al., 2003). Quando o conteúdo de água é relacionado à atividade de água do produto, são formadas as curvas de isoterma de sorção, um gráfico de dispersão cujo comportamento se associa à velocidade de algumas das reações mais comuns que encurtam o tempo de vida útil do alimento, como a atividade enzimática e não enzimática, o crescimento de micro-organismos e a oxidação lipídica (MALTINI et al., 2003). Diante disso, em problemas que envolvam a determinação das condições mais adequadas de secagem, ambas as ferramentas de análise do processo podem ajudar na identificação de um conteúdo de água e o correspondente tempo de secagem necessário para proporcionar segurança ao produto, considerando as principais deficiências que o tornam mais susceptível à deterioração e sua relação com a atividade de água. Na literatura, o estudo de curvas de cinética e isotermas de sorção foi aplicado na secagem de alguns produtos alimentícios, como pimenta (DI SCALA e CRAPISTE, 2008), amora (DOYMAZ, 2004), banana (AZOUBEL et al., 2010), batata doce (OH, LEE e HONG, 2018) e kiwi (VALLESPER et al., 2019), entre outros.

Uma das técnicas mais difundidas para a secagem de alimentos é o uso de ar quente convectivo (MOSES et al., 2014). Nesta técnica, o alimento é posicionado dentro de uma câmara fechada, na qual será exposto a uma corrente de ar forçado, com baixa umidade e aquecida a uma temperatura constante, de modo que a transferência de energia na forma de calor ocorra majoritariamente por convecção com um fluxo térmico orientado das bordas para o centro do material (KUMAR, MILLAR e KARIM, 2015). Entre as vantagens do uso do ar quente convectivo na secagem de alimentos, pode ser citado o baixo custo de operação e manutenção, assim como a simplicidade tecnológica, não exigindo uma mão-de-obra especializada para operá-lo. Apesar disso, é uma técnica que possui baixa eficiência energética, principalmente nos períodos finais da secagem, exigindo um longo tempo de operação (MENON, STOJCESKA e TASSOU, 2020). Por esse motivo, algumas técnicas alternativas têm sido estudadas, entre as quais o uso de micro-ondas.

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas que, quando se propagam próximas a moléculas polares (como a água), são absorvidas e induzem movimentos de rotação e translação sobre os átomos (MEDA, ORSAT e RAGHAVAN, 2017). Como resultado dessa

movimentação, o atrito formado pelo contato das moléculas energizadas entre si gera calor de forma instantânea (OLIVEIRA e FRANCA, 2002). A capacidade de transferência de energia é ainda melhorada pela habilidade de penetração das micro-ondas através da superfície do alimento a elas exposto, formando um aquecimento volumétrico, isto é, sobre todo o volume do material (ZHANG et al., 2006). A partir disso, o produto desidrata mais rapidamente que no uso da técnica de ar quente convectivo, aumentando a eficiência energética do processo (GIRI e PRASAD, 2007; MASKAN, 2001). A aplicação das micro-ondas na operação de secagem foi estudada em trabalhos recentes, em especial com a adaptação do uso de câmaras de secagem a baixa pressão, utilizando como objeto de estudo alimentos como abóbora (MONTEIRO et al., 2018), manga (PU e SUN, 2015), mirtilo (ZIELINSKA, SADOWSKI e BŁASZCZAK, 2016) e maçã (MOTHIBE et al., 2014).

Em virtude da influência do procedimento de secagem sobre as características do processo, como a taxa de aquecimento e de perda de água, o que reflete diretamente sobre o produto obtido, a geração de conhecimento a respeito deste tema pode ajudar a entender os mecanismos atuantes nas técnicas empregadas, suas limitações e em quais situações elas podem ser indicadas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar o uso da técnica de micro-ondas a vácuo para a secagem de maçã cv. Fuji e queijo de Coalho, um tipo de queijo originalmente produzido na região nordeste do Brasil.

2. Material e métodos

2.1. Matéria-prima

No experimento, foram utilizados dois alimentos: queijo de Coalho e maçã da variedade Fuji, ambos obtidos no comércio do município de Itapetinga, Bahia. O queijo de Coalho foi escolhido por ser um produto originalmente brasileiro, produzido e consumido em maior quantidade na região nordeste do país; é um tipo de queijo de baixo custo se comparado ao queijo provolone (único tipo comercializado no Brasil na forma desidratada) e possui características próprias, como sua textura dura e estrutura firme, que não derrete quando exposta ao calor. Já a escolha da maçã Fuji se baseou no preço de venda e disponibilidade da fruta no mercado local onde o experimento foi desenvolvido (disponível de fevereiro a meados de outubro), assim como por ser um produto conhecido em todo o mundo.

Barras de queijo de Coalho com teor de água de $35,7 \pm 0,2\%$ em base úmida, determinado por análise gravimétrica em estufa a vácuo (AOAC método 926.12, 1996), e

embaladas a vácuo em filme de polipropileno foram adquiridas e armazenadas a $8 \pm 2^\circ\text{C}$, seguindo a orientações do fabricante. Todas as barras utilizadas estavam de acordo com os critérios e características exigidas no regulamento técnico vigente (BRASIL, 2001).

No dia anterior à secagem, as barras de queijo foram retiradas da refrigeração e cortadas em amostras de base retangular com 38 ± 3 mm de comprimento, 51 ± 2 mm de largura e $1,8 \pm 0,3$ mm de espessura (Fig. 2.1). O procedimento de corte foi feito a temperatura ambiente (20 a 25°C). As fatias foram então acondicionadas em sacos de polipropileno, que foram selados e armazenados a $8 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas.

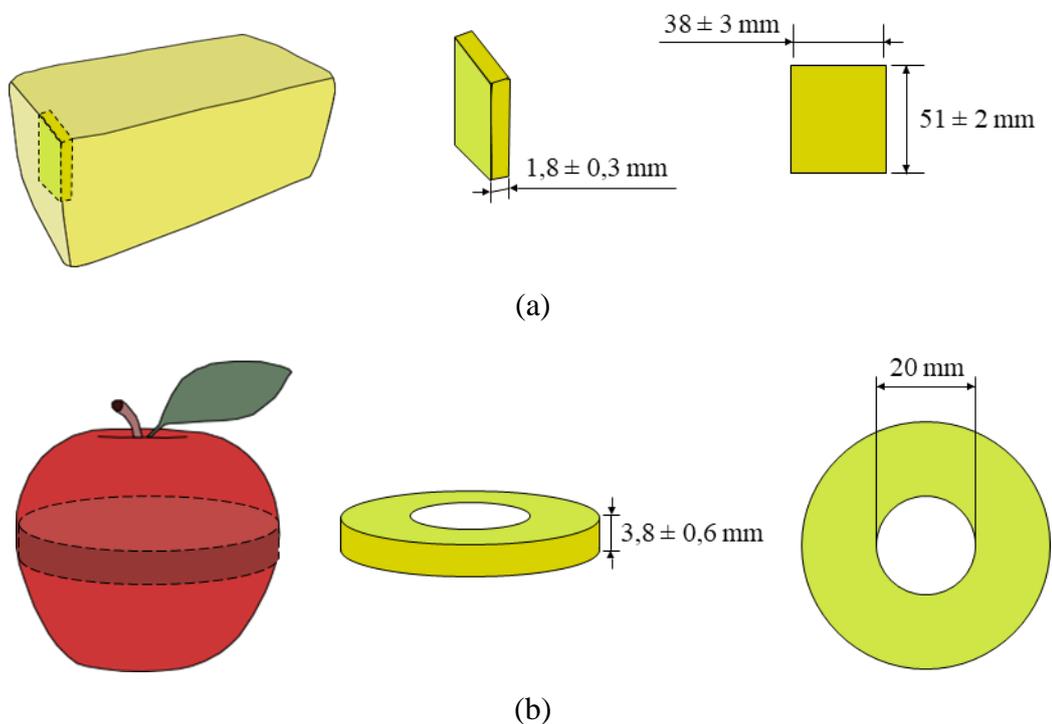


Figura 2.1. Preparo da matéria-prima utilizada no experimento: (a) queijo de Coalho e (b) maçã Fuji.

Quanto ao preparo da maçã, frutas da variedade Fuji com teor de sólidos solúveis a 22°C de $13,1 \pm 0,7^\circ\text{Brix}$ (Refratômetro DAS E-Scan, Electron Machine CorporationTM, Luxemburgo), teor de água de $87,7 \pm 0,07\%$ em base úmida (AOAC método 926.12, 1996) e acidez de $0,25 \pm 0,02\%$ de ácido málico, este último medido por titulometria (Titulador automático HI 901, Hanna[®] Instruments, São Paulo, Brasil) com solução de NaOH a 0,1M (IAL método 311/IV, 2008), foram adquiridas, higienizadas em solução de cloro a 100 ppm por 10 minutos e armazenadas a $8 \pm 2^\circ\text{C}$.

No dia anterior à secagem, as maçãs foram retiradas da refrigeração e selecionadas de acordo com aspectos visuais, como ausência de cores atípicas na casca, deformações e/ou fissuras. As maçãs selecionadas foram descascadas e cortadas na direção perpendicular à haste da fruta em fatias com $3,8 \pm 0,6$ mm de espessura. A parte central das fatias, onde se localizavam as sementes, foi extraída utilizando um tubo metálico oco com 20 mm de diâmetro afiado nas extremidades (Fig. 2.1).

Imediatamente após o corte, as fatias de maçã foram imersas em solução aquosa antioxidante, composta por 1% m/v de ácido ascórbico (Anidrol®, São Paulo, Brasil) e 0,2% de ácido cítrico (Química Moderna, São Paulo, Brasil), por 5 minutos na proporção alimento:solução de 1:7 (PUTNIK et al., 2017; PIZZOCARO, TORREGGIANI e GILARDI, 1993). Os reagentes utilizados para produzir a solução foram de grau analítico. Na sequência, o excesso de solução nas fatias foi drenado e elas foram acondicionadas em sacos de polipropileno, posteriormente selados e armazenados a 8°C por 24 horas.

2.2. Procedimento de secagem

2.2.1. Ar quente convectivo

A secagem em ar quente convectivo do queijo e da maçã ocorreu em dias diferentes e ambos foram feitos em estufa de bandejas com circulação forçada de ar (SL 102, Solab, São Paulo, Brasil) ajustada para que o ar circulasse a uma velocidade constante de $1 \pm 0,1$ m.s⁻¹.

Das seis bandejas existentes na estufa, que apresentavam dimensões de 65 cm x 90 cm cada, foram utilizadas duas, localizadas uma abaixo da outra há aproximadamente 15 cm de distância e localizadas na posição mais alta do equipamento. Durante o procedimento, as prateleiras foram giradas e suas posições trocadas a cada trinta minutos após ser feita uma coleta de amostras a fim de manter a distribuição de temperatura sobre os alimentos uniforme.

Durante a secagem, a cada hora completada, a temperatura superficial das fatias foi aferida utilizando uma câmera termográfica por infravermelho (Modelo 881-3, versão 1.32, Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Alemanha), seguido de uma coleta de amostras (fatias que juntas totalizassem mais de 10 gramas) para posterior análise. As amostras coletadas, após deixar a estufa, foram primeiramente resfriadas a temperatura ambiente por 5 minutos antes de serem acondicionadas em sacos de polipropileno, que foram posteriormente selados e armazenados a 8°C.

O procedimento de secagem para ambos os alimentos se estendeu até que a taxa de secagem das fatias atingisse valor inferior a $0,01 \text{ g de água.g}^{-1} \text{ de matéria seca.h}^{-1}$, ponto em que o alimento foi considerado em equilíbrio termodinâmico com o meio devido a baixa variação do conteúdo de água com o tempo de secagem.

Na secagem do queijo de Coalho, a estufa foi configurada para operar a $70 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ e, na secagem da maçã, a configuração utilizada foi de $80 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Em ambos os casos, a escolha da temperatura se baseou em testes iniciais, que demonstraram que, abaixo da temperatura escolhida, o produto apresentava textura mais macia, coesa e de difícil mastigação e, acima desta temperatura, ocorriam alterações indesejáveis de cor (dados não apresentados).

2.2.2. Micro-ondas a vácuo

2.2.2.1. Adaptação do forno de micro-ondas

Foram feitas adaptações em um forno de micro-ondas doméstico (Brastemp, Brasil) com capacidade interna de 30 litros, frequência de 2,45 GHz e amplitude de potência variando de 0,1 a 1,5 kW. Na adaptação, foi criado um sistema (Fig. 2.2) utilizando uma bomba de vácuo com potência de $\frac{1}{4}$ CV (Modelo 131, Primatec, São Paulo, Brasil); uma coluna de sílica, composta por um Frasco Kitasato de 1.000 mL preenchido com grânulos de sílica-gel com 8 mm de diâmetro, para proteger a bomba de vácuo do efeito da umidade; um mecanismo rotatório, composto por um cotovelo giratório com entrada macho de $\frac{1}{4}$ " e saída de engate rápido de $\frac{1}{8}$ " fixado sobre a parte superior do gabinete do forno e unido a um espigão construído em nylon, responsável por manter a movimentação do prato contido no forno de micro-ondas e proporcionar melhor distribuição de temperatura aos alimentos durante o aquecimento; e uma câmara de vácuo, composta por uma base de vidro temperado com 300 mm de diâmetro e 6 mm de espessura sob a tampa de um dessecador de vidro borossilicato de mesmo diâmetro, ambos com as laterais envolvidas com silicone atóxico para a vedação.

Por motivos de segurança, a fim de evitar a formação de faíscas ou chamas, não foram utilizadas peças metálicas na parte interna do forno. Sendo assim, todas as mangueiras e conexões empregadas foram peças plásticas e resistentes a variações de temperatura, compostas de polietileno, politetrafluoretileno, silicone ou nylon.

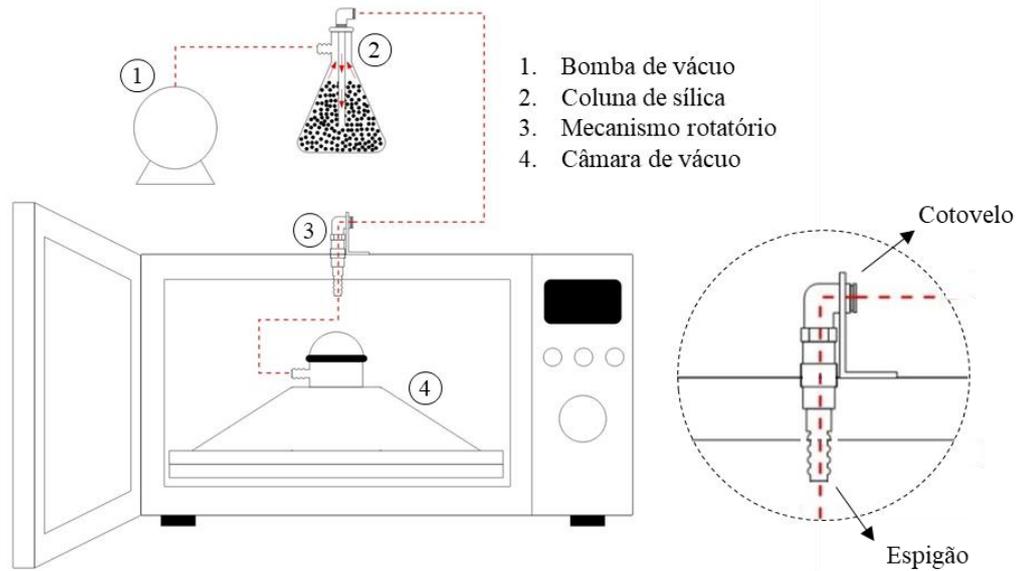


Figura 2.2. Desenho esquemático do secador de micro-ondas a vácuo adaptado para o experimento.

Para manter a uniformidade na absorção das micro-ondas, os alimentos a serem desidratados foram dispostos, em todos os ensaios, a uma mesma distância em relação ao centro da câmara de vácuo (Fig. 2.3). Na organização, os alimentos foram distribuídos próximos à borda da base de vidro temperado (a aproximadamente 20 cm do centro da câmara), em forma de círculo.

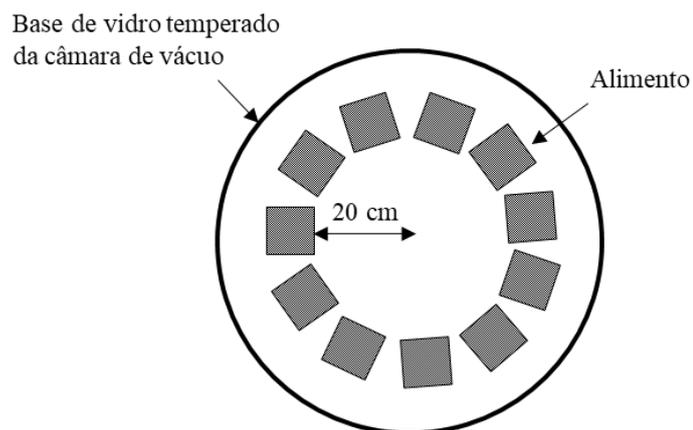


Figura 2.3. Organização dos alimentos na câmara de vácuo do secador de micro-ondas.

2.2.2.2. Secagem em micro-ondas a vácuo

A secagem do queijo de Coalho e da maçã Fuji em micro-ondas foi realizada empregando a mesma pressão de trabalho, de modo que ambos os alimentos foram desidratados dentro da faixa de 15 a 19 kPa. Em todos os ensaios, a velocidade de rotação da câmara de vácuo foi mantida a 6 rpm.

Durante a secagem, a coleta de amostras para análise foi feita utilizando o método destrutivo, isto é, a cada tempo de secagem na qual foi estabelecida uma coleta, todas as fatias contidas na câmara de vácuo foram retiradas para que novas fatias frescas fossem distribuídas na câmara, recomeçando o procedimento para o tempo seguinte. Esse método foi adotado para que um mesmo lote de fatias não fosse comprimido (retorno à pressão atmosférica) e, na sequência, descomprimido (expostas novamente à pressão de trabalho), influenciando os resultados do experimento.

A cada coleta de amostras, imediatamente após a abertura da câmara de vácuo, a temperatura superficial das fatias foi aferida utilizando uma câmera termográfica por infravermelho (Modelo 881-3, versão 1.32, Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Alemanha). Com base no valor de temperatura obtido, a secagem foi finalizada quando as fatias de queijo alcançaram temperatura maior que 70°C e as fatias de maçã alcançaram temperatura maior que 80°C, igualando-se à temperatura de bulbo seco utilizada na secagem em ar quente convectivo.

Devido às dimensões da câmara de vácuo, os alimentos foram desidratados em lotes. Na distribuição, cada lote do queijo correspondeu a 12 fatias (aproximadamente 35 gramas) e cada lote da maçã correspondeu a 7 fatias (aproximadamente 65 gramas). Apesar da diferença de peso entre os lotes de queijo e maçã, as mesmas densidades de potência foram utilizadas para o aquecimento dos dois alimentos: 8 W.g⁻¹ e 20 W.g⁻¹, de acordo com o procedimento descrito a seguir.

Na secagem do queijo a 8 W.g⁻¹, o forno de micro-ondas foi configurado para aquecer a uma potência de 300 W (313,8 ± 11,5 W). Durante a secagem, foram feitas coletas de amostras para análise após 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50 minutos. Já na secagem do queijo a 20 W.g⁻¹, o procedimento ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa, o forno de micro-ondas foi configurado para aquecer a uma potência de 600 W (647,1 ± 24,0 W) e coletas de amostras foram então feitas após 2, 4, 5, 6, 8 e 10 minutos. De acordo com testes prévios feitos por mais de 10 minutos a 600 W, o produto obtido começa a apresentar alterações de cor, com presença de queimaduras na superfície das fatias. Por esse motivo, na continuação da

secagem, a potência de aquecimento do forno foi reduzida para 300 W e novas coletas foram feitas após 15 minutos (10 min a 600 W + 5 min a 300 W) e 20 minutos (10 min a 600 W + 10 min a 300 W).

Em relação à maçã, a secagem aconteceu em duas etapas nas duas densidades de potência. Na densidade de 8 W.g^{-1} , o forno de micro-ondas foi inicialmente configurado a 600 W e coletas foram feitas após 5, 10, 15, 20 e 25 minutos. Na sequência, a potência do forno foi reduzida para 300 W e novas coletas foram feitas após 35 minutos (25 min a 600 W + 10 min a 300 W), 45 minutos (25 min a 600 W + 20 min a 300 W), 55 minutos (25 min a 600 W + 30 min a 300 W) e 65 minutos (25 min a 600 W + 40 min a 300 W). Já na densidade de 20 W.g^{-1} , o forno de micro-ondas foi inicialmente configurado para a potência de 1.200 W ($1.335,4 \pm 75,8 \text{ W}$) e coletas foram feitas após 2, 4 e 6 minutos de aquecimento. Em seguida, a potência do forno foi reduzida para 300 W e novas coletas foram feitas após 26 minutos (6 min a 1.200 W + 20 min a 300 W), 46 minutos (6 min a 1.200 W + 40 min a 300 W), 66 minutos (6 min a 1.200 W + 60 min a 300 W), 86 minutos (6 min a 1.200 W + 80 min a 300 W) e 106 minutos (6 min a 1.200 W + 100 min a 300 W). A redução de potência de micro-ondas utilizada na secagem da maçã, além de evitar o superaquecimento das fatias, foi empregada também para manter o controle da pressão na câmara de vácuo dentro da faixa de trabalho (15 a 19 kPa), evitando aumentos abruptos causados pela vaporização da água.

2.3. Análise das amostras

2.3.1. Atividade de água

A atividade de água foi medida em triplicata utilizando um analisador de a_w (4 TEV, Aqualab, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EUA) configurado para fazer medição por ponto de orvalho na temperatura de 25°C.

2.3.2. Teor de água

O teor de água das amostras foi determinado em triplicata por análise gravimétrica em estufa a vácuo (SL 104/12, Solab, São Paulo, Brasil) configurada para aquecimento a 70°C e pressão abaixo de 100 mmHg (AOAC método 926.12, 1996).

2.3.3. Imagem de distribuição da umidade relativa

As imagens de distribuição de umidade foram obtidas após o acondicionamento das amostras por 24 horas a 8°C em embalagens plásticas seladas utilizando uma câmera termográfica por infravermelho (Modelo 881-3, versão 1.32, Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Alemanha) equipada com lente de 7,5 mm e configurada a 60-70% de umidade relativa do ar, temperatura de 25°C e emissividade (ϵ) de 0.98.

2.4. Avaliação dos dados

2.4.1. Determinação do teor de água de referência

A determinação do teor de água de referência se baseou nos resultados e avaliação dos dados obtidos na secagem em ar quente convectivo (tratamento controle).

A partir dos valores de teor e atividade de água aferidos nas amostras coletadas durante a secagem em ar quente convectivo, foram construídos gráficos de dispersão que representassem as isotermas de sorção do queijo de Coalho e da maçã Fuji. Aos dados experimentais das isotermas, foram então ajustados modelos matemáticos que descrevessem os seus comportamentos. Para isto, foram utilizados neste estudo os modelos de BET (Eq. 1) e GAB (Eq. 2), dois dos mais empregados em estudos que envolvem produtos alimentícios.

$$X = \frac{(X_m \cdot c \cdot a_w) \cdot (1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (c-1) \cdot a_w - c \cdot a_w^{n+1})} \quad (1)$$

$$X = \frac{X_m \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + c \cdot k \cdot a_w)} \quad (2)$$

Nas Eq. 1 e 2, X representa o teor de água (g de água.g⁻¹ de matéria seca) e a_w a atividade de água (adimensional), ambos variáveis da função. Os demais termos (c, n, k e X_m) representam constantes do modelo.

Utilizando o modelo de melhor ajuste, o teor de água de referência foi calculado para um valor de atividade de água de $a_w = 0,3$. A escolha deste valor se baseou no diagrama de estabilidade dos alimentos proposto por Labuza et al. (1972), o qual demonstra de forma genérica a influência da atividade de água sobre a velocidade de algumas das reações indesejáveis mais comuns que os alimentos podem sofrer durante o armazenamento. Partindo do diagrama de estabilidade, alimentos que apresentam atividade de água com valor $a_w = 0,3$ tendem a apresentar uma redução considerável na velocidade de reações de oxidação lipídica

e escurecimento enzimático, duas situações que podem limitar o tempo de vida-útil do queijo e da maçã, respectivamente.

2.4.2. Definição dos tempos de secagem

Determinado o teor de água de referência, o tempo necessário para alcançá-lo na secagem em ar quente convectivo e em micro-ondas a vácuo foi calculado utilizando as curvas de cinética de secagem.

As curvas de cinética foram construídas por meio de gráficos de dispersão do teor de água adimensionalizado em função do tempo de secagem. Entre as variáveis, o cálculo do teor de água adimensionalizado (Eq. 3) considerou o teor de água inicial do alimento (X_0), o teor de água do produto em cada tempo de coleta de amostras (X) e o teor de água quando o produto alcançou o equilíbrio com o meio (X_{eq}), todos expressos em g de água.g⁻¹ de matéria seca.

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3)$$

Na análise dos resultados obtidos na secagem em micro-ondas a vácuo, o teor de água de equilíbrio (X_{eq}) foi desprezado no cálculo da Eq. 3. A omissão desse termo tem fundamento no baixo valor que normalmente apresenta (PU e SUN, 2015; DADALI et al., 2007).

Os dados experimentais obtidos nas curvas de cinética foram ajustados a seis modelos matemáticos (Tabela 2.1), sendo X_{adm} e t (tempo de secagem) as variáveis da função e os termos k , n , a , b , c e g constantes do modelo.

Tabela 2.1. Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos alimentos.

Modelo	Equação	Referência
Dois termos	$X_{adm} = a \cdot e^{-k \cdot t} + c \cdot e^{-g \cdot t}$	Midilli et al. (2002)
Henderson e Pabis (H&P)	$X_{adm} = a \cdot e^{-k \cdot t}$	Gupta et al. (2011)
Lewis e Newton (L&N)	$X_{adm} = e^{-k \cdot t}$	Lima et al. (2016) Horuz et al. (2017)
Logarítmico	$X_{adm} = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$	Gupta et al. (2011)
Page	$X_{adm} = e^{-k \cdot t^n}$	Lima et al. (2016)
Verma	$X_{adm} = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a)e^{-g \cdot t}$	Horuz et al. (2017)

Utilizando o modelo de melhor ajuste, o tempo de secagem foi calculado admitindo como teor de água do produto (X) o valor do teor de água de referência do queijo e da maçã.

2.4.3. Análise estatística

O ajuste dos modelos matemáticos sobre os dados experimentais foi feito no software SAS[®] *University Edition*, versão 9.4M6, utilizando o procedimento NLIN e o método iterativo de Newton. A escolha do modelo de melhor ajuste se baseou nos valores do coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e do qui-quadrado (χ^2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (V_{exp} - V_{pred})^2}{\sum_{i=1}^N (V_{exp} - \mu)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{exp} - V_{pred})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{exp} - V_{pred})^2}{N - z} \quad (6)$$

Nas equações, o termo V_{exp} representa o valor experimental, V_{pred} representa o valor predito, N representa o número de observações, z representa o número de constantes do modelo e μ representa a média aritmética dos valores experimentais. Na análise dos parâmetros estatísticos, foi considerado o modelo de melhor ajuste aquele que apresentou o maior valor de R^2 e os menores valores de RMSE e χ^2 . O experimento foi conduzido com três repetições.

3. Resultados e discussão

3.1. Análise das isotermas de sorção e determinação do teor de água de referência

As isotermas de sorção do queijo e da maçã apresentaram comportamento similar ao padrão tipo III, conforme classificação proposta por Brunauer et al. (1940), podendo ser divididas em duas fases (Fig. 2.4).

Na primeira fase, houve alterações mais acentuadas do teor de água no queijo e na maçã para valores de atividade de água nas faixas de $0,65 < a_w < 0,96$ e $0,81 < a_w < 0,98$, respectivamente. Nestas faixas, a variação do teor de água em relação ao conteúdo inicial presente no queijo foi de aproximadamente 85% e na maçã superou 90%. Portanto, essa relação entre o teor e a atividade de água indica que a maior parte da água que constitui o

queijo e a maçã apresenta uma alta atividade, isto é, as moléculas de água apresentam um elevado estado de energia como consequência das formas de interação estabelecidas com outros componentes presentes nos alimentos.

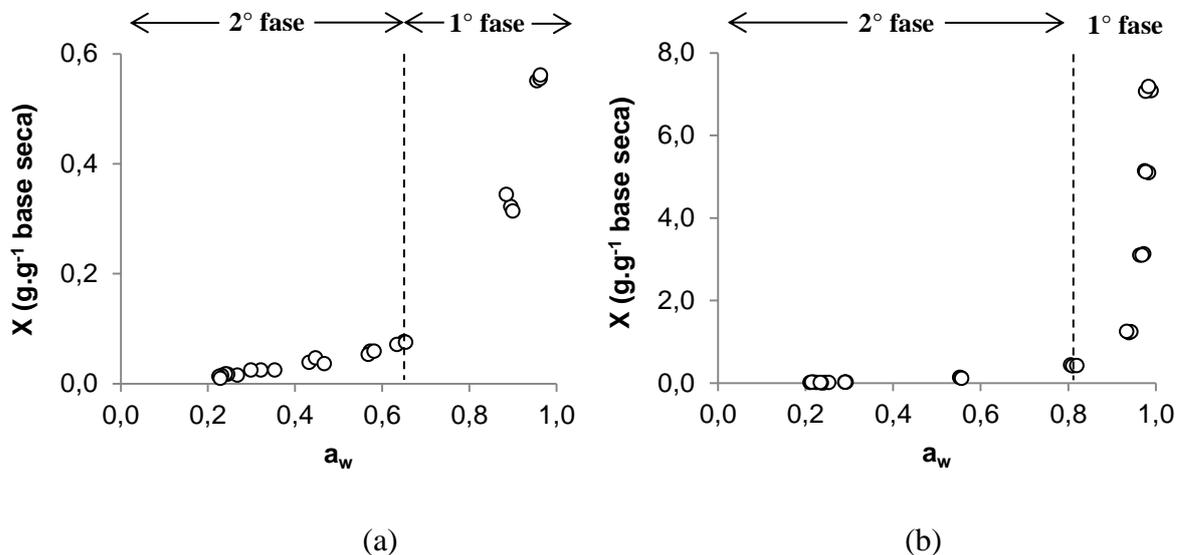


Figura 2.4. Isotherma de dessorção a 25°C do (a) queijo de Coalho e da (b) maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo.

De modo geral, a água presente nesta primeira fase caracteriza-se por formar interações mais fracas com macromoléculas vizinhas (carboidratos, proteínas), havendo predominância de interações das próprias moléculas de água entre si por meio de ligações de hidrogênio (MATHLOUTHI, 2001). Devido à baixa força de ligação que apresentam quando comparada às demais interações existentes entre as moléculas que compõe o alimento, as interações do tipo água-água são rompidas com maior facilidade quando lhes é fornecida energia. Normalmente localizadas nas regiões mais superficiais do alimento, o conteúdo de água presente nesta fase é, por esse motivo, removido logo nos primeiros momentos do procedimento de secagem (KHAN, NAGY e KARIM, 2018).

Na segunda fase, um comportamento distinto entre o teor e a atividade de água foi identificado, com variações de até 10% no teor de água do queijo nas faixas $0,25 < a_w < 0,65$ e de até 6% no teor de água da maçã na faixa $0,24 < a_w < 0,81$. Diferente do que ocorreu na fase anterior, nesta fase, as moléculas têm seus movimentos mais restringidos, resultado da formação de interações mais fortes, como interações iônicas, com componentes responsáveis pela estrutura do alimento (proteínas, minerais) (AVERSA et al., 2007). Assim, devido à força dessas ligações, um maior fornecimento de energia é necessário para a quebra das interações e remoção da água durante o processo de secagem.

Entre os modelos de previsão ajustados aos dados experimentais das isotermas, o modelo de BET teve o melhor ajuste tanto para o queijo quanto para a maçã (Tabela 2.2). Quando comparado ao modelo de GAB, o modelo de BET obteve maiores valores nos parâmetro R^2 e menores valores nos parâmetros RMSE e χ^2 . Além disso, o alinhamento com os dados experimentais, isto é, a capacidade observada no modelo de prever valores que condizem com as medições obtidas no experimento, foi maior no modelo de BET que no modelo de GAB para a faixa de atividade de água $0,2 < a_w < 0,4$, intervalo no qual será determinado o teor de água de referência.

Tabela 2.2. Parâmetros de ajuste dos modelos matemáticos de BET e GAB aos dados experimentais do queijo de Coalho e da maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo*.

Modelo	Produto	X_m	c	n	k	R^2	RMSE	χ^2
BET	Queijo	0,0418	1,1099	34,5796	--	0,9961	0,0115	$1,51 \times 10^{-4}$
BET	Maçã	0,2748	0,0324	99,7979	--	0,9464	0,5607	$3,49 \times 10^{-1}$
GAB	Queijo	0,1298	0,2715	--	0,8905	0,9957	0,0121	$1,67 \times 10^{-4}$
GAB	Maçã	0,1485	0,9365	--	0,9922	0,9278	0,6507	$4,70 \times 10^{-1}$

*Os termos c, n, k e X_m representam constantes dos modelos e os termos R^2 , RMSE e χ^2 representam, respectivamente, o coeficiente de determinação, a raiz quadrada do erro quadrático médio e o qui-quadrado

Com base no modelo de melhor ajuste, o conteúdo de água de referência do queijo foi calculado para um valor de atividade de água de $a_w = 0,30$, valor escolhido com base no digrama de estabilidade dos alimentos (Labuza et al. 1972). A partir do cálculo, foi obtido o valor de referência de $0,019 \text{ g de água.g}^{-1}$ de matéria seca para o queijo e $0,005 \text{ g de água.g}^{-1}$ de matéria seca para a maçã.

3.2. Análise das curvas de cinética e determinação dos tempos de secagem

O uso das micro-ondas a vácuo reduziu o tempo de secagem dos alimentos quando comparado ao uso do ar quente convectivo (Fig. 2.5). Enquanto o queijo desidratado em ar quente convectivo teve a maior parte do conteúdo de água (aproximadamente 90%) removida nas primeiras 2 horas de secagem, a substituição pela secagem em micro-ondas a vácuo reduziu em até 95% o tempo utilizado para remover um conteúdo de água semelhante, sendo feita em 0,1 a 0,4 horas (6 a 24 minutos) a depender da densidade de potência empregada. Em relação à maçã, cerca de 90% do conteúdo aquoso foi retirado após 4 horas de secagem em ar

quente convectivo, sendo que, no uso das micro-ondas a vácuo, esse tempo foi reduzido em 85%, chegando a 30 min (0,5h) de operação. Portanto, a secagem em micro-ondas a vácuo acelerou o processo de evaporação e, conseqüentemente, a transferência da água contida nos alimentos para o meio externo.

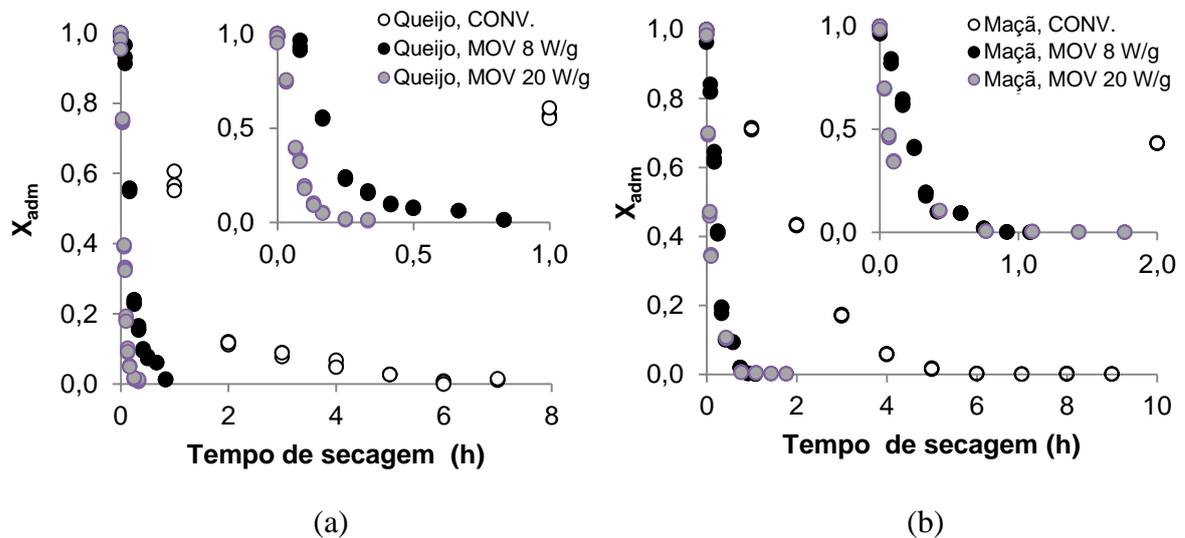


Figura 2.5. Curvas de cinética de secagem para (a) queijo de Coalho e (b) maçã Fuji desidratados em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo.

A redução no tempo de operação pode ser explicada pelo aumento da difusividade de água proporcionado pelas micro-ondas (CHONG et al., 2014), resultante do aquecimento volumétrico (aquecimento simultâneo das moléculas de água presentes tanto no interior quanto na superfície do alimento) e instantâneo provocado pela absorção das ondas eletromagnéticas. Essa forma de aquecimento aumenta a taxa de secagem do material devido ao maior gradiente de pressão formado entre a parte interna e externa do alimento (DATTA e NI, 2002), ainda potencializado pelo uso do vácuo. Dessa maneira, essa diferença de pressão formada durante o aquecimento promove uma maior movimentação molecular, aumentando a taxa com a qual a água é removida do alimento.

Ao comparar as densidades de potência, foram observados comportamentos distintos nas curvas de cinética de secagem do queijo e da maçã. Na secagem do queijo a 8 W.g^{-1} , foi observado um período de adaptação às condições do meio, que se estendeu pelos primeiros 5 minutos (0 a 0,08 h), no qual houve menor variação do conteúdo de água se comparado aos períodos subsequentes. Essa variação pode estar associada à temperatura do produto, que precisou desse intervalo de tempo para alcançar a temperatura de bulbo úmido e iniciar o processo de evaporação da água (Fig. 2.6). No emprego de uma densidade de potência mais

alta ($20 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$), esse tempo de adaptação foi reduzido, fazendo com que o produto alcançasse a temperatura de bulbo úmido mais rapidamente e logo iniciasse o período de taxa de secagem constante. Assim sendo, o aumento da densidade de potência na secagem do queijo em micro-ondas a vácuo aumentou também a taxa de aquecimento do alimento, reduzindo o tempo da operação.

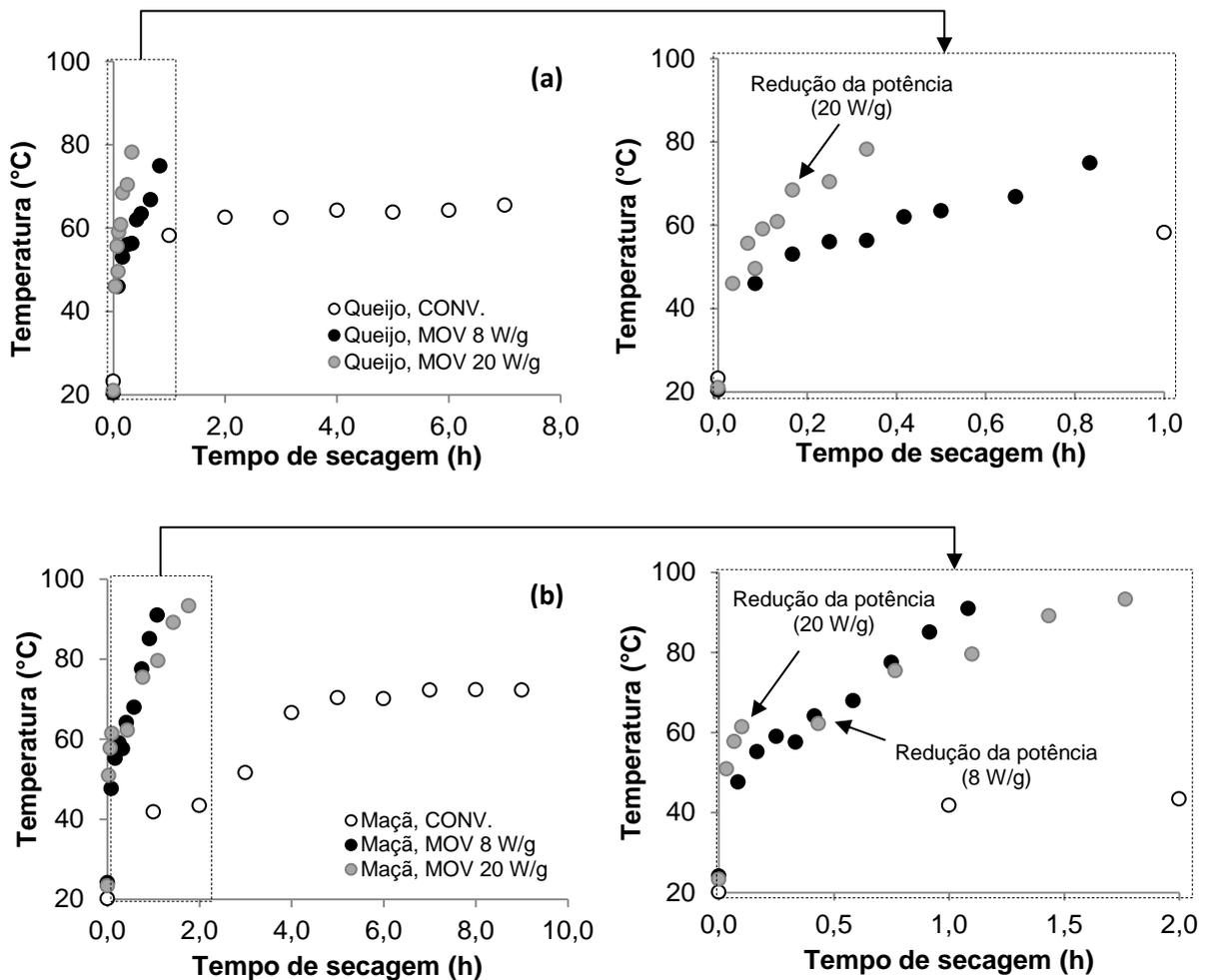


Figura 2.6. Alteração da temperatura de superfície do (a) queijo de Coalho e da (b) maçã Fuji no decorrer do tempo de secagem em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo.

O aumento observado na taxa de aquecimento do queijo com a alteração da densidade de potência está relacionado à maior disponibilidade de energia. Sabendo que a potência representa a quantidade de energia fornecida em um determinado intervalo de tempo, o acréscimo da potência do forno de micro-ondas promove maior transferência de energia para o alimento, que a utiliza na evaporação da água.

Em relação à maçã, não houve um período de adaptação evidente, contudo as curvas de cinética apresentaram um comportamento peculiar. No uso da densidade de potência de 20

W.g^{-1} , houve inicialmente um aumento na perda de água nos primeiros 25 minutos (0 a 0,42 h) se comparado à secagem a 8 W.g^{-1} . Em contrapartida, após esse período, a taxa de perda de água na secagem a 20 W.g^{-1} decresceu, de modo que as curvas nas duas densidades de potência praticamente se sobrepuseram. Esse comportamento pode ter como causa a redução feita na potência de micro-ondas, momento em que a potência do secador de micro-ondas estava configurada a 300 W em ambos os casos.

Diferente do que ocorreu com o queijo no uso das micro-ondas a vácuo, a densidade de potência de 20 W.g^{-1} prolongou o tempo de secagem da maçã. Comparado com a secagem a 8 W.g^{-1} , a fruta precisou de 41 minutos a mais para alcançar as condições de finalização da operação, um aumento de 64% sobre o tempo de secagem. Esse aumento no tempo do processo pode estar relacionado com a mudança da potência de micro-ondas durante a secagem, que influenciou o comportamento da temperatura de superfície do produto. Após um período de rápido aquecimento nos primeiros 6 minutos (0,1 horas), a taxa de aquecimento da maçã sofreu uma nítida redução nos períodos subsequentes, quando a potência configurada no forno foi alterada de 1.200 W para 300 W na secagem a 20 W.g^{-1} . Mesmo depois de 25 minutos (0,43 h) de operação, quando ambas as densidades utilizavam a potência de 300 W, as alterações na temperatura do produto foram mais lentas na secagem a 20 W.g^{-1} . Isso indica, portanto, que o aquecimento inicial da maçã na secagem a 20 W.g^{-1} influenciou a capacidade de absorção de energia e, conseqüentemente, a perda de água.

A causa para esse comportamento na secagem da maçã em micro-ondas a vácuo pode estar relacionada com a alta pressão de vapor gerada nas camadas internas do alimento durante o aquecimento. Ao ser exposta à densidade de 20 W.g^{-1} , a pressão exercida sobre as paredes das células da fruta devido à movimentação das moléculas de água pode ter provocado danificações sobre a estrutura das paredes celulares, alterando a seletividade da membrana e/ou da lamela média (responsável pela coesão das células) e dificultando os processos de transferência de massa (VEGA-GÁLVEZ et al., 2015; YI et al., 2016). Outra possível causa é a mais rápida formação de crosta ao redor do alimento durante os primeiros minutos de secagem, impedindo a migração da água para a superfície da fruta nos estágios finais da operação.

Entre os modelos ajustados aos dados de cinética de secagem do queijo, o proposto por Henderson e Pabis (H&P) apresentou o melhor ajuste, tanto para o ar quente convectivo quanto para o micro-ondas a vácuo nas potências de 8 W.g^{-1} e 20 W.g^{-1} (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Estimativa para os parâmetros utilizados nos modelos ajustados às curvas de cinética do queijo submetido à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).

Modelo	Método	n	k	a	c	g	R ²	RMSE	χ ²
Dois termos	CONV.	--	0,7646	0,2752	0,7387	0,7646	0,975	0,054	0,003
Dois termos	MOV 8 W.g ⁻¹	--	2,9104	-298,9	300	2,9156	0,944	0,085	0,009
Dois termos	MOV 20 W.g ⁻¹	--	9,1088	-199,9	200,9	9,1308	0,978	0,048	0,003
H&P	CONV.	--	0,7646	1,0139	--	--	0,975	0,054	0,003
H&P	MOV 8 W.g⁻¹	--	4,7956	1,0972	--	--	0,938	0,090	0,009
H&P	MOV 20 W.g⁻¹	--	14,7496	1,0275	--	--	0,974	0,053	0,003
L&N	CONV.	--	0,7565	--	--	--	0,974	0,054	0,003
L&N	MOV 8 W.g ⁻¹	--	4,4135	--	--	--	0,927	0,098	0,010
L&N	MOV 20 W.g ⁻¹	--	14,4008	--	--	--	0,973	0,054	0,003
Logarítmico	CONV.	--	0,7453	1,0217	-0,0091	--	0,975	0,053	0,003
Logarítmico	MOV 8 W.g ⁻¹	--	4,2976	1,1397	-0,0512	--	0,942	0,088	0,009
Logarítmico	MOV 20 W.g ⁻¹	--	13,6181	1,0577	-0,0355	--	0,977	0,050	0,003
Page	CONV.	1,7145	0,575	--	--	--	0,989	0,035	0,001
Page	MOV 8 W.g ⁻¹	1,8942	16,6267	--	--	--	0,980	0,051	0,003
Page	MOV 20 W.g ⁻¹	1,4284	42,3891	--	--	--	0,996	0,021	0,000
Verma	CONV.	--	0,699	-0,2729	--	0,7459	0,974	0,054	0,003
Verma	MOV 8 W.g ⁻¹	--	2,4017	215,4	--	2,3948	0,936	0,092	0,009
Verma	MOV 20 W.g ⁻¹	--	8,867	601,6	--	8,8598	0,979	0,047	0,002

Tabela 2.4. Estimativa para os parâmetros utilizados nos modelos ajustados às curvas de cinética da maçã submetida à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).

Modelo	Método	n	k	a	c	g	R ²	RMSE	χ ²
Dois termos	CONV.	--	0,2951	-87,8312	88,863	0,297	0,985	0,041	0,002
Dois termos	MOV 8 W.g ⁻¹	--	2,4514	-98,4085	99,4529	2,4645	0,976	0,054	0,003
Dois termos	MOV 20 W.g ⁻¹	--	-0,622	0,0061	0,9757	10,6534	0,992	0,031	0,001
H&P	CONV.	--	0,5245	1,0447	--	--	0,974	0,054	0,003
H&P	MOV 8 W.g ⁻¹	--	4,115	1,0573	--	--	0,969	0,062	0,004
H&P	MOV 20 W.g ⁻¹	--	10,5034	0,9808	--	--	0,991	0,033	0,001
L&N	CONV.	--	0,5068	--	--	--	0,972	0,057	0,003
L&N	MOV 8 W.g ⁻¹	--	3,8997	--	--	--	0,965	0,065	0,004
L&N	MOV 20 W.g ⁻¹	--	10,8262	--	--	--	0,991	0,033	0,001
Logarítmico	CONV.	--	0,454	1,0908	-0,0572	--	0,982	0,046	0,002
Logarítmico	MOV 8 W.g ⁻¹	--	3,6721	1,0976	-0,0507	--	0,973	0,057	0,004
Logarítmico	MOV 20 W.g ⁻¹	--	10,9632	0,9628	0,0208	--	0,993	0,029	0,001
Page	CONV.	1,5556	0,3091	--	--	--	0,998	0,013	0,000
Page	MOV 8 W.g⁻¹	1,5721	8,3215	--	--	--	0,993	0,029	0,001
Page	MOV 20 W.g⁻¹	0,7225	5,1092	--	--	--	0,994	0,027	0,001
Verma	CONV.	--	1,0448	433	--	1,0473	0,997	0,019	0,000
Verma	MOV 8 W.g ⁻¹	--	2,2832	203,5	--	2,2771	0,973	0,057	0,004
Verma	MOV 20 W.g ⁻¹	--	18,5444	0,638	--	3,3614	0,998	0,016	0,000

Apesar dos modelos de Page e logarítmico terem apresentado maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) e menores valores de erro médio quadrático (RMSE) e qui-quadrado (χ^2), o modelo H&P se ajustou com maior precisão ao comportamento dos dados experimentais nos conteúdos mais baixos de água ($< 0,1 \text{ g.g}^{-1}$ em base seca), faixa de interesse do estudo, sendo, por esse motivo, o modelo selecionado. Na secagem da maçã, o modelo de Page apresentou o melhor ajuste (Tabela 2.4, pg. 51).

Com base nos valores obtidos para as constantes dos modelos de cinética, para alcançar teor de água de referência de $0,019 \text{ g.g}^{-1}$ em base seca, o queijo deve ser desidratado em ar quente convectivo por 5,4 horas, em micro-ondas a vácuo a 8 W.g^{-1} por 0,72h e em micro-ondas a 20 W.g^{-1} por 0,23h. No caso da maçã, foi previsto que o teor de água de referência de $0,005 \text{ g.g}^{-1}$ em base seca seja alcançado após 7,9 h na secagem em ar quente convectivo, 0,91 h na secagem em micro-ondas a vácuo a 8 W.g^{-1} e 1,62 h na secagem em micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} .

Entre as constantes dos modelos de cinética, o termo “k” representa um indicativo da taxa de secagem. Com base nisso e considerando os resultados obtidos para o queijo e maçã, o uso das micro-ondas aumentou a taxa de secagem em ambos os alimentos, com acréscimos de 6 a 19 vezes na secagem do queijo e de 16 a 26 vezes na secagem da maçã. Essa variação sobre a taxa de secagem provocada pelo uso de micro-ondas a vácuo também foi relatada em estudos desenvolvidos com outros alimentos, como mirtilos (ZIELINSKA, SADOWSKI e BLASZCZAK, 2016) e abóbora (MONTEIRO et al., 2018), nos quais o acréscimo foi na ordem de 15 a 22 vezes quando comparado à secagem em ar quente convectivo.

3.3. Comportamento da atividade de água e imagens de umidade do produto

A técnica de secagem influenciou o comportamento da atividade de água dos alimentos ao longo do tempo de processo (Fig. 2.7). De modo geral, a secagem em ar quente convectivo foi o procedimento em que a redução da atividade de água ocorreu de forma mais lenta, durando de 6 a 7 horas para que o produto seco apresentasse um valor similar ao encontrado no produto seco em micro-ondas a vácuo utilizando menos de um quarto do tempo (0,25 a 1,77 horas). Portanto, a secagem em micro-ondas promoveu uma redução mais rápida da atividade de água do produto.

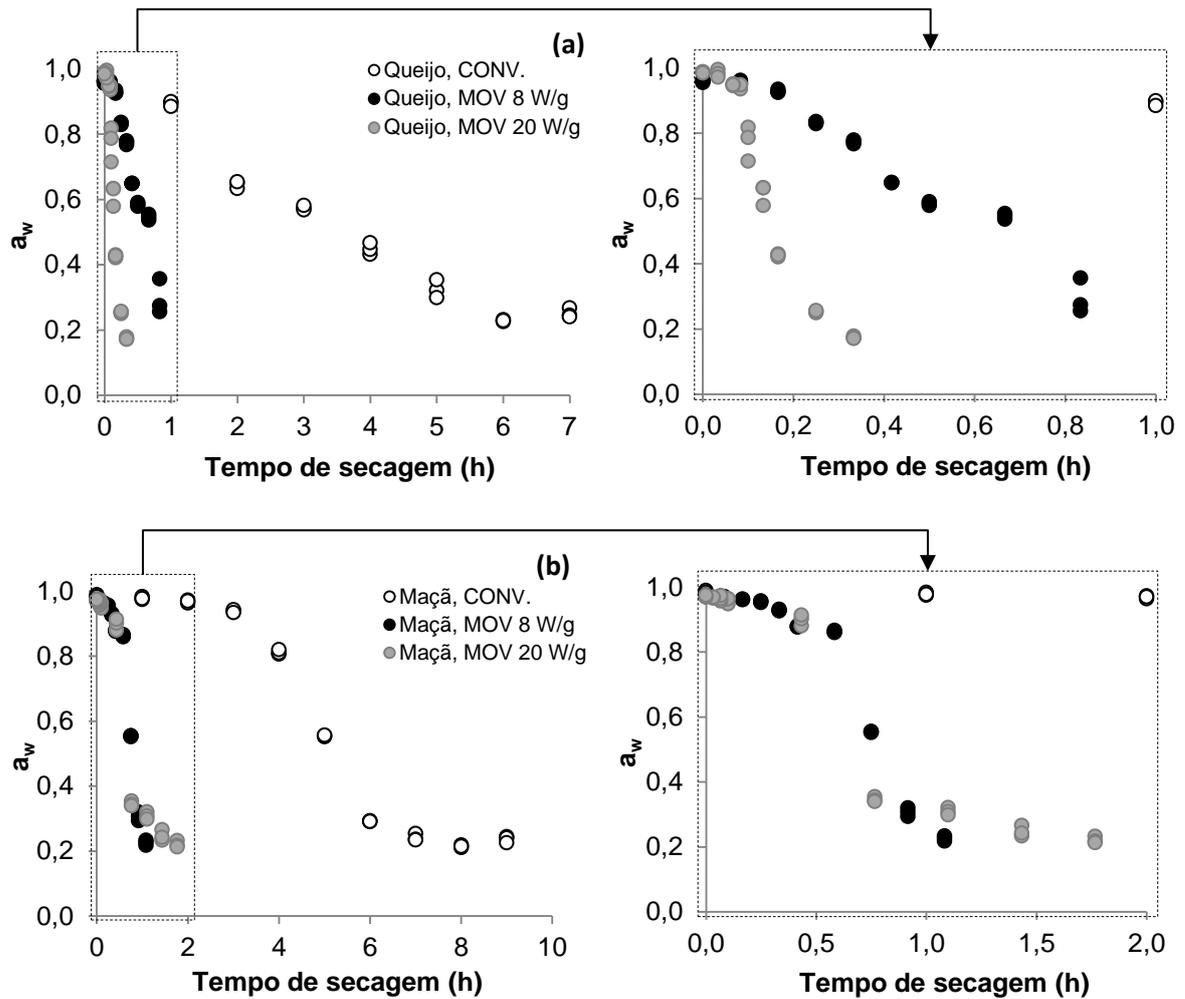


Figura 2.7. Alteração da atividade de água do (a) queijo Coalho e (b) da maçã Fuji no decorrer do tempo de secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV) com diferentes densidades de potência.

Ao comparar o comportamento entre as duas densidades de potência empregadas na secagem em micro-ondas a vácuo, em ambos os alimentos foi identificado um período inicial, no qual houve uma redução mais lenta da atividade de água. Esse período, que se prolongou pelos primeiros 6 minutos (0,1 h) para o queijo e 30 minutos (0,5 h) para a maçã, está relacionado com o tempo necessário para a remoção do conteúdo de água em maior nível energético presente no alimento. A duração desse processo de retirada de água pode depender de certos fatores, como a quantidade de água do produto fresco, a composição química do alimento e o arranjo estrutural, variando, portanto, de alimento para alimento. Reduções mais acentuadas da atividade de água foram identificadas na sequência, relacionadas com a redução da taxa de secagem (fim do período de taxa de secagem constante) e estabelecimento do equilíbrio termodinâmico do produto com o meio.

Na secagem do queijo, o emprego de maior potência de micro-ondas tornou mais rápida a redução da atividade de água. Essa alteração pode ser explicada pela pressão exercida sobre a estrutura do alimento, como resultado da absorção de maior quantidade de energia e excitação das moléculas de água. Em contrapartida, no caso da maçã, o efeito da potência empregada não foi tão aparente e o uso da potência de 20 W.g^{-1} aumentou o tempo para que o produto chegasse a atividade de água desejada ($a_w = 0,3$) nos estágios finais da desidratação. Esse comportamento pode estar associado às possíveis danificações na estrutura das células provocadas pelo efeito *puffing* (RAKESH e DATTA, 2011).

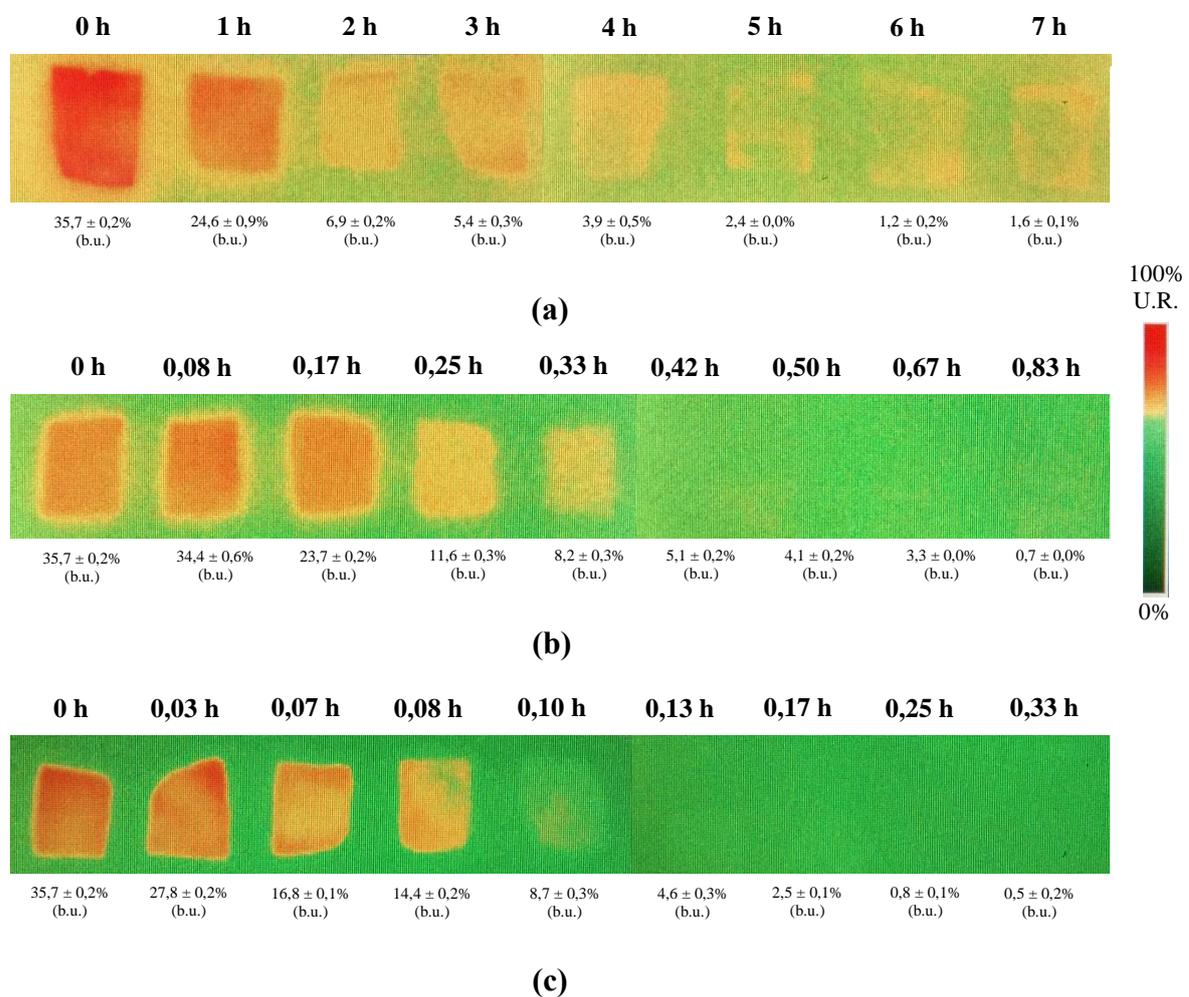


Figura 2.8. Imagens de umidade relativa das fatias de queijo submetidas à secagem em (a) ar quente convectivo, (b) micro-ondas a vácuo a 8 W.g^{-1} e (c) micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} .

Devido à relação que têm, os efeitos da redução da atividade de água puderam ser visualmente verificadas nas imagens de distribuição de umidade relativa (Fig 2.8 e 2.9). Nas imagens, a predominância de cores quentes (vermelho e laranja) sobre a superfície das fatias

de queijo e maçã nos estágios iniciais de secagem, seja em ar quente convectivo ou em micro-ondas a vácuo, indica a presença de uma alta quantidade de umidade, relacionada com os mais altos valores de atividade de água do produto. Nesta fase, o equilíbrio entre as taxas de evaporação e difusão da água mantém a superfície do alimento constantemente úmida no decorrer do tempo da operação (ERBAY e ICIER, 2010).

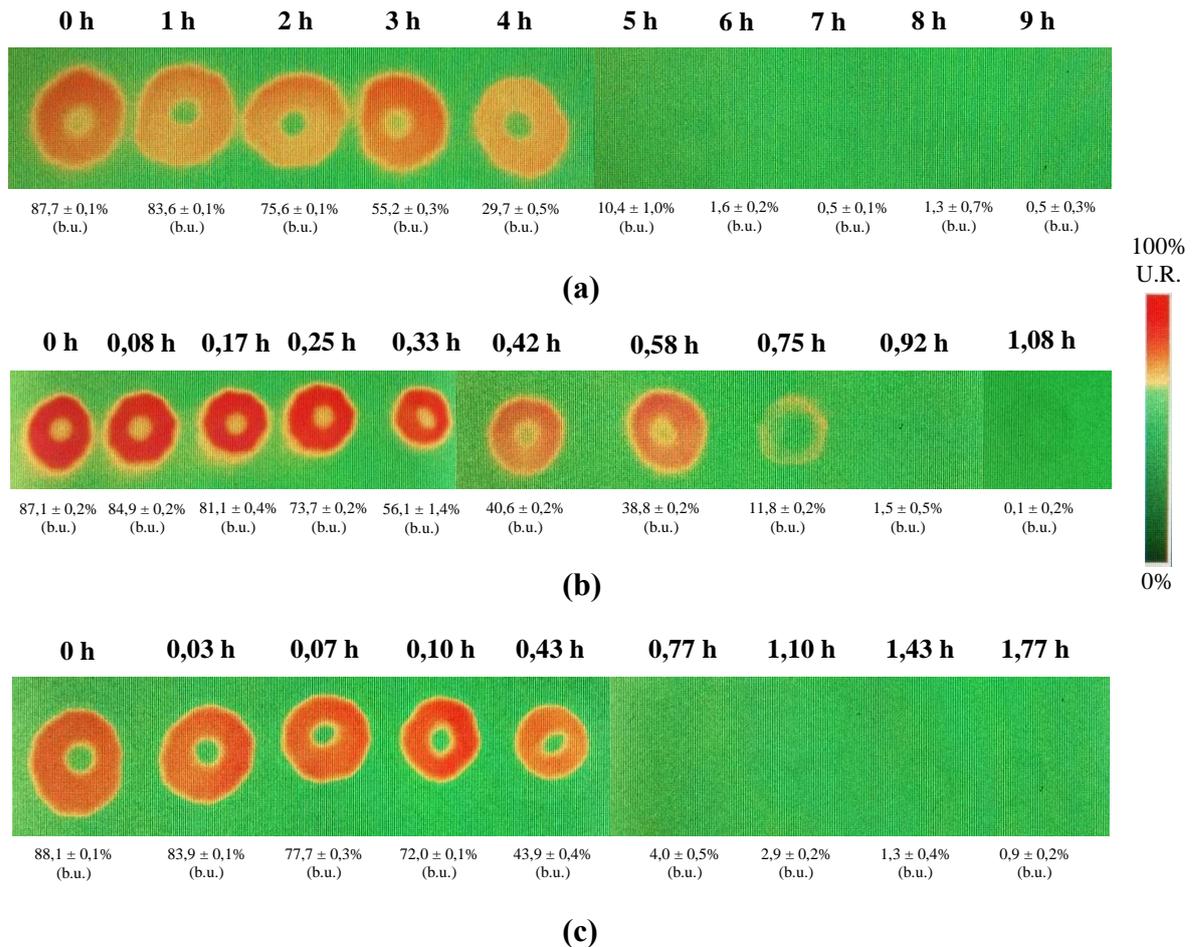


Figura 2.9. Imagens de umidade relativa das fatias de maçã submetidas à secagem em (a) ar quente convectivo, (b) micro-ondas a vácuo a 8 W.g^{-1} e (c) micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} .

Na sequência, a prevalência de uma coloração amarela na superfície das fatias indica a faixa onde houve as maiores alterações da atividade de água dos alimentos. Neste momento, quando o conteúdo de água do produto já sofreu uma redução considerável em relação ao seu teor inicial, a taxa de difusão da água não é mais suficiente para manter a umidade da superfície do produto e o equilíbrio que antes havia com o processo de evaporação deixa de existir, culminando no equilíbrio com a umidade relativa do ambiente, quando não pode ser identificada a forma e geometria das fatias nas imagens.

4. Conclusão

- Foi possível fazer a adaptação de um forno de micro-ondas doméstico para operação a vácuo. O secador experimental preservou o movimento do prato giratório contido no interior do forno, cuja função exerce um importante papel para uma melhor distribuição de temperatura durante o aquecimento dos alimentos. A simplicidade do projeto apresentado pode tornar esse tipo de tecnologia mais acessível para ser reproduzido em pesquisas de laboratório e/ou na aplicação em pequenos empreendimentos.
- Com base nos critérios estabelecidos, os tempos de secagem mais adequados para o queijo de coalho e a maçã Fuji foram determinados. A partir das equações ajustadas às isotermas de sorção e curvas de cinética, os tempos de secagem foram estimados em 5,4 horas em ar quente convectivo a 70°C, 0,72 horas em micro-ondas a vácuo a 8 W.g⁻¹ e 0,23 horas em micro-ondas a vácuo a 20 W.g⁻¹ para o queijo e 7,9 horas em ar quente convectivo, 0,91 horas em micro-ondas a vácuo a 8 W.g⁻¹ e 1,62 horas em micro-ondas a vácuo a 20 W.g⁻¹ para a maçã.
- Entre os modelos testados para a descrição das curvas de cinética, o modelo de Henderson e Pabis foi o que apresentou o melhor ajuste sobre os dados experimentais do queijo e o de Page para os dados experimentais da maçã.
- De forma geral, o uso das micro-ondas a vácuo apresentou potencial para reduzir o tempo de secagem dos alimentos em até 96% a depender das condições de operação, quando comparado ao ar quente convectivo.
- Na secagem em micro-ondas a vácuo, a eficácia na retirada de água dependeu das condições de operação e do tipo de alimento, isto porque, enquanto o uso da densidade de potência mais alta intensificou o processo desidratação do queijo, o mesmo não aconteceu com a maçã.

REFERÊNCIAS

- AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (method 926.12) Arlington: **A.O.A.C.**, 1996, chapter 33. p. 5.
- AVERSA, Maria et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 922-932, 2007.
- AZOUBEL, Patrícia Moreira et al. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 194-198, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 30, de 26 de junho de 2001. Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Manteiga da Terra ou Manteiga de Garrafa; Queijo de Coalho e Queijo de Manteiga. **Diário Oficial da União**. Brasília, 16 de julho de 2001.
- BRUNAUER, Stephen et al. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.
- CHONG, Chien Hwa et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 4, p. 975-989, 2014.
- DADALI, Gökçe; KILIÇ APAR, Dilek; ÖZBEK, Belma. Microwave drying kinetics of okra. **Drying Technology**, v. 25, n. 5, p. 917-924, 2007.
- DATTA, A. K.; NI, H. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. **Journal of Food Engineering**, v. 51, n. 4, p. 355-364, 2002.
- DI SCALA, Karina; CRAPISTE, Guillermo. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **LWT-Food Science and Technology**, v. 41, n. 5, p. 789-795, 2008.
- DOYMAZ, Ibrahim. Drying kinetics of white mulberry. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 341-346, 2004.
- DOYMAZ, Ibrahim. Air-drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 4, p. 1291-1297, 2007.
- ERBAY, Zafer; ICIER, Filiz. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010.
- GIRI, S. K.; PRASAD, Suresh. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of food engineering**, v. 78, n. 2, p. 512-521, 2007.
- GUPTA, Shilpi; COX, Sabrina; ABU-GHANNAM, Nissreen. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. **LWT-Food Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 1266-1272, 2011.
- HORUZ, Erhan et al. Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, n. 230, p. 295-305, 2017.
- IAL. Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: **Instituto Adolfo Lutz**, 2008, 581p.
- KHAN, Md Imran H.; NAGY, Szilvia Anett; KARIM, M. A. Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. **Food Research International**, v. 105, p. 772-781, 2018.
- KROKIDA, Magdalini K. et al. Drying kinetics of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 4, p. 391-403, 2003.

- KUMAR, Chandan; MILLAR, Graeme J.; KARIM, M. A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Drying Technology*, v. 33, n. 2, p. 227-237, 2015.
- LABUZA, T. P. et al. Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid oxidation. *Journal of Food Science*, v. 37, n. 1, p. 154-159, 1972.
- LIMA, Marla Mateus de et al. Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. *LWT-Food Science and Technology*, v. 72, p. 501-509, 2016.
- MALTINI, E. et al. Water activity and the preservation of plant foods. *Food Chemistry*, v. 82, n. 1, p. 79-86, 2003.
- MASKAN, Medeni. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, v. 48, n. 2, p. 177-182, 2001.
- MATHLOUTHI, Mohamed. Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, v. 12, n. 7, p. 409-417, 2001.
- MEDA, V.; ORSAT, V.; RAGHAVAN, V. Microwave heating and the dielectric properties of foods. In: *The microwave processing of foods*. Woodhead Publishing, 2017. p. 23-43.
- MENON, Abhay; STOJCESKA, Valentina; TASSOU, Savvas A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, v. 100, p. 67-76, 2020.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.
- MONTEIRO, Ricardo L. et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, v. 232, p. 1-10, 2018.
- MOSES, J. A. et al. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, v. 6, n. 3, p. 43-55, 2014.
- MOTHIBE, Kebitsamang Joseph et al. Microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying of apple cubes. *Drying Technology*, v. 32, n. 15, p. 1762-1768, 2014.
- OH, Suji; LEE, Eun-Jung; HONG, Geun-Pyo. Quality characteristics and moisture sorption isotherm of three varieties of dried sweet potato manufactured by hot air semi-drying followed by hot-pressing. *LWT-Food Science and Technology*, v. 94, p. 73-78, 2018.
- OLIVEIRA, M. E. C.; FRANCA, A. S. Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v. 53, n. 4, p. 347-359, 2002.
- PIZZOCARO, Francesco; TORREGGIANI, Danila; GILARDI, Gianluca. Inhibition of apple polyphenoloxidase (PPO) by ascorbic acid, citric acid and sodium chloride. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 17, n. 1, p. 21-30, 1993.
- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Vis-NIR hyperspectral imaging in visualizing moisture distribution of mango slices during microwave-vacuum drying. *Food Chemistry*, v. 188, p. 271-278, 2015.
- PUTNIK, Predrag et al. Influence of antibrowning solutions, air exposure, and ultrasound on color changes in fresh-cut apples during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 41, n. 6, p. e13288, 2017.
- RAKESH, Vineet; DATTA, Ashim K. Microwave puffing: Determination of optimal conditions using a coupled multiphase porous media-Large deformation model. *Journal of Food Engineering*, v. 107, n. 2, p. 152-163, 2011.
- VALLESPER, Francisca et al. Ultrasound assisted low-temperature drying of kiwifruit: Effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 99, n. 6, p. 2901-2909, 2019.
- VEGA-GÁLVEZ, A. L. M. S. et al. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, v. 85, n. 1, p. 42-50, 2008.

VEGA-GÁLVEZ, Antonio et al. Influence of drying temperature on dietary fibre, rehydration properties, texture and microstructure of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 4, p. 2304-2311, 2015.

YI, Jianyong et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips. **LWT-Food Science and Technology**, v. 70, p. 271-279, 2016.

ZHANG, Min et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 10, p. 524-534, 2006.

ZIELINSKA, Magdalena; SADOWSKI, Piotr; BŁASZCZAK, Wioletta. Combined hot air convective drying and microwave-vacuum drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.): Drying kinetics and quality characteristics. **Drying Technology**, v. 34, n. 6, p. 665-684, 2016.

CAPÍTULO 3: ADAPTAÇÃO DE UM FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO PARA OPERAÇÃO A VÁCUO E SUA APLICAÇÃO NA SECAGEM DE MAÇÃ FUJI E QUEIJO DE COALHO – PARTE 2

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações provocadas pela secagem em micro-ondas a vácuo sobre as características físicas do queijo de Coalho e da maçã Fuji. Os resultados foram comparados à secagem em ar quente convectivo (técnica convencional). Fatias de queijo e de maçã foram submetidas à secagem em micro-ondas a vácuo nas densidades de potência de 8 W.g⁻¹ e 20 W.g⁻¹ sob pressão de 15 a 19 kPa e à secagem em ar quente convectivo a 70°C e 80°C, respectivamente. A secagem em micro-ondas a vácuo foi realizada em um aparelho experimental. A atividade de água, reologia, cor e volume específico dos produtos desidratados empregando as duas técnicas de secagem foram avaliados. Os resultados indicaram que a técnica de secagem influenciou as propriedades físicas do queijo de Coalho e da maçã Fuji. A aplicação das micro-ondas a vácuo na secagem do queijo apresentou melhores resultados que o uso do ar quente convectivo, preservando a cor do produto e evitando o seu encolhimento. O uso das micro-ondas a vácuo preservou a cor natural da maçã, no entanto não foi observada a expansão de volume característica do aquecimento por micro-ondas. O potencial de uso das micro-ondas a vácuo na produção de queijo de Coalho desidratado como produto pronto para consumo pode ser explorado

Palavras-chave: Micro-ondas a vácuo; Efeito de sopro; Reologia; Secagem de alimentos.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the changes caused by vacuum microwave drying on the physical characteristics of *Coalho* cheese and Fuji apples. The results were compared to convective hot air drying (conventional method). Cheese and apple slices were subjected to vacuum microwave drying at 8 W.g⁻¹ and 20 W.g⁻¹ under pressure from 15 to 19 kPa and drying in convective hot air at 70 °C and 80 °C, respectively. Vacuum microwave drying was carried out in an experimental apparatus. The water activity, rheology, color, and specific volume of the dehydrated products using two drying techniques were taken. The results indicated that the drying technique influences the physical properties of *Coalho* cheese and Fuji apple. The

application of vacuum microwaves in cheese drying showed better results than the use of convective hot air, preserving the color of the product and preventing its shrinkage. The use of vacuum microwaves preserved the natural color of the apple; however, the volume expansion characteristic of microwave heating was not obtained. The potential of using vacuum microwaves to produce dried *Coalho* cheese as a ready-to-eat product can be explored.

Keywords: Vacuum-microwave drying; Puffing effect; Rheology; Drying of food.

1. Introdução

A maioria dos alimentos é naturalmente perecível. Esta característica, comumente percebida em alimentos com alto teor de água, como frutas e hortaliças, carne e produtos cárneos ou leite e produtos lácteos, exige uma série de cuidados que devem estar em consonância com a celeridade necessária nas movimentações que ocorrem dentro da cadeia produtiva. Por esta razão, é importante que haja uma logística adequada para que os alimentos possam chegar ao consumidor em condições para serem utilizados e com uma qualidade aceitável, evitando perdas financeiras aos distribuidores dessas mercadorias, possíveis impactos ambientais gerados com o descarte dos resíduos e o desperdício de uma fonte de energia biodisponível. Uma estratégia que pode ajudar nesse processo de preservação da qualidade do produto e estender o seu tempo de vida-útil é o uso de métodos de conservação, procedimentos de intervenção sobre o alimento que retardam reações de deterioração por meio de alterações na sua composição química, adição de novos elementos (aditivos alimentares) e/ou pela transformação física da matéria a partir da ação de agentes externos (temperatura, radiação, dentre outros) (VILLALOBOS-DELGADO et al., 2019). Entre os métodos de caráter físico, a secagem é um dos mais comuns.

A secagem é uma operação unitária cujo objetivo é remover parte da água que compõe o alimento. Nesse procedimento, são utilizados conhecimentos de transferência de calor e massa, tendo como principais agentes promotores dessas transferências as variações de temperatura e/ou de pressão (FENG, YIN e TANG, 2012; AVERSA et al., 2007). Uma vez que a água é um dos principais elementos envolvidos em reações que degradam química e biologicamente o alimento, a sua remoção promove a segurança do produto diante de fatores externos de contaminação ou que possam alterá-lo de algum modo (DE BRUIJN et al., 2016). Além disso, em certos casos, a secagem também pode abrir perspectivas na fabricação de novos produtos, já que a operação pode causar modificações em atributos como cor, sabor e

textura que, a depender do produto e das condições de operação, podem proporcionar um *feedback* positivo pelos consumidores (DE LIMA et al., 2016; HUANG e ZHANG, 2012).

Na indústria, a técnica de secagem mais utilizada é o ar quente convectivo (MOSES et al., 2014). De construção simples, esta técnica tem como principal vantagem o baixo custo de aquisição e operação. Apesar disso, existem pesquisas que têm apontado limitações no emprego da técnica em relação a sua influência sobre as características do produto obtido, relatando problemas como o encolhimento excessivo do alimento, redução da capacidade de reidratação, na quantidade de compostos bioativos e da atividade antioxidante, perda de nutrientes e uma textura mais dura (HORUZ e MASKAN, 2015; NAWIRSKA et al., 2009; CUI, XU e SUN, 2003). Diante desse cenário, técnicas estão sendo desenvolvidas para substituir ou complementar a secagem convectiva, entre as quais pode ser citado o uso do aquecimento por micro-ondas.

Micro-ondas são radiações eletromagnéticas propagadas a partir da geração conjunta dos campos elétrico e magnético. Devido à sua natureza, são capazes de excitar as moléculas de água, gerando aquecimento a partir do atrito formado durante a colisão dessas moléculas (HOSSAN, BYUN e DUTTA, 2010). Na secagem de alimentos, o seu uso tem conferido aos produtos, entre outros benefícios, maior retenção de nutrientes bioativos, de compostos termossensíveis e voláteis (TIAN et al., 2016; SCHULZE, HUBBERMANN e SCHWARZ, 2014; WOJDYŁO et al., 2014), melhor capacidade de reidratação (ZIELINSKA, SADOWSKI e BŁASZCZAK, 2016; MONTEIRO et al., 2018) e a preservação da cor natural do alimento (TIAN et al., 2016; PU e SUN, 2017). Tais benefícios, contudo, dependem dos ajustes feitos para a operação quanto ao tempo de secagem e a potência de geração das micro-ondas, de modo que seja evitado o superaquecimento do alimento e discrepâncias na distribuição da temperatura superficial (DUAN et al., 2011; VADIVAMBAL e JAYAS, 2007). Portanto, é importante compreender como as alterações nos ajustes do processo podem influenciar as características do alimento desidratado, algo que tem relação direta com a aceitação do consumidor.

Na literatura, existem vários trabalhos que utilizaram a técnica de micro-ondas a vácuo na secagem de alimentos, em especial nos últimos anos. As aplicações foram desde a secagem de mirtilos (ZIELINSKA, ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2018) a cenoura (BÉTTEGA et al., 2014), romã (DAK e PAREEK, 2014) e maçã (MOTHIBE et al., 2014). Contudo, poucos trabalhos trouxeram informações compiladas sobre o comportamento durante a secagem em micro-ondas de alimentos de diferentes matrizes e estruturas (animais e vegetais). Assim, este trabalho teve o objetivo de avaliar as alterações provocadas pela secagem em micro-ondas a

vácuo em diferentes condições de operação sobre as características do queijo de Coalho e da maçã Fuji, comparando-as ao uso da técnica convencional (secagem convectiva). Para o desenvolvimento da pesquisa, o queijo de Coalho foi escolhido por ser um produto originalmente brasileiro, produzido e consumido em maior quantidade na região nordeste do país; é um tipo de queijo de baixo custo se comparado ao queijo provolone (único tipo comercializado no Brasil na forma desidratada) e possui características próprias, como sua textura dura e estrutura firme, que não derrete quando exposta ao calor. Já a escolha da maçã Fuji se baseou no preço de venda e disponibilidade da fruta no mercado local onde o experimento foi desenvolvido (disponível de fevereiro a meados de outubro), assim como por ser um produto conhecido em todo o mundo.

2. Material e métodos

2.1. Matéria-prima

Barras de queijo de Coalho com teor de água de $33,5 \pm 0,4\%$ em base úmida, determinado por análise gravimétrica em estufa a vácuo (AOAC método 926.12, 1996), e maçãs da variedade Fuji com teor de sólidos solúveis a 22°C de $14,9 \pm 0,9^{\circ}\text{Brix}$ (Refratômetro DAS E-Scan, Electron Machine CorporationTM, Luxemburgo), acidez titulável de $0,16 \pm 0,03\%$ de ácido málico (IAL método 311/IV, 2008) e teor de água de $87,1 \pm 0,2\%$ em base úmida (AOAC método 926.12, 1996) foram adquiridos em um comércio varejista do município de Itapetinga, Bahia. Antes de serem armazenadas em ambiente refrigerado a $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$, as maçãs foram higienizadas em solução de cloro a 100 ppm por 10 minutos, enxaguadas em água corrente e secas em papel toalha. As barras de queijo foram diretamente armazenadas em ambiente refrigerado a $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e mantidas em suas embalagens comerciais seladas a vácuo por, no máximo, 15 dias.

No dia anterior ao início do experimento, os alimentos foram fatiados manualmente. As barras de queijo foram cortadas em fatias na forma de paralelepípedo com dimensões de $40,3 \pm 0,7$ mm de comprimento, $50,0 \pm 2,8$ mm de largura e $1,7 \pm 0,6$ mm de espessura. As maçãs, depois de descascadas, foram cortadas na direção perpendicular ao pedúnculo, formando fatias de formato cilíndrico com $4,5 \pm 0,4$ mm de espessura. Para a retirada das sementes, foi inserida na parte central das fatias de maçã uma broca oca de metal com 20 mm de diâmetro.

Após o corte, as fatias de maçã foram imediatamente imersas em uma solução aquosa antioxidante composta por 1% m/v de ácido ascórbico (Anidrol®, São Paulo, Brasil) e 0,2% de ácido cítrico (Química Moderna, São Paulo, Brasil) por cinco minutos. A proporção fruta:solução utilizada foi de 1:7.

2.2. Procedimento de secagem

Para fazer a comparação das características dos produtos desidratados, foi estabelecido um teor de água de referência para o queijo e um teor de água de referência para a maçã. Este valor indica uma condição de estabilidade ao armazenamento, baseando-se no digrama proposto por Labuza et al (1972) e em estudos prévios sobre o comportamento do queijo e da maçã quando submetidos à secagem em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo (ver Capítulo 2).

Com base nesses estudos, os tempos em que os alimentos foram desidratados são os previstos para que o queijo alcance teor de água de $0,019 \text{ g água.g}^{-1}$ matéria seca e a maçã alcance teor de água de $0,005 \text{ g de água.g}^{-1}$ de matéria seca.

2.2.1. Ar quente convectivo

A secagem em ar quente convectivo foi feita em estufa de bandejas com circulação forçada de ar (SL 102, Solab, São Paulo, Brasil). Em todos os ensaios, a velocidade do ar foi mantida constante e igual a $1 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Quanto às configurações de tempo e temperatura, o queijo de Coalho foi desidratado a $70 \pm 0,3^\circ\text{C}$ por 5,4 horas e a maçã foi desidratada a 80°C por 7,9 horas.

2.2.2. Micro-ondas a vácuo

A secagem em micro-ondas foi realizada em um forno doméstico adaptado para que os alimentos pudessem ser aquecidos abaixo da pressão atmosférica. No experimento, a pressão de trabalho foi mantida, para ambos os alimentos, na faixa de 15 a 19 kPa e a velocidade de rotação da câmara de vácuo localizada na parte interna do forno mantida a 6 rpm.

O procedimento de secagem foi feito utilizando duas densidades de potência: 8 W.g^{-1} e 20 W.g^{-1} . Na secagem do queijo a 8 W.g^{-1} , o forno de micro-ondas foi configurado para aquecer a uma potência de 300 W ($313,8 \pm 11,5 \text{ W}$) por 43 minutos e 12 segundos ($0,72$

horas). Já na secagem do queijo a 20 W.g^{-1} , o procedimento ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa, as fatias de queijo foram inicialmente aquecidas a 600 W ($647,1 \pm 24,0 \text{ W}$) por 10 minutos. Finalizado o tempo e mantendo inalterada a pressão dentro da câmara de vácuo, a potência do forno foi reduzida para 300 W e o procedimento de secagem continuou por mais 3 minutos e 48 segundos, totalizando 13 minutos e 48 segundos de processo (0,23 horas).

Em relação à maçã, a secagem aconteceu em duas etapas nas duas densidades de potência. Na secagem a 8 W.g^{-1} , as fatias de maçã foram inicialmente aquecidas utilizando a potência de 600 W por 25 minutos. Na sequência, a potência do forno foi reduzida para 300 W e o produto foi desidratado por mais 29 minutos e 36 segundos, totalizando 54 minutos e 36 segundos de processo (0,91 horas). Já na densidade de 20 W.g^{-1} , as fatias foram inicialmente aquecidas utilizando a potência de 1.200 W ($1.335,4 \pm 75,8 \text{ W}$) por 6 minutos e, em seguida, a potência do forno foi reduzida para 300 W por mais 91 minutos e 12 segundos, totalizando 97 minutos e 12 segundos de processo (1,62 horas).

2.3. Avaliação da matéria-prima e dos produtos

2.3.1. Atividade de água

A atividade de água foi medida em triplicata utilizando um analisador de a_w (4 TEV, Aqualab, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EUA) configurado para fazer medição por ponto de orvalho na temperatura de 25°C .

2.3.2. Teor de água

O teor de água das amostras foi determinado em triplicata por análise gravimétrica em estufa a vácuo (SL 104/12, Solab, São Paulo, Brasil) configurada na temperatura de 70°C e pressão menor que 100 mmHg, conforme metodologia proposta pelo método 926.12 (AOAC, 1996).

2.3.3. Reologia

O comportamento reológico foi avaliado em vinte replicatas utilizando um analisador de textura (TA.HD Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK), equipado com célula de carga de 50 kg e capacidade de aquisição de 500 pontos por segundo.

Na avaliação, as amostras de queijo desidratado foram submetidas a um ensaio de penetração (Fig. 3.1) utilizando a *probe* HDP/CFS (Stable Micro Systems, Surrey, UK) configurada com velocidade no pré-teste de 1 mm.s^{-1} , velocidade no teste de 1 mm.s^{-1} , velocidade no pós-teste de 10 mm.s^{-1} e distância de penetração de 3 mm. As maçãs desidratadas foram submetidas a um ensaio de flexão utilizando a *probe* HDP/3PB (Stable Micro Systems, Surrey, UK) ajustada com os apoios a uma distância de 2,7 cm entre si e configurada com velocidade no pré-teste de 1 mm.s^{-1} , velocidade no teste de 1 mm.s^{-1} , velocidade no pós-teste de 10 mm.s^{-1} e distância de flexão de 10 mm.



Figura 3.1. Ensaios mecânicos utilizados na avaliação reológica das amostras de (a) queijo Coalho e da (b) maçã Fuji.

O ensaio a qual cada alimento foi submetido se baseou em um movimento que pode ser utilizado em testes sensoriais para avaliar o atributo “crocância”. Nesse movimento, a fatia é posicionada nas mãos entre as pontas dos polegares e as laterais dos indicadores, sofrendo penetração pelos polegares (movimento de cima para baixo) e flexão pelos indicadores (movimento de baixo para cima).

A partir dos testes, foram obtidas medidas da dureza, trabalho, número de picos de força, fraturabilidade e gradiente, tomadas a partir da interpretação dos diagramas força *versus* distância de deformação (Fig. 3.2). Na interpretação, a dureza foi considerada como o

maior valor absoluto de força identificado durante o teste, o trabalho foi obtido a partir do cálculo da área sob a curva formada no diagrama, o número de picos informou a contagem dos picos de força identificados durante o teste, a fraturabilidade identificou a força necessária para que ocorra a primeira fratura do material analisado e o gradiente foi calculado com base no ângulo formado entre a força e a deformação no regime de elasticidade linear. Todos os cálculos e medidas foram determinados utilizando o *software* Exponent, versão 5.1.1.0 (Stable Micro Systems, Surrey, UK).

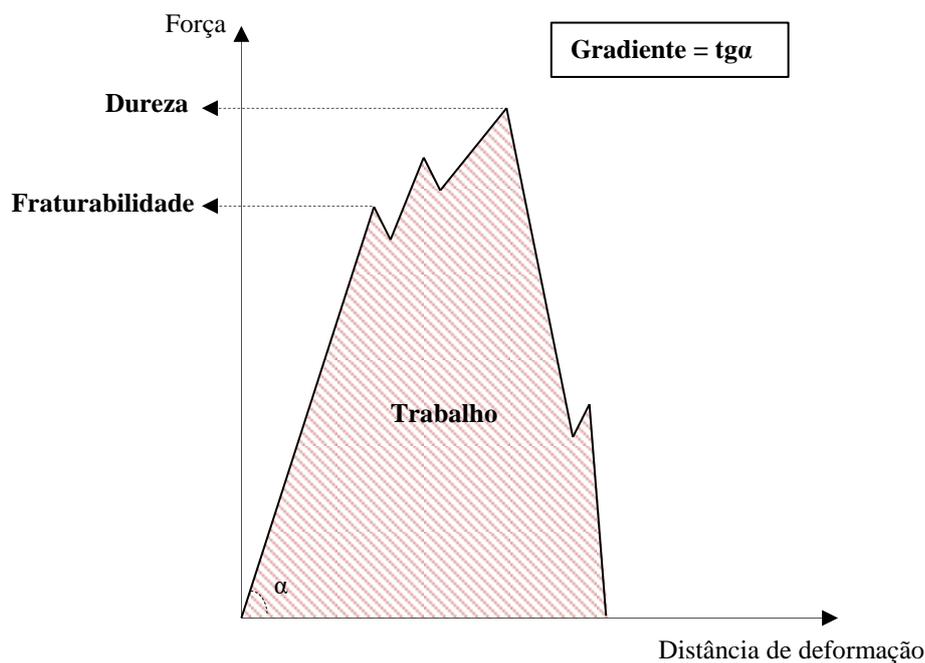


Figura 3.2. Forma de interpretação do diagrama força versus distância adotada para obter as medidas de análise reológica.

2.3.4. Cor

A cor foi avaliada em dez replicatas utilizando um espectrofotômetro ColorQuest XE (HunterLab, Reston, USA) equipado com iluminante D65 (inclinação de 10°) e sensor CQX3233. Nas análises, foi considerada a reflectância total das amostras, incluindo a difusa e a especular. Cada amostra foi avaliada em apenas um ponto da superfície, sendo as leituras do queijo feitas no centro das fatias e as da maçã nas extremidades.

A partir da avaliação, foram registradas as medidas de luminosidade (L^*) e das coordenadas de cor a^* e b^* de cada amostra. Os resultados foram expressos pela diferença entre a medida obtida na avaliação do produto seco (medida final) e a obtida para o alimento

fresco que lhe deu origem (medida inicial), expressos como $\Delta L^* = L^*_{inicial} - L^*_{final}$, $\Delta a^* = a^*_{inicial} - a^*_{final}$ e $\Delta b^* = b^*_{inicial} - b^*_{final}$. Além disso, com base nessas diferenças, foi determinada a variação de cor do produto (ΔE^*), conforme a Eq (1).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

2.3.5. Volume específico

O volume específico foi determinado em quadruplicata, considerando o peso e o volume do produto (Eq. 2). Para isso, em uma balança analítica (Bioprecisa FA-2104N, TDS Instrumental Tecnológica LTDA), foram pesadas amostras com 1 a 2 gramas do produto desidratado. As amostras pesadas foram então transferidas para uma proveta de 100 mL, que já continha em seu interior um volume conhecido de água. Utilizando o princípio de Arquimedes, o volume das amostras foi determinado a partir do deslocamento do nível da água após a transferência da amostra. Tendo como base essas medidas, o volume específico foi calculado conforme a equação abaixo.

$$v = \frac{(V_{final} - V_{inicial})}{m} \quad (2)$$

Sendo v o volume específico (mL/g), V_{final} o volume após a transferência da amostra para a proveta (mL), $V_{inicial}$ o volume de água antes da transferência da amostra para a proveta (mL) e m a massa da amostra (g).

2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) utilizando o teste F com nível de significância de 5%. Os grupos de médias nos quais foram identificadas diferenças significativas foram posteriormente analisados pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Toda a avaliação estatística foi desenvolvida no ambiente SAS[®] *University Edition*, versão 9.4M6. O experimento foi conduzido com três repetições.

3. Resultados e discussão

3.1. Atividade de água e volume específico

A secagem reduziu a atividade de água do queijo e da maçã (Tabela 3.1), sendo que a intensidade desta redução variou conforme a técnica empregada e o tipo de alimento. Entre as técnicas utilizadas na secagem do queijo, o produto obtido a partir do uso de micro-ondas a vácuo apresentou atividade de água até 20% menor que o produto desidratado em ar quente convectivo. Quando a comparação é restrita às densidades de potência empregadas na secagem em micro-ondas a vácuo, o procedimento feito a 8 W.g^{-1} reduziu em 12%, em média, a atividade de água do queijo quando comparado ao procedimento a 20 W.g^{-1} . Em contrapartida, na secagem da maçã, um comportamento diferente foi observado. Enquanto a maçã desidratada em micro-ondas a vácuo apresentou atividade de água até 20% maior que a obtida no ar quente convectivo, não houve diferença significativa entre as duas densidades de potência.

Esses resultados podem estar associados às alterações que ocorrem na estrutura do alimento durante a secagem, que podem ser influenciadas, entre outros fatores, pelo teor de água do alimento fresco e a forma de aquecimento utilizada. Quando comparados, a maçã possui aproximadamente três vezes mais água em sua composição que o queijo. Com isso, durante o aquecimento, a movimentação molecular provocada pela absorção das ondas eletromagnéticas tem capacidade para gerar uma pressão de vapor d'água no interior da maçã superior a que ocorre na estrutura do queijo.

Como consequência desse aumento de pressão, deformações podem ter surgido na estrutura das células da fruta (BONDARUK, MARKOWSKI e BŁASZCZAK, 2007), alterando as rotas de migração da água para a superfície e impedindo o processo de transferência de massa. Fisicamente retida no interior do produto, essa água em elevado estado de energia pode ter sido responsável pelo aumento da atividade de água da maçã desidratada em micro-ondas a vácuo se comparada à maçã desidratada em ar quente convectivo. Por outro lado, a menor pressão exercida sobre a rede de micelas de caseína que estruturam o queijo pode ter provocado um efeito inverso, ajudando na migração da água por expandir os poros do alimento e evitar a retenção dessas moléculas na estrutura do produto.

Tabela 3.1. Análise das propriedades físicas do queijo e maçã frescos e submetidos à secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).

Tratamento	Teor de água (g.g ⁻¹ b.s.)	a _w (25°C)	v (mL.g ⁻¹)	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔE*
<i>Queijo</i>							
Fresco	0,555 ± 0,004 ^a	0,960 ± 0,004 ^a	1,38 ± 0,07 ^a	--	--	--	--
CONV.	0,011 ± 0,001 ^b	0,362 ± 0,017 ^b	0,79 ± 0,05 ^b	15,69 ± 2,32 ^a	1,53 ± 0,09 ^a	-17,49 ± 1,74 ^a	23,71 ± 0,83 ^a
MOV 8 W.g ⁻¹	0,012 ± 0,002 ^b	0,288 ± 0,005 ^c	1,66 ± 0,04 ^c	4,90 ± 2,05 ^b	1,39 ± 0,25 ^{ab}	-21,98 ± 1,43 ^b	22,67 ± 1,09 ^a
MOV 20 W.g ⁻¹	0,013 ± 0,001 ^b	0,327 ± 0,005 ^d	1,86 ± 0,10 ^d	2,62 ± 1,96 ^b	1,26 ± 0,14 ^b	-20,83 ± 1,13 ^b	21,13 ± 0,93 ^b
<i>Maçã</i>							
Fresco	7,109 ± 0,049 ^A	0,983 ± 0,005 ^A	0,98 ± 0,22 ^A	--	--	--	--
CONV	0,004 ± 0,004 ^B	0,251 ± 0,005 ^B	1,20 ± 0,20 ^B	19,59 ± 6,49 ^A	-9,81 ± 1,95 ^A	-13,69 ± 3,68 ^A	26,46 ± 5,20 ^A
MOV 8 W.g ⁻¹	0,012 ± 0,002 ^B	0,283 ± 0,008 ^C	0,88 ± 0,02 ^A	9,20 ± 5,61 ^B	-6,53 ± 2,83 ^B	-25,12 ± 9,37 ^B	28,76 ± 7,62 ^A
MOV 20 W.g ⁻¹	0,004 ± 0,001 ^B	0,304 ± 0,009 ^C	0,94 ± 0,02 ^A	18,14 ± 7,77 ^A	-10,34 ± 1,56 ^A	-6,14 ± 3,36 ^C	22,50 ± 6,44 ^A

¹Média ± desvio padrão

²Valores seguidos de letras diferentes e localizados na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas referem-se aos dados do queijo e letras maiúsculas referem-se aos dados da maçã.

Essa hipótese corrobora com os resultados de volume específico. De acordo com eles, a secagem em micro-ondas a vácuo aumentou em até 35% o volume específico do queijo se comparado ao alimento fresco. Portanto, esse acréscimo indica que houve uma expansão do volume do produto durante a desidratação em micro-ondas. Em contrapartida, o uso do ar quente convectivo provocou um efeito contrário, de encolhimento do material, reduzindo em aproximadamente 42% o volume específico do queijo. Quanto à maçã, a secagem em micro-ondas manteve inalterado o volume específico após a desidratação, porém o produto obtido mostrou-se mais denso que o desidratado em ar quente convectivo.

Na secagem do queijo em micro-ondas a vácuo, o uso da densidade de potência de 20 W.g^{-1} aumentou a atividade de água do produto se comparado à densidade de potência de 8 W.g^{-1} . Este acréscimo pode estar relacionado com a maior disponibilidade de energia na forma de calor a partir da mudança da potência de geração das micro-ondas, o que fez com que interações mais fortes da água com outros componentes polares ou iônicos fossem rompidas e elevassem o estado de energia das moléculas de água que não foram removidas durante o procedimento de secagem.

3.2. Cor

A secagem em micro-ondas a vácuo foi o procedimento que melhor preservou a luminosidade do queijo. Se comparado à secagem convectiva, o uso das micro-ondas reduziu em cerca de 70% a variação de luminosidade do produto, não havendo diferenças quanto à densidade de potência empregada ($P > 0,05$). Em relação à maçã, a luminosidade do produto foi influenciada tanto pela técnica de secagem quanto pela densidade de potência de micro-ondas, de modo que a maçã desidratada em micro-ondas a vácuo na densidade de potência de 8 W.g^{-1} apresentou variação de luminosidade até 53% menor que os demais procedimentos de secagem utilizados, os quais não apresentaram diferença significativa entre si.

Na coordenada de cor a^* , a secagem do queijo em micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} reduziu em 18%, em média, a variação do parâmetro quando comparado ao produto obtido em ar quente convectivo. Entre as densidades de potência de micro-ondas, não houve diferença significativa ($P > 0,05$). Já na secagem da maçã, o procedimento em micro-ondas a vácuo na potência de 8 W.g^{-1} reduziu em torno de 30% a variação da coordenada a^* em relação aos demais procedimentos de secagem, os quais não diferiram entre si ($P > 0,05$).

Em relação à coordenada de cor b^* , a desidratação do queijo em micro-ondas, independentemente da densidade potência empregada, aumentou em até 25% a variação do

parâmetro quando comparado à secagem em ar quente convectivo. Quanto à maçã, a secagem em micro-ondas a 8 W.g^{-1} aumentou em 83% e a densidade de 20 W.g^{-1} reduziu em 55% a variação da coordenada b^* quando comparados ao procedimento feito em ar quente convectivo.

Ambas as coordenadas Δa^* e Δb^* em conjunto com a luminosidade compõem medidas que, identificadas em um plano cartesiano tridimensional, indicam de forma quantitativa a variação de cor entre os produtos secos e o alimento fresco. Uma maior perspectiva dessa variação pôde ser obtida por meio do cálculo da diferença de cor (ΔE), que considera essas três coordenadas e as expressa em um único valor. Por meio do cálculo de ΔE , foi observado que a secagem do queijo em micro-ondas a vácuo na densidade de potência de 20 W.g^{-1} preservou até 10% a mais a cor do produto após a desidratação se comparado às demais técnicas. Em relação à maçã, não houve diferença entre os procedimentos de secagem em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo, de forma que todos apresentaram o mesmo nível de preservação de cor em relação à fruta fresca.

As alterações de cor apresentadas pelos produtos podem estar relacionadas com o modo como ocorre a migração de água no interior do alimento durante a secagem. Isto porque, enquanto no procedimento convectivo a remoção de água inicia nas camadas mais externas e superficiais e se orienta para as camadas mais internas do alimento com o passar do tempo (KHAN, NAGY e KARIM, 2018; KUMAR, MILLAR e KARIM, 2015) – gerando uma distribuição que concentra maior conteúdo de água no interior em relação à superfície –, no procedimento em micro-ondas ocorre o contrário, de forma que o gradiente de pressão de vapor formado no interior do alimento devido à penetração das ondas eletromagnéticas impulsiona a água para que ela se concentre em maior quantidade na superfície (JUNQUEIRA, CORRÊA e ERNESTO, 2017). A partir disso, durante a secagem em micro-ondas, pode ocorrer um resfriamento dos constituintes não aquosos presentes nas regiões superficiais do alimento (*coldspots*), entre os quais os compostos responsáveis pela cor do produto. Isso seria possível devido ao fenômeno de resfriamento evaporativo (WRAY e RAMASWAMY, 2015; BOURAOU, RICHARD e DURANCE, 1994), que faz com que a maior parte da energia fornecida ao alimento seja prioritariamente absorvida e utilizada pela água no processo de evaporação, de maneira que, nas regiões mais "irrigadas" e com alta concentração de conteúdo aquoso, a variação de temperatura não seja suficiente para a perda ou transformação de alguns dos compostos com maior sensibilidade térmica. Como a taxa de migração da água do interior para a superfície do alimento tende a aumentar com a maior disponibilidade de energia, o uso de potências mais altas pode ter concentrado maior

quantidade de água na superfície, resfriando-a com mais intensidade e fazendo com que o produto obtido apresente menos alterações na cor que no uso de potências mais baixas, como o que foi observado ao avaliar a diferença de cor (ΔE) na secagem do queijo a 8 e 20 W.g⁻¹. Por outro lado, as possíveis deformações sofridas pela maçã na secagem em micro-ondas devido ao efeito *puffing* podem ter dificultado a migração da água durante a secagem, contribuindo para que houvesse uma distribuição não uniforme sobre a superfície da fruta e, conseqüentemente, a presença de pontos quentes (*hotspots*) (VADIVAMBAL e JAYAS, 2007), responsáveis pela maior perda de luminosidade identificada no produto seco.

3.3. Reologia

No que se refere à reologia dos produtos, em geral, a dureza dos alimentos aumentou após a desidratação e foi influenciada pelo procedimento de secagem adotado (Tabela 3.2). Na secagem do queijo, o uso das micro-ondas a vácuo quase triplicou a dureza do produto quando comparado à secagem em ar quente convectivo. Esse acréscimo ocorreu independentemente da densidade de potência empregada, que não apresentou diferença significativa entre si ($P > 0,05$). Quanto à maçã, a secagem em micro-ondas a vácuo a 20 W.g⁻¹ aumentou em cerca de 50% a dureza do produto quando comparado à secagem em ar quente convectivo. Já no uso das micro-ondas a 8 W.g⁻¹, não foi identificada alteração sobre o parâmetro em relação à maçã fresca, provavelmente pelo produto não ter sido desidratado o suficiente para que ocorresse as alterações de textura, como o aumento da dureza e fragilidade do material, devido ao aumento da temperatura de transição vítrea (SINHA e BHARGAV, 2020).

Semelhante ao que ocorreu com a dureza, a secagem do queijo em micro-ondas a vácuo dobrou o valor do parâmetro trabalho em relação ao uso do ar quente convectivo. Na secagem da maçã, a desidratação em micro-ondas a 20 W.g⁻¹ aumentou em até 97%, em média, o valor do parâmetro e a desidratação a 8 W.g⁻¹ apresentou valor similar ao obtido na secagem convectiva. Em ambos os alimentos foi observado aumento do trabalho no produto seco, seja utilizando a técnica de micro-ondas ou convectiva, em relação ao alimento fresco.

O aumento sobre a dureza e o trabalho dos produtos desidratados em relação aos alimentos frescos pode ser o resultado do efeito antiplastificante exercido pela água (SEOW, CHEAH e CHANG, 1999). Com um diâmetro relativamente pequeno se comparado aos demais componentes presentes no alimento, as moléculas de água tendem a ocupar volumes vazios formados na estrutura do produto (espaços intercelulares de células vegetais, por

exemplo), agindo como uma espécie de lubrificante que auxilia a mobilidade e a flexibilidade da estrutura (JOB, 2018). Com a redução do teor e atividade da água do alimento, a mobilidade da estrutura fica comprometida e a maior proximidade dos elementos não aquosos aumenta a força necessária para flexioná-los, tornando a estrutura mais resistente à deformação, dura e frágil.

Tabela 3.2. Análise das propriedades mecânicas do queijo e maçã frescos e submetidos à secagem em ar convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).

Tratamento	Dureza (N)	Trabalho (N.mm)	n° de picos	Fraturabilidade (N)	Gradiente (N.mm ⁻¹)
<i>Queijo</i>					
Fresco	0,293 ± 0,076 ^a	0,448 ± 0,132 ^a	5,050 ± 1,746 ^a	0,293 ± 0,076 ^a	0,089 ± 0,025 ^a
CONV.	2,059 ± 1,246 ^b	1,538 ± 0,800 ^b	6,900 ± 2,809 ^{ab}	1,532 ± 1,061 ^a	3,070 ± 2,104 ^a
MOV 8 W.g ⁻¹	5,589 ± 1,624 ^c	3,081 ± 0,981 ^c	10,550 ± 4,165 ^{bc}	4,872 ± 1,986 ^b	15,369 ± 7,039 ^b
MOV 20 W.g ⁻¹	5,998 ± 1,811 ^c	3,683 ± 1,135 ^c	13,200 ± 6,867 ^c	3,612 ± 1,928 ^b	12,824 ± 4,838 ^b
<i>Maçã</i>					
Fresco	2,033 ± 0,555 ^A	4,458 ± 1,273 ^A	9,200 ± 3,970 ^A	1,913 ± 0,641 ^A	0,822 ± 0,227 ^A
CONV.	7,565 ± 1,794 ^B	25,698 ± 10,233 ^B	11,300 ± 4,406 ^{AB}	6,706 ± 2,592 ^B	2,123 ± 0,774 ^A
MOV 8 W.g ⁻¹	2,954 ± 1,566 ^A	19,707 ± 10,014 ^B	15,900 ± 4,867 ^{BC}	2,404 ± 1,857 ^A	0,878 ± 0,626 ^A
MOV 20 W.g ⁻¹	11,653 ± 5,826 ^C	38,820 ± 23,333 ^C	17,450 ± 9,249 ^C	5,914 ± 5,434 ^B	5,165 ± 3,183 ^B

¹Média ± desvio padrão

²Valores seguidos de letras diferentes e localizados na mesma coluna diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras minúsculas referem-se aos dados do queijo e letras maiúsculas referem-se aos dados da maçã.

Em geral, os parâmetros de dureza e trabalho apresentaram relação com a atividade de água dos produtos. Por meio desta relação, produtos com menor atividade de água tenderam a apresentar maior dureza e trabalho. Uma exceção a este padrão foi a maçã desidratada em micro-ondas a vácuo na densidade de 20 W.g^{-1} , que, apesar de ter apresentado a maior dureza e trabalho entre os procedimentos de secagem utilizados, exibiu atividade de água maior que a fruta desidratada em ar quente convectivo. Esse comportamento pode estar associado à formação de uma crosta sobre a superfície do alimento (fenômeno *case-hardening*) como resultado do aparecimento de pontos quentes (*hotspots*) nas camadas superficiais da maçã (GULATI e DATTA, 2015). Devido às possíveis deformações da estrutura da fruta sofridas durante a secagem a 20 W.g^{-1} , a difusão da água para a superfície pode ter sido reduzida, concentrando água no interior do produto e gerando elevações de temperatura que superaqueceram a superfície (KARUNASENA et al., 2015).

Quanto ao número de picos de força identificados na avaliação reológica, o uso das micro-ondas a vácuo para a secagem da maçã aumentou em até 90% o valor do parâmetro em relação à maçã fresca. Na secagem do queijo, o produto desidratado em micro-ondas a vácuo apresentou, em média, o dobro do número de picos quando comparado ao queijo fresco. Quando a comparação se restringe aos procedimentos de secagem utilizados, o uso das micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} resultou no produto com o maior número de picos de força, apresentando valor 91% maior na desidratação do queijo e 54% maior na desidratação da maçã, ambos em relação ao produto obtido em ar quente convectivo.

Já em relação ao gradiente, o uso das micro-ondas a vácuo aumentou consideravelmente o valor do parâmetro em comparação ao alimento fresco. Na secagem do queijo, essa diferença chegou a duas ordens de magnitude. Quando comparado ao produto obtido em ar quente convectivo, o parâmetro de gradiente apresentou valor até 5 vezes maior no uso das micro-ondas a vácuo (8 W.g^{-1} ou 20 W.g^{-1}) para a secagem do queijo e 2 vezes maior no uso das micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} para a secagem da maçã.

Esses resultados indicam que os produtos obtidos em micro-ondas a vácuo tenderam a apresentar uma menor deformação que os obtidos em ar quente convectivo quando ambos são submetidos a uma força externa de mesma intensidade. Comumente tratado como uma medida de rigidez do material, o gradiente pode fornecer informações sobre a crocância do produto quando interpretado em conjunto com o número de picos de força (NGUYEN et al., 2010; SALVADOR et al., 2009; VARELA et al., 2006). Essa interpretação está ligada à identificação de um padrão em *zigzag* nas curvas de força *versus* deformação do material, caracterizado por alta rigidez e muitos picos de força (CHEN e OPARA, 2013). Considerando

esse padrão, os alimentos desidratados em micro-ondas a vácuo têm, portanto, potencial para apresentar uma textura mais crocante que àqueles desidratados em ar quente convectivo, com destaque no uso das maiores densidades de potência.

Por fim, a desidratação em micro-ondas a vácuo aumentou a fraturabilidade do queijo. Essa variação chegou a até três vezes o valor observado no produto obtido com a secagem em ar quente convectivo, independentemente da densidade de potência empregada. Na secagem da maçã, em contrapartida, não houve diferença quanto à fraturabilidade entre os produtos obtidos com o uso das micro-ondas a vácuo a 20 W.g^{-1} e em ar quente convectivo. Apesar disso, o uso da densidade de potência de 8 W.g^{-1} reduziu em até 2 vezes o valor observado em relação ao ar quente convectivo e teve um valor similar ao aferido na fruta fresca. Esses resultados demonstram que o uso das micro-ondas a vácuo pode levar o alimento a apresentar maior resistência à fratura após seco. Isto ocorre provavelmente devido à maior coesão entre os componentes da estrutura do produto depois da retirada da água. Tal resistência, contudo, depende das condições utilizadas na secagem, como o nível de potência empregada e o tipo de alimento a ser desidratado.

3.4. Aparência do produto

O queijo apresentou encolhimento após a secagem em ar quente convectivo (Fig. 3.3). Nas amostras submetidas à secagem em micro-ondas a vácuo, deformações no produto foram observadas, com o aparecimento de protuberâncias superficiais independentemente da densidade de potência empregada. Essas deformações podem estar relacionadas ao efeito *puffing* ocorrido durante o processo de remoção da água, de maneira que, com o aumento da pressão gerada no interior do alimento durante o aquecimento, pode ter ocorrido a expansão da estrutura do produto, contribuindo para o aumento dos poros e do volume do material.

Quanto à maçã, não houve alterações aparentes entre as frutas desidratadas em ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo.

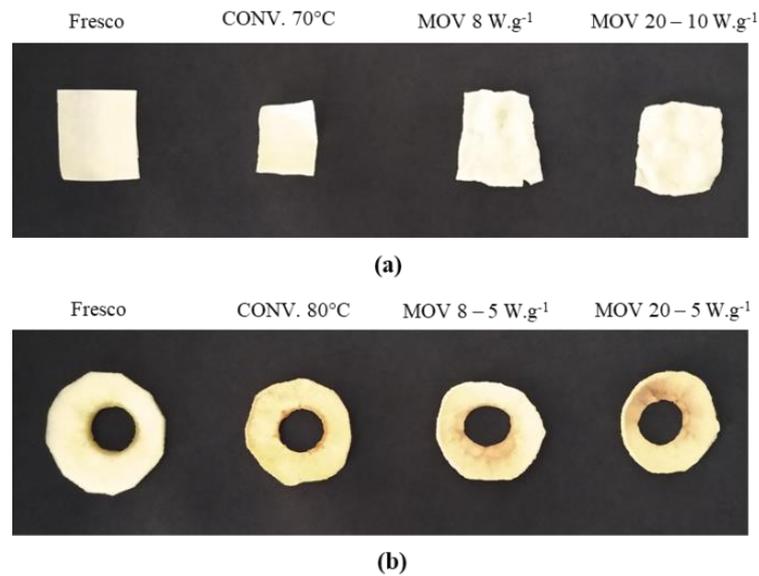


Figura 3.3. Aparência (a) do queijo Coalho e (b) da maçã Fuji frescos e após a secagem em ar quente convectivo (CONV.) e micro-ondas a vácuo (MOV).

4. Conclusão

- A técnica de secagem influenciou as propriedades físicas do queijo de Coalho e da maçã Fuji. De forma geral, o queijo desidratado em micro-ondas a vácuo apresentou melhores resultados que o desidratado em ar quente convectivo, preservando com maior eficácia a cor natural do queijo e evitando o seu encolhimento.
- Devido às alterações proporcionadas sobre as propriedades reológicas, o potencial de uso das micro-ondas a vácuo na produção de queijo de Coalho desidratado como produto pronto para consumo (*snack*) pode ser explorado em trabalhos futuros, empregando ferramentas de pesquisa com consumidores ou a análise sensorial.
- O uso das micro-ondas a vácuo preservou a cor natural da maçã, em especial no emprego da densidade de potência de 8 W.g⁻¹, no entanto não foi identificado o efeito de expansão de volume, característico do aquecimento por micro-ondas, de forma que a intensidade do efeito de sopro (*puffing*) mostrou-se dependente do tipo e do teor de água inicial do alimento.
- Como sugestão para novos experimentos, o uso de um procedimento em multi-estágio para a secagem da maçã, envolvendo o uso de ar quente convectivo e micro-ondas a vácuo em conjunto, pode ser avaliado. A partir de uma secagem prévia e parcial da

fruta em ar quente convectivo, é possível que haja redução da pressão de vapor d'água gerada no interior do alimento durante o aquecimento por micro-ondas e, conseqüentemente, uma melhoria em aspectos de qualidade do produto.

REFERÊNCIAS

- AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (method 926.12) Arlington: **A.O.A.C.**, 1996, chapter 33. p. 5.
- AVERSA, Maria et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 922-932, 2007.
- BOURAOUI, M.; RICHARD, P.; DURANCE, T. Microwave and convective drying of potato slices. **Journal of Food Process Engineering**, v. 17, n. 3, p. 353-363, 1994.
- BÉTTEGA, R. et al. Comparison of carrot (*Daucus carota*) drying in microwave and in vacuum microwave. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 403-412, 2014.
- BONDARUK, Joanna; MARKOWSKI, Marek; BŁASZCZAK, Wioletta. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 2, p. 306-312, 2007.
- CHEN, Lan; OPARA, Umezuruike Linus. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods—A review. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 3, p. 497-507, 2013.
- CUI, Zheng-Wei; XU, Shi-Ying; SUN, Da-Wen. Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. **Drying technology**, v. 21, n. 7, p. 1173-1184, 2003.
- DAK, Manish; PAREEK, N. K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying. **Journal of Food Engineering**, v. 122, p. 117-121, 2014.
- DE BRUIJN, Johannes et al. Effect of vacuum microwave drying on the quality and storage stability of strawberries. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, n. 5, p. 1104-1115, 2016.
- DE LIMA, Marla Mateus et al. Vacuum impregnation and drying of calcium-fortified pineapple snacks. **LWT-Food Science and Technology**, v. 72, p. 501-509, 2016.
- DUAN, Zhen-hua et al. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, n. 4, p. 472-476, 2011.
- FENG, Hao; YIN, Yun; TANG, Juming. Microwave drying of food and agricultural materials: basics and heat and mass transfer modeling. **Food Engineering Reviews**, v. 4, n. 2, p. 89-106, 2012.
- GULATI, Tushar; DATTA, Ashim K. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 119-138, 2015.
- HORUZ, Erhan; MASKAN, Medeni. Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum L.*) arils. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 1, p. 285-293, 2015.
- HOSSAN, Mohammad Robiul; BYUN, DoYoung; DUTTA, Prashanta. Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 23-24, p. 5129-5138, 2010.
- HUANG, Lue-lue; ZHANG, Min. Trends in development of dried vegetable products as snacks. **Drying Technology**, v. 30, n. 5, p. 448-461, 2012.
- IAL. Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: **Instituto Adolfo Lutz**, 2008, 581p.
- JOB, Ubbink. Plasticization and antiplasticization in amorphous food systems. **Current Opinion in Food Science**, v. 21, p. 72-78, 2018.
- JUNQUEIRA, João Renato de Jesus; CORRÊA, Jefferson Luiz Gomes; ERNESTO, Dovel Branquinho. Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed

- vacuum osmodehydrated pumpkin slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, p. e13250, 2017.
- KARUNASENA, H. C. P. et al. Numerical investigation of case hardening of plant tissue during drying and its influence on the cellular-level shrinkage. **Drying Technology**, v. 33, n. 6, p. 713-734, 2015.
- KHAN, Md Imran H.; NAGY, Szilvia Anett; KARIM, M. A. Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. **Food Research International**, v. 105, p. 772-781, 2018.
- KUMAR, Chandan; MILLAR, Graeme J.; KARIM, M. A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. **Drying Technology**, v. 33, n. 2, p. 227-237, 2015.
- LABUZA, T. P. et al. Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid oxidation. *Journal of Food Science*, v. 37, n. 1, p. 154-159, 1972.
- MONTEIRO, Ricardo L. et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 232, p. 1-10, 2018.
- MOSES, J. A. et al. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, v. 6, n. 3, p. 43-55, 2014.
- MOTHIBE, Kebitsamang Joseph et al. Microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying of apple cubes. **Drying Technology**, v. 32, n. 15, p. 1762-1768, 2014.
- NAWIRSKA, Agnieszka et al. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 1, p. 14-20, 2009.
- NGUYEN, Loc T. et al. Evaluating the impact of thermal and pressure treatment in preserving textural quality of selected foods. **LWT-Food Science and Technology**, v. 43, n. 3, p. 525-534, 2010.
- PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. **Biosystems Engineering**, v. 156, p. 108-119, 2017.
- SALVADOR, A. et al. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. **LWT-Food Science and Technology**, v. 42, n. 3, p. 763-767, 2009.
- SCHULZE, Beate; HUBBERMANN, Eva Maria; SCHWARZ, Karin. Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. **LWT-Food Science and Technology**, v. 57, n. 1, p. 426-433, 2014.
- SEOW, C. C.; CHEAH, P. B.; CHANG, Y. P. Antiplasticization by water in reduced-moisture food systems. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 4, p. 576-581, 1999.
- SINHA, Ankita; BHARGAV, Atul. Effect of state transition, drying kinetics and moisture content on Young's modulus variation during thermal drying of hygroscopic food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 279, p. 109957, 2020.
- TIAN, Yuting et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms. **Food Chemistry**, v. 197, p. 714-722, 2016.
- VADIVAMBAL, R.; JAYAS, D. S. Changes in quality of microwave-treated agricultural products—a review. **Biosystems engineering**, v. 98, n. 1, p. 1-16, 2007.
- VARELA, P. et al. Crispness assessment of roasted almonds by an integrated approach to texture description: texture, acoustics, sensory and structure. **Journal of Chemometrics: A Journal of the Chemometrics Society**, v. 20, n. 6-7, p. 311-320, 2006.
- VILLALOBOS-DELGADO, Luz H. et al. Natural antimicrobial agents to improve foods shelf life. In: **Food Quality and Shelf Life**. Academic Press, 2019. p. 125-157.

WOJDYŁO, Aneta et al. Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 3, p. 829-841, 2014.

WRAY, Derek; RAMASWAMY, Hosahalli S. Novel concepts in microwave drying of foods. **Drying Technology**, v. 33, n. 7, p. 769-783, 2015.

ZIELINSKA, Magdalena; SADOWSKI, Piotr; BŁASZCZAK, Wioletta. Combined hot air convective drying and microwave-vacuum drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.): Drying kinetics and quality characteristics. **Drying Technology**, v. 34, n. 6, p. 665-684, 2016.

ZIELINSKA, Magdalena; ZIELINSKA, Danuta; MARKOWSKI, Marek. The effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, color and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 3, p. 585-602, 2018.