



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

Ana Paula Filippin

Otimização da secagem convectiva intermitente com foco na redução de consumo de energia e melhoria da qualidade - aplicação a beterrabas vermelhas

São José do Rio Preto
2022

Ana Paula Filippin

Otimização da secagem convectiva intermitente com foco na redução de consumo de energia e melhoria da qualidade - aplicação a beterrabas vermelhas

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciências de Alimentos junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro
Coorientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São José do Rio Preto
2022

F483o Filippin, Ana Paula

 Otimização da secagem convectiva intermitente com foco na redução de consumo de energia e melhoria da qualidade - aplicação a beterrabas vermelhas / Ana Paula Filippin.

-- São José do Rio Preto, 2022

 154 f. : il., tabs., fotos

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

 Orientadora: Maria Aparecida Mauro

 Coorientador: Fabio Bentes Freire

 1. Simulação numérica. 2. Economia de energia. 3. Encolhimento. 4. Secagem em dois estágios. 5. Betalaínas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Ana Paula Filippin

Otimização da secagem convectiva intermitente com foco na redução de consumo de energia e melhoria da qualidade - aplicação a beterrabas vermelhas

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Maria Aparecida Mauro
UNESP – Campus de São José do Rio Preto
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Carolina Castilho Garcia
UFTPR – Campus de Medianeira

Prof. Dr. Gustavo César Dacanal
USP – Campus de Pirassununga

Prof. Dr. João Claudio Thomeo
UNESP – Campus de São José do Rio Preto

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira
UNESP – Campus de Araraquara

São José do Rio Preto
07 de março de 2022

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela presença constante mesmo na minha ausência.

À minha família pelo apoio e suporte irrestritos.

Ao meu marido, por todas as coisas em todo o tempo.

Às minhas amigas, parceiras de laboratório que levarei para toda a vida, Laís, Mari e Maísa: a vocês tenho muito a agradecer. Muito além das trocas de ideia e da companhia diária por anos, eu agradeço o apoio contínuo, físico e emocional, durante todo esse tempo, principalmente durante minha recuperação. Agradeço também à Kati, Ana Maria e Lili por todo apoio, ensinamentos e amizade. Ao Ezequiel e à Erika pela ajuda com o Matlab.

Às alunas de iniciação científica, Luciana Harumi Pelicho Nichioka e Marieli Santana Ferreira pela dedicação e companhia.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida Mauro, me faltam palavras para agradecer. Obrigada por compartilhar e por me ensinar tantas coisas. Obrigada por sua confiança, por seu carinho, por seu apoio, por seu cuidado, por sua escuta e sobretudo, por sua compreensão. Suas palavras sempre foram fonte de calma, inspiração e equilíbrio.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fábio Bentes Freire pelo apoio e disponibilidade.

À Prof.^a Dr.^a Vânia Regina Nicoletti e ao Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, pelas correções e sugestões no exame de qualificação e por contribuírem tanto com minha formação desde o mestrado.

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia e Tecnologia da UNESP, é muito bom pertencer a esse time.

Aos professores que compõem a banca examinadora desta tese, agradeço por terem aceitado o convite e por suas contribuições valiosas.

Agradeço à Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro à pesquisa, por meio do projeto de pesquisa (Proc. 2017/02808-6).

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

RESUMO

A secagem com intermitência térmica é uma alternativa para minimizar as desvantagens da secagem convencional. Consiste na aplicação de um primeiro estágio de secagem em uma temperatura alta, favorecendo a evaporação enquanto a superfície está saturada de água e, após determinado tempo, reduzi-la (segundo estágio). As vantagens dessa técnica dependem da determinação correta dos parâmetros de processo que devem ser estabelecidos considerando características do material. Este trabalho avalia a secagem convectiva intermitente sob o ponto de vista da economia de energia e da manutenção da qualidade de beterraba vermelha, fonte de pigmentos naturais (betalaínas). Para isso, foram feitas simulações de várias condições intermitentes, considerando 3 temperaturas para o primeiro estágio (80, 90 e 100 °C) e 3 para o segundo (60, 70 e 80 °C). A duração máxima do primeiro estágio foi determinada através da análise da evolução da temperatura das amostras e se baseou no ponto de elevação abrupta da temperatura, que foi 50, 60 e 70 minutos para temperaturas de 100, 90 e 80 °C, respectivamente. Um modelo baseado na Lei de Fick, escrito em coordenadas lagrangeanas, foi integrado numericamente para descrever perfis de umidade durante a secagem de fatias de beterraba. O encolhimento, determinado experimentalmente durante secagens conduzidas em 60, 70, 80, 90 e 100 °C, mostrou-se predominantemente longitudinal, linearmente dependente da umidade e independente da temperatura do ar de secagem. A difusividade mássica efetiva mostrou dependência com a temperatura, descrita pela equação de Arrhenius, e foi superestimada quando a retração foi desprezada, pois este caso considera um caminho de difusão maior do que o real ao longo da secagem. Quando o encolhimento não foi considerado, os perfis de umidade espaciais não corresponderam à realidade, o que gerou desvios perceptíveis entre valores preditos e observados. O modelo matemático que inclui o encolhimento foi validado experimentalmente com secagens contínuas e intermitentes, com parâmetros estatísticos satisfatórios. O consumo de energia, avaliado através de um balanço de entalpia e através de um medidor de grandezas elétricas, foi linearmente dependente do tempo de secagem e variou com a temperatura. Várias configurações de secagem intermitente mostraram economias de energia elétrica relevantes, chegando a 30,5% (90°C/40min+70°C/120min), com redução de 33% de tempo de secagem. A degradação de betalaínas foi avaliada em função do tempo de secagem (60, 70, 80, 90 e 100 °C) sendo que as retenções tiveram decaimento no início das secagens e mantiveram-se estáveis e com valores superiores a 75% durante a maior parte do tempo, exceto quando as amostras atingiram temperaturas superiores a 70 °C. Os valores de retenção obtidos ao final de algumas secagens intermitentes corroboraram os resultados obtidos

na cinética de degradação, levando à conclusão de que configurações que limitam a temperatura das beterrabas a 70 °C durante toda a secagem preservam as características relacionadas à qualidade do produto desidratado, além de reduzir o tempo total de processo. A modelagem e a simulação matemática foram ferramentas imprescindíveis para avaliar a secagem intermitente, que se mostrou uma técnica vantajosa sob o ponto de vista ambiental, econômico e nutricional.

Palavras-chave: Simulação numérica. Economia de energia. Encolhimento. Secagem em dois estágios. Betalaínas

ABSTRACT

Drying with thermal intermittent is an alternative to minimize the disadvantages of conventional drying. It consists of applying a first drying stage at a high temperature, favoring evaporation while the surface is saturated with water and, after a certain time, reducing it (second stage). The advantages of this technique depend on the correct determination of the process parameters that must be established considering material characteristics. This study evaluates intermittent convective drying from the point of view of energy saving and quality maintenance of red beet, source of natural pigments (betalains). For this, simulations of several intermittent conditions were performed, considering 3 temperatures for the first stage (80, 90 and 100 °C) and 3 for the second (60, 70 and 80 °C). The maximum duration of the first stage was determined by analyzing the temperature evolution of the samples and was based on the abrupt temperature rise point, which was 50, 60 and 70 minutes for temperatures of 100, 90 and 80 °C, respectively. A model based on Fick's Law, written in Lagrangian coordinates, was numerically integrated to describe moisture profiles during the drying of beetroot slices. Shrinkage, experimentally determined during dryings carried out at 60, 70, 80, 90 and 100 °C, showed to be predominantly longitudinal, linearly dependent on moisture and independent of the air-drying temperature. The effective mass diffusivity showed dependence on temperature, described by the Arrhenius equation, and was overestimated when shrinkage was neglected, as this case considers a diffusion path greater than the real one along the drying process. When shrinkage was not considered, the spatial moisture profiles did not correspond to reality, which generated noticeable deviations between predicted and observed values. The mathematical model that includes the shrinkage was experimentally validated with continuous and intermittent drying, with satisfactory statistical parameters. The energy consumption, evaluated through an enthalpy balance and through an electrical magnitude meter, was linearly dependent on the drying time and varied with temperature. Several intermittent drying configurations showed significant electrical energy savings, reaching 30.5% (90°C/40min+70°C/120min), with a 33% reduction in drying time. Betalains degradation was evaluated as a function of drying time (60, 70, 80, 90 and 100 °C) and retentions had a decay at the beginning of drying and remained stable at and with values greater than 75% during most of the time, except when the samples reached temperatures above 70 °C. The retention values obtained at the end of some intermittent drying corroborated the results obtained in the degradation kinetics, leading to the conclusion that settings that limit the temperature of the beetroots to 70 °C during the entire drying process

preserve the characteristics related to the quality of the dehydrated product, in addition to reducing the total process time. Modeling and mathematical simulation were essential tools to evaluate intermittent drying, which proved to be an advantageous technique from an environmental, economic and nutritional point of view.

Keywords: Numerical modeling. Energy saving. Shrinkage. Two-stage drying. Betalains

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Curva típica de secagem em condições constante, umidade em função do tempo	21
Figura 1.2 – Parâmetros de modelagem matemática de secagem de frutas e hortaliças	29
Figura 1.3 – Estrutura de betacianinas e betaxantinas	34
Figura 1.4 – Fontes de betaláínas. A (<i>Flores e frutos da opuntia (pêra de cacto)</i>), B (flores de amaranto vermelho), C (Beterrabas vermelhas e amarelas), D (Flores primaveras coloridas (<i>Bougainvillea</i>)), E (<i>Pitaya rosa</i>) e F (Acelga-de-talos).	35
Figure 2.1 - Convective tray dryer. (A) - Front view. (B) - Posterior view. (C) Control Panel.	52
Figure 2.2 – (a) Volume ($V \cdot V_0^{-1}$), (b) thickness ($z \cdot z_0^{-1}$), (c) diameter ($d \cdot d_0^{-1}$) of the beetroot slices as a function of the moisture during drying at 60, 70, 80, 90 and 100 °C and coefficients of the linear equations fitted to the experimental data.	60
Figure 2.3 – Beetroot slices exposed to drying at 80 °C.	62
Figure 2.4 – Density of beetroot slices as a function of moisture content during drying at 60, 70, 80, 90 and 100 °C.	63
Figure 2.5 – Experimental (Exp) and estimated (Calc) values for the moisture ratio ($X \cdot X_0^{-1}$) as a function of the drying time, considering (S) or neglecting (NS) the shrinkage.....	64
Figure 2.6 – Drying rates as a function of the moisture content of beetroots dried at 60, 70 and 80 °C.	65
Figure 2.7 – Spatial moisture profiles simulated by the models considering (S) (Figures (a) and (b)) and neglecting the shrinkage (NS) (Figures (c) and (d)) during drying conducted at 70 °C. X_m and $X_{1/2}$ refer to the moisture (dry basis) at the central point of the slice and the average moisture, respectively. L_t is the slice thickness at drying time t	66
Figura 3.1 – Secadores convectivos de bandeja.	84
Figura 3.2 - Câmara de secagem do secador convectivo com a posição das fatias de beterraba durante o monitoramento da temperatura da superfície por termopares.	85
Figura 3.3 – Configurações de secagens intermitentes e contínuas.	88
Figura 3.4 – Diagrama esquemático do secador. (a) inversor de frequência; (b) disjuntor geral e acionadores das resistências; (c) controlador de temperatura; (p) PT 100; (H) higrômetro; (L) sensor de temperatura acoplado ao controlador.	91
Figura 3.5 – Evolução da temperatura superficial de fatias de beterraba expostas à secagem conduzidas a 80, 90 e 100 °C.....	93

Figura 3.6 – (a) Difusividades efetivas do primeiro estágio de secagem intermitente em função de diferentes umidades finais do primeiro estágio (X_1^t) obtidas para diversas durações de secagens (t).	94
Figura 3.7 – (a) Difusividades do segundo estágio de secagem intermitente em função das diversas umidades iniciais do segundo estágio (X_2^0). (b), (c) e (d) Curvas de secagem experimentais (Exp.) e calculadas (Calc.) pelo modelo (Equação 3.5) com os valores de difusividades apresentados na Figura 3.4(a), para diferentes umidades iniciais do segundo estágio de secagem ($M = X_2^0 / X_1^0$).	95
Figura 3.8 – Consumos de energia medidos através da análise de grandezas elétricas (E.A.) e calculados pelo balanço de entalpia (E.B) em função do tempo de secagem.....	96
Figura 3.9 – Curvas simuladas de secagens intermitentes e contínuas.	99
Figura 3.10 – Consumo específicos de energia de secagens contínuas e intermitentes, determinados pelo analisador de energia e pelo balanço de entalpia.	101
Figura 3.11 – Economias de energia (%) de secagens intermitentes.....	102
Figura 3.12 – Curvas de secagens intermitentes experimentais (Exp.) e simuladas (Sim.). ..	104
Figura 3.13 – Consumos de energia experimentais (Exp.) e simulados (Sim.) medidos através do analisador de energia (a) e calculados a partir do balanço de entalpia (b).....	106
Figura 4.1 – Teor de sólidos solúveis em função da umidade (em base seca) de beterrabas <i>in natura</i>	125
Figura 4.2 – Retenção (%) de betacianinas e betaxantinas em função do tempo de secagem em secagens conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C.....	126
Figura 4.3 – Temperatura média superficial de fatias de beterraba vermelha em função do tempo de secagem.....	127
Figura 4.4 – Diferença de cor (ΔE) de amostras expostas à secagem intermitente (SI) e contínua (SC).....	132
Figura 4.5 – Retenções médias (%) de betacianinas e betaxantinas em secagens intermitentes e secagens contínuas.	133

LISTA DE TABELAS

Table 2.1 – Statistical parameters of adjustment of the models with (S) and without shrinkage (NS) to the experimental data.	67
Table 2.2 – Adjusted values of effective diffusivity ($m^2 \cdot s^{-1}$) with (S) and without shrinkage (NS).	68
Table 2.3 - Effective diffusion coefficients, activation energy and drying conditions of beetroot drying studies found in the literature.	69
Tabela 3.1 – Entrada de dados para simulação de secagens intermitentes e contínuas.	89
Tabela 3.2 – Coeficientes angulares (a) e lineares (b) da Equação 3.22 ajustada aos dados experimentais de consumo de energia a partir do analisador de energia (E.A.) e do balanço de entalpia (E.B.).	97
Tabela 3.3 – D_{eff} utilizados nas simulações das secagens intermitentes (calculados através das Equações 10 e 11) e respectivos indicadores estatísticos de ajuste entre dados simulados e observados.	105
Tabela 3.4 – Indicadores estatísticos das simulações de consumo de energia através de equações obtidas pelo analisador de energia (E.A.) e pelo balanço de entalpia (E.B.).	106
Tabela 3.5 – Consumos específicos de energia simulados e experimentais.	107
Tabela 4.1 – Parâmetros de cor de beterrabas <i>in natura</i> e secas e valores normalizados em relação à cor inicial.	131

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante do modelo de Henderson (adimensional)
a_w	Atividade de água
Abs	Absorbância
b	Constante do modelo de Henderson (adimensional)
Bet	Conteúdo de betalaínas ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ amostra seca)
C	Razão de umidade (adimensional)
D_{eff}	Coefficiente de difusão efetivo da água ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
e	Consumo de energia do motor (kWh)
\dot{E}	Taxa de secagem ($\text{kg} \text{ água} \cdot \text{s}^{-1}$)
H	Entalpia ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ar seco).
\vec{j}	Fluxo mássico difusivo ($\text{kg} \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
I	Corrente elétrica (A)
imp	Absorção de luz das impurezas
L	Comprimento característico (m)
m	Massa (kg)
\dot{m}	Taxa de ar seco ($\text{kg} \text{ ar seco} \cdot \text{s}^{-1}$)
N	Número de observações ou resíduos
P	Potência (kW)
R	Constante dos gases ideais ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Ret	Retenção (%)
S	Coefficiente de contração volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
s^\bullet	Coefficiente de encolhimento local ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
T	Temperatura (K)
t	Tempo (s)
U	Voltagem (V)
V	Volume (m^3)
\vec{v}	Velocidade global das espécies ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
\vec{V}_k	Velocidade das espécies k (w, s) ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
x	Absorção de luz corrigida de betanina

X	Umidade em base seca ($\text{kg water} \cdot \text{kg}^{-1}$ sólidos secos)
y	Absorção de luz de corrigida de vulgaxantina-I
Y	Umidade absoluta ($\text{kg vapor} \cdot \text{kg ar seco}^{-1}$)
z	Coordenada Euleriana (m)

Sobrescritos

0	Inicial
f	Final
s	Sólidos como referência
<i>Calc</i>	Calculado/predito
<i>Exp</i>	Experimental

Subscritos

bt	Beterraba
k	Substâncias (w, s)
<i>Nat</i>	Natura
s	Sólidos
w	Água
<i>tol</i>	Tolueno
1	Primeiro estágio de secagem intermitente
2	Segundo estágio de secagem intermitente
c	Secagem contínua

Símbolos gregos

ζ	Coordenada Lagrangeana ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)
η	Rendimento do motor (0 a 1)
$\cos \varphi$	Fator de potência (-1 a 1)
ρ	Concentração mássica ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ρ_{bt}	Densidade da beterraba ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
v	Volume úmido (m^3 de mistura $\cdot \text{kg ar seco}^{-1}$)
ω	Fração mássica das espécies k (w, s) ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	16
OBJETIVOS GERAIS	19
1. CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
1.1. Secagem	20
1.1.1. Etapas do processo de secagem	20
1.2. Secagem e o consumo de energia.....	21
1.3. Secagem intermitente	24
1.4. Modelagem matemática	26
1.5. Encolhimento	30
1.6. Beterraba.....	32
1.7. Betalaínas	33
1.7.1. Produção e aplicação industrial	36
REFERÊNCIAS	37
2. CAPÍTULO 2 – SIMPLIFIED DRYING MODEL FOR HIGHLY SHRINKABLE FOODS: A CASE STUDY ON RED BEETROOT DRYING.....	49
2.1. INTRODUCTION	49
2.2. METHODOLOGY	51
2.2.1. Drying experiments	51
2.2.2. Shrinkage analysis	53
2.2.3. Mathematical modeling	54
2.2.4. Drying rates	58
2.3. RESULTS AND DISCUSSION.....	59
2.3.1. Shrinkage analysis	59
2.3.2. Drying kinetics	63
2.3.3. Evaluation of effective diffusion coefficients	68
2.4. CONCLUSIONS.....	70
REFERENCES	71
APPENDIX 2.A - Mathematical model development	75
3. CAPÍTULO 3 – SECAGEM INTERMITENTE DE BETERRABA VERMELHA: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONSUMO	80
3.1. INTRODUÇÃO	80
3.2. OBJETIVOS	82
3.2.1. Geral	82
3.2.2. Específicos.....	82
3.3. MATERIAIS E MÉTODOS	82

3.3.1. Ensaio experimentais	82
3.3.2. Análise da evolução da temperatura superficial	84
3.3.3. Modelo matemático	85
3.3.4. Simulação de secagens intermitentes	88
3.3.5. Consumo de energia	90
3.3.6. Balanços de entalpia	90
3.3.7. Consumo de energia do motor	92
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
3.4.1. Dados utilizados para simulação	92
3.4.2. Secagens intermitentes e contínuas: cinética e consumo de energia	98
3.4.3. Economia de energia	102
3.4.4. Validação experimental	103
3.5. CONCLUSÃO	107
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE 3A – Isotermas de dessorção de beterraba	111
APÊNDICE 3B – Condições do ar de secagem	112
APÊNDICE 3C – Avaliação do critério de parada	113
APÊNDICE 3D – Durações de secagens intermitentes e contínuas simuladas com CP ≤ 5%	115
4. CAPÍTULO 4 – RETENÇÃO DE BETALAÍNAS DURANTE SECAGEM CONVECTIVA E EFEITOS DA INTERMITÊNCIA TÉRMICA	118
4.1. INTRODUÇÃO	118
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	121
4.2.1. Ensaio de secagem convectiva	121
4.2.2. Cinética de retenção de betalaínas	122
4.2.3. Metodologia analítica	122
4.2.4. Extração das betalaínas	123
4.2.5. Quantificação das betalaínas	123
4.2.6. Cor	124
4.2.7. Análise estatística	124
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	124
4.3.1. Cinética de degradação de betalaínas	124
4.3.2. Secagens intermitentes	130
4.4. CONCLUSÃO	135
REFERÊNCIAS	135
APÊNDICE 4A – Revisão bibliográfica de metodologias de extração e quantificação de betalaínas	140
CONCLUSÕES GERAIS	152
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	153

INTRODUÇÃO GERAL

A secagem convectiva de alimentos com ar aquecido é amplamente utilizada devido à sua relativa simplicidade. Entretanto, em função de sua facilidade de uso, esse processo é aplicado de maneira empírica, o que pode resultar em baixa qualidade do produto acabado e em gastos excessivos e desnecessários de energia. O gasto energético de operações de secagem e seus impactos na emissão de poluentes têm sido uma preocupação constante dos pesquisadores da área. Considerando o aumento da demanda energética mundial associado aos meios de produção de energia que são, em sua maioria, não renováveis, o que se observa é um panorama energético e ambiental preocupante. Muitos secadores industriais são mal projetados ou operam em condições inapropriadas, portanto, pode haver margem para alterar as condições de secagem e reduzir o consumo energético. Com base em fundamentos físico-matemáticos, modelagens e simulações numéricas é possível determinar as melhores condições de processo. Além disso, a busca por maneiras de aumentar a eficiência da secagem e reduzir o seu consumo de energia deve ser intensificada e, com esse objetivo, este trabalho aborda a secagem com intermitência térmica. Essa técnica consiste em aplicar uma temperatura alta no estágio inicial da secagem, favorecendo a evaporação enquanto a superfície do produto ainda está saturada ou parcialmente saturada de água. Após determinado tempo, a temperatura do ar de secagem é reduzida para que não cause danos excessivos aos parâmetros de qualidade do produto. Resultados positivos vêm sendo relatados quanto ao uso da intermitência térmica em relação ao aumento de taxas de secagem e economia de energia, além de manter a qualidade do produto quando comparado ao processo contínuo. No entanto, se as condições de processo, principalmente de temperatura e duração do primeiro estágio, forem determinadas arbitrariamente, o resultado pode não ser vantajoso, ocasionando superaquecimento do produto e/ou aumento do consumo de energia em relação à secagem convencional. Portanto, para determinar as condições de secagem apropriadas, é necessário um estudo detalhado da cinética de secagem, que pode ser feito através da determinação de um modelo matemático eficiente na previsão de perfis temporais e espaciais de umidade num sólido que sofre encolhimento da matriz durante a secagem. Além disso, comportamentos específicos do material a ser seco, como evolução da temperatura do produto, encolhimento e cinética de degradação de compostos de interesse, devem ser avaliados em função das condições em que são submetidos durante a secagem. Por fim, o consumo energético, tanto para aquecimento como para insuflamento do ar, também deve ser considerado.

O objeto de estudo deste trabalho é a beterraba vermelha (*Beta vulgaris*), uma raiz tuberosa altamente nutritiva, rica em vitaminas e minerais e uma importante fonte de pigmentos naturais que pertencem à classe das betalaínas. Esses pigmentos são divididos em dois grupos, as betacianinas (coloração vermelha) e as betaxantinas (coloração amarela). Na beterraba, a principal betalaína presente é a betanina, que junto com outros pigmentos em quantidades menores, é comercializada para uso como corante alimentício (EEC E162). No grupo das betaxantinas, a principal é a vulgoxantina I. A produção mundial desse corante natural é alta e é normalmente comercializada na forma de pó ou de extrato concentrado. A principal forma de produção do pó de beterraba é por secagem por atomização, no entanto, devido seu alto teor de açúcares, a desidratação do suco de beterraba em atomizador requer que seja previamente fermentado ou então adicionado de agentes carreadores. Nesse sentido, a secagem convectiva pode ser uma alternativa simples e de menor custo para a fabricação de pequenos pedaços desidratados, que podem ser uma opção saudável para petiscos, ou para produção de pó, obtido da moagem dos pedaços desidratados, que pode ser incorporado a outros alimentos, como produtos lácteos ou de panificação, aumentando suas propriedades sensoriais e nutricionais.

Tendo em vista que a secagem intermitente é uma alternativa para minimizar as desvantagens da secagem convectiva convencional, a proposta deste trabalho foi a investigação de condições de processo que otimizem a secagem intermitente, aplicada a beterrabas vermelhas, em relação ao aumento da eficiência do processo e à redução do consumo de energia, assegurando a qualidade sensorial e nutricional do alimento. Para isso, foram realizadas simulações de várias condições de secagem intermitentes e contínuas através da solução numérica de modelo baseado na segunda lei de Fick, escrito em coordenadas Lagrangeanas para incluir o efeito do encolhimento. Os limites de temperatura e tempo estudados foram pré-estabelecidos de acordo com experimentos. Foram investigadas a dependência do encolhimento com o conteúdo e umidade em várias temperaturas de secagem e a sua influência na determinação de difusividades efetivas; a degradação de betalaínas em função do tempo de secagem de beterrabas durante todas as condições de secagem e o efeito da intermitência térmica sobre a retenção de betalaínas e de cor em beterrabas desidratadas.

Esta tese está dividida em 4 capítulos:

O Capítulo 1 traz uma revisão da literatura científica sobre os assuntos investigados nesta pesquisa.

No Capítulo 2, é proposto um modelo teórico para prever perfis espaciais e temporais de umidade durante a secagem convectiva de beterraba vermelha,. O modelo foi escrito considerando coordenadas móveis para incluir o encolhimento das fatias de beterraba. É

apresentada uma avaliação detalhada do encolhimento em função da umidade e da temperatura, e seu efeito sobre os perfis simulados e sobre a determinação da difusividade efetiva também é discutido.

O Capítulo 3 descreve a investigação de várias condições de aplicação da intermitência térmica, buscando otimizá-la em termos de eficiência do processo e economia de energia. Para isso, foram feitas simulações de secagens intermitentes em 47 configurações diferentes (com temperatura e duração do primeiro estágio e temperatura do segundo estágio variadas) com base no modelo matemático abordado no Capítulo 2, aplicado à secagem intermitente. Também são feitas análises energéticas das diversas condições de secagem com base em modelos empíricos determinados tanto a partir de medições de consumo por analisador de grandezas elétricas quanto de valores calculados pelos balanços de entalpia.

Por fim, o Capítulo 4 aborda o estudo da cinética de degradação de betalaínas (betacianinas e betaxantinas) ao longo de secagens contínuas de beterraba vermelha conduzidas em várias temperaturas (60, 70, 80, 90 e 100 °C). Também são avaliadas quatro configurações de secagem com intermitência térmica. Os dados de retenção de betalaínas e de cor resultantes de secagens intermitentes e contínuas são comparados para avaliação do efeito da intermitência térmica na qualidade de beterrabas desidratadas.

OBJETIVOS GERAIS

Objetivo geral

Propõe-se investigar condições operacionais de secagem intermitente de beterrabas através de modelagem e simulação numérica do processo, com o objetivo de minimizar o consumo de energia e maximizar a retenção de betalaínas.

Objetivos específicos

- Avaliar o encolhimento de fatias de beterraba em função do teor de água e da temperatura do ar em secagens contínuas conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C;
- Determinar perfis de temperatura de fatias de beterraba submetidas a diversas temperaturas de secagem;
- Avaliar a eficiência do modelo matemático que considera encolhimento e a eficiência de sua resolução numérica para descrever as secagens contínuas;
- Avaliar o consumo de energia do secador durante secagens contínuas com base em balanços de entalpia e em medidas de consumo de energia elétrica e determinar modelos empíricos de consumo de energia em função do tempo de secagem, para cada temperatura;
- Simular secagens intermitentes em diversas configurações de tempo e de temperatura e avaliar o consumo energético em cada configuração;
- Avaliar os efeitos da temperatura e do tempo de secagem sobre a retenção de betalaínas;
- Avaliar a influência da intermitência térmica na retenção de betalaínas e na cor de fatias de beterraba desidratadas;
- Determinar as melhores condições de secagem convectiva de beterraba considerando o consumo energético, a retenção de cor e a retenção de betalaínas.

1. CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Secagem

A secagem é uma operação unitária antiga que consiste na remoção de água na forma de vapor pelo emprego de calor. No caso da indústria de alimentos, a secagem é uma das principais técnicas de conservação utilizadas e desempenha papel importante na cadeia produtiva de vegetais e no processo de fabricação de grande parte de alimentos processados que requerem secagem ou que utilizam matérias primas desidratadas em suas composições (DEFRAEYE, 2014).

Sabe-se que frutas e hortaliças contêm elevados teores de água, o que as torna facilmente degradáveis após a colheita. Nesse sentido, a redução significativa da concentração de água ocasionada pela secagem confere aos alimentos maior estabilidade devido à redução da atividade de água e conseqüente inibição do crescimento microbiano e minimização de reações químicas e bioquímicas durante o armazenamento (MUJUMDAR; LAW, 2010).

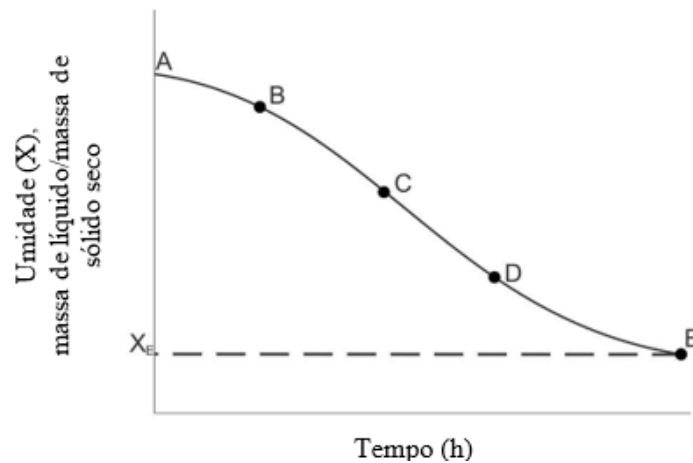
A secagem por convecção, principal método de secagem empregado na indústria de alimentos, utiliza ar quente no processo de remoção de água, que ocorre através da transferência de calor e de massa. São dois processos fundamentais que ocorrem simultaneamente: transferência de calor para evaporar o líquido, em que o calor flui do ar de secagem para a superfície do sólido e daí para seu interior; transferência de massa, em que a água, líquida ou vapor, movimenta-se de zonas de alta umidade (no interior dos sólidos) para zonas de umidades inferiores (superfície), onde é removida sob a forma de vapor (TREYBAL, 1980).

A secagem é determinada por esses dois processos, que, por sua vez, dependem de alguns fatores. Os principais fatores externos envolvidos no processo de secagem são temperatura, umidade e velocidade do ar. Além disso, as taxas de secagem também dependem de fatores internos, como geometria, forma, espessura e estrutura do sólido (CASTRO et al., 2018).

1.1.1. Etapas do processo de secagem

Se a temperatura e a umidade relativa do meio secante forem constantes, a secagem de um sólido úmido tende a ter sempre um mesmo tipo de comportamento, que pode ser descrito pela Figura 1.1.

Figura 1.1 – Curva típica de secagem em condições constante, umidade em função do tempo



Fonte: FOUST et al., 2008

Após o primeiro contato do sólido com o meio secante, existirá um período de adaptação, onde a sua temperatura se ajustará às condições do secador, o que é ilustrado pelo segmento AB da curva. No ponto B, se a secagem apresentar um período em regime permanente, ela apresentará taxa constante de secagem e a temperatura da superfície do sólido será igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. Nesse período, descrito pelo segmento BC, as temperaturas do sólido se mantêm estáveis assim como a taxa de secagem, e, portanto, ele é chamado de período de secagem a taxa constante. Durante esse período, a superfície do sólido está saturada de água, e, à medida em que ela evapora da superfície, a água presente no interior do sólido a substitui. Dessa forma, no período de taxa constante, a secagem ocorre como se a massa de líquido evaporasse sem sofrer influência do sólido. No ponto C, quando o sólido atinge a umidade crítica, o teor de água presente é mínimo para suprir a superfície, que, a partir desse ponto, passa a apresentar zonas de insaturação de água. Como consequência, a temperatura do sólido aumenta e a taxa de secagem diminui consideravelmente, o que caracteriza o primeiro período de taxa decrescente (segmento CD). A partir do ponto D (início do segundo período de taxa de secagem decrescente), a superfície está praticamente seca (sem zonas significativas de saturação de água), e os mecanismos de transporte de água são muito lentos em comparação com o início da secagem. No ponto E, a umidade do sólido atinge o equilíbrio, e o processo de secagem se encerra (TREYBAL, 1980; FOUST et al., 2008).

1.2. Secagem e o consumo de energia

Antigamente, os produtos agrícolas eram secos através da secagem natural, realizada pela sua exposição ao sol. É um processo conveniente por ser simples e barato. No entanto, a falta de padronização de produtos, a dificuldade de produção em alta escala, a dependência de

condições ambientais e a susceptibilidade à contaminação fizeram com que novos métodos de secagem fossem desenvolvidos. Hoje em dia, existem vários tipos de secadores operando sob várias configurações, além de várias técnicas de secagem, que são aplicadas conforme o objetivo da secagem e características do produto a ser seco. Alguns exemplos de secadores são: secadores de bandeja, secadores de túnel, secadores de esteira, secadores com bomba de calor, secadores de tambor, secadores rotativos, secadores de leito fluidizado, secadores pneumáticos, secadores por atomização e liofilizadores (FOUST et al., 2008). Além disso, secadores com base em tecnologias emergentes, como ultrassom, micro-ondas, infravermelho e campo elétrico pulsado, têm mostrado bons resultados quanto a eficiência e qualidade do produto final (RADOJČIN et al., 2021).

Atualmente, a secagem tornou-se uma operação bem estabelecida não só na indústria de alimentos, mas também na indústria têxtil, de papel e celulose, de madeira, farmacêutica, entre outras. No entanto, os secadores industriais, na grande maioria secadores convectivos (AGHILINATEGH et al., 2015), fabricados para uma vida útil longa, não foram projetados considerando a realidade energética atual, em que o uso consciente de energia é encorajado, principalmente pelo apelo ambiental, mas também pelo alto custo operacional de um processo que tem alta demanda energética (DEFRAEYE, 2014).

O consumo da secagem pode chegar a representar 25% do consumo total de uma indústria de processamento de alimentos (KUMAR et al., 2014). Como bem apontado por Kaveh et al. (2020), além do alto consumo energético dos secadores, suas emissões de poluentes, diretas (queima de madeira em fornalhas e caldeiras ou queima direta de gás) e indiretas (utilizando energia elétrica), exercem impacto ambiental significativo. Dessa forma, qualquer melhoria na sua eficiência energética trará ganhos importantes em termos econômicos e, principalmente, de sustentabilidade (KUMAR et al., 2014).

Publicações atuais mostram crescente preocupação em avaliar o consumo de energia de diferentes tipos de secagem, a fim de propor tecnologias e/ou métodos de secagem que contribuam com a eficiência do processo e, por consequência, reduzam ou otimizem o gasto energético. Alguns autores avaliam vários métodos de secagem, individuais ou associados, para o mesmo produto, a fim de concluir qual teria maior eficiência energética. Por exemplo, Montevalli et al. (2014) avaliaram o consumo de energia de quatro tecnologias de secagem (individuais e associadas) durante a secagem de camomila, a saber, convecção de ar quente, radiação infravermelha, vácuo e micro-ondas. Os autores concluíram que as maiores eficiências energética, térmica e de secagem e o menor consumo específico de energia foram obtidas em secagem por micro-ondas. A associação da secagem por micro-ondas com ar quente resultou

em redução de eficiência e aumento do consumo específico de energia, e a secagem a vácuo mostrou-se a menos eficiente e com consumo de energia significativo. Kaveh et al. (2020) estudaram o consumo de energia e consequente emissão de gases poluentes, durante secagens híbridas de pistache através da associação de ar aquecido com infravermelho, ar aquecido com micro-ondas, ar aquecido com coletores solares e secagem contínua multi-estágio. Os autores concluíram que as menores emissões de poluentes e os menores consumos ocorreram em alta temperatura de secagem e baixa velocidade de fluxo de ar. A secagem híbrida de ar quente com infravermelho mostrou os menores consumos e a menor emissão de poluentes. Os autores ainda pontuaram benefício em explorar a energia solar (para geração de energia e calor) e usá-la nesses sistemas híbridos. Wang et al. (2018) estudaram a secagem de crisântemo em várias condições de secagem convectiva com ar quente e secagem híbrida de ar quente com micro-ondas. Como parte dos resultados, os autores observaram que o aumento da temperatura do ar elevou as eficiências térmica e energética enquanto o aumento do tempo de micro-ondas diminuiu ambos os valores. De modo geral, os autores concluíram que a secagem híbrida (ar quente – micro-ondas) mostrou maiores eficiências térmica e energética, mantendo um produto desidratado com alto conteúdo de fito químicos e atividade antioxidante. Ownude et al. (2018a) avaliaram a secagem híbrida de batata doce com convecção de ar quente com infravermelho. Os resultados mostraram que o método combinado proporcionou uma maior taxa de secagem com o menor tempo de secagem; como consequência, os autores obtiveram economia significativa, de até 85,59 %. De modo geral, não é possível fazer uma conclusão generalista de qual metodologia de secagem é mais vantajosa pois o consumo energético durante a secagem depende das características físico-químicas do material assim como das condições de processo e ambientais e dos equipamentos utilizados.

Outros autores têm buscado condições de processo que reduzam o gasto energético sem causar alterações na qualidade do produto. Por exemplo, Ownude et al. (2018b) mostraram que o uso da radiação infravermelha de baixa intensidade reduziu o consumo de energia (quando comparado com intensidade maior) e não afetou a qualidade da batata-doce desidratada.

Além desses, ainda se constata que muitos autores vêm estudando a alteração de condições de processo durante a secagem a fim de obter ganhos na qualidade e na eficiência energética. Esse tipo de secagem, cujos parâmetros de processo são alterados ao longo do tempo, é chamada secagem intermitente e será tema do próximo item dessa revisão.

De maneira geral, a quantificação do gasto energético das operações de secagem é predominantemente feita por equações baseadas na energia fornecida pelo ar aquecido (VIEIRA et al, 2007; AGHBASHLO et al., 2008; NAZGHELICHI et al., 2010; MOTEVALI

et al., 2014; DEHGHANNYA et al. 2018; KAVEH et al., 2020). Kaveh et al. (2020) ainda consideraram em seus cálculos as perdas de energia dentro da própria rede elétrica para que pudessem, de fato, avaliar a quantidade real de energia que necessitaria ser produzida para alimentar os secadores. Alguns autores usaram equipamentos de medição de grandezas elétricas (analisadores de energia) para quantificar o consumo de energia durante a secagem (ALIBAS, 2007; MARTYNENKO; ZHENG, 2016; FILIPPIN et al., 2018), o que mostrou ser uma técnica interessante, pois permite analisar as perdas de calor do sistema através da comparação das medidas de consumo com os valores calculados por balanços de massa e energia que consideram a secagem adiabática como hipótese. O consumo de energia do sistema de ventilação foi avaliado por alguns autores através de cálculos usando a potência nominal dos motores (VIEIRA et al, 2007; BEIGI, 2016), no entanto, na maioria dos trabalhos encontrados, o consumo de energia para o insuflamento de ar não foi considerado.

1.3. Secagem intermitente

A secagem de alimentos traz vários benefícios, como aumento da estabilidade e facilidade no manuseio e transporte dos produtos alimentícios. No entanto, a exposição de alimentos a temperaturas altas por longos tempos de secagem pode causar efeitos indesejáveis nas características sensoriais do alimento, o que reduz sua qualidade e, algumas vezes, a aceitabilidade por parte do consumidor. Durante a secagem pode ocorrer degradação de cor, aroma e compostos nutricionais que normalmente são sensíveis à temperatura, assim como alterações indesejáveis na firmeza e na textura do alimento (DEMARCHI et al., 2013)

Além disso, como visto no tópico anterior, a secagem é um processo que tem alta demanda energética. Neste contexto, a secagem intermitente é uma alternativa para redução do consumo de energia e aumento de taxas de secagem (YANG et al., 2013; THOMKAPANICH; SUVARNAKUTA, DEVAHASTIN, 2007; FILIPPIN et al. 2018; DEHGHANNYA et al., 2018; AMADO et al. 2020), e até mesmo redução de danos que afetam alguns parâmetros de qualidade dos alimentos (CHUA et al., 2001; KOWALSKI; PAWLOWSKI, 2011; KOWALSKI et al., 2013, KOWALSKI et al, 2014; SALEH et al., 2020; VAN ENGELAND et al., 2022).

A secagem intermitente é descrita como uma metodologia de secagem na qual os parâmetros de processo são modificados com o tempo. Essas modificações podem ocorrer no fornecimento de calor, na velocidade ou direção do ar de secagem, temperatura, umidade ou até mesmo na pressão (CHUA et al., 2001; KUMAR et al., 2014). Chua et al. (2003), classificam secagens intermitentes de quatro formas:

(a) Secagem intermitente na qual o calor é fornecido intermitentemente, o que é feito através da interrupção do fluxo do ar de secagem. No período em que há interrupção no fornecimento de calor, chamado de período de secagem não ativa por Mujumdar e Law (2010), o material é submetido a um período de “descanso” chamado de têmpera. Nesse período, ocorre a redistribuição da umidade, que migra do interior para a superfície do sólido, favorecendo a evaporação no próximo estágio de secagem e, conseqüentemente, aumentando as taxas de secagem. A maioria dos trabalhos de secagem intermitente encontrados na literatura usam períodos de têmpera, principalmente quando os objetos de estudo são grãos e cereais. No entanto, o uso dessa metodologia de secagem intermitente na secagem de alimentos úmidos é crescente (VON ENGELAND et al., 2022). Destacam-se trabalhos com banana (CHUA et al., 2001), cogumelos (CAO et al., 2004), couve chinesa (YANG et al., 2013), pera (SILVA et al., 2014), cenoura (KOWALSKI et al., 2013; SALEH et al., 2020), lichia (CAO et al., 2020) e rabanete (SINGH et al., 2022);

(b) Secagem intermitente na qual há um período curto de secagem em alta temperatura, em seguida ocorre a interrupção do fornecimento de calor (têmpera), o resfriamento lento das amostras e, então, a secagem é retomada com temperatura mais amena (finalização da secagem);

(c) Secagem intermitente na qual ocorre a inversão no sentido do fluxo de ar por determinado tempo. Essa prática é utilizada para secagem de partículas;

(d) Secagem intermitente na qual a temperatura, umidade, velocidade ou pressão sofrem variações conforme um padrão cíclico especificado.

É válido ressaltar que os métodos apresentados de intermitência podem ser usados individualmente ou em conjunto (MUJUMDAR; LAW, 2010) ou ainda, serem adaptados conforme o objetivo da secagem e a estrutura do material que está sendo seco.

Thomkapanich, Suvarnakuta e Devahastin (2007) usaram variação cíclica de pressão e temperatura na secagem intermitente de bananas e concluíram que a variação cíclica da temperatura proporcionou melhor retenção de vitamina C. Nesse trabalho, as taxas de secagem foram favorecidas na secagem intermitente e, portanto, houve redução nos tempos de secagem. O uso de temperaturas cíclicas também foi relatado na secagem de cenouras (KOWALSKI et al., 2013), na secagem de cerejas (KOWALSKI et al., 2014) e na secagem de batatas, bananas e goiabas (CHUA et al., 2000) e resultou em melhor retenção da cor dos produtos. Chua et al., (2000) ainda afirmam que a seleção adequada da temperatura do ar de secagem intermitente aumentou a retenção de ácido ascórbico das goiabas em 20%, enquanto Kowalski et al. (2013) atribuíram à intermitência a maior retenção de β -caroteno.

A aplicação de diferentes fontes de fornecimento de calor também é uma forma de intermitência (KUMAR et al., 2014). A secagem convectiva combinada com micro-ondas (KUMAR et al., 2018; DEHGHANNYA et al., 2018; SZADZIŃSKA et al., 2019) e infravermelho (ONWUDE et al., 2019; WANG et al., 2019) são exemplos de secagem convectiva assistida por outras tecnologias que aumentam a difusividade da água, acelerando o processo de secagem (KUMAR et al., 2014).

Uma outra metodologia de secagem intermitente é a secagem com intermitência térmica. Nela, a temperatura é alterada durante a secagem, no sentido decrescente, por etapas. No início da secagem, aplica-se uma temperatura alta, que favorece as taxas de evaporação e consequentemente as taxas de secagem. Nesse período, a superfície do material está saturada ou parcialmente saturada de água e, portanto, a temperatura da superfície será próxima da temperatura de bulbo úmido. O período de secagem com temperatura elevada deve ter sua duração determinada por ensaios preliminares, para a superfície atingir temperatura estabelecida de acordo com o objetivo da secagem e características do produto. Após o tempo determinado, a temperatura de secagem deve ser reduzida, a fim de minimizar os danos causados pela temperatura, sendo que esta pode ser mantida até o final do processo ou continuar a ser reduzida, se necessário. Resultados positivos têm sido relatados quanto ao aumento de taxas e eficiência de secagem e, consequente, economia de energia, mantendo a qualidade de maçã (FILIPPIN et al., 2018), mangas (AMADO et al., 2020) e cebola (TAKOUGNADI et al., 2018). No caso da secagem de nozes, além de ganho na eficiência energética, Chen et al. (2020) observaram maior tempo de vida de prateleira para o óleo extraído.

1.4. Modelagem matemática

A modelagem matemática da secagem faz uso de equações para descrever os fenômenos físicos mais relevantes envolvidos nesse processo (WANG; CHEN; MUJUMDAR, 2007). Essa ferramenta é essencial, uma vez que a variabilidade da estrutura e da composição dos vegetais associada a fenômenos de transporte, tornam a secagem uma operação unitária complexa. Um modelo matemático pode, por exemplo, determinar perfis de variáveis que não podem ser medidas experimentalmente, muitas vezes por limitações experimentais e instrumentais. Além disso, modelos matemáticos contribuem para o dimensionamento de secadores assim como para a avaliação de seu desempenho, e permitem o controle e otimização do processo, o que é fundamental para a manutenção da qualidade nutricional e sensorial e segurança alimentar (CASTRO et al., 2018). A ampliação de escala de experimentos laboratoriais também é uma aplicação fundamental da modelagem matemática e das simulações de processo (GOLESTANI

et al., 2013). A importância da modelagem vai além de fornecer previsões de perfis de concentração e temperatura, pois pode extrair detalhes que fornecem novas visões aos pesquisadores sobre o processo estudado (WANG; CHEN; MUJUMDAR, 2007). O uso de simulações baseadas num modelo matemático, sobretudo, é uma técnica que reduz os custos do desenvolvimento de um processo ou equipamento, por diminuir significativamente o consumo de recursos necessários para a realização de testes experimentais.

Muitos modelos matemáticos para secagem convectiva de frutas e hortaliças são propostos na literatura e podem ser classificados em três categorias principais: modelos teóricos, semiteóricos e empíricos. Os modelos empíricos e semiteóricos em geral fornecem bons ajustes, são de fácil resolução e não dependem de fundamentos teóricos. Em contrapartida, oferecem uma visão limitada sobre os mecanismos que ocorrem durante a secagem e acabam por resultar em constantes que agrupam características específicas do experimento e que, portanto, não servirão para secagens conduzidas em condições diferentes daquelas nas quais o modelo foi ajustado. Erbay e Icier (2010) classificam os modelos semiempíricos de acordo com sua derivação: (a) modelos derivados da lei de resfriamento de Newton, como os modelos de Lewis e de Page; (b) derivados da segunda lei de Fick, que são modelos exponenciais de termo único, dois termos e três termos. Como exemplo, tem-se os modelos de Henderson e Pabis e Henderson e Pabis modificado, o modelo logarítmico, o modelo de Midilli e Midilli modificado, dentre outros. Entre os empíricos, Erbay e Icier (2010) citam o modelo de Thompson, modelo de Wang e Singh e modelo de Kaleemullah.

Já os modelos teóricos são baseados na lei geral de transporte que pode ser derivada em leis físicas como a segunda Lei de Fick para transferência de massa, a Lei de Fourier para transferência de calor por condução e a lei de Newton para transferência de quantidade de movimento (CASTRO et al., 2018). Os modelos teóricos são capazes de explicar o comportamento da secagem e podem ser usados em diversas condições de processo, com transporte uni, bi ou tridimensional. No entanto, aproximações e suposições durante a resolução destes modelos podem gerar erros consideráveis (ERBAY; ICIER, 2010).

A resolução dos modelos teóricos pode ser numérica ou analítica. Quando utilizadas as soluções analíticas, são feitas simplificações significativas que podem interferir na predição correta de perfis temporais de secagem (PERRÉ, 2015). Um obstáculo significativo é a dificuldade de considerar o encolhimento. Uma alternativa encontrada foi inserir uma equação que descreve a espessura em função da umidade diretamente na solução já integrada. Bons resultados de ajuste foram encontrados (FILIPPIN et al., 2018; AMADO et al. 2020), embora essa seja uma solução aproximada.

Quando soluções numéricas são utilizadas, é possível considerar a secagem de maneira mais criteriosa. Sabe-se, por exemplo, que a difusão líquida devido a gradientes de concentração de água, na maioria das vezes, é o único mecanismo considerado durante a modelagem da secagem. Como consequência, difusão na superfície dos poros, difusão de água no estado de vapor e capilaridade em alimentos granulados e porosos são negligenciados (INYANG et al., 2018) o que pode ser equivocado em secagens em altas temperaturas, nas quais ocorre vaporização interna (PERRÉ, 2015). Todavia, sublinha-se que quando modelos de um único parâmetro (nesse caso, a difusividade efetiva) são ajustados a dados experimentais, compreende-se que o coeficiente de difusão efetivo descreve e engloba transferência total de umidade interna que consiste em fluxo capilar, difusão líquida, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e outros mecanismos prováveis de transferência de massa (MUGI; CHANDRAMOHAN, 2020).

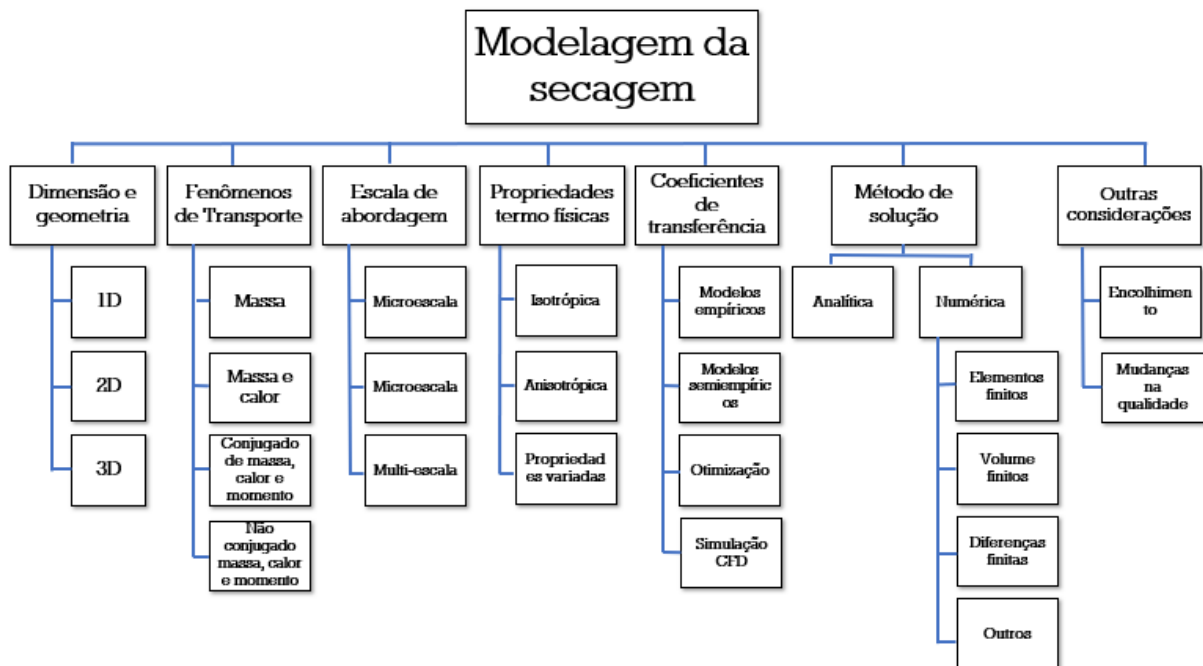
Nos casos em que há presença simultânea de água no estado líquido e vapor dentro sólido, a modelagem da secagem é mais difícil. Este é o caso do trabalho de Curcio et al. (2010), que desenvolveram um modelo multifásico baseado na conservação de água no estado líquido e vapor e consideraram fenômenos acoplados de calor e massa e condições do escoamento do ar em regime turbulento que, segundo os autores, prevê corretamente perfis espaciais e temporais de umidade e temperatura em secagens em que a evaporação dentro do sólido é significativa. No entanto, nesse modelo, os autores não consideraram o encolhimento. Tomando como exemplo o trabalho de Curcio et al. (2010), fenômenos de calor e de movimento também podem ser considerados em modelos com solução numérica, de forma conjugada (LAMNATOU et al. 2010) ou não-conjugada (KAYA; AYDIN; DINCER, 2007), embora muitos trabalhos considerem somente a transferência de massa. A consideração de secagem isotérmica pode ser facilmente aceita quando se considera a secagem em camada fina, que segundo Erbay e Icier (2010), se aplica a secagem de fatias de frutas e hortaliças. Os autores usam, como argumentação, o fato de que o gradiente de temperatura do produto, nessas condições, atinge o equilíbrio mais rapidamente que o gradiente de umidade.

Outra possibilidade da solução numérica, que não é possível aplicar na solução analítica, é considerar o coeficiente de difusão variável em função da umidade ou da temperatura, ou de ambas. De modo geral, o coeficiente de difusão efetivo aumenta com o aumento da temperatura e diminui com a redução de umidade do produto e, quando consideradas essas dependências, o ajuste de modelos de secagem pode apresentar melhores resultados (GOLESTANI et al., 2013). Usualmente, a dependência do coeficiente de difusão efetivo é dada a partir de equações exponenciais do tipo da equação de Arrhenius (BALDÁN et al., 2020).

Para solucionar as equações diferenciais, vários métodos numéricos são reportados em trabalhos de secagem, sejam métodos sem malha como hidrodinâmica de partículas suavizadas (SPH), método de Galerkin livre de elementos (EFG), método de interpolação de ponto (PIM), método de interpolação de ponto radial local (LRPIM) e método de interpolação de ponto limite (BPIM) (MUDIYANSELAGE et al., 2017); ou métodos baseados em malha, nos quais o espaço contínuo é dividido em espaços discretos, como nos métodos de elementos finitos (CURCIO et al., 2010; BON et al., 2007), de volume finito (LAMNATOU et al., 2010) e de diferença finita (KAYA et al., 2007), este último utilizado no presente trabalho.

De modo resumido, vários parâmetros devem ser determinados antes da escolha do modelo mais apropriado para cada caso. Esses parâmetros foram reunidos por Castro et al. (2018) e são mostrados na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Parâmetros de modelagem matemática de secagem de frutas e hortaliças



Fonte: Castro et al. (2018)

Baseados na grande possibilidade de hipóteses a serem assumidas, Castro et al. (2018) revisaram trabalhos de modelagem de secagem da última década a fim de ponderar quais condições têm sido mais consideradas nos modelos. Os autores verificaram que a maioria dos modelos avaliados usou soluções numéricas (mais de 70 %), baseadas em métodos que consideram o domínio dividido em uma grade (métodos de elementos finitos, volume finito e

diferença finita). Soluções não conjugadas e que consideram o acoplamento de transferência de calor e massa foram predominantes. A maior parte dos trabalhos consideraram transporte unidimensional e somente uma pequena parte considerou transporte tridimensional. As propriedades termo físicas foram consideradas constantes na maioria dos trabalhos, assim como a maioria desprezou o encolhimento. Modelos mais complexos são mais rigorosos e resultam em previsões com maior precisão. No entanto, exigem alta demanda computacional e podem necessitar de determinação experimental de várias propriedades do material. Modelos mais simples são úteis em aplicações de engenharia mas, dependendo das simplificações, perdem precisão. Por exemplo, como apontado por Castro et al. (2018), muitos autores encontram dificuldade para incluir o encolhimento no modelo numérico e, por isso, o desprezam. Esta simplificação resulta em perfis de umidade distorcidos, principalmente quando se trata de secagem de alimentos altamente encolhíveis. Neste sentido, para cada caso, é necessária uma ponderação na complexidade do modelo matemático a ser utilizado, avaliando-se quais fenômenos, de fato, são relevantes, a fim de encontrar um modelo robusto e de precisão satisfatória.

1.5. Encolhimento

O encolhimento é um fenômeno físico comumente observado durante processos de desidratação de vegetais. Quando a água é removida do material, ocorre um desequilíbrio entre a pressão do interior e do exterior do sólido, que gera tensões de contração e, conseqüentemente, o encolhimento. As tensões de contração podem causar numerosas quebras nas paredes celulares e resultar na formação de pequenas cavidades no interior no material (LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004). Outras conseqüências possíveis são o colapso do vegetal, mudanças em seu formato e, ocasionalmente, fissuras (quebras ou descontinuidades) no produto (MAYOR; SERENO, 2004; PURLIS et al., 2021). A perda de estrutura, colapso ou ainda, a diminuição drástica da porosidade de vegetais desidratados são problemas para a indústria de alimentos, pois esses processos influenciam a retenção de aromas, a capacidade de reidratação, distribuição final de umidade, propriedades mecânicas e textura de alimentos (LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004).

Dentre os fatores que influenciam o encolhimento estão a umidade do produto (TALLA et al., 2004; JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010), porosidade (KARUNASENA et al., 2015; APRAJEETA et al., 2015), dimensões e geometrias iniciais (MULET et al., 2000), estrutura do alimento (JANGAM; LAW; MUJUMDAR, 2010), condições de secagem (NGUYEN et al., 2018), características das células (GUMETA-CHAVÉS et al., 2011) e temperatura de transição

vítrea (T_g) (KATEKAWA; SILVA, 2007), citada como uma das principais causas da não linearidade do encolhimento com a umidade do produto. Sobre isso, entende-se que se o produto estiver no estado gomoso (acima da T_g), as resistências mecânicas do material são baixas e a matriz sólida tem alta mobilidade, o que leva ao encolhimento ideal (redução do volume é igual ao conteúdo de água perdida). No entanto, com a redução de umidade e aumento da temperatura do produto ocasionados pela secagem, o estado do alimento pode passar de gomoso para vítreo. Neste caso, suas propriedades mecânicas mudam significativamente, há redução na mobilidade da matriz e aumento da rigidez do material. Como resultado, a taxa de encolhimento reduz-se consideravelmente (KATEKAWA; SILVA, 2007; GULATI; DATTA, 2015).

Em alguns estudos de secagem a modelagem é feita desprezando-se o encolhimento, o que facilita a resolução de modelos. No entanto, o encolhimento de alimentos raramente é insignificante (MAYOR; SERENO, 2004), principalmente em frutas e legumes, que são altamente deformáveis (HASSINI et al., 2007). Além disso, vários trabalhos publicados relatam que o encolhimento é um fenômeno fundamental na previsão de perfis de umidade e temperatura durante a secagem e que considerá-lo desprezível pode resultar em perfis de umidade distorcidos e coeficientes de difusão efetivos equivocados (MAYOR; MORENO, 2004; HASSINI et al., 2007; CASTRO et al., 2018).

A maneira mais simples de considerar o encolhimento durante a modelagem de processos de secagem é incluir uma correlação empírica entre o encolhimento e a umidade da amostra (MAYOR; SERENO, 2004), o que vários autores têm feito (HASSINI et al., 2007; MANDIOULI et al., 2011; YUAN et al., 2019). O encolhimento é caracterizado como propriedade volumétrica (NGUYEN et al., 2018), ou seja, considera-se que o encolhimento é igual ao volume de água eliminado pela secagem. Nesse caso, espera-se que o encolhimento tenha relação linear com a umidade. A relação linear foi obtida na secagem de vários alimentos (HATAMIPOUR et al., 2002; TALLA et al., 2004; KATEKAWA; SILVA et al., 2007). No entanto, desvios da linearidade podem ser causados por situações em que a saída de água pode ser impedida, como é o caso de formação de crosta na superfície. Além disso, em alguns tipos de tecido, quando níveis muito baixos de umidade são atingidos, o encolhimento da matriz pode parar, e se houver posterior perda de água, sua porosidade aumentará.

Muitos trabalhos relatam relações não lineares entre o encolhimento e a concentração de água no sólido. Embora modelos empíricos tenham ajustes satisfatórios e fácil resolução, apresentam a desvantagem da aplicabilidade limitada pois são baseados em experimentos conduzidos em produtos e processos específicos. Sob esse argumento, muitos autores abordam o encolhimento de maneira teórica, o que pode ser muito difícil devido à heterogeneidade de

alimentos e alta demanda computacional para resolução numérica. Mahiuddin et al. (2018) fizeram uma vasta revisão na literatura e sintetizaram trabalhos com modelos teóricos que predizem o encolhimento durante secagens de frutas e hortaliças. Segundo os autores, para o desenvolvimento dos modelos, as frutas e hortaliças são aproximadas a materiais com comportamentos elásticos ou hiperelásticos, elastoplásticos ou viscoelásticos. Como conclusão, os autores ressaltam que modelos teóricos ainda esbarram em simplificações e aproximações que podem limitá-los. Sublinha-se a complexidade de se estabelecer um modelo teórico geral capaz de prever o encolhimento durante a secagem de frutas e hortaliças, que são alimentos heterogêneos e que podem ser muito diferentes entre si devido à sua estrutura e composição.

1.6. Beterraba

A beterraba é uma dicotiledônea pertencente à família *Chenopodiaceae* e uma das principais hortaliças cultivadas no Brasil. É uma raiz tuberosa que apresenta grande acúmulo de tecidos de reserva (parênquima) disposto em faixas concêntricas que se alternam com tecidos condutores (xilema e floema) (PRECZENHAK et al., 2018). São consumidas de várias formas, cruas, cozidas, em conserva ou em sucos e shakes.

Pode apresentar-se em três biótipos, a beterraba açucareira (raiz com alto teor de sacarose, utilizada para extração de açúcar), a beterraba forrageira (empregada na alimentação animal) e, por último, a beterraba vermelha, também conhecida como beterraba de mesa, que é o biótipo cultivado no Brasil (TIVELLI et al., 2011).

A beterraba tem sido utilizada como alimento desde 1000 a.C., época em que já era consumida em toda a bacia do mediterrâneo. Os romanos utilizavam as folhas como alimento e as raízes para uso medicinal (PANDITA et al., 2020). Na Europa, a beterraba se tornou comercialmente importante no século 19, após o desenvolvimento da beterraba açucareira (*Beta vulgaris saccharifera*) na Alemanha (NINFALI; ANGELINO, 2013). No Brasil, o cultivo da beterraba se intensificou com a imigração europeia e asiática (GRANGEIRO et al., 2007).

A beterraba contém nas partes aéreas e em suas raízes uma gama de elementos que lhe proporcionam um elevado valor nutritivo. Entre os macronutrientes, destacam-se os carboidratos (frutose, sacarose, glicose e amido), fibra alimentar, lipídeos e proteína (KALETA; GÓRNICKI, 2010). Entre os micronutrientes estão as vitaminas (K, C, A, B1, B2, B3, B5 e B9) e os minerais (potássio, sódio, fósforo, magnésio, cálcio, ferro e zinco) (AKAN; GUNES; ERKAN, 2021). Além disso, a beterraba vermelha contém vários compostos bioativos como flavonoides, saponinas, carotenoides, alcaloides, terpenoides e, principalmente, elevados níveis de betalainas, que são responsáveis por sua coloração (HADIPOUR et al., 2020), e que serão

abordadas no item subsequente. Por estarem presentes em quantidades apreciáveis, esses compostos conferem à beterraba vermelha um elevado poder antioxidante, o que a torna muito benéfica para saúde. Hadipour et al. (2020) reúnem relatos científicos datados da década de 1990 até os dias atuais, que confirmam seus benefícios através de estudos in vivo, incluindo vários estudos em humanos. Destacam-se seus efeitos anti-diabéticos, anti-cancerígeno, anti-obesidade, anti-hipertensivo, antioxidante e anti-inflamatório, assim como sua contribuição na melhoria cognitiva e inibição de reações indesejadas no cérebro que estão envolvidas na progressão da doença de Alzheimer. Somado a isso, ainda se atribui à beterraba os efeitos hepato-protetor, antimicrobiano, anti-enxaqueca, antiviral, antialérgico e antitrombótico (PANDITA et al., 2020).

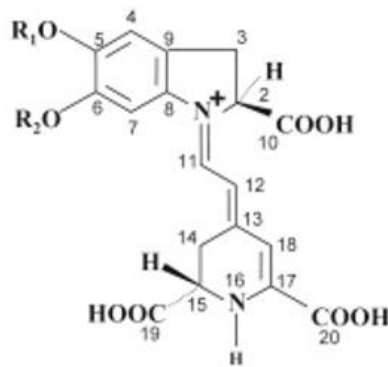
1.7. Betalaínas

As betalaínas são pigmentos nitrogenados hidrossolúveis que se encontram armazenados nos vacúolos celulares e, em maiores concentrações, nos tecidos epidérmicos e subepidérmicos das plantas que sintetizam esses pigmentos (SAWICKI; BĄCZEK; WICZKOWSKI, 2016). Entre suas funções biológicas estão a atuação como atrativos para insetos e pássaros que ajudam na polinização e dispersão de sementes, e a proteção contra patógenos (SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021).

Podem ser divididas em dois grupos estruturais, as betacianinas e as betaxantinas (DELGADO-VARGAS et al., 2001). As betacianinas exibem coloração vermelho-violeta com um espectro de absorbância (λ_{Max}) de 541 ± 9 nm, e as betaxantinas apresentam coloração amarelo-alaranjada com um espectro de absorbância (λ_{Max}) de $471,5 \pm 13,5$ nm (CASTRO-ENRIQUEZ et al., 2020). Dentre as betacianinas, a betanina é a mais comum no reino vegetal (RODRIGUEZ-AMAYA, 2016).

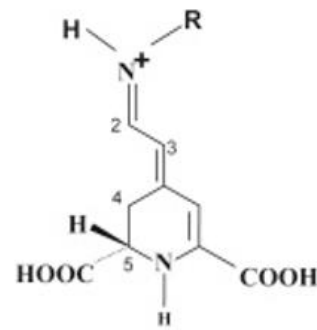
As betalaínas são derivadas de um composto comum, o ácido betalâmico que quando se condensa com derivados de ciclo-DOPA, resulta em betacianinas (vermelhas), e quando reage com aminas ou aminoácidos, resulta em betaxantinas (amarelas) (STINTZING; CARLE, 2004). A estrutura química das betacianinas e betaxantinas é mostrada na Figura 1.3.

Figura 1.3 – Estrutura de betacianinas e betaxantinas



Betacianinas

R₁= glicosil ou derivados
R₂= glicosil, glucuronil, derivados ou H



Betaxantinas

R = aminoácido, amina ou derivados

Fonte: RODRIGUEZ-AMAYA, 2019.

Por muito tempo, a beterraba vermelha foi considerada praticamente a única fonte de betalaínas, no entanto, novas fontes desses pigmentos vêm sendo investigadas (CARREÓN-HIDALGO et al., 2022). Entre elas, estão a pitaia (*Hylocereus polyrhizus*) (STINTZING et al., 2002; HERBACH et al. 2006, PRIATNI; PRADITA, 2015), espinafre indiano (*Basella rubra*) (KUMAR et al., 2015), acelga-de-talo ou acelga suíça colorida (KUGLER; STINTZING; CARLE, 2004), flores ou grãos de amarantos (CAI; SUN; CORKE, 2003) e pera espinhosa ou pera de cacto (*Opuntia spp.*) (OBÓN et al., 2009). A Figura 1.4 mostra algumas das fontes de betalaínas citadas.

Figura 1.4 – Fontes de betalaínas. A (*Flores e frutos da opuntia (pêra de cacto)*), B (flores de amaranto vermelho), C (Beterrabas vermelhas e amarelas), D (Flores primavera coloridas (*Bougainvillea*)), E (*Pitaya rosa*) e F (Acelga-de-talos).



Fonte: GONÇALVES, 2012.

As betalaínas possuem elevada capacidade antioxidante. Gengatharan, Dykes e Choo (2015), em sua revisão, relataram bons resultados sobre a capacidade das betalaínas de eliminar radicais livres. Estudos *in vitro* mostraram que betalaínas podem apresentar capacidade antioxidante maior do que antioxidantes conhecidos como ácido ascórbico, rutina e catequinas (CAI; SUN; CORKE, 2003).

A capacidade antioxidante das betalaínas resulta em benefícios à saúde. Esatbeyoglu et al. (2015) revisaram a literatura e encontraram estudos que atribuem às betalaínas benefícios tais como prevenção de danos ao DNA, desintoxicação de enzimas, atividade reguladora de gene e ação anti-inflamatória. Em outra revisão, Celli e Brooks (2016) indicam os efeitos benéficos como efeito cardioprotetor, anti-inflamatório e antimicrobiano. Além disso, outros estudos apontam atividade quimio-preventiva (ZHANG et al., 2013), neutralização de estresse oxidativo (KUJAWSKA et al., 2009) e ação anticarcinogênica (KUMAR et al., 2015).

A estabilidade das betalaínas, assim como a dos demais corantes naturais, é uma variável importante e sofre influência de vários fatores, tais como pH, umidade, atividade de água, temperatura, luz e oxigênio. Segundo revisões bibliográficas atuais (RODRIGUEZ-AMAYA,

2019; SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021; CARREÓN-HIDALGO et al., 2022), a estabilidade das betalaínas é maior em baixos valores de atividade de água, em pHs entre 3 e 7, em baixas temperaturas, em atmosfera de nitrogênio (ausência ou diminuição de oxigênio) e na ausência de luz. Por outro lado, é menor em faixas de pH < 3 ou > 7, em temperaturas altas, sob exposição à luz e ao oxigênio e na presença de metais. As betalaínas ainda são susceptíveis à degradação enzimática pela ação das enzimas polifenol oxidases, peroxidases e glicosidases. Nesse sentido, para assegurar a qualidade de alimentos pigmentados com esses compostos, condições de tempo e temperatura durante os processos de fabricação de alimentos devem ser cuidadosamente controlados, além das condições de armazenamento, que também devem ser consideradas.

1.7.1. Produção e aplicação industrial

Os corantes sintéticos ganharam popularidade na indústria de alimentos devido ao seu baixo custo de produção, pigmentação eficiente e estabilidade química. No entanto, o interesse dos consumidores por alimentos que sejam pigmentados por corantes naturais tem sido a força motriz para a substituição de corantes artificiais por corantes derivados de fontes naturais (RODRIGUEZ-AMAYA, 2019). Essa forte tendência se dá, devido, principalmente, à preocupação dos consumidores com os malefícios à saúde causados ou relacionados ao uso de corantes sintéticos.

Neste contexto, destaca-se o uso das betalaínas. A beterraba é o único alimento que é usado para produção de corante à base de betalaínas em grande escala (NIRMAL et al., 2021). O corante de beterraba é aprovado para uso industrial na Europa e Estados Unidos (Corante E162) e é comercializado na forma de concentrados, produzidos pela evaporação a vácuo do suco de beterraba até ter teores de sólidos totais de 60 a 65 %, ou na forma de pós, que passaram por processo de secagem por atomização (*spray drying*) ou por liofilização (DELAGO-VARGAS, 2001; JANISZEWSKA; WLODARCZYK, 2013). Segundo Delago-Vargas (2001), nesses produtos, a concentração de pigmentos varia entre 0,3 e 1%, sendo que o restante de sólidos é composto praticamente por açúcares (75 a 80%). No caso da secagem de extrato de beterraba por atomização, é necessário o emprego de carreadores, normalmente dextrinas de alto peso molecular (BAZARIA; KUMAR, 2016), o que é descrito por Nemzer et al. (2011) como uma das principais dificuldades na concentração de betalaínas nos produtos secos finais.

Por serem hidrossolúveis, as betalaínas são facilmente incorporadas em alimentos e seu uso é promissor na indústria de alimentos (AZEREDO, 2009; GENGATHARAN; DYKES; CHOO, 2015; RODRIGUEZ-AMAYA, 2019). Embora as antocianinas sejam os pigmentos

naturais mais utilizados na faixa de cor vermelho a roxo, as betalaínas são mais estáveis em relação ao pH (principalmente entre faixas de 3 a 7) e podem ser utilizadas como corantes em alimentos de baixa acidez, na qual a pigmentação com antocianinas tende a não ser eficiente (STINTZING; CARLE, 2004; CELLI; BROKS, 2016). Nesse sentido, o emprego de betalaínas é vantajoso em muitos tipos de alimentos, como os produtos lácteos, doces, balas, bebidas não alcoólicas e alguns tipos de produtos cárneos (CARREON-HIDALGO et al., 2022).

REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M.; H. KIANMEHR, M.; SAMIMI-AKHIAHANI, H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 2865–2871, 2008. DOI: 0.1016/j.enconman.2008.03.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890408001039>
- AGHILINATEGH, N.; RAFIEE, S.; GHOLIKHANI, A.; HOSSEINPUR, S.; OMID, M.; MOHTASEBI, S. S.; MALEKI, N. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. **Food Science & Nutrition**, v. 3, n. 6, p. 519–526, 2015. DOI:10.1002/fsn3.241. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4708644/>
- ALIBAS, I. Energy Consumption and Colour Characteristics of Nettle Leaves during Microwave, Vacuum and Convective Drying. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 495–502, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751100600417X>
- AMADO, L.R.; SILVA, K.S.; MAURO, M.A.; Drying of mangoes (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) at changeable temperature conditions—Effects on energy consumption and quality of the dehydrated fruit. **Journal of Food Process Engineering**. p.1-13, 2020. DOI: 10.1111/jfpe.13615. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13615>
- APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. **Journal of Food Engineering**, v. 144, p.119–128, 2015. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877414003343#:~:text=Potato%20lices%20were%20subjected%20to,in%20final%20stages%20of%20drying.>
- AKAN, S.; TUNA GUNES, N.; ERKAN, M. Red beetroot: Health benefits, production techniques, and quality maintaining for food industry. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 10, 2021. DOI:10.1111/jfpp.15781. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.15781>
- AZEREDO, H.M.C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. International. **Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p.2365–2376, 2009. DOI:

- 10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x. Disponível em:
<https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>
- BALDÁN, Y.; FRNANDEZ, A.; URRUTIA, A. R.; FABANI, M. P.; RODRIGUEZ, R.; MAZZA, G. Non-isothermal drying of bio-wastes: Kinetic analysis and determination of effective moisture diffusivity. **Journal of Environmental Management**, v. 262, 110348, 2020. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110348. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720302838>
- BAZARIA, B.; KUMAR, P. Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, 2016. DOI:10.1016/j.jssas.2016.09.007. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X16300807>
- BON, J.; ROSSELLÓ, C.; FEMENIA, A.; EIM, V.; SIMAL, S.; BON, J.; ROSSELLÓ, C.; FEMENIA, A.; EIM, V.; SIMAL, S. Mathematical Modeling of Drying Kinetics for Apricots: Influence of the External Resistance to Mass Transfer. **Drying Technology**, v. 25, n.11, p.1829–1835, 2007. DOI:10.1080/07373930701677918. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373930701677918>
- CAI, Y.; SUN, M.; CORKE, H. Antioxidant Activity of Betalains from Plants of the *Amaranthaceae*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 2288-2294, 2003. DOI: 10.1021/jf030045u. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12670172/>
- CAO, X.; ISLAM, M. N.; XU, W.; CHEN, J.; CHITRAKAR, B.; JIA, X., ZHONG. Energy Consumption, Colour, Texture, Antioxidants, Odours, and Taste Qualities of Litchi Fruit Dried by Intermittent Ohmic Heating. **Foods**, v. 9, n. 4, 2020. DOI:10.3390/foods904042. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32260168/>
- CAO, X.; ISLAM, M.N.; XU, W.; CHEN, J.; CHITRAKAR, B.; JIA, X.; LIU, X.; ZHONG, S. Energy Consumption, Colour, Texture, Antioxidants, Odours, and Taste Qualities of Litchi Fruit Dried by Intermittent Ohmic Heating. **Foods**, v. 425, n. 9, 2020. DOI: 10.3390/foods9040425. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32260168/>
- CARREON-HIDALGO, J.P.; FRANCO-VASQUÉZ, D.C.; GOMEZ-LINTINM G.; PÉREZ-FLORES, L.J. Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. **Food Research International**, v. 151, 2022. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110821. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996921007213>
- CASTRO-ENRÍQUEZ, D.D.; MONTAÑO-LEYVA, B.; DEL TORO-SÁNCHEZ, C.L.; ONOFRE, J.E.; CARVAJAL-MILLAN, E.; BURRUEL-IBARRA, S.E.; TAPIA-HERNANDEZ, L.A.; BARRERAS-URBUNA, C.G. RODRIGUES-FELIX, F. Stabilization of betalains by encapsulation—a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, p. 1587–1600, 2020. DOI: 10.1007/s13197-019-04120-x. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-019-04120-x>
- CELLI, G.B.; BROOKS, M.S. Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins — A current review. **Food Research**

International, v. 100, n. 3, 2016. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.08.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996916303623>

CHEN, C.; VENKITASAMY, C.; ZHANG, W.; DENG, L.; MENG, X.; PAN, Z. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. **Journal of Food Engineering**, v. 285, 110105, 2020. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.11010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087742030203X>

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K.; HAWLADER, M.N.A; HO, J. C. Convective drying of agricultural Products. Effect of continuous and stepwise change in drying air temperature. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 1949-1960, 2001. DOI: 10.1081/DRT-100107282. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/DRT-100107282>

CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Intermittent drying of bioproducts—an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, p. 285–295, 2003. DOI:10.1016/S0960-8524(03)00133-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852403001330#:~:text=Intermittent%20drying%20is%20a%20novel,both%20experimental%20and%20modeling%20works.>

CURCIO, S. A Multiphase Model to Analyze Transport Phenomena in Food Drying Processes, **Drying Technology**, v. 28, n. 6, p. 773-785, 2010. DOI: 10.1080/07373937.2010.482697. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2010.482697>

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323–344, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.027. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914006096>

DEGHANNYA, J.; HOSSEINLAR, S.; HESHMATI, M. K. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 45, p. 132-151, 2018. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.10.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856417306720>

DELGADO-VARGAS, F.; JIMÉNEZ, A.R.; PAREDES-LÓPEZ, O. Natural Pigments: Carotenoids, Anthocyanins, and Betalains — Characteristics, Biosynthesis, Processing, and Stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 40, n. 30, 173-289, 2001. DOI: 10.1080/10408690091189257.

DEMARCHI, S. M.; RUIZ, N. A. Q.; CONCELLÓN, A.; GINER, S. A. Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers. *Food and Bioproducts Processing*, v. 91, n. 4, p. 310-318, 2013

ERBAY, Z.; ICIER, F. 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. DOI: 10.1080/10408390802437063. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408390802437063?journalCode=bfns20>

ESATBEYOGLU, T.; WAGNER, A.E.; SCHINI-KERTH, V.B.; RIMBACH, G. Betanin - A food colorant with biological activity. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 59, p. 36–

47, 2015. DOI: 10.1002/mnfr.201400484. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25178819/>

FILIPPIN, A. P.; FILHO, L. M.; FADEL, V.; MAURO, M. A. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. **Drying Technology**, v. 36, n.14, 2018. DOI: 10.1080/07373937.2017.1421549. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2017.1421549>

FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GENGATHARAN, A.; DYKES, G. A.; CHOO, W. S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 64, n. 2, 645–649, 2015. DOI:10.1016/j.lwt.2015.06.052 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815300025>

GOLESTANI, R.; RAISI, A.; AROUJALIAN, A. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient. **Drying technology**, v. 31, p. 40-51, 2013. DOI: 10.1080/07373937.2012.714826. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.714826>

GONÇALVES, L.C.P. Betalaínas: semissíntese, capacidade antirradicalar e aplicação como sondas em sistemas biológicos. Tese (Doutorado), Universidade Federal do ABC, São Paulo, 2012.

GRANGEIRO, L.C; NETO, F.B.; NEGREIROS, M.Z.; CECÍLIO FILHO, A.B. ; CALDAS, A.V.C.C ; COSTA, N.L. Produtividade da beterraba e rúcula em função da época de plantio em monocultivo e consórcio. **Horticultura Brasileira**, vol. 25, p. 577-581, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/pBVSww7QGMtqXPm9nRpSKLn/?lang=pt#:~:text=Quando%20a%20semeadura%20da%20r%C3%BAcula%20foi%20realizada%20na%20mesma%20C3%A9poca,esp%C3%A9cies%2C%20nas%20semeaduras%20mais%20tardias.>

GULATI, T.; DATTA, A. K. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 119–138, 2015. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877415002435>

GUMETA-CHÁVEZ, C.; JORGE CHANONA-PÉREZ, J.J.; MENDOZA-PÉREZ, J. A. TERRÉS-ROJAS, E.; GARIBAY-FEBLES, V.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G.F. Shrinkage and Deformation of *Agave atrovirens* Karw Tissue during Convective Drying: Influence of Structural Arrangements. **Drying Technology**, v. 29, n. 6, p. 612-623, 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2010.514380>

HADIPOUR, E.; TALEGHANI, A.; TAYARANI-NAJARAN, N.; TAYARANI-NAJARAN, Z. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. **Phytotherapy Research**, v. 34, n. 8, 2020. DOI:10.1002/ptr.6653. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ptr.6653>

HASSINI, L.; AZZOUZA, S.; PECZALSKIB, R.; BELGHITHA, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. **Journal of**

Food Engineering, v. 79, n. 1, p. 47-56, 2007. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.025.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877406000720>

HATAMIPOUR, M.S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p. 247–252, 2002. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00082-1.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877402000821>

HERBACH, H.M.; STINTZING, F.C.; CARLE, R. Betalain Stability and Degradation - Structural and Chromatic Aspects. **Journal of Food Science**, v. 71, n. 4, 2006. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x.
Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x>

INYANG, U.; OBOH, I.; ETUK, B. Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 8, p. 27-48, 2018. DOI: 10.4236/aces.2018.82003.
Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=82910>

JANGAM, S.V.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits**. 1 Ed, Singapore, 2010.

JANISZEWSKA, E.; WLODARCZYK, J. Influence of spray drying conditions on beetroot pigments retention after microencapsulation process. **Acta Agrophysica**, v. 20, n. 2, p. 343-356, 2013. Disponível em: <http://www.acta-agrophysica.org/Influence-of-spray-drying-conditions-on-beetroot-pigments-retention-after-microencapsulation,104854,0,2.html>

KALETA, A. GÓRNICKI, K. Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 12, p. 2967–2978, 2010. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.040.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890410002529>

KARUNASENA, H.C.P.; GU, Y.T.; BROWN, R.J.; SENADEERA, W. Numerical investigation of plant tissue porosity and its influence on cellular level shrinkage during drying. **Biosystems engineering**, v. 132, p. 71-87, 2015. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.002.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511015000215>

KATEKAWA, M.E.; SILVA, M.A. On the Influence of Glass Transition on Shrinkage in Convective Drying of Fruits: A Case Study of Banana Drying. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1659-1666, 2007. DOI: 10.1080/07373930701590863. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930701590863>

KAVEH, M.; CHAYJAN, R. A.; TAGHINEZHAD, E.; SHARABIANI, V. R.; MOTEVALI, A. Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: *Pistacia Atlantica*). **Journal of Cleaner Production**, v. 259, n. 20, 120963, 2020. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120963.
Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620310106>

KAYA, A.; AYDIN, O; DINCER, I. Numerical Modeling of Forced-Convection Drying of Cylindrical Moist Objects, Numerical Heat Transfer, Part A: **Applications**, v. 51, n. 9, p. 843-

854, 2007. DOI: 10.1080/10407780601112753. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780601112753>

KOWALSKI, S. J.; PAWLOWSKI, A. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 4, p. 384-390, 2011. DOI: 10.1016/j.cep.2011.02.012 Get rights and content. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270111000511?via%3Dihub>

KOWALSKI, S. J.; SZADZINSKA, J.; LECHTANSKA, J. Non-stationary drying of carrot: Effect on product quality. **Journal of Food Engineering**, v. 118, n. 4, p. 393-399, 2013. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.04.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413002100>

KOWALSKI, S.J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing**, v. 82, p. 65-70, 2014. DOI: 10.1016/j.cep.2014.05.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270114001196>

KUGLER, F.; STINTZING, F. C.; CARLE, R. Identification of Betalains from Petioles of Differently Colored Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. ssp. *cicla* [L.] Alef. Cv. Bright Lights) by High-Performance Liquid Chromatography–Electrospray Ionization Mass Spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 10, p. 2975–2981, 2004. DOI: 10.1021/jf035491w. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf035491w>

KUJAWSKA, M.; IGNATOWICZ, E.; MAREK MURIAS, M.; MAŁGORZATA EWERTOWSKA, M.; KATARZYNA IKOŁAJCZYK, K.; JADWIGA JODYNIS-LIEBERT, J. Protective Effect of Red Beetroot against Carbon Tetrachloride- and *N*-Nitrosodiethylamine-Induced Oxidative Stress in Rats. **Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, p. 2570-2575, 2009. DOI: 10.1021/jf803315d. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19292473/>

KUMAR, C.; JOARDDER, M.U.H.; FARRELL, T. W.; KARIM, M.A. Investigation of intermittent microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model. **Drying Technology**, v. 36, n. 6, p. 736-750, 2018. DOI: 10.1080/07373937.2017.1354874. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2017.1354874?journalCode=ldrt20>

KUMAR, C; KARIN, MA.; JOARDDER M. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48-57, 2014. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413004275>

KUMAR, S.S.; MANOJ, P.; GIRIDHAR, P.; SHRIVASTAVA, R.; BHARADWAJ, M. Fruit extracts of *Basella rubra* that are rich in bioactives and betalains exhibit antioxidant activity and cytotoxicity against human cervical carcinoma cells. **Journal of Functional Foods**, v. 15, p. 509–515, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464615001693>

LAMNATOU, C.; PAPANICOLAOU, E.; BELESSIOTIS, V.; KYRIAKIS, N. Finite-volume modelling of heat and mass transfer during convective drying of porous bodies – Non-conjugate

and conjugate formulations involving the aerodynamic effects. **Renewable Energy**, Vol. 35, n.7, p. 1391–1402.2010. DOI :10.1016/j.renene.2009.11.008

LEWICKI, P.P.; JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 3, p.307-314 ,2004. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2003.10.014 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087740300428X>

MADIOULI, J.; SGHAIER, J.; ORTEU, J.; ROBERT, L.; LECOMTE, D.; SAMMOUDA, H. Non-contact Measurement of the Shrinkage and Calculation of Porosity During the Drying of Banana. **Drying Technology**, v. 29, n. 12, p. 1358-1364, 2011. DOI:10.1080/07373937.2011.561460. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.561460?journalCode=ldrt20>

MARTYNENKO A, ZHENG W. Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. **Journal of Food Engineering**, v.168, p. 215–222, 2016.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v.61, n. 3 , p. 373-386, 2004.

MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; BANAKAR, A.; GHOBADIAN, B.; KHOSHTAGHAZA, M.H. Comparison of energy parameters in various dryers. **Energy Conversion and Management**, vol 87, p. 711-725, 2014. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.012

MUDIYANSELAGE, R; C. M., KARUNASENA, H. C. P., GU, Y. T., GUAN, L., SENADEERA, W. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying – A review. *Journal of Food Engineering*, Vol. 194, p. 24–39, 2017. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.09.00

MUGI, V. R. CHANDRAMOHAN, V. P. Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products – A review. **Solar Energy**, 2021. DOI:10.1016/j.solener.2021.07.04

MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. **Food and Bioprocess Technology**, Vol. 3, n. 6, p. 843–852 2010. DOI:10.1007/s11947-010-0353-1

MULET, A.; GARCIA-REVERTER, J.; BOM, J.; BERNA, A. Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. **Drying Technology**, vol.18, n.6, p.1201-1219, 2000. DOI: 10.1080/07373930008917772

NAZGHELICHI, T.; KIANMEHR, M.H.; AGHBASHLO, M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy*, vol. 35, p. 4679-4684, 2010. DOI:10.1016/j.energy.2010.09.036

NEMZER, B; PIETRZKOWSKI, Z.; SPORNA, A.; STALICA, P.; THRESHER, W.; MICHAŁOWSKI, T.; WYBRANIEC, S. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. **Food Chemistry**, v. 127, p. 42–53, 2011

NGUYEN, T.K.; MONDOR, M.; RATTI, C. Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, v. 230, p. 8-17, 2018. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.02.017

NINFALI, P.; ANGELINO, D. Nutritional and functional potential of *Beta vulgaris* cicla and rubra. *Fitoterapia*, v. 89, p. 188–199, 2013. DOI: 10.1016/j.fitote.2013.06.004

NIRMAL, N. P., MEREDDY, R.; MAQSOOD, S. Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications. *Food Chemistry*, vol. 356, 129611, 2021. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.12961

OBÓN, J. M.; CASTELLAR, M. R.; ALACID, M.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A. Production of a red–purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, v. 90, n. 4, p. 471–479, 2009. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2008.07.01

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; ABDAN, K.; JANIUS, R.; CHEN, G. Experimental studies and mathematical simulation of intermittent infrared and convective drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioprocess Processing*, v. 114, p. 163–174, 2019. DOI: 10.1016/j.fbp.2018.12.006

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; ABDAN, K.; JANIUS, R.; CHEN, G. Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. *Journal of Food Process Engineering*, v. 41, n. 4, e12686, 2018a. DOI:10.1111/jfpe.12686. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12686>

ONWUDE, D.I.; HASHIM, N.; ABDAN, K.; JANIUS, R.; CHEN, G. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption. *Heat and Mass Transfer*, v. 54, p. 2917–2933, 2018b. DOI: 10.1007/s00231-018-2338-y

PANDITA, D.; PANDITA A.; PAMURU R. R.; NAYIK G.A. BEETROOT. IN: NAYIK G.A., GULL A. (eds) *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Springer, Singapore, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-7470-2_3

PERRÉ, P. The Proper Use of Mass Diffusion Equations in Drying Modeling: Introducing the Drying Intensity Number, *Drying Technology*, v. 33, p. 15-16, 1949-1962, DOI: 10.1080/07373937.2015.1076836. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2015.1076836>

PRECZENHAK, A. P.; TESSMER, M. A.; BERNO, N. D.; DE ABREU VIEIRA, A. P.; KLUGE, R. A. Initial stages of minimal processing of red beets result in significant loss of bioactive compounds. *LWT*, v. 96, p. 439–445, 2018. DOI:10.1016/j.lwt.2018.05.063

PRIATNI, S.; PRADITA, A. Stability study of betacyanin extract from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peels. *International Symposium on Applied Chemistry*, v. 16, p. 438-444, 2015. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.076. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876619615002247>

PURLIS, E.; CEVOLI, C.; FABBRI, A. Modelling Volume Change and Deformation in Food Products/Processes: An Overview. **Foods**, v. 10, n. 4, p. 778, 2021. DOI:10.3390/foods10040778. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33916418/>

RADOJČIN, M.; PAVKOV, I.; BURSAĆ KOVAČEVIĆ, D.; PUTNIK, P.; WIKTOR, A.; STAMENKOVIĆ, Z.; GERE, A. Effect of Selected Drying Methods and Emerging Drying Intensification Technologies on the Quality of Dried Fruit: A Review. **Processes**, v. 9, n. 1, p. 132, 2021. DOI:10.3390/pr9010132. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/1/132>

RODRIGUES-AMAYA, D. Natural food pigments and colorants. **Current Opinion in Food Science**, v. 7, p. 20-26, 2016.

RODRIGUEZ-AMAYA, D.B.; **Betalains**. In MELTON, L.; SHAHIDI, L.; VARELIS, P. Encyclopedia of Food Chemistry, v. 1. Elsevier Inc, 2019. p. 35-39

SADOWSKA-BARTOSZ, I.; BARTOSZ, G. Biological Properties and Applications of Betalains. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 2520, 2021. DOI:10.3390/molecules26092520.

SALEH, R.; KULIG, B.; EMILIOZZI, A.; HENSEL, O.; STURM, B. Impact of critical control-point based intermittent drying on drying kinetics and quality of carrot (*Daucus carota* var. laguna). **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 20, 100682, 2020. DOI:10.1016/j.tsep.2020.100682. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S245190492030202X>

SAWICKI, T.; BĄCZEK, N.; WICZKOWSKI, W. Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part. **Journal of Functional Foods**, v. 27, p. 249–261, 2016. DOI:10.1016/j.jff.2016.09.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464616302808>

SILVA, V.; COSTA, J. J.; FIGUEIREDO, A. R.; NUNES, J.; NUNES, C.; RIBEIRO, T. I. B., PEREIRA, B. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. **Journal of Food Engineering**, v. 180, p. 77–86, 2016. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.02.01. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877416300450>

SINGH, A.; SARKAR, J.; SAHOO, R. R. Experimentation and Performance Analysis of Solar-Assisted Heat Pump Dryer for Intermittent Drying of Food Chips. ASME. **J. Journal of Solar Energy Engineering**, v. 144, n. 2, 2022. 021004. DOI:10.1115/1.4052549. Disponível em: <https://www.sciencegate.app/document/10.1115/1.4052549>

STINTZING, F.C.; CARLE, F. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 1, p.19–38, 2004. DOI: 10.1016/j.tifs.2003.07.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224403001638>

STINTZING, F.C.; SCHIEBER, A.; CARLE, R. Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, *Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton & Rose. **Food Chemistry**, v. 77, n. 1, p. 101–106, 2002.

DOI: 10.1016/S0308-8146(01)00374-0. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814601003740>

SZADZIŃSKA, J.; MIERZWA, D.; PAWŁOWSKI, A.; MUSIELAK, G. REIHANEH PASHMINEHAZAR ABDOLREZA KHARAGHANI. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot, **Drying Technology**, v. 38, n. 1-2, 2019. DOI: 10.1080/07373937.2019.1624565. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2019.1624565?journalCode=ldrt20>

TAKOUGNADI, E.; BOROZE, T.E. T.; AZOUMA, O. Y. Development of an intermittent drying process of onion. **Cogent Food & Agriculture**, v. 4, n 1, 2017. DOI:10.1080/23311932.2017.1422225. Disponível em:
[https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2017.1422225#:~:text=Onion%20slices%2C%205%20mm%20thick,24%20dm3%2Fs\).](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2017.1422225#:~:text=Onion%20slices%2C%205%20mm%20thick,24%20dm3%2Fs).)

TALLA, A.; PUIGGALI, J.R.; JOMAA, W.; JANNOT, Y. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. **Journal of Food Engineering**, vol. 64, n. 1, p.103–109, 2004. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2003.09.017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877403003698>

THOMKAPANICH, O.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S. Study of Intermittent Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material. **Drying Technology**, v. 25, n.1, p. 205-223, 2007. DOI: 10.1080/07373930601161146. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930601161146>

THOMKAPANICH, O.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S. Study of Intermittent Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material. **Drying Technology**, v. 25, n. 1, p. 205–223, 2007. DOI:10.1080/07373930601161146. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930601161146>

TIVELLI, S.W.; FACTOR, T.L.; TERAMOTO, J.R.S.; FABRI, E.G.; MORAES, A.R.A.; TRANI, P.E.; MAY, A. Beterraba: do plantio à comercialização. Boletim Técnico IAC, Campinas, n. 210, 2011.

TREYBAL, R.E. **Mass Transfer Operations**. 3th edition. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1980.

VAN ENGELAND, C.; SPREUTELS, L.; LEGROS, R.; HAUT, B. Comprehensive analysis of intermittent drying. A theoretical approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 131, p. 86–101, 2022. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.10.009. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308521001590>

VIEIRA, M. G. A.; ESTRELLA, L.; ROCHA, S. C. S. Energy Efficiency and Drying Kinetics of Recycled Paper Pulp. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1639–1648, 2007. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930701590806>

WANG, Q.; LI, S.; HAN, X.; NI, Y.; ZHAO, D.; HAO, J. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 107, p. 236–242, 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643819302014>

WANG, W.; CHEN, G.; MUJUMDAR A. S. Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research. **Drying Technology**, v. 25, n.4, p.659-668, 2007. DOI: 10.1080/07373930701285936. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930701285936>

WANG, Y.; LI, X.; CHEN, X.; LI, B.; MAO, X.; MIAO, J.. ZHAO, C.; HUANG, L.; GAO, W. Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 129, p. 84–94, 2018. DOI:10.1016/j.cep.2018.03.020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270117306712>

YANG, Z.; ZHU, E.; ZHU, Z.; WANG, J.; LI, S. A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris L.ssp*) seeds. **Food and Bioproducts Processing**, vol. 91, p. 381–388, 2013. DOI: 10.1016/j.fbp.2013.02.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096030851300014X>

YUAN, Y.; TAN, L.; XU, Y.; YUAN, Y.; DONG, J. Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 136, p. 539–548, 2019. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.042. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072917308463>

ZHANG, Q.; PAN, J.; WANG, Y.; LUBET, R.; YOU, M. Beetroot Red (Betanin) Inhibits Vinyl Carbamate- and Benzo(a)pyrene-Induced Lung Tumorigenesis Through Apoptosis. **Molecular Carcinogenesis**, v.52, n. 9, p. 686–691, 2013. DOI: 10.1002/mc.21907. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mc.21907>

Simplified drying model for highly shrinkable foods: a case study on red beetroot drying

ABSTRACT

A simplified model based on Fick's law and written in Lagrangian coordinates in order to consider the shrinkage, has been integrated numerically to describe the drying of beetroot slices. The shrinkage was experimentally determined, and it was predominant along the thickness because of the anisotropic structure of the beetroot tissue. Shrinkage was linearly dependent on moisture and independent of air-drying temperatures (60, 70, 80, 90 e 100 °C). Diffusivity was temperature dependent (represented by the Arrhenius equation) and overestimated when the shrinkage was neglected (can be up to 4.5 times higher). The water concentration profiles over time were simulated and showed that when the shrinkage is not considered, distorted profiles are found. Also, predicted drying curves present noticeable deviations from experimental data. Therefore, shrinkage needs to be considered for a proper understanding of drying and its correct application. The mathematical model with shrinkage was validated experimentally (with dryings conducted at 60,70 and 80 °C in triplicate) with satisfactory statistical parameters ($R^2 \geq 0.998$ and $P\% \leq 23\%$). The model requires only additional shrinkage data which makes it suitable for describing the drying of fruits and vegetables slices.

2. **CAPÍTULO 2 – Simplified drying model for highly shrinkable foods: a case study on red beetroot drying**

2.1. **INTRODUCTION**

Drying is one of the main product preservation techniques in the food industry and therefore plays an important role in the vegetable production chain and in the manufacture of most processed foods. In convection drying, hot air is used to remove water from the food, which, in its liquid or vapor state, moves from areas of high moisture (inside the solids) to areas of lower moisture (surface), where it is removed in the form of vapor.

Convective drying of beetroot into pieces (followed by grinding) is a cheaper alternative for production of beetroot powder (KAPOOR; FENG, 2022), which can be used as a natural pigment in dairy products, sweets, candies, non-alcoholic beverages, and some types of meat products (CELLI; BROKS, 2016). In addition, beet powder in its entire form is a good source of fiber and can be used to enrich other food products such as cookies, pasta, soup mixes, among others. However, to avoid excessive nutritional degradation, the drying process must be known such that can properly be designed and controlled.

There are several models in the literature that are intended to describe the most relevant transport phenomena of drying, and they can be classified into three main groups: theoretical models, based directly on heat and mass transfer equations, with analytical or numerical solutions, semitheoretical models and empirical models (ERTEKIN; FIRST, 2017).

One of the advantages of theoretical models is that they allow the spatial and temporal profiles of water concentration and temperature to be determined, while empirical models describe only the drying kinetics. The semi-theoretical models are based on the diffusion theory, use less calculation time than theoretical model and this can benefit practical applications such as dryer designs and automatic controls for drying processes (ERTEKIN et al., 2017).

Various numerical methods are used in drying studies, where the main approaches are mesh-free methods and grid-based methods. The mesh-free methods have been shown to be an option for complex systems with multiphase interactions, large deformations and multiscale physics (MUDIYANSELAGE et al., 2017). The grid-based numerical methods, in which the continuous space is divided into discrete spaces, have been successfully applied in solving problems in engineering such as drying solid materials that suffer limited deformations (MUDIYANSELAGE et al., 2017, CASTRO et al., 2018). Examples of this are the works of Rani and Tripathy (2020) who modeled green pineapple drying using the finite element method

and Rahman et al. (2007) and Nimnuan and Nabnean (2020) who modeled the ginger drying using the finite difference method.

In addition, models derived under several different hypotheses are available: which consider uni-, bi- or three-dimensional transport phenomena; constant effective diffusion coefficient (TZEMPELIKOS et al., 2015) or time-varying effective diffusion coefficient (GOLESTANI et al., 2013); only mass transfer (BISPO et al., 2013), simultaneous heat and mass transfer (GOLESTANI et al., 2013) and simultaneous heat, mass, and momentum transport (CURCIO, 2010). There is no single universally valid model for all fruits and vegetables, so it is worth analyzing and comparing different approaches to convective drying modeling (CASTRO et al., 2018). Considering the complexity of food drying, mathematically contemplating all simultaneous phenomena may require high computational performance and the need for experimental determination of various thermophysical properties for input data. In this sense, it is valid to evaluate a simplified and sufficiently underpinned approach that results in satisfactory predictions.

An important phenomenon to be considered when modeling the drying is shrinkage, although some authors consider it negligible (NISTOR et al., 2017; ABHISHEK et al., 2020). Neglecting shrinkage in the models can lead to inaccuracies in drying foods with a high moisture content (CASTRO et al., 2018). When water is removed from a material with vegetable tissues, there is an imbalance between the internal and external pressure of the solid, leading to contraction stresses that result in shrinkage (MAYOR; SERENO, 2004). As a consequence, there could be a drastic decrease in the porosity, collapse, shape changes and, occasionally, rupture or discontinuities in the product (PURLIS et al., 2021). Some of the factors that influence shrinkage have already been established, such as the product moisture (ONG; LAW, 2010), porosity (APRAJEETA et al., 2015), initial dimensions and geometries (MULET et al., 2000), structure of the food matrix (ONG; LAW, 2010), glass transition temperature (GULATI; DATTA, 2015) and drying operating conditions (NGUYEN et al., 2018, MAHIUDDIN et al., 2018). Therefore, shrinkage involves characteristics of the drying operation and the food to be dried, such as the circular bands observed in beetroot slices (ARTSCHWAGER, 1926). The behavior of beet shrinkage during convective drying has been little discussed in the literature. There is a report of an empirical study of beet cube shrinkage during convective drying conducted at 60 °C, in a combined drying study (convective and vacuum-microwave methods) (FIGIEL et al., 2010). However, as far as the authors know, studies on the behavior of beet slice shrinkage and the effect of different drying temperatures on it have not been published.

Some authors describe shrinkage through theoretical approaches under the assumption that foods behave like elastic, hyperelastic, viscoelastic or elastoplastic material (MAHIUDDIN et al., 2018), others through empirical approaches, using constant average dimension (TZEMPELIKOS et al., 2015) or correlations between shrinkage and the drying time (APRAJEETA et al., 2015). A simple way to consider shrinkage in drying models can be through an empirical correlation between shrinkage and moisture. This correlation can be linear (HATAMIPOUR; MOWLA, 2003; KATEKAWA et al., 2007) or nonlinear (GULATI; DATTA, 2015, RANI; TRIPATHY, 2020). The advantage of the empirical approach to shrinkage is that it involves a mathematical modeling with low or medium difficulty (regression models, response surface methodology or even more complex methods such as artificial neural networks) and this makes the model easily implementable, which is advantageous for industrial application, especially by companies that do not have access to more sophisticated tools (PURLIS et al., 2021).

However, in general, the material shrinkage makes it difficult to use of standard models as Fick's second law (BRASIELLO et al., 2017), which assumes constant mass density and, thus, overall mass flux null (BIRD et al., 2002). As an alternative to contemplating shrinkage in a fundamental equation, in this article, a theoretical model is developed that considers the overall flux in a volume that shrinks, and it has as a reference a system of moving coordinates (Lagrangean) that follows the movement of the solid (ROQUES et al., 1994). Thus, it is assumed that the reference velocity is based on the shrinkage of the solid, which is determined experimentally. The consideration of moving boundaries simplifies the numerical solution of the model as each nodal point of the matrix (pure solid) is positioned in a time-independent reference.

In this sense, this work proposes a theoretical model with a simplified view but sufficiently underpinned to predict spatial and temporal profiles of moisture during convective drying of red beetroot, which, as far as the authors know, has been little evaluated in this regard. The model considers beetroot shrinkage, which is evaluated at different temperatures; its effect on the simulated profiles and on the effective diffusivity determination is also discussed.

2.2. METHODOLOGY

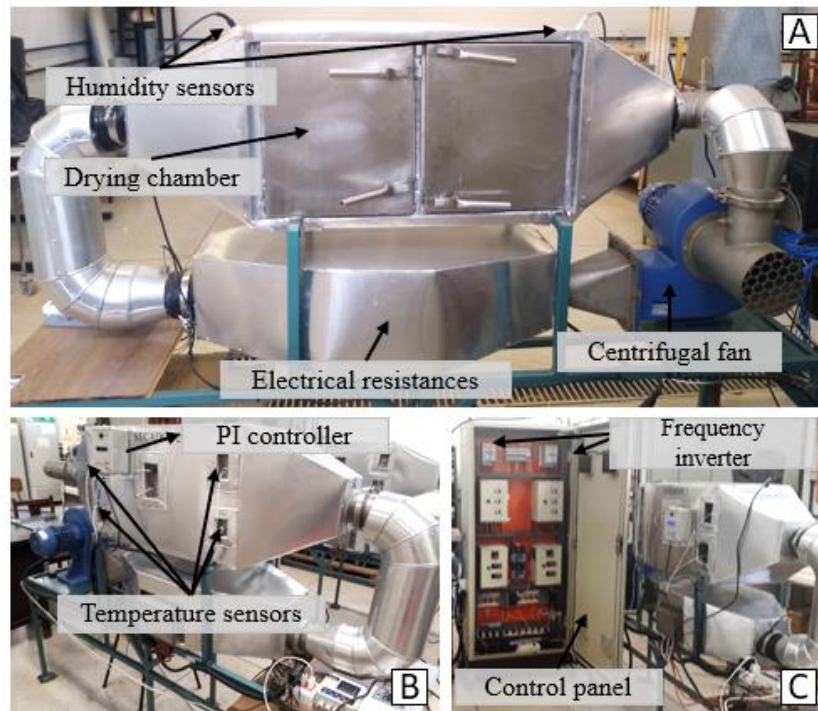
2.2.1. Drying experiments

The cv. Boro red beetroots (*Beta vulgaris*) were washed in running water, sliced with an electric slicer (ECO, São Paulo) (thickness of $(5.13 \pm 0.13) \times 10^{-3}$ m) and molded with a

circular stainless-steel mold with a diameter of $(81.5 \pm 0.05) \times 10^{-3}$ m. Then, the slices were placed between stainless steel screened trays and taken to a dryer that was previously heated to temperatures of 60, 70 and 80 °C, with a constant air velocity equal to $2.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The average initial mass of the beets per drying test was 510 ± 13 g.

The drying experiments were conducted, in triplicate, in a tray dryer with forced convection of heated air through a centrifugal fan (Ibran, Siroco VSI 195, São Paulo, Brazil), with a frequency inverter (WEG, CWF10, Santa Catarina, Brazil) to control the air velocity as shown in Figure 2.1.

Figure 2.1 - Convective tray dryer. (A) - Front view. (B) - Posterior view. (C) Control Panel.



Source: prepared by the author

The dryer was thermally insulated with ceramic fiber and the air was heated by a set of electrical resistances. The drying chamber had a cross sectional area of $13.86 \pm 10^{-2} \text{ m}^2$ and the air flow was directed parallel to both larger surfaces of the samples. The drying chamber had four PT100 temperature sensors to monitor the air-drying temperature and two humidity sensors (ImPac®, DO9861T-R1 and DOHD2717, Italy) connected to the data acquisition system (ImPac®). A PI-type controller maintained the drying air temperature at the setpoint. The drying setup also had a mobile thermohygrometer (ImPac®, IP-747RH, São Paulo, Brazil) to

measure the room temperature and relative humidity and a hot wire anemometer to measure air-drying velocity (Brand ImPac®, model HD403TS, Italy).

To determine the drying kinetics curves, samples were weighed over time on a semi analytical scale (Gehaka, BK 4000, Brazil) until the weight variation was less than 0.5% between two consecutive weighings within 30-minute intervals. After the end of each experiment, some samples continued to dry until they reached equilibrium with the heated air, in other words, until the mass was constant.

The moisture of the fresh and dried samples was determined (in triplicate) by the gravimetric method, in which the samples were placed in a vacuum oven (Tecnal, TE-395, São Paulo, Brazil) at 60 °C and 10 kPa until the mass was constant.

2.2.2. Shrinkage analysis

Shrinkage was assessed through the relationship between the final (V_b^f) and initial (V_b^0) volume of the beetroot slices (m^3), subjected to different drying times, called volumetric contraction coefficient (S):

$$S = V_b^f / V_b^0 \quad (2.1)$$

Samples were evaluated after drying with different durations conducted at 60, 70, 80, 90 and 100 °C. A beetroot was prepared (as topic 2.2.1.); part of the slices was used to determine moisture, volume and density in fresh beetroot. The other part was dried at selected time and temperature conditions, and then, volume and density were determined in duplicate.

The slices were weighed (semi analytical scale Gehaka, BK 4000, São Paulo, Brazil) before and after drying, and the initial and final diameters and thicknesses were measured. For each slice, thicknesses in four different positions and diameters in two directions perpendicular to each other were measured with a manual caliper. After drying, at ambient temperature the slice volume was measured using an adapted pycnometer bottle, as described by Molina Filho et al. (2016), with toluene as the filling fluid. The initial volume of each slice was given by Equation 2.2:

$$V_{bt}^0 = m_b^0 / \rho_{bt}^0 \quad (2.2)$$

in which m_b^0 is the mass of the fresh beetroot slice (kg), and ρ_{bt}^0 is the density of the fresh beetroot ($kg \cdot m^{-3}$). The density of the fresh and dried beetroot slices was given by Equation 2.3:

$$\rho_{bt} = m_{bt} / (V_{bt+tol} - V_{tol}) \quad (2.3)$$

in which m_{bt} is the mass of the sample (kg), V_{bt+tol} is the volume of the sample plus the volume of toluene (m³), and V_{tol} is the volume of toluene (m³). The initial moisture of the beetroots was determined experimentally by gravimetric method (in triplicate), while the final moisture was established through the loss of mass during drying.

2.2.3. Mathematical modeling

It was assumed that beet was a homogeneous and isotropic material and that drying was isothermal. In addition, a binary mass transfer system of species k was adopted, in which the species “ w ” and “ s ” were the liquid water and solid constituents, respectively. Since the species “ w ” can move out of the system while species “ s ” remains always in the system (like a matrix that delimited the system boundaries), the continuity equation can be given by Equation 2.4

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_k \vec{v}_k) = 0 \quad (2.4)$$

in which ρ_k is the mass concentration (kg·m⁻³) of the k species, and \vec{v}_k are the velocities of the k species in a fixed coordinate system.

The diffusive mass flux \vec{j}_w is defined as the molecular transport of water in relation to the global average velocity \vec{v} :

$$\vec{j}_w = \rho_w (\vec{v}_w - \vec{v}) \quad (2.5)$$

in which the mass average velocity is

$$\vec{v} = \omega_w \vec{v}_w + \omega_s \vec{v}_s \quad (2.6)$$

in which ω is the mass fraction of each species, w and s .

The water diffusive flux from Fick's law is given as follows:

$$\vec{j}_w = -\rho D_{eff} \vec{\nabla} \omega_w \quad (2.7)$$

where D_{eff} is the effective diffusion coefficient of water that diffuses through the solid ($m^2 \cdot s^{-1}$), ρ is the total mass concentration ($kg \cdot m^{-3}$) and $\vec{\nabla} \omega_w$ is the gradient of the mass fraction of water.

Due to shrinkage during drying, it is more appropriate to refer to the mass flow of water \vec{j}_w^s with the reference velocity of the solids, \vec{v}_s :

$$\vec{j}_w^s = \rho_w (\vec{v}_w - \vec{v}_s) \quad (2.8)$$

Substituting Equation 2.8 into Equation 2.4 leads to Equation 2.9:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_w \vec{v}_s) = -\vec{\nabla} j_w^s \quad (2.9)$$

However, Fick's law given by Equation 2.7 is valid for a mass average reference velocity frame. Therefore, to relate the diffusive fluxes based on the two reference velocities, \vec{v} and \vec{v}_s , Equations 2.5 and 2.8 are combined, as follows:

$$\vec{j}_w^s = \vec{j}_w / (1 - \omega_w) \quad (2.10)$$

Substituting Equation 2.10 into Equation 2.9 and replacing the flux \vec{j}_w by Fick's law gives Equation 2.11:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_w \vec{v}_s) = -\vec{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \vec{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.11)$$

It is appropriate expressing water content on a dry basis, as:

$$X = \rho_w / \rho_s \quad (2.12)$$

After rearrangements and canceling equation 2.4 for the species "s", Equation 2.11 can be rewritten as follows

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v}_s \vec{\nabla} X \right) = \vec{\nabla} (\rho_s D_{eff} \vec{\nabla} X) \quad (2.13)$$

The drying model goes through a coordinate change described in the next section.

Coordinate change

This study used material coordinates (Lagrangian), which is a moving coordinate system that tracks the shrinkage of the solid matrix (ROQUES et al., 1994). Therefore, the solids velocity will be null.

Given an initial material volume V^0 , the corresponding mass of the solids (s) can be determined by Equation 2.14:

$$m_s = \rho_s^0 V^0 \quad (2.14)$$

in which ρ_s^0 is an initial homogeneous mass concentration of solids.

Since the surface of the volume moves with the solid's velocity, the volume integral provides a constant m_s (Equation 2.15):

$$m_s = \int_{V(t)} \rho_s dV \quad (2.15)$$

The Lagrangian or material coordinates give out any position from the spatial (Eulerian) coordinates (ROQUES et al., 1994). Because the slice is considered to be a planar sheet, the analysis is reduced to unidimensional shrinkage. The one-dimensional conservation of mass with thickness in spatial coordinates (z) is given in material coordinates (ζ), in dimensionless form, by the following equation:

$$d\zeta = \frac{\rho_s dz}{\rho_s^0 L^0} \quad (2.16)$$

in which L^0 is the initial thickness.

Shrinkage

Deformation during drying can be given by a local shrinkage coefficient s^\bullet , as shown in Equation 2.16, for a sufficiently small volume such that ρ_s is constant:

$$s^\bullet = \frac{V^{(t)}}{V^0} = \frac{\rho_s^0}{\rho_s} \quad (2.17)$$

From Equations (2.13), (2.16) and (2.17), with velocity of solids $\vec{v}_{s,\zeta} = 0$, Equation (2.18) is obtained:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{(L^0)^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial X}{(s^*)^2} \frac{\partial X}{\partial \zeta} \right) \quad (2.18)$$

In this work, s^* was determined experimentally from the volumetric contraction coefficient (S , Equation 2.1), assuming negligible variations until the equilibrium state. To integrate equation (2.18) into the overall volume, an equation for the dimensionless thickness variation as a function of the sample moisture was determined, to represent the one-dimensional shrinkage coefficient (s^*) at each position. When the shrinkage is neglected, s^* equals 1.

Defining the moisture ratio (C) as $C = X/X^0$, Equation (2.18) can be rewritten as:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{(L^0)^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{1}{(s^*)^2} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right] \quad (2.19)$$

Detailed development of Equation 2.11 through Equation 2.19 is available in Appendix 2A.

The initial and boundary conditions are presented in Equations 2.20 and 2.21. On the surfaces of the sample, the external resistance was neglected because of the high air-drying velocity.

$$C = C^0 = 1 \quad 0 < \zeta < 1 \text{ at } t=0 \quad (2.20)$$

Boundary condition on the surfaces

$$C = C^{eq} = \frac{X^{eq}}{X^0} \quad \zeta = 0 \text{ and } 1 \quad (2.21)$$

in which X^{eq} is equilibrium moisture ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, d.b.) experimentally determined with samples that remained in the dryer after the end of drying until the mass was constant.

Solving the model

The model was solved by the finite difference method. The spatial derivative was replaced by a central-difference approximation, and the time was discretized by the numerical

integrator *ode45* of MATLAB®. In view of the experimental difficulty of inferring the spatial distribution of the moisture inside the material, the numerical approach was made with the average moisture of the beet slices through the integration of the moisture profile at each moment of the process.

The effective diffusion coefficient was established as the value that provided the best fit between the simulated and experimental drying kinetics. For this purpose, constant increments of 1×10^{-13} in D_{eff} were made until there was no change (on the order of 10^{-4}) in the *RMSE* (root mean square error) values.

The analysis of agreement between the simulations and the experimental results was performed using statistical indices such as the coefficient of determination (R^2), the relative average of the error ($P\%$) (Equation 2.22), and the *RMSE* (Equation 2.23).

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_1^N \left| \frac{C^{Exp} - C^{Calc}}{C^{Exp}} \right| \quad (2.22)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_1^N (C^{Exp} - C^{Calc})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

in which C^{Exp} and C^{Calc} are the dimensionless calculated and experimental moisture, respectively, and N is the number of observations or residues.

The D_{eff} were analyzed using an analysis of variance and Tukey's test at a 5% significance level.

2.2.4. Drying rates

The drying rates were given by Equation 2.24:

$$\dot{E} = \frac{m_s \Delta X}{\Delta t} \quad (2.24)$$

where \dot{E} is the drying rate ($\text{kg water} \cdot \text{s}^{-1}$), m_s is the mass of dry solids of the beetroot (kg dry matter), and $\Delta X / \Delta t$ is the variation in the moisture ($\text{kg water} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dry matter} \cdot \text{s}^{-1}$).

2.3. RESULTS AND DISCUSSION

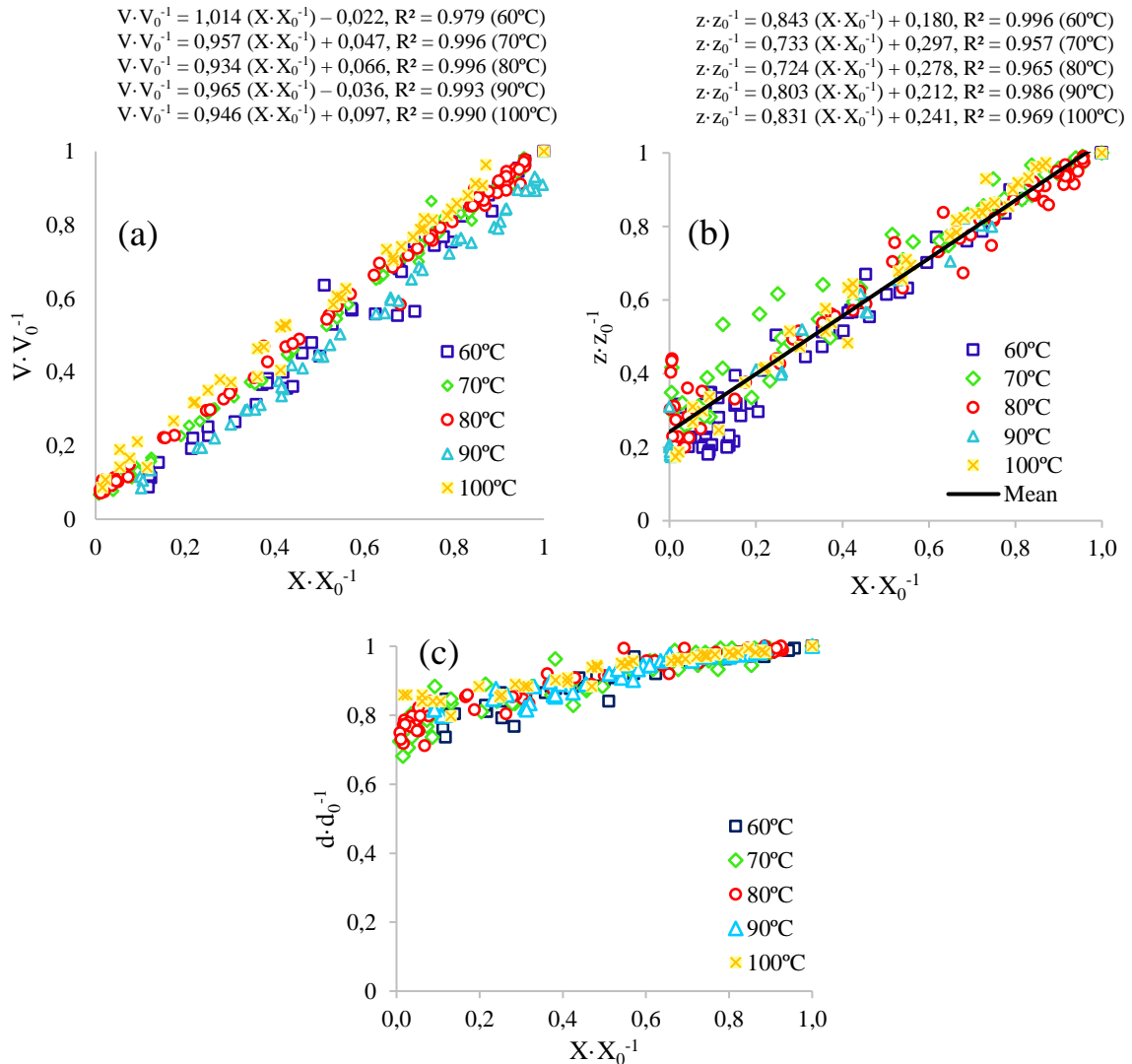
The analysis of shrinkage and drying kinetics, together with the results of both simulation and experiments, is done in this section.

Initially, the results of the shrinkage measurements are presented as a function of the moisture, including a thickness function that was applied in the drying model. After that, experimental results related to drying kinetics are shown, as well as drying curves calculated from the models that both considered or not the shrinkage. Moisture spatial profiles from both considerations were compared. Then, the performance of the model with shrinkage was evaluated, and finally, diffusion coefficients were discussed.

2.3.1. Shrinkage analysis

The shrinkage of the beetroot slices was strongly dependent on the moisture of the samples, as shown in Figure 2.2, which shows the decrease in the volume (Figure 2.2a) and in the thickness (Figure 2.2b) and diameter (Figure 2.2c) as a function of the moisture of the beetroot slices at 60, 70, 80, 90 and 100 °C. The coefficients of the linear equations fitted to the experimental data, as well as the R^2 values, are also shown in Figure 2.2.

Figure 2.2 – (a) Volume ($V \cdot V_0^{-1}$), (b) thickness ($z \cdot z_0^{-1}$), (c) diameter ($d \cdot d_0^{-1}$) of the beetroot slices as a function of the moisture during drying at 60, 70, 80, 90 and 100 °C and coefficients of the linear equations fitted to the experimental data.



Source: prepared by the author

The volume decrease was significant, reaching similar values at all temperatures for moisture close to zero (Figure 2.2a). On average, the volume of the samples decreased to $11.8 \pm 2\%$ of the initial volume. These results agree with those found in other studies on drying by hot air, whose volume decreased to values below 20 % (KHALLOUFI et al., 2012). Nguyen et al. (2018) showed that the volume of carrots and potatoes can decrease up to approximately 12 % and 20 %, respectively of the initial volume during drying. According to Souraki and Mowla (2008), the final volume of the green bean cylinders was 10 to 20 % of the initial volume, depending on the drying temperature. In the drying of carrots, the reduction was even greater, with the final volumes less than 10 % of the initial volumes (ZIELINSKA et al., 2007).

Shrinkage was greater along the thickness (longitudinal shrinkage, Figure 2.1b) than the diameter (Figure 1c), with an average reduction of approximately 75% and a linear dependence at all drying temperatures ($0.95 < R^2 < 0.99$). The reduction in the volume of the samples had a linear behavior ($0.97 < R^2 < 0.99$), as found by other authors (MULET et al., 2000; KATEKAWA et al., 2007; APRAJEETA et al., 2015, NGUYEN et al., 2018); therefore, the linearity of the volume with the moisture shows that the shrinkage of the beet slices approaches the so-called ideal shrinkage, in which the volume reduction is equal to the volume of water removed by drying (NGUYEN et al., 2018).

During the process, the surface dries quickly, which can make it stiff due to the transition to the glassy state. However, the linearity shown in Figure 2.1a leads us to believe that the samples remained in the rubbery state during drying (KATEKAWA et al., 2007), because if there was a glass transition of the material, there would certainly be a significant deviation from the linear behavior (GULATI; DATTA, 2015). According to Purlis et al. (2021), while the material is in the rubbery state, the free shrinkage assumption (ideal shrinkage) can be considered valid. Furthermore, data from the literature indicate glass transition temperatures (T_g) close to 40 °C in beet powder at low moisture ($\pm 3.15\%$) (KAPOOR; FENG, 2022), which corroborates this hypothesis, since at higher moisture, that is, during the entire drying process, the T_g value would be even lower due to the plasticizing effect of water.

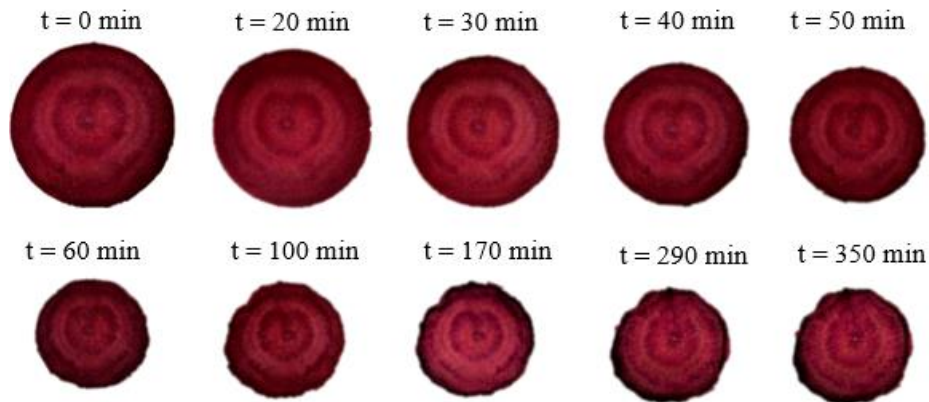
There was little variation in the angular coefficients of the shrinkage lines, with an average of 0.786 ± 0.05 . The angular coefficients did not show a clear trend regarding the temperature; therefore, the temperature was not a key factor in shrinking the beet slices. In this sense, it can be thought that all the heat supplied to the sample is used to remove the water and not to change the solid thermodynamic state. If part of the energy were used for a 2nd order transition (glass transition), the temperature could have an influence. Other authors have also shown temperature independence in shrinkage for the operating conditions of drying vegetables (HATAMIPOUR; MOWLA, 2003; SOURAKI; MOWLA, 2008).

Longitudinal shrinkage can be related to the geometry of the slice, the thickness of which was much less than the diameter ($d/z = 16.3$). This relationship shows the effect of the difference in area available for heat and mass transfer, which is much smaller on the side than on the faces of coin-shaped samples. Thus, during drying, there is an internal region with cells that are more hydrated than the peripheral regions, which keeps the shape along that axis more unchanged (MULET et al., 2000).

It is worthwhile to mention that the beet slices did not deform significantly from their original shape (Figure 2.3). This result is partly due to the beet's rigid structure with concentric

circular bands (with alternating conductive tissues, xylem and phloem, presented in the narrow bands, and reserve tissue, parenchyma, presented in the wide bands (ARTSCHWAGER, 1926)) which has possibly played an important role in maintaining the initial circular shape of the sample.

Figure 2.3 – Beetroot slices exposed to drying at 80 °C.

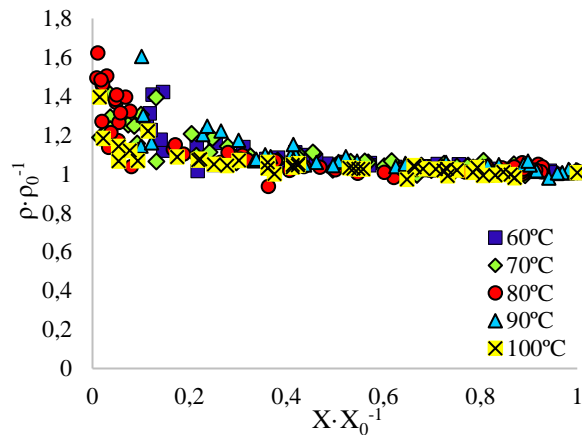


Source: prepared by the author

Since the shrinkage almost did not depend on the temperature and was greater in thickness, to account for it in the mathematical model, the solid line in Figure 2.2b was adopted from the mean of the angular and linear coefficients of all the equations. The adjustment of the mean shrinkage equation to the experimental data was satisfactory, with $0.957 < R^2 < 0.986$ and $6\% < P < 11.8\%$.

Figure 2.4 shows the density of the beetroot as a function of the moisture. At all temperatures, there was an increase in the density of the samples, which was linear and almost constant until the moisture ratio ($X \cdot X_0^{-1}$) was approximately 0.4 and was drastically thereafter.

Figure 2.4 – Density of beetroot slices as a function of moisture content during drying at 60, 70, 80, 90 and 100 °C.



Source: prepared by the author

At the beginning of drying, the mass of solids is small in relation to the mass of water, and thus, the density of the beetroot is close to the density of pure water at ambient temperature (25 °C, 997 kg·m⁻³). The concentration of the solids increases as the moisture decreases; thus, as the density of the solids is greater than that of water, an increase in the density of the sample is expected, especially in materials with low porosity.

During drying, the intracellular spaces, initially filled with water, are replaced by air or are compressed by tissue retraction (APRAJEETA et al., 2015). Considering the linear shrinkage of the beetroot and its low porosity (VALLESPIR et al., 2018) it is not expected the spaces to be filled with air, but rather the tissue to retract. In addition, according to Khalloufi et al. (2012), the linear behavior of shrinkage as a function of the moisture content (Figure 2.2) indicates an insignificant development of porosity (NISTOR et al., 2017) during drying.

No effects of air-drying temperature on sample density were observed.

2.3.2. Drying kinetics

The triplicate results of drying at 60, 70 and 80 °C, totaling 9 tests, are reported according to the temperature followed by the number of replicates.

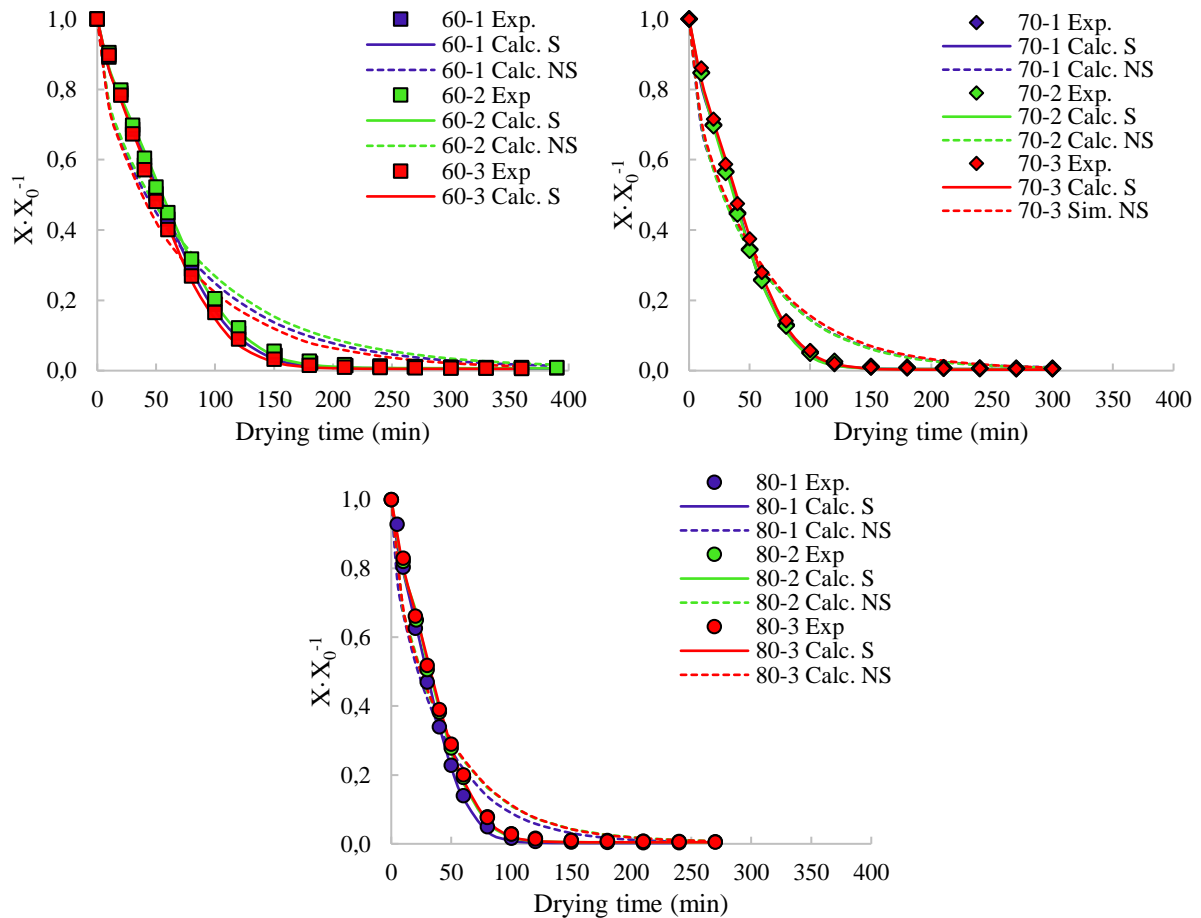
2.3.2.1. Drying curves and rates

The average moisture of the fresh samples was 0.897 ± 0.018 kg·kg⁻¹ (w.b.) with a variation coefficient of 2.0 %. The moisture of the dried samples varied within a narrow range

(from 0.0366 ± 0.001 to 0.0613 ± 0.0006), and similar to the equilibrium moisture (from 0.0214 ± 0.0005 to 0.0507 ± 0.0024), dependence on the drying temperature was minimal.

Figure 2.5 shows the experimental values of drying at 60, 70 and 80 °C, together with the calculated values through the mathematical model, considering or neglecting the shrinkage.

Figure 2.5 – Experimental (Exp) and estimated (Calc) values for the moisture ratio ($X \cdot X_0^{-1}$) as a function of the drying time, considering (S) or neglecting (NS) the shrinkage.



* The markers represent the experimental points; the dashed lines represent the curves predicted by the (NS) model and the solid lines represent the curves predicted by the (S) model

Source: prepared by the author

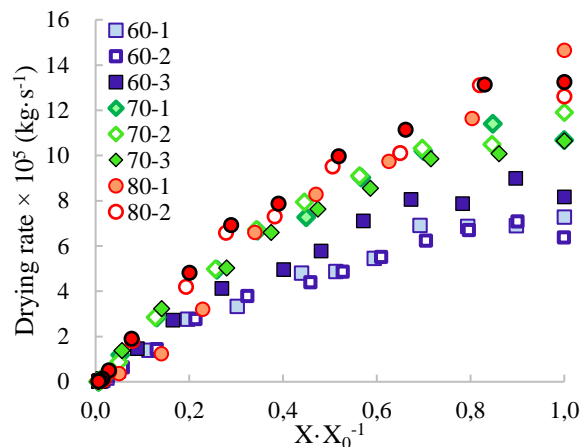
The drying curves shown in Figure 2.5 are typical for drying food with a long period of decreasing rate in which the internal diffusion strongly controls the process. There was a rapid and significant decrease in the excess water within a short initial time interval (the higher the temperature was, the shorter that interval was), and then, the drying rate decreased.

In Figure 2.5, the difference between the estimated moisture curves and the measured values shows that the mathematical model that does not consider shrinkage (NS) was not able

to properly describe the drying. In all the experiments, until approximately 50/60 minutes from the beginning of the process, the decrease in the moisture estimated by the (NS) model was more pronounced than what is shown by the experimental values. From this moment on, the curve estimated by the model passes over the experimental data. When considering the shrinkage ((S) model), the predictions of the mathematical model improve considerably to the point of the predicted curve (continuous line) practically overlapping the experimental data (markers).

The drying rates are shown in Figure 2.6. In some of the experiments, there was a brief stage at a constant rate, mainly for lower temperatures. When drying at a constant rate, the excess water available on the sample surface evaporates as it is immediately replenished by internal diffusion.

Figure 2.6 – Drying rates as a function of the moisture content of beetroots dried at 60, 70 and 80 °C.



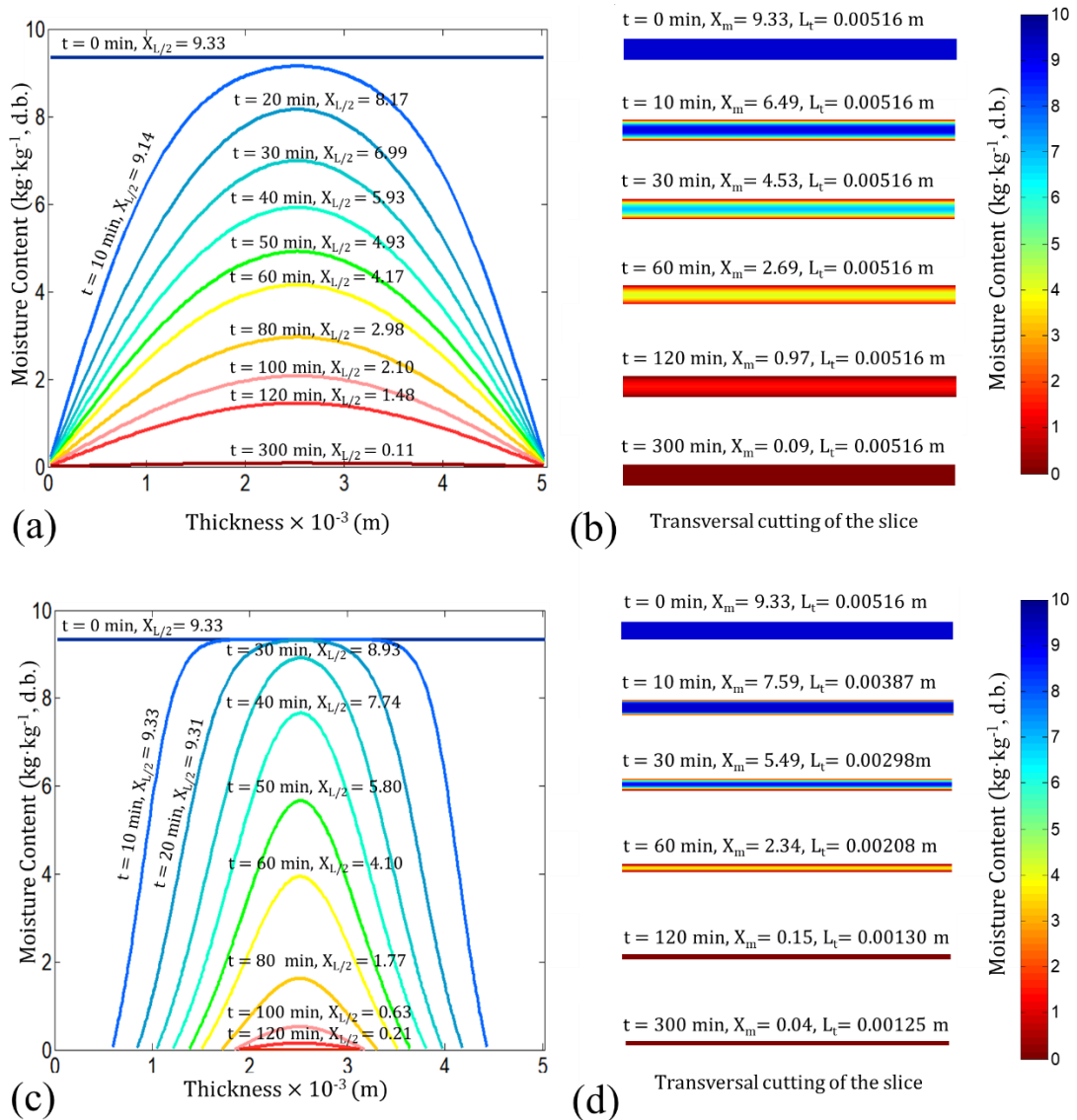
Source: prepared by the author

In many studies on drying food, there were no constant rate stages during the process (SOURAKI; MOWLA, 2008; GOLESTANI et al., 2013). This aspect is possibly due to experimental failure to measure changes within a short period of time. Molina Filho et al. (2016) overcame this difficulty by using a scale that was directly coupled to the setup such that the mass of the samples was measured continuously in the drying of pumpkins. In general, in this work, drying was predominantly at a decreasing rate. The effect of temperature is clear in both Figures 2.5 and 2.6. As expected, the higher the temperature is, the higher the rates and the less the drying time.

2.3.2.2. Mathematical modeling: moisture curves over time and spatial profiles

Spatial moisture profiles as a function of the distance over time are shown in Figures 2.7a – 2.7d, where Figures 2.7a and 2.7b display the results for the model NS and Figures 2.7c and 2.7d for the model S.

Figure 2.7 – Spatial moisture profiles simulated by the models considering (S) (Figures (a) and (b)) and neglecting the shrinkage (NS) (Figures (c) and (d)) during drying conducted at 70 °C. X_m and $X_{1/2}$ refer to the moisture (dry basis) at the central point of the slice and the average moisture, respectively. L_t is the slice thickness at drying time t .



Source: prepared by the author

This Figure shows great differences between the spatial profiles predicted by the two models. The Figure 2.7a shows the decrease in the water at the central point from the start of drying, resulting in a lower moisture gradient than in Figure 2.7c. However, in Figure 2.7b, the

7moisture values on the axis of symmetry, are higher than in Figure 2.7a until about 50 minutes of drying. The moisture profiles predict by the (S) model are more pronounced and approach equilibrium more quickly than the (NS) profiles, as can be seen by comparing Figures 2.7b and 2.7d at 120 minutes of drying.

At the end of drying (300 minutes), the moisture estimated by both models was close, being slightly overestimated by the model without shrinkage.

The high decrease in thickness from the start of drying can be seen in Figures 2.7c and 2.7d. In the first 10 minutes of drying, there was a drop of approximately 22% of this dimension. As the process proceeds, the shrinkage is increasingly less significant until it stops by the end of drying. The one-dimensional model used in this study neglected radial variations.

The performance of the model with shrinkage can be assessed by statistical parameters, as shown in Table 2.1.

Table 2.1 – Statistical parameters of adjustment of the models with (S) and without shrinkage (NS) to the experimental data.

Drying test T(°C)-Rep.	Shrinkage	Statistical Parameters		
		R ²	P (%)	RMSE
60-1	S	0.998	16%	0.014
	NS	0.976	122%	0.070
60-2	S	0.998	16%	0.015
	NS	0.976	149%	0.069
60-3	S	0.998	16%	0.013
	NS	0.976	149%	0.069
70-1	S	0.999	22%	0.012
	NS	0.973	133%	0.070
70-2	S	0.999	17%	0.010
	NS	0.974	121%	0.064
70-3	S	0.999	19%	0.011
	NS	0.972	166%	0.070
80-1	S	0.998	22%	0.018
	NS	0.975	163%	0.074
80-2	S	0.999	23%	0.013
	NS	0.975	96%	0.062
80-3	S	0.999	19%	0.011
	NS	0.974	106%	0.064

The best statistical parameters were observed for the model that considered shrinkage. At the end of drying, low levels of both moisture and water transferred out of the sample led to higher relative error values. Karim and Hawlader (2005) found values of relative errors below 6%; however, the moisture of the bananas at the end of drying was approximately 0.25 kg·kg⁻¹ of dry matter. In this work, such a final moisture of 0.25 kg·kg⁻¹ of dry beet would lead to a

relative error of at most 8%. Following this same line of reasoning, Curcio et al. (2008) dried carrots until obtaining a final moisture between 0.5 and 0.6 kg·kg⁻¹ of dry matter with relative errors of less than 3%. In the case of beet drying, final moisture between 0.5 and 0.6 kg·kg⁻¹ would lead to relative errors below 5.5%. The low *RMSE* values (maximum 1.84%), which is a nonrelative statistical index, in addition to $R^2 > 0.998$, show good agreement between the model with shrinkage and the experimental data. The same statistical indices show a poorer performance of the model without shrinkage. Thus, the good agreement between the experimental and estimated data validates the model with shrinkage through moving coordinates. It should be mentioned that the mathematical model used in this work, with shrinkage in Lagrangian coordinates, was as simple as possible but that it still provided a good description of drying, as shown by the results.

2.3.3. Evaluation of effective diffusion coefficients

Adjusted values of effective diffusivity (D_{eff}) with and without shrinkage are shown in Table 2.2.

Table 2.2 – Adjusted values of effective diffusivity (m²·s⁻¹) with (S) and without shrinkage (NS).

Shrinkage	$D_{eff} \times 10^{-10}$ (m ² ·s ⁻¹)		
	60 °C	70 °C	80 °C
S	1.233 ^a ± 0.097	1.674 ^b ± 0.099	2.075 ^c ± 0.218
NS	5.441 ^A ± 0.454	7.562 ^B ± 0.424	9.472 ^C ± 0.967

Values in the same row with a different letter present a statistically significant difference at a confidence level of 95% ($p < 0.05$)

In the model with shrinkage (S), the spaces between the nodes of the discretization grid have different sizes as a function of the distance to the surface. During drying, the size of each discrete space was updated as a function of the moisture, reducing the water diffusion distance until it stopped shrinking. Thus, D_{eff} was lower than those determined by the model without shrinkage, which presented D_{eff} overestimation, because it considered that the same amount of water was removed at a constant distance (initial thickness), *i.e.*, the diffusion length was greater than the real length. The D_{eff} value can be up to 4.5 times higher than expected, leading to incorrect scale-up calculations of dryers and inaccuracies in simulations. In general, the order

of magnitude of D_{eff} for beetroot drying in this work was within the range found in the literature for drying fruits and vegetables (DOULIA et al., 2000).

The values in Table 2.2 show the effect of the air-drying temperature on the diffusivity. The values that proved to be significantly different (Tukey test, $p < 0.05$), which shows that the higher the drying temperature was, the greater the effective diffusion coefficient. Thus, D_{eff} can be appropriately described by a nonlinear dependence relationship with the temperature of the Arrhenius type as Equation 2.25, which was established with the D_{eff} adjusted with S model, and which provided a determination coefficient of $R^2 = 0.993$.

$$D_{eff} = 1.25 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-25.508}{RT}\right) \quad (2.25)$$

in which 1.25×10^{-6} is the D_{eff} when the temperature tends to infinity, R is the universal gas constant in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, and T is the temperature in K. The activation energy value was $25.508 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, which is a value close to that obtained by other studies on beet drying, as shown in Table 2.3.

Table 2.3 - Effective diffusion coefficients, activation energy and drying conditions of beetroot drying studies found in the literature.

Reference	Air drying		Geometry (Dimensions (mm))	Mathematical modeling			D_{eff} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Activation energy ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)
	Velocity	Temperature (drying time)		Solution	Geometry considered in the modeling	Shrinkage		
SHYMKARYK et al. (2008)	$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	30 - 100 °C	Cylinder (24x5)	Analytical solution (5 terms)	Plate	NS	1.6×10^{-9} to 5.9×10^{-9}	20.2
GOKHALE; LELE (2011)	$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	50 °C (360 min) 65 °C (\approx 230 min) 80 °C (\approx 170 min) 100 °C (\approx 140 min) 120 °C (105 min)	Crushed pulp (300x300x7 tray))	Analytical solution (3 terms)	Plate	NS	2.7×10^{-7} to 17.3×10^{-7}	24.32
SINGH; HATHAN (2016)	$1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	55 °C (690 min) 65 °C (570 min) 75 °C (460 min)	Cube (10x10x10)	Analytical solution (1 term)	Plate	NS	8.09×10^{-9} to 1.46×10^{-8}	27.92
NISTOR et al., (2017)	-	50 °C (510 min) 60 °C (390 min) 70 °C (300 min)	Parallelepiped (40x10x5)	Analytical solution	Plate	NS	1.6×10^{-8} to 3.0×10^{-8}	-

VALLESPIR et al. (2018a)	1 m·s ⁻¹	40 °C (325 min)	Cube (8x8x8)	Numerical solution (finite elements)	Cube	NS	3.07×10 ⁻¹⁰	-
VALLESPIR et al. (2018b)	1 m·s ⁻¹	50 °C (168 min)	Cube (10x10x10)	Numerical solution (finite elements)	Cube	NS	4.2×10 ⁻¹⁰	-

*Control drying values for each work were considered, that is, convective drying without treatment. NS = no shrinkage

The D_{eff} values obtained in this study (Table 2.2) were close to those found by Vallespir et al. (2018a) e Vallespir et al. (2018b), that dried beetroots into cubes but at lower temperatures and air velocity. Larger diffusivities (order of magnitude of 10^{-9} to 10^{-7}) were found by Shynkaryk et al. (2008), Gokhale and Lele (2011), Singh and Hathan (2016) and Nistor et al. (2017). Many factors inherent to the drying methodology interfere in the effective diffusion coefficient value. For example, Gokhale and Lele (2011) dried crushed beetroot in thin layer and obtained D_{eff} on the order of magnitude of 10^{-7} . In this case, the size of the beetroot pieces may have favored water diffusion.

The D_{eff} is the result of several factors from conventional mass transfer to capillary flows. Consequently, it depends not only on the drying conditions but also on the different simplifying assumptions. For example, the consideration of the shrinkage or not, the truncation in the first terms of the series in analytical solutions of the Fick equation or the approximation of geometry during modeling changes the value of the effective diffusivity. Modeling with analytical solutions, shown in Table 2.3, considered the approximation for plates with one-dimensional transport even though the geometry was cube (three-dimensional transport) or short cylinder (two-dimensional transport). In addition, all the studies listed did not consider shrinkage during mathematical modeling, which overestimates the effective diffusivities.

In the present study, D_{eff} was adjusted under the hypothesis of one-dimensional shrinkage, therefore, the diffusion coefficient encompassed the radial reduction effect of the samples, although it was not very significant.

2.4. CONCLUSIONS

The consideration of shrinkage played an important role in moisture profiles predicting, both in time and space, and in determining the value of effective diffusion coefficients, which

were overestimated when the shrinkage was neglected. The results showed that neglecting the shrinkage results in distorted moisture profiles in relation to the experimental data. The thickness shrinkage of beetroot slices was predominant over radial reduction and was independent of air-drying temperature. Finally, the mathematical model with shrinkage in Lagrangian coordinates satisfactorily described the drying of beetroot pieces using only additional experimental shrinkage data. Therefore, this finding shows that the model is a useful tool in actual engineering applications on vegetable drying.

REFERENCES

- ABHISHEK, D.; RAMAKRISHNA, K.; NAIK, B.K. Evaluation of heat and mass transfer coefficients at beetroot-air interface during convective drying, **Interfacial Phenom Heat Transf**, v. 8, n. 4, p. 303–319, 2020. DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020036455. Disponível em: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/728e68e739b67efe,28924be8038d64f5,69c8a4b922620a60.html>
- APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. **Journal of Food Engineering**, v. 144, p. 119–128, 2015. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004
- ARTSCHWAGER, E. Anatomy of the vegetative organs of the sugar Beet. **Journal of Agricultural Research**, v. 33, 1926.
- BIRD, B., STEWART, W.E. E LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena**, 2th edition, LTC, Rio de Janeiro, 2004.
- BISPO, J.S.C., RODRIGUES, C.M., BONAFE, C.F.S., ASSIS, C.J.A. Modeling drying isotherms using a structure transition model, **Drying Technology**, v. 31, p. 1008-1019, 2013. DOI:10.1080/07373937.2013.771648
- BRASIELLO, A., IANNONE, G. ADILETTA, G., DE PASQUALE, S., RUSSO, P., DI MATTEO, M. Mathematical model for dehydration and shrinkage: Prediction of eggplant's MRI spatial profiles. **Journal of Food Engineering**, v. 203, p. 1-5, 2017. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.01.013
- CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 223, p. 152–167, 2018. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.12.01
- CELLI, G. B.; BROOKS, M. S.L. Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins — A current review. **Food Research International**, v. 100, p. 501–509, 2017. DOI:10.1016/j.foodres.2016.08.034

CURCIO, S. A Multiphase Model to Analyze Transport Phenomena in Food Drying Processes, **Drying Technology**, v. 28, p. 773-785, 2010. DOI:10.1080/07373937.2010.482697

CURCIO, S.; AVERSA, M.; CALABRO, V.; IORIO, G. Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation, **Journal of Food Engineering**, v. 87, p. 541–553, 2008. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.09.030

DOULIA, D.; TZIANO, K.; GEKAS, V. A knowledge base for the apparent mass diffusion coefficient of foods. **International Journal of Food Properties**, v. 3, p. 1– 14, 2000. DOI:10.1080/10942910009524613

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 57, n. 4, p. 701–717, 2015. DOI:10.1080/10408398.2014.910493

FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 4, p. 461–470, 2010. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.01.02

GOLESTANI, R.; RAISI, A.; AROUJALIAN, A. Mathematical modeling on air drying of apples Considering shrinkage and variable diffusion coefficient. **Drying technology**, v. 31, p. 40-51, 2013. DOI: 10.1080/07373937.2012.714826

GULATI, T.; DATTA, A. K. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 119–138, 2015. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031

GUMETA-CHÁVEZ, C.; JORGE CHANONA-PÉREZ, J.J.; MENDOZA-PÉREZ, J.A.; TERRÉS-ROJAS, E.; GARIBAY-FEBLES, V.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G.F. Shrinkage and deformation of *Agave atrovirens* karw tissue during convective drying: Influence of structural arrangements. **Drying technology**, v. 29, p. 612-623, 2011. DOI:10.1080/07373937.2010.514380

HATAMIPOUR, M.S.; MOWLA, D. Correlations for shrinkage, density and diffusivity for drying of maize and green peas in a fluidized bed with energy carrier. **Journal of Food Engineering**, Vol. 59, p. 221–227, 2003. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00461-2

KAPOOR, R.; FENG, H. Characterization of physicochemical, packing and microstructural properties of beet, blueberry, carrot and cranberry powders: The effect of drying methods. **Powder Technology** 395, 290–300, 2022. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.058.

KARIM, M.A.; HAWLADERM M.N.A. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, Vol. 70, p. 35-45, 2005. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2004.09.010

KATEKAWA, M.E.; SILVA, M.A. On the Influence of glass transition on shrinkage in convective drying of fruits: A Case Study of Banana Drying. **Drying technology**, Vol. 25, p. 1659-1666, 2007. DOI:10.1080/07373930701590863

KHALLOUFI, S.; ALMEIDA-RIVERA, C.; JANSSEN, C.; BONGERS, P. Pseudo-linearity of the shrinkage coefficient and a sensitivity study of collapse and shrinkage functions, **Food research international**, Vol. 48, p. 808–819, 2012. DOI:10.1016/j.foodres.2012.06.024

MAHIUDDIN, M.; KHAN, M. I. H.; KUMAR, C.; RAHMAN, M. M.; KARIM, M. A. Shrinkage of Food Materials During Drying: Current Status and Challenges. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2018. DOI:10.1111/1541-4337.12375

MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, Vol. 61, p. 373-386, 2004. DOI:10.1016/S0260-8774(03)00144-4

MOLINA FILHO, L.; FRASCARELI, E.C; MAURO, M. A. Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). **Food and Bioprocess Technology**, Vol. 9, p. 859-871, 2016. DOI:10.1007/s11947-016-1674-5

MUDIYANSELAGE, C.M.R.; KARUNASENA, H.C.P.; GU, Y.T., GUAN, L.; SENADEERA, W. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying: A review, **Journal of Food Engineering**, Vol. 194, p. 24-39, 2017. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.09.002

MULET, A.; GARCIA-REVERTER, J.; BOM, J., BERNA, A. Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. **Drying Technology**, Vol. 18, p. 1201-1219, 2000. DOI: 10.1080/07373930008917772

NGUYEN, T.K., MONDOR, M., RATTI, C. Shrinkage of cellular food during air drying. **Journal of Food Engineering**, Vol. 230, p. 8-17, 2018. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.02.017

NIMNUAN, P.; NABNEAN, S. Experimental and simulated investigations of the performance of the solar greenhouse dryer for drying cassumunar ginger (*Zingiber cassumunar Roxb.*). **Case Studies in Thermal Engineering**, Vol. 22, 100745, 2020. DOI:10.1016/j.csite.2020.100745

NISTOR, O.; SEREMET, L.; ANDRONOIU, D. G.; RUDI, L.; BOTEZ, E. Influence of different drying methods on the physicochemical properties of red beetroot (*Beta vulgaris* L. var. *Cylindra*). **Food Chemistry**, Vol. 236, p. 59–67, 2017. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.129

ONG, S.P; LAW, C.L. Hygrothermal Properties of Various Foods, Vegetables and Fruits. In: Jangam, S.V.; Law, C. L.; Mujumdar, A. S. (Editors). *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. 1 Ed, Singapore, 2010.

PURLIS, E., CEVOLI, C., FABBRI, A. Modelling Volume Change and Deformation in Food Products/Processes: An Overview. **Foods**, v.10, n. 4, p. 778, 2021. DOI:10.3390/foods10040778

RAHMAN, S.M.A.; ISLAM, M.R.; MUJUMDAR, A.S. A study of coupled heat and mass transfer in composite food products during convective drying, **Drying Technology**, v. 25, p. 1359 – 1368, 2007. DOI:10.1080/07373930701438956

RANI, P.; TRIPATHY, P. Modelling of moisture migration during convective drying of pineapple slice considering non-isotropic shrinkage and variable transport properties. **Journal of Food Science and Technology**, v.57, p. 3748–3761, 2020. DOI: 10.1007/s13197-020-04407-4

ROQUES, M.A.; ZAGROUBA, F.; DO AMARAL SOBRAL, P. Modelisation principles for drying of gels, **Drying Technology**, v. 12, p. 1245-1262, 1994. DOI: 10.1080/07373939408961004

SINGH, B.; HATHAN. B, S. Convective dehydration kinetics and quality evaluation of osmo-convective dried beetroot candy. **Italian Journal of Food Science**, v. 28, n. 4, p. 669, 2016, pp. 669.

SHYNKARYK, M.V.; LEOVKA, N.I.; VOROBIEV, E. Pulsed electric fields and temperature effects on dry and rehydration of red beetroots, **Drying Technology**, v. 26, p. 695-704, 2008. DOI:10.1080/07373930802046260

SOURAKI, B.A.; MOWLA, D. Axial and radial moisture diffusivity in cylindrical fresh green beans in a fluidized bed dryer with energy carrier: Modeling with and without shrinkage. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 9–19, 2008. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.05.013

TZEMPELIKOS, D.A.; MITRAKOS, D.; VOUIROS, A.P.; BARDAKAS, A.V.; FILIOS, A.E., MARGARIS, D.P. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. **Journal of Food Engineering**, v. 156, p. 10–21, 2015. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017

VALLESPIR, F.; CÁRCEL J.A.; MARRA, F., EIM, V. S.; SIMAL, S. Improvement of mass transfer by freezing pre-treatment and ultrasound application on the convective drying of beetroot (*Beta vulgaris L.*). **Food Bioprocess and Technology**, v. 11, p. 72–83, 2018. DOI:10.1007/s11947-017-1999-8

ZIELINSKA, M.; MARKOWSKI, M. Drying Behavior of Carrots Dried in a Spout–Fluidized Bed Dryer, **Drying Technology**, v. 25, n. 1, p. 261-270, 2007. DOI:10.1080/07373930601161138

APPENDIX 2.A - MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT

This appendix shows the mathematical development of Equation 2.11 to Equation 2.19.

Equation 2.11 is shown below.

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho_w \bar{v}_s) = -\bar{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \bar{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.11)$$

From the definition of moisture, in dry basis, $X = \rho_w / \rho_s$ (Equation 2.12), ρ_w is replaced by $\rho_s X$, therefore, Equation 2.11 became:

$$\frac{\partial (X \rho_s)}{\partial t} + \bar{\nabla}(X \rho_s \bar{v}_s) = -\bar{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \bar{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.A)$$

Applying the product rule,

$$X \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial t} \right) + \rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + X \bar{\nabla}(\rho_s \bar{v}_s) + (\rho_s \bar{v}_s) \bar{\nabla} X = -\bar{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \bar{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.B)$$

Reorganizing the Equation (2.B),

$$X \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho_s \bar{v}_s) \right) + \rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + (\rho_s \bar{v}_s) \bar{\nabla} X = -\bar{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \bar{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.C)$$

From Equation 2.4 this chapter, it is known that

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho_s \bar{v}_s) = 0$$

Therefore,

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + (\rho_s \bar{v}_s) \bar{\nabla} X = -\bar{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \bar{\nabla} \omega_w}{(1 - \omega_w)} \right] \quad (2.D)$$

Knowing that $\omega_w + \omega_s = 1$ and $X = \frac{\omega_w}{\omega_s}$,

$$\omega_w = \frac{X}{(1+X)} \quad (2.E)$$

Substituting Equation (E) into Equation (D),

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + (\rho_s \vec{v}_s) \vec{\nabla} X = -\vec{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \vec{\nabla} \left(\frac{X}{1+X} \right)}{1 - \left(\frac{X}{1+X} \right)} \right] \quad (2.F)$$

Using the quotient rule

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + (\rho_s \vec{v}_s) \vec{\nabla} X = -\vec{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \left(\frac{\vec{\nabla} X (1+X) - X \vec{\nabla} (X+1)}{(1+X)^2} \right)}{1 - \left(\frac{X}{1+X} \right)} \right] \quad (2.G)$$

Reorganizing the Equation (2.G),

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + (\rho_s \vec{v}_s) \vec{\nabla} X = -\vec{\nabla} \left[\frac{-\rho D_{eff} \frac{\vec{\nabla} X}{(1+X)^2}}{\frac{1}{1+X}} \right] \quad (2.H)$$

Resulting in

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v}_s \vec{\nabla} X \right) = -\vec{\nabla} \left(\frac{-\rho D_{eff} \vec{\nabla} X}{X+1} \right) \quad (2.I)$$

in additions, as

$$X+1 = \frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{\rho_s}{\rho_s} = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.J)$$

Equation (2.13) was obtained.

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v}_s \vec{\nabla} X \right) = \vec{\nabla} (\rho_s D_{eff} \vec{\nabla} X) \quad (2.13)$$

Considering the change from a fixed coordinate (z) to a moving coordinate (ζ), in a dimensionless case, the velocity of solids will be null, therefore, $\vec{v}_{s,\zeta} = 0$. Equation 2.13 can be written as

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) = \bar{\nabla} \left(\rho_s D_{eff} \bar{\nabla} X \right) \quad (2.L)$$

The coordinate change, applied to plate geometry and for a unidimensional case, is given by Equation (2.16)

$$d\zeta = \frac{\rho_s dz}{\rho_s^0 L^0} \quad (2.16)$$

Isolating the “ dz ” term in the Equation 2.16 and substituting it in the Equation 2.L:

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\frac{\rho_s^0}{\rho_s} L_0 \partial \zeta} \left(\rho_s D_{eff} \frac{\partial X}{\frac{\rho_s^0}{\rho_s} L_0 \partial \zeta} \right) \quad (2.M)$$

Shrinkage during drying can be represented by a local coefficient (s^*), given by Equation (2.17). It was considered a sufficiently small volume such that ρ_s is constant.

$$s^* = \frac{V(t)}{V^0} = \frac{\rho_s^0}{\rho_s} \quad (2.17)$$

Substituting ρ_s by $\frac{\rho_s^0}{s^*}$,

$$\frac{\rho_s^0}{s^*} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{s^* L_0 \partial \zeta} \left(\frac{\rho_s^0}{(s^*)^2} D_{eff} \frac{\partial X}{L_0 \partial \zeta} \right) \quad (2.N)$$

In this work, shrinkage was considered one-dimensional, therefore s^* was given an equation for the dimensionless thickness variation as a function of the sample moisture.

Considering D_{eff} constant and knowing that ρ_s^0 and L_0 are constant:

$$\frac{\rho_s^0}{s^\bullet} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) = \frac{D_{eff}}{L^0} \frac{\rho_s^0}{s^\bullet} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial X}{(s^\bullet)^2 d\zeta} \right) \quad (2.O)$$

Canceling the term $\frac{\rho_s^0}{s^\bullet}$ on both sides of the Equation(p), Equation (2.P) is obtained. It was replaced by Equation 2.18 from this chapter.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{(L^0)^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial X}{(s^\bullet)^2 d\zeta} \right) \quad (2.P)$$

Defining the moisture ratio (C) as $C = X/X^0$, Equation (2.18) can be rewritten as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{(L^0)^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{1}{(s^\bullet)^2} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right] \quad (2.19)$$

Secagem intermitente de beterraba vermelha: modelagem, simulação e consumo de energia

RESUMO

A partir da modelagem matemática e simulação numérica, foram avaliadas 47 configurações de secagem de beterraba com intermitência térmica (temperaturas iniciais de 80, 90 e 100 °C e finais de 60,70 e 80 °C), em termos de cinética de secagem e consumo de energia. Um modelo baseado na lei de Fick e escrito em coordenadas lagrangeanas para considerar o encolhimento da matriz, foi usado para simular as secagens, enquanto o consumo energético foi simulado a partir de modelos empíricos. A duração máxima dos primeiros estágios foi determinada pela temperatura superficial das amostras. Os modelos foram validados experimentalmente com ajuste satisfatório e previram com eficiência a cinética e o consumo energético das secagens. O consumo de energia foi linearmente dependente do tempo de secagem e variou com a temperatura. Várias configurações de secagem mostraram economias relevantes, chegando a 30,5% (90°C/40min+70°C/120min), com redução de 33% de tempo. Primeiros estágios com tempos intermediários e diferenças de temperaturas maiores entre os estágios favoreceram o aumento da economia de energia. Os resultados mostram que a secagem intermitente é uma técnica economicamente vantajosa, mas, para isso, as condições de processo devem ser cuidadosamente estabelecidas.

3. CAPÍTULO 3 – Secagem intermitente de beterraba vermelha: modelagem, simulação e consumo

3.1. INTRODUÇÃO

A secagem por ar quente é uma operação unitária importante na cadeia de produção agrícola pois é a principal técnica empregada para a conservação de alimentos. No entanto, a secagem tem alta demanda energética, sendo responsável por uma porção considerável do consumo de energia de uma indústria de processamento de alimentos (MUJUNDAR, 2006; KUMAR et al., 2014). Uma vez que grande parte da energia gerada no planeta ainda depende de combustíveis fósseis (energia não renovável), o consumo energético significativo de secadores é relevante quanto à produção de gases do efeito estufa (KAVEH et al., 2020), que causam inúmeros efeitos adversos graves ao ecossistema. Considerando-se, sobretudo, o contexto ambiental atual, tornam-se cada vez mais necessárias pesquisas por alternativas que aumentem a eficiência energética do processo de secagem, a fim de torná-lo mais sustentável.

Muitas tecnologias e técnicas de secagem têm sido estudadas nesse sentido, como secagens híbridas em processos intermitentes com micro-ondas (DAI et al., 2019), com micro-ondas e ultrassom (SZADZIŃSKA et al., 2020), com infravermelho (CHUA et al., 2005), radiofrequência (MAO; WANG, 2021), com aquecimento ôhmico (CAO et al., 2020) e utilizando ultrassom como pré-tratamento (DEHGHANNYA et al., 2019). No entanto, pensando numa produção em escala industrial, os secadores convectivos, além de já representarem 85% dos secadores industriais existentes (AGHILINATEGH et al., 2015), ainda são a principal escolha por sua simplicidade e baixos custos de investimento (DODER; DACOVIK, 2019). Nesse sentido, este trabalho propõe uma técnica simples que pode ser facilmente adaptada utilizando equipamentos de secagem convectiva já existentes. Essa técnica, aqui chamada de secagem com intermitência térmica, apresenta-se como uma alternativa para plantas de secagem industriais já em operação, cujos secadores foram fabricados para uma vida útil longa, porém não foram projetados considerando a realidade energética atual, em que o uso consciente de energia é encorajado, principalmente pelo apelo ambiental, mas também pelo alto custo operacional do processo (DEFRAEYE, 2014). Inicialmente, utiliza-se um estágio com temperatura alta, aproveitando-se da condição de saturação da água na superfície do alimento, a fim de favorecer a evaporação. Após determinado tempo, que é estabelecido conforme características do secador e do alimento a ser seco, reduz-se a temperatura do ar de secagem para minimizar os danos à qualidade sensorial e nutricional do alimento causados pelo calor.

Dessa forma, é possível ter ganho no tempo total de processo quando comparado ao processo convencional e, conseqüentemente, redução do consumo de energia, sem que haja perdas em parâmetros de qualidade do produto desidratado (FILIPPIN et al., 2018; AMADO et al., 2020), ou ainda, em alguns casos, com melhoria dos mesmos (TAKOUGNADI et al., 2018; CHEN et al. 2020).

Todavia, as vantagens da secagem com intermitência térmica estão diretamente associadas à seleção adequada de parâmetros de processo. Durações e temperaturas do primeiro estágio definidas arbitrariamente podem não resultar na eficiência máxima possível da secagem ou em processo menos eficiente do que o convencional, além de poderem sobreaquecer o produto, causando danos à sua qualidade. Configurações de secagem intermitentes que resultem em secagens mais longas do que as secagens contínuas (TAKOUGNADI et al., 2018; XANTHOPOULOS et al., 2019) podem resultar no aumento da oxidação de compostos (TAKOUGNADI et al., 2018). Portanto, para determinar estratégias de secagem específicas é fundamental investigar e compreender a cinética de secagem, o que é possível graças à modelagem matemática e à simulação. A importância da modelagem vai além de previsões de perfis de concentração e temperatura, pois dos modelos podem ser extraídas mais informações, fornecendo novas visões aos pesquisadores sobre o processo estudado (WANG; CHEN; MUJUMDAR, 2007). Somado a isso, fazer uso de simulações baseadas num modelo matemático é uma técnica que reduz os custos do desenvolvimento de um processo ou equipamento, por diminuir significativamente o consumo de recursos necessários para a realização de testes experimentais.

O objeto de estudo deste trabalho foi a beterraba vermelha (*Beta vulgaris*), uma raiz tuberosa que possui uma gama de elementos que lhe proporcionam um elevado valor nutritivo. Além de quantidades apreciáveis de sacarose, proteína, ferro, potássio e vitaminas, a beterraba vermelha é fonte de betalaínas, e, por isso, é usada para produção desse corante em grande escala (HADIPOUR et al., 2020). Nesse contexto, a secagem convectiva intermitente é uma boa alternativa para fabricação de pó de beterraba, pois, além de ser usada como corante natural, pode, na sua forma integral, ser utilizada como farinha no preparo de outros alimentos.

Tendo em vista que, caso as condições de processo sejam determinadas arbitrariamente, a secagem intermitente pode não trazer vantagens em relação à convencional, a proposta deste capítulo é investigar várias condições de aplicação da intermitência térmica, a fim de otimizá-la em termos de eficiência do processo e economia de energia. Para isso, foram realizadas simulações de secagens intermitentes em 47 configurações diferentes (com temperatura e duração do primeiro estágio e temperatura do segundo estágio variadas) através de um modelo

numérico fundamentado na lei de Fick e escrito em coordenadas móveis para considerar o encolhimento. Também foram feitas análises energéticas das diversas condições de secagem e foram determinados modelos empíricos a partir de medições de consumo através de um analisador de grandezas elétricas, e a partir dos valores calculados pelos balanços de entalpia.

3.2. OBJETIVOS

3.2.1. Geral

Avaliar o uso da intermitência térmica em termos de eficiência de secagem de beterrabas e economia de energia e determinar a configuração de secagem intermitente mais econômica.

3.2.2. Específicos

- Avaliar o consumo de energia de secagens conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C através de medidas do analisador de grandezas elétricas e de cálculos pelo balanço de entalpia e determinar equações empíricas para simular o consumo durante secagens convectivas;
- Determinar durações máximas de primeiros estágios de secagem intermitentes com base na temperatura superficial de fatias de beterraba;
- Determinar os coeficientes de difusão efetivos para simulação de várias configurações de secagem intermitente e contínua;
- Simular diferentes configurações de secagem intermitentes, dentro de limites pré-determinados, a fim de determinar a condição mais vantajosa em termos de economia de energia;
- Validar simulações de secagem intermitente com base em ensaios experimentais.

3.3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.3.1. Ensaios experimentais

3.3.1.1. Preparo da matéria prima

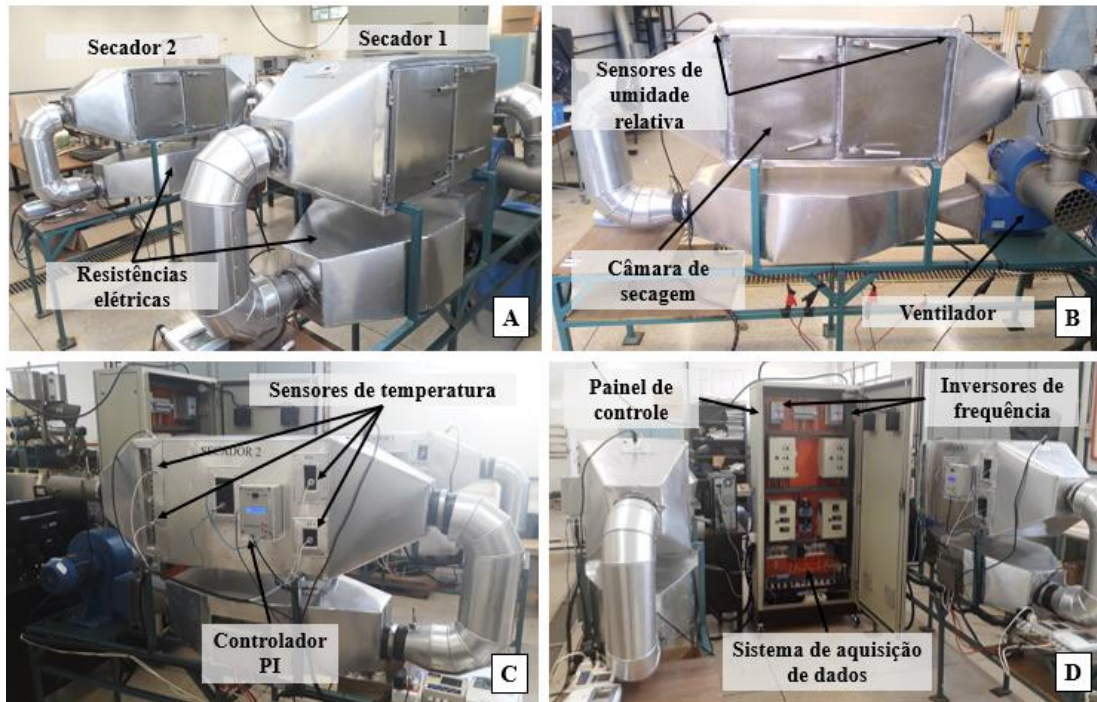
Beterrabas vermelhas (*Beta vulgaris*) da variedade Boro foram adquiridas na CEAGESP (Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo) de São José do Rio Preto (São Paulo, Brasil) e foram armazenadas a 10 °C. Em temperatura ambiente, as beterrabas foram higienizadas, fatiadas com espessura média de $5,05 \pm 0,04$ mm com uma fatiador elétrico (ECO,

São Paulo) e moldadas com um molde de aço inoxidável com diâmetro de $8,15 \pm 0,50$ mm. Em seguida, as fatias foram dispostas entre bandejas teladas de aço inoxidável e inseridas no secador. A massa inicial média de beterrabas foi de $494,78 \pm 8,26$ g.

3.3.1.2. Ensaios de secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos em dois secadores idênticos de leito fixo com convecção forçada de ar aquecido (Figura 3.1 A), equipados com ventilador centrífugo (Ibran, Siroco VSI 195, São Paulo) (Figura 3.1 B). A velocidade foi controlada por um inversor de frequência (WEG, modelo CWF10, Santa Catarina). O ar é aquecido através de resistências elétricas e os secadores são isolados com fibra de cerâmica. Cada câmara de secagem possui 4 sensores PT100 e dois higrômetros (Figura 3.1 C) (ImPac®, DO9861T-R1 e DOHD2717, Itália) que estão conectados a um sistema de aquisição de dados (ImPac®) (Figura 3.1 D). O controle e temperatura do ar de secagem é feito por controlador tipo PID (que foi configurado para faixas de temperatura de 50 °C a 110 °C e com velocidades do ar de 1,5 a 2,5 m·s⁻¹ com as constantes $k_p = 10$, $k_i = 0,59$ e $k_d = 0$). O sistema de secagem ainda dispõe de um termohigrômetro móvel (ImPac®, IP-747RH, São Paulo) para registro das condições do ar ambiente. Os ensaios de secagem intermitente ocorreram de forma que, durante o primeiro período de secagem, as bandejas foram colocadas no secador 1. Decorrido o tempo de secagem na temperatura alta, as bandejas foram retiradas do secador 1 e imediatamente inseridas no secador 2.

Figura 3.1 – Secadores convectivos de bandeja.



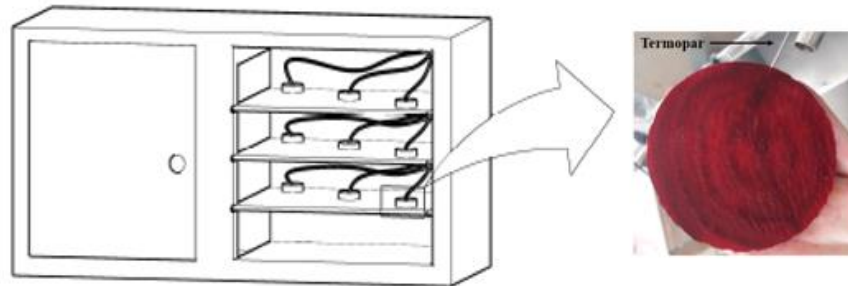
Para validação das simulações, foram realizados ensaios de 4 configurações de secagens intermitentes aleatórias, em duplicata: 90°C/50min+70°C/90min (ID 1), 90°C/60min+60°C/120min (ID 2), 100°C/40min+60°C/150min (ID 3) e 80°C/70min+60°C/120min (ID 4).

As umidades inicial e final foram determinadas por método gravimétrico em estufa a vácuo (60 °C e 10 kPa) e a atividade de água foi determinada por um equipamento analisador de atividade de água (AquaLab, 4TEV, EUA), operando a 25 °C.

3.3.2. Análise da evolução da temperatura superficial

A temperatura da superfície das fatias de beterraba foi monitorada durante secagens conduzidas nas temperaturas do primeiro estágio (80, 90 e 100 °C), através de 8 termopares tipo T, com bainha de 1,5 mm de diâmetro, inseridos às fatias de beterraba, conforme a Figura 3.2. Foram feitas 5 repetições em cada temperatura.

Figura 3.2 - Câmara de secagem do secador convectivo com a posição das fatias de beterraba durante o monitoramento da temperatura da superfície por termopares.



3.3.3. Modelo matemático

Utilizou-se o modelo matemático teórico, descrito no Capítulo 2, no qual adotou-se um sistema binário de espécies “ W ” e “ S ” que representam a água e os sólidos constituintes do alimento, respectivamente.

O modelo parte da equação de continuidade e considera que o fluxo de massa difusivo de água, que tem como referência a velocidade global das espécies (\bar{v} , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), pode ser descrito pela lei de Fick. No entanto, devido ao encolhimento que ocorre durante a secagem, é mais conveniente especificar o fluxo de massa de água com a referência da velocidade dos sólidos (\bar{v}_s , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), e para isso relacionam-se os fluxos nas duas velocidades de referência. Com isso, obtém-se a Equação 3.1, demonstrada no Capítulo 2:

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + \bar{v}_s \bar{V} X \right) = \bar{V} \left(\rho_s D_{eff} \bar{V} X \right) \quad (3.1)$$

em que ρ_s é a concentração de massa de sólidos ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), D_{eff} ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) o coeficiente efetivo de difusão de água e X ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) é o conteúdo de água em base seca.

Encolhimento

Como definido no Capítulo 2, a deformação durante a secagem pode ser representada por um coeficiente de encolhimento local s^* de acordo com a Equação 3.2, desde que o volume seja suficientemente pequeno para que ρ_s seja considerada constante:

$$s^{\bullet} = \frac{V^{(t)}}{V^0} = \frac{\rho_s^0}{\rho_s} \quad (3.2)$$

em que V^0 (m^3) é o volume inicial, $V^{(t)}$ (m^3) um volume após um tempo t e ρ_s^0 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), uma concentração inicial homogênea de sólidos.

No Capítulo 2 também se constatou que o encolhimento de fatias de beterraba é predominantemente longitudinal, linear em função da umidade e independente da temperatura de secagem. Dessa forma, foi possível representar o encolhimento de todas as secagens de acordo com a Equação 3.3:

$$s^{\bullet} = \frac{L}{L^0} = 0,787 \cdot \left(\frac{X}{X^0} \right) + 0,242 \quad (3.3)$$

em que L (m) é a espessura da fatia em um tempo qualquer de secagem, L^0 (m) é a espessura no instante inicial e X^0 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) é o conteúdo de água inicial, em base seca.

Mudança de coordenada

Devido à relevância do encolhimento nesse processo de secagem, este estudo utilizou coordenadas Lagrangeanas ou materiais, formadas por um sistema de coordenadas móveis que segue a contração da matriz sólida (ROQUES et al., 1994). Com isso, a velocidade de encolhimento torna o termo convectivo nulo na Equação 3.1.

Com base na conservação de massa, para o caso unidimensional, a mudança da coordenada Euleriana (espacial, z) para a coordenada Lagrangeana (material, ζ), em forma adimensional, é dada por:

$$d\zeta = \frac{\rho_s dz}{\rho_s^0 L^0} \quad (3.4)$$

Modelo

Para o estabelecimento do modelo matemático a ser discretizado, a razão de umidade $C = X/X^0$ foi substituída na Equação 1, escrita para o caso unidimensional. Também se

procedeu à mudança da coordenada, com base nas Equações 3.2 e 3.4 e na velocidade $\vec{v}_{s,\zeta} = 0$, o que resultou na Equação 3.5:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{(L^0)^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{1}{(s^*)^2} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right] \quad (3.5)$$

As condições iniciais e as condições de contorno são apresentadas nas Equações 3.6 e 3.7. Nas superfícies das amostras, a resistência externa foi desprezada devido à alta velocidade de secagem do ar.

$$C = C^0 = 1 \quad 0 < \zeta < 1 \text{ em } t = 0 \quad (3.6)$$

$$C = C^{eq} = \frac{X^{eq}}{X^0} \quad \zeta = 0 \text{ e } 1 \quad (3.7)$$

Solução do modelo

Utilizou-se o método das diferenças finitas. As derivadas espaciais foram substituídas pela sua aproximação por diferença central e a variável temporal foi discretizada usando o integrador numérico *ode45* do software Matlab®.

Considerando a dificuldade para se obter experimentalmente a distribuição espacial da umidade no interior do material, o que requer equipamentos e recursos especializados, utilizou-se a comparação da umidade média das fatias de beterraba obtida experimentalmente com aquela obtida através da integração dos perfis de umidade em cada tempo de interesse.

O coeficiente de difusão efetivo (D_{eff}) foi determinado a partir dos dados de umidade, pela minimização da diferença entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo, o que se deu através de incrementos constantes (1×10^{-13}) ao D_{eff} , até que não houve alteração (na ordem de 10^{-4}) nos valores obtidos de *RMSE* (raiz da média do quadrado dos resíduos).

A concordância entre o modelo e os resultados experimentais foi analisada através de medidas estatísticas, tais como o coeficiente de determinação (R^2), a média relativa do erro (P%) (Equação 3.7), e o índice *RQMR* (Equação 3.9).

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_1^N \left| \frac{C^{Exp} - C^{Calc}}{C^{Exp}} \right| \quad (3.8)$$

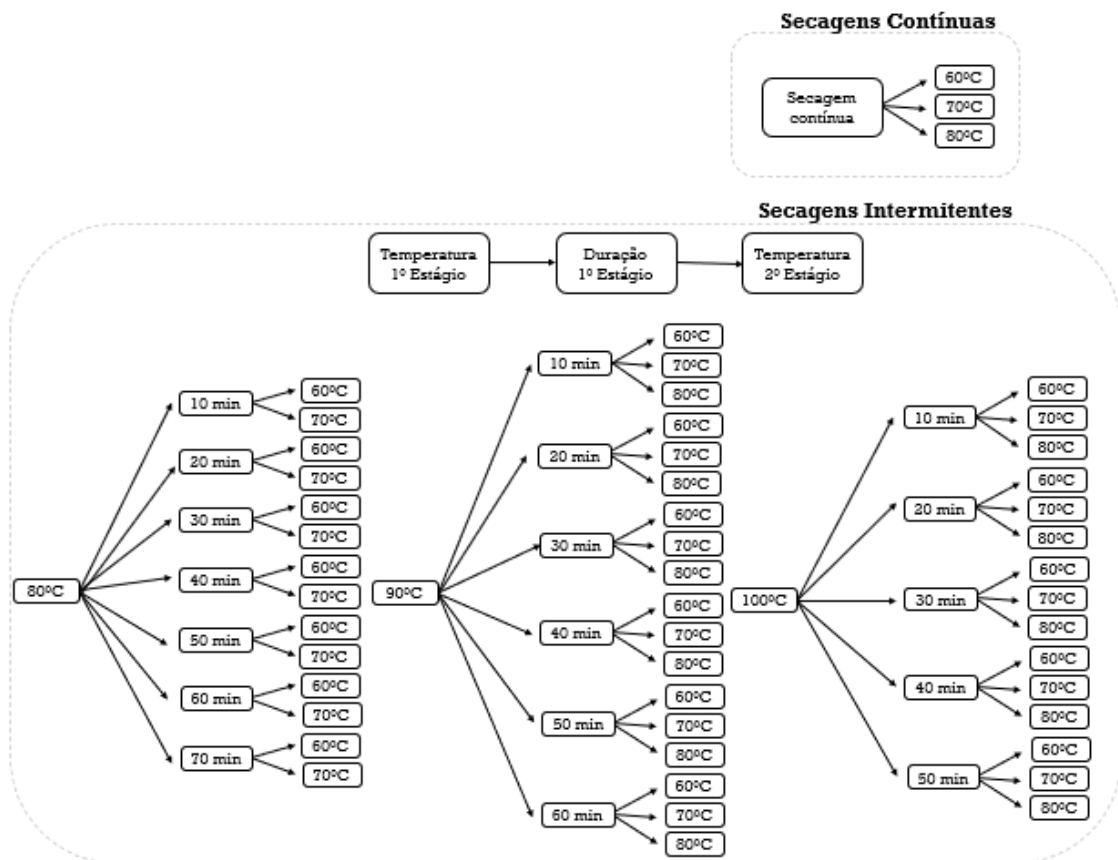
$$RQMR = \left[\frac{1}{N} \sum_1^N (C^{\text{Exp}} - C^{\text{Calc}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

em que C^{Exp} e C^{Calc} representam o adimensional de umidade calculado e experimental, respectivamente, e N representa o número de observações ou resíduos

3.3.4. Simulação de secagens intermitentes

Foram simuladas várias configurações de secagens intermitentes e contínuas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.3. Para controle, foram estabelecidas secagens contínuas a 60, 70 e 80 °C, que também foram simuladas. A duração máxima dos primeiros estágios foi determinada de acordo com resultados da avaliação realizada a partir evolução da temperatura superficial das amostras com o tempo, como será mostrado adiante, no item 3.4.2.

Figura 3.3 – Configurações de secagens intermitentes e contínuas.



As condições consideradas para as simulações de secagem estão descritas na Tabela 3.1. Elas foram baseadas em dados experimentais e modelos ajustados a esses dados. Os coeficientes

resultantes das equações e as correspondentes medidas estatísticas dos ajustes são apresentados no rodapé da Tabela.

Tabela 3.1 – Entrada de dados para simulação de secagens intermitentes e contínuas.

	Secagem Intermitente – 1º Estágio	Secagem Intermitente – 2º Estágio	Secagem Contínua
Divisões da grade	180		
Umidade inicial	$X_1^0 = 9$ (kg·kg ⁻¹ , b.s.)	$X(\zeta)_2^0$ (kg·kg ⁻¹ , b.s.) *	$X_c^0 = 9$ (kg·kg ⁻¹ , b.s.)
Espessura inicial	$L_1^0 = 0,005$ (m)	$L_2^0 = \left(0,787 \cdot \left(\frac{X_1^t}{X_1^0}\right) + 0,242\right) \cdot L_1^0$ Equação 3.3	$L_c^0 = 0,005$ (m)
D_{eff}	$D_{eff,1} = 7,468 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{-17138,47}{RT}\right)$ (Equação 3.10) **	$D_{eff,2} = A \left(\frac{X_1^t}{X_1^0}\right)^2 + B \left(\frac{X_1^t}{X_1^0}\right) + C$ (Equação 3.11) ***	$D_{eff,c} = 1,25 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-25508}{RT}\right)$ (Equação 3.12) ****
Umidade de equilíbrio	$X_{1,T(c)}^{eq} = X_{2,T(c)}^{eq} = X_{c,T(c)}^{eq} = \left[\frac{\ln(1-a_w)}{a}\right]^{\frac{1}{b}}$ (Equação 3.13) *****		
Critério de parada	$CP = \left(\frac{X^t - X^{t+30}}{X^t}\right) \leq 5\%$ (Equação 3.14)		

*Em que $X(\zeta)_2^0$ é perfil espacial de distribuição de conteúdo de água ao final do estágio 1.

** $1,863 \times 10^{-10}$ (80 °C/10min), $2,176 \times 10^{-10}$ (90 °C/10 min) e $2,672 \times 10^{-10}$ (100 °C/10min).

***A= 0.2629 (60 °C), 0.4792 (70 °C) e 0.3323 (80 °C); B=0.8519 (60 °C), 1.0331 (70 °C) e 1.605 (80 °C); C= 0.1935 (60 °C), 0.3077 (70 °C) e 0.2648 (80 °C). Faixa de temperatura avaliada = 60 a 80 °C

**** Equação determinada no Capítulo 2.

***** $a = 2,837422$ (60 °C), $3,709200$ (70 °C) e $4,189946$ (80 °C); $b = 0,605952$ (60 °C), $0,691785$ (70 °C) e $0,620426$ (80 °C). Ajustes 60 °C ($R^2 = 0,9954$, P (%) = 8,08), 70 °C ($R^2 = 0,9904$, P (%) = 7,12) e 80 °C ($R^2 = 0,9800$, P (%) = 12,36). Dados experimentais mostrados no Apêndice 3A.

Os valores de $D_{eff,1}$ foram determinados através da equação de Arrhenius (ver item 3.4.3). Os valores de $D_{eff,2}$ foram inseridos no programa por uma equação polinomial (para cada temperatura) em função da umidade inicial do segundo estágio (X_1^t). Esta equação foi ajustada aos valores dos coeficientes de difusão efetivos obtidos através da modelagem de curvas de secagem experimentais a partir de diferentes umidades iniciais, o que está detalhado em Resultados (ver item 3.4.3).

Para as simulações das secagens contínuas, o valor de $D_{eff,c}$ foi determinado pela Equação 3.12, descrita no Capítulo 2.

A equação de encolhimento (Equação 3.3), que faz parte do modelo matemático e, portanto, é utilizada em todas as simulações (secagens intermitentes e contínuas), serviu para

determinar a espessura inicial das fatias de beterrabas no segundo estágio das secagens intermitentes, como apresentado na Tabela 3.1 na forma de Equação 3.3. Essa equação está descrita no Capítulo 2.

A umidade de equilíbrio foi obtida através do modelo de Henderson (Equação 3.13), ajustado a dados de isotermas obtidas por método estático gravimétrico (JOWITT et al., 1987). 4 g de beterraba foram acomodadas em recipientes de vidro herméticos com soluções salinas saturadas com umidades relativas entre 0,11 e 0,9 (LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, NaNO₂, NaCl e KCl). Em seguida, os recipientes foram armazenados em estufas (Simétrica, SL 336L, São Paulo), operando a 60, 70 e 80 °C. Foram realizadas pesagens semanais até as amostras atingirem peso constante, e então, a umidade final das amostras foi determinada por método gravimétrico, em estufa a vácuo (Tecnal, TE-395, São Paulo) a 60°C e 10 kPa.

3.3.5. Consumo de energia

O consumo de energia para aquecimento do ar durante as secagens foi avaliado por duas metodologias, uma teórica, com base em dados experimentais de secagem e respectivos balanços de entalpia (descrito a seguir), e uma prática, através de um analisador de grandezas elétricas (Embrasul, RE 4001, Rio Grande do Sul) instalado nos fios de alimentação elétrica dos blocos de resistências do secador. O equipamento registrou dados de tensão, corrente, potência e consumo de energia elétrica a cada 10 milissegundos durante as secagens.

3.3.6. Balanços de entalpia

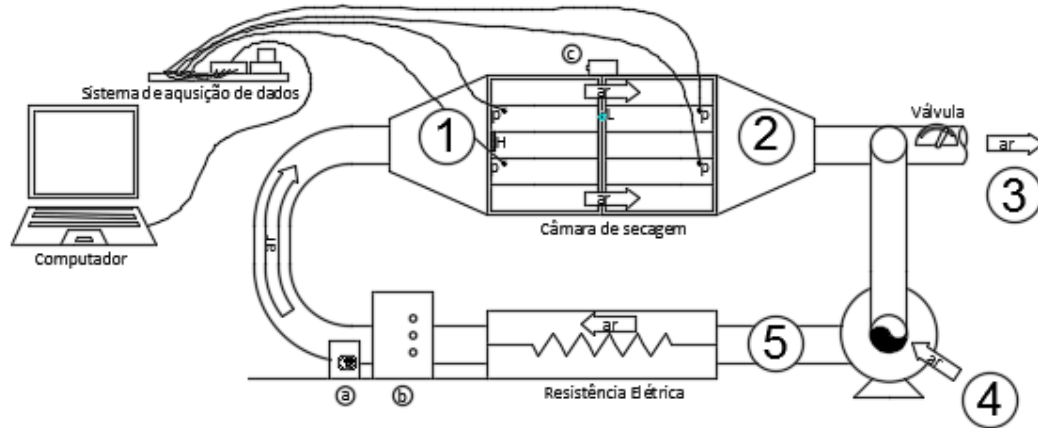
O balanço de entalpia foi escrito em termos de taxa de ar seco, considerando a secagem adiabática. As propriedades do ar ambiente e aquecido foram determinadas através de uma carta psicrométrica digital considerando a altitude de São José do Rio Preto (São Paulo, Brasil) (489 m). Os valores de entalpia e umidade absoluta do ar ambiente foram obtidos utilizando-se valores médios de temperatura e umidade relativa do ar registrados em cada dia de secagem.

O volume úmido foi calculado de acordo com a Equação 3.15 (TREYBAL, 1980):

$$v_i = (0.00287 + 0.00462 \times Y) \times (T + 273) \quad (3.15)$$

em que v é o volume úmido, dado em m³ de mistura · kg ar seco⁻¹, Y é a umidade absoluta do ar (kg vapor · kg ar seco⁻¹) e T a temperatura, em °C e i indica a posição no secador conforme o diagrama esquemático do secador, mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Diagrama esquemático do secador. (a) inversor de frequência; (b) disjuntor geral e acionadores das resistências; (c) controlador de temperatura; (p) PT 100; (H) higrômetro; (L) sensor de temperatura acoplado ao controlador.



Fonte: FILIPPIN et al., (2018)

A taxa de ar seco que chega às bandejas (\dot{m}_1 , kg ar seco \cdot s $^{-1}$) é a mesma que sai (\dot{m}_2 , kg ar seco \cdot s $^{-1}$) e é dada em função da área transversal da câmara de secagem e a velocidade do ar medida experimentalmente.

A umidade absoluta do ar que deixa as bandejas (Y_2 , kg vapor \cdot kg $^{-1}$ ar seco) é calculada em função da taxa de água evaporada (\dot{E} , kg vapor \cdot s $^{-1}$), que, por sua vez, é calculada a partir das curvas de secagem experimentais.

$$Y_2 = Y_1 + \frac{\dot{E}}{\dot{m}_1} \quad (3.16)$$

A taxa de ar seco que sai do secador (\dot{m}_3 , kg ar seco \cdot s $^{-1}$), que é igual a massa de ar fresco que entra no secador (\dot{m}_4 , kg ar seco \cdot s $^{-1}$) é dada pela Equação 3.17.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \frac{(\dot{m}_1 \cdot \nu_1) \cdot (1 - (R/100))}{\nu_3} \quad (3.17)$$

em que R é a porcentagem de ar reciclado (95%).

Numa condição adiabática, a entalpia do ar que passa pelas resistências pode ser calculada segundo:

$$H_5 = \frac{(\dot{m}_1 - \dot{m}_3)H_1 + \dot{m}_4 H_4}{(\dot{m}_1 - \dot{m}_3) + \dot{m}_4} \quad (3.18)$$

em que H é a entalpia ($J \cdot kg^{-1}$ ar seco).

A quantidade de energia necessária (\dot{q} , W) para aquecer o ar foi calculada segundo

$$\dot{q} = \dot{m}_1 H_1 - \dot{m}_1 H_5 \quad (3.19)$$

Dado que a taxa de secagem decresce durante o processo, a energia requerida para aquecer o ar foi calculada para cada período entre pesagens sucessivas, sob a hipótese de que a evaporação se aproximaria de um regime estacionário dentro de cada um dos períodos.

3.3.7. Consumo de energia do motor

O consumo de energia para ventilação foi obtido através da Equação 3.20:

$$e = P \cdot t \quad (3.20)$$

em que e é o consumo de energia (kWh), t é o tempo de uso do motor, em hora, e P (kW) é a potência para um circuito trifásico, dada pela Equação 3.21 (FRANCHI, 2008).

$$P = I \cdot U \cdot \eta \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \quad (3.21)$$

em que I é a corrente (A) e η é o rendimento do motor fornecido pelo fabricante (83,7%). A corrente foi medida através de um multímetro.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

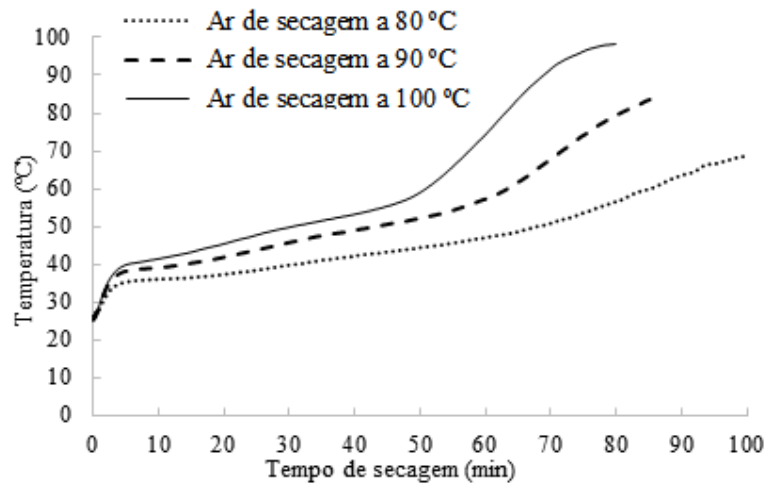
3.4.1. Dados utilizados para simulação

Esse tópico se refere à apresentação e discussão dos resultados utilizados como entrada de dados nas simulações de secagem propostas neste trabalho.

3.4.1.1. Evolução da temperatura da superfície

A Figura 3.5 mostra a evolução da temperatura média da superfície de fatias de beterraba vermelha durante secagens conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

Figura 3.5 – Evolução da temperatura superficial de fatias de beterraba expostas à secagem conduzidas a 80, 90 e 100 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos primeiros minutos houve uma elevação abrupta de temperatura, característica de um período de adaptação (TREYBAL, 1980). Ao final desse período, as temperaturas correspondiam à temperatura de bulbo úmido para as condições de secagem (verificadas em carta psicrométrica) e permaneceram crescentes de modo a não evidenciar um período constante definido.

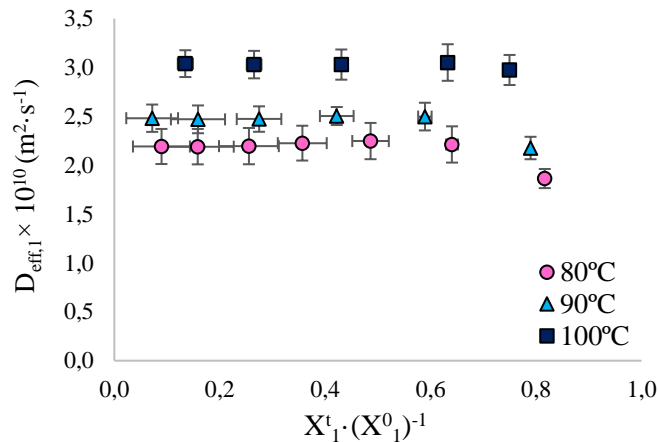
Observou-se uma segunda elevação abrupta bem definida nos tempos de 50, 60 e 70 minutos das curvas de secagens a 80, 90 e 100 °C, respectivamente. A mudança na inclinação da curva é mais intensa e evidente quanto maior é a temperatura. Entende-se que, a partir desses pontos, houve predominância de zonas de insaturação, ou seja, de áreas da superfície sem recobrimento de água. Como consequência, a temperatura do produto aumentou significativamente. Portanto, a partir desses resultados, ficou estabelecido que os primeiros estágios de secagem conduzidos a 80, 90 e 100 °C poderiam durar, no máximo, 50, 60 e 70 minutos, respectivamente.

3.4.1.2. Coeficiente de difusão efetivo

A Figura 3.6 mostra os coeficientes de difusão efetivos ajustados para secagens curtas (que são possíveis configurações de primeiro estágio) com duração “ t ” (em que $t_0 = 10$ e $t = t_0 + 10$ até $t = 50, 60$ ou 70 minutos nas temperaturas de 100, 90 e 80 °C, respectivamente). Os resultados são mostrados em função das umidades finais após o período “ t ” de secagem (X_1^t). Essas umidades foram normalizadas em relação ao conteúdo inicial de água (X_1^t/X_1^0). Os

valores de $D_{eff,1}$ apresentados na Figura 3.6 resultam da média de coeficientes de difusão ajustados a três secagens experimentais para cada condição de tempo e temperatura. As barras de erro verticais indicam o desvio padrão dos valores de $D_{eff,1}$ e as horizontais representam o desvio da umidade (X_1^t/X_1^0).

Figura 3.6 – (a) Difusividades efetivas do primeiro estágio de secagem intermitente em função de diferentes umidades finais do primeiro estágio (X_1^t) obtidas para diversas durações de secagens (t).



Fonte: Elaborado pelo autor

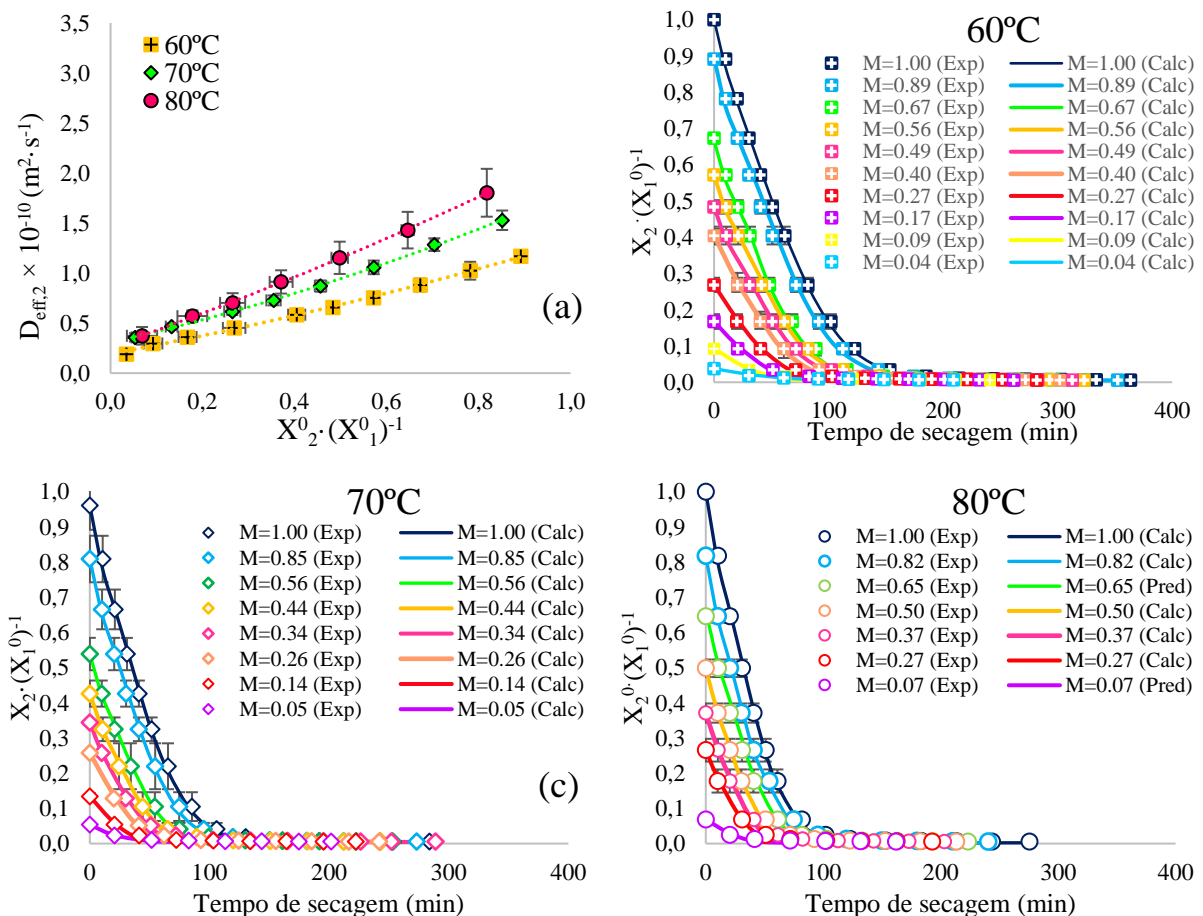
Ainda na Figura 3.6, os primeiros pontos experimentais, que se mostraram inferiores aos demais (na mesma temperatura), referem-se a $D_{eff,1}$ ajustados para secagens de 10 minutos. A partir dos segundos pontos experimentais, os $D_{eff,1}$ foram praticamente constantes (coeficiente de variação $\approx 1\%$), sendo em média, $(2,210 \pm 0,02) \times 10^{-10}$, $(2,484 \pm 0,02) \times 10^{-10}$ e $(3,024 \pm 0,03) \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ nas temperaturas de 80, 90 e 100 °C, respectivamente. Uma equação que segue a funcionalidade da equação de Arrhenius (Equação 3.10, Tabela 3.1) foi ajustada a essas médias das difusividades ($R^2 = 0,9741$) e utilizada para entrada de dados de $D_{eff,1}$ no modelo. Para secagens com duração de 10 minutos, utilizou-se o $D_{eff,1}$ médio determinado experimentalmente para cada temperatura ($1,863 \times 10^{-10}$, $2,176 \times 10^{-10}$ e $2,672 \times 10^{-10}$, para 80, 90 e 100 °C).

A Figura 3.7(a) ilustra as difusividades do segundo estágio ($D_{eff,2}$) cujas umidades iniciais (X_2^0) são iguais às finais dos primeiros estágios de secagem (X_1^t), nas diversas durações de secagens (t). O valor de $D_{eff,2}$ é decrescente em função da umidade inicial, de forma que

um polinômio de 2º grau (Equação 3.11, Tabela 3.1), ajustado para cada temperatura, apresentou bom ajuste ($R^2 > 0,997$) e foi usado para entrada de dados de $D_{eff,2}$ no modelo.

A redução do valor médio de $D_{eff,2}$ em função da umidade inicial da secagem se relaciona ao fato de que o segundo estágio se inicia com beterrabas que já tiveram um período inicial de secagem, ou seja, a água livre já foi retirada e a água restante difunde mais lentamente quanto menor é a sua concentração (BIRD et al., 2001). Esse fato é corroborado pelas Figuras 3.7(b), 3.7(c) e 3.7(d), que mostram as curvas de secagem calculadas e as experimentais a partir de várias umidades iniciais ($M = X_2^0/X_1^0$), nas quais observa-se a redução mais lenta do teor de água, conforme a umidade inicial da beterraba diminui.

Figura 3.7 – (a) Difusividades do segundo estágio de secagem intermitente em função das diversas umidades iniciais do segundo estágio (X_2^0). (b), (c) e (d) Curvas de secagem experimentais (Exp.) e calculadas (Calc.) pelo modelo (Equação 3.5) com os valores de difusividades apresentados na Figura 3.4(a), para diferentes umidades iniciais do segundo estágio de secagem ($M = X_2^0/X_1^0$).

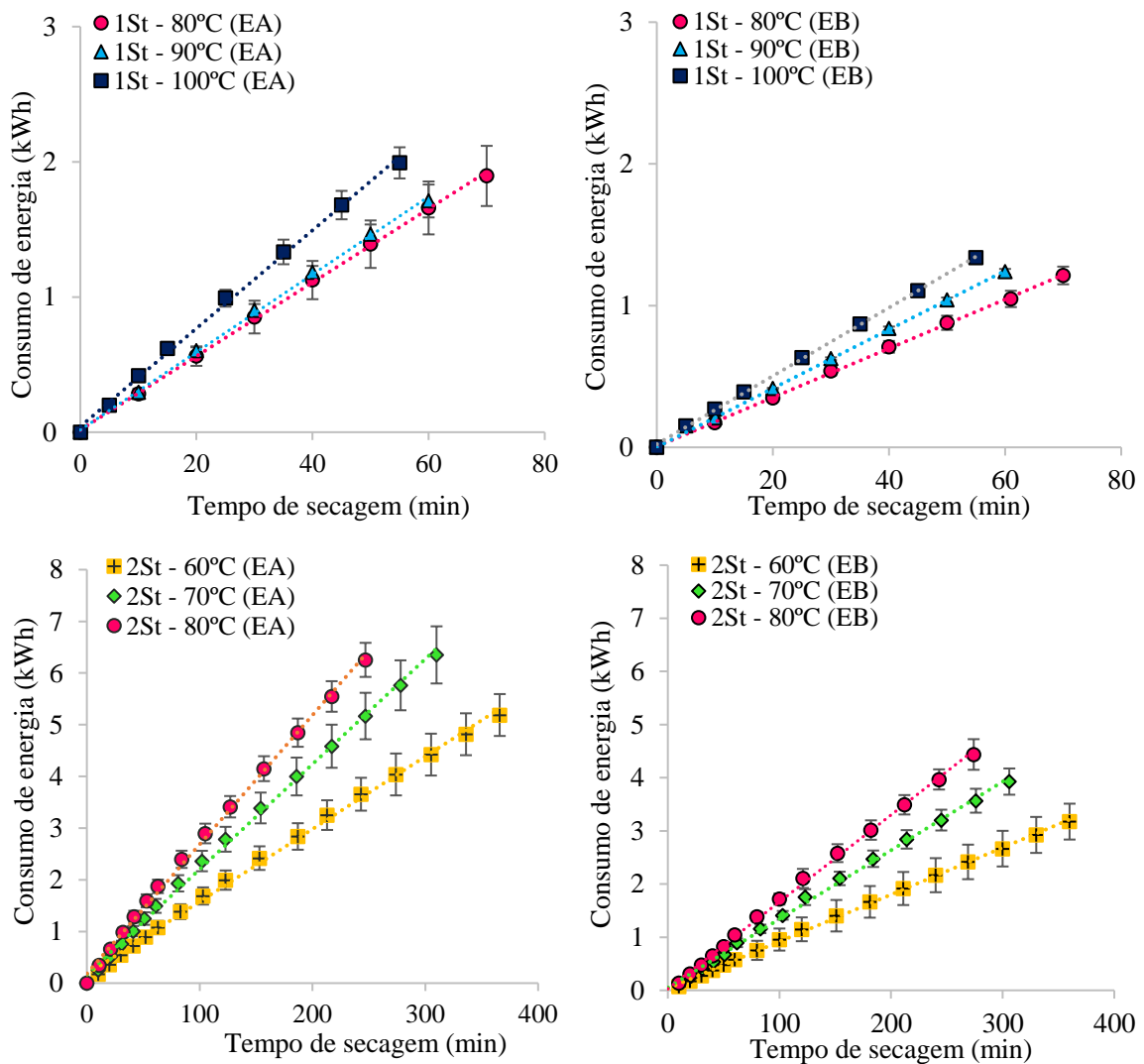


Fonte: Elaborado pelo autor

3.4.1.3. Modelos para consumo de energia

A Figura 3.8 mostra o consumo energético para aquecimento do ar durante o primeiro e segundo estágio (1St e 2St), medido pelo analisador de grandezas elétricas (E.A) e calculado pelo balanço de entalpia (E.B).

Figura 3.8 – Consumos de energia medidos através da análise de grandezas elétricas (E.A.) e calculados pelo balanço de entalpia (E.B) em função do tempo de secagem.



*1St e 2St se referem ao primeiro e ao segundo estágio de secagem intermitente, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor

Consumos obtidos através do E.B são inferiores aos obtidos pelo analisador, pois não consideram as perdas de calor para o ambiente. Além disso, as potências do E.B são função da taxa de evaporação de água, portanto, resultam em valores decrescentes conforme o tempo de

secagem. As potências calculadas pelo E.B foram, em média, 30% inferiores às potências medidas pelo E.A.

De modo geral, o consumo de energia foi linear em relação ao tempo de secagem (Equação 3.22). Um ajuste linear resultou em $R^2 > 0,99$ para todas as temperaturas, independentemente do método de quantificação do consumo de energia. Os coeficientes angulares das retas, mostrados na Tabela 3.2, também corroboram a dependência do consumo de energia com a temperatura do ar de secagem.

$$e = at + b \quad (3.22)$$

sendo a o coeficiente angular ($\text{kWh}\cdot\text{s}^{-1}$) e b , o coeficiente linear (kWh).

As equações de retas obtidas foram utilizadas para calcular o consumo de energia para aquecimento do ar durante secagens simuladas.

Tabela 3.2 – Coeficientes angulares (a) e lineares (b) da Equação 3.22 ajustada aos dados experimentais de consumo de energia a partir do analisador de energia (E.A.) e do balanço de entalpia (E.B.).

	T (°C)	Analisador de energia (E.A.)			Balanço de entalpia (E.B.)		
		a	b	R ²	a	b	R ²
Secagem contínua	60	0,0140	0,1710	0,9979	0,0092	0,0839	0,9977
	70	0,0203	0,1687	0,9980	0,0129	0,0510	0,9981
	80	0,0250	0,1852	0,9978	0,0173	0,0059	0,9995
1º Estágio de secagem intermitente	80	0,0273	0,0166	0,9940	0,0164	0,0287	0,9987
	90	0,0281	0,0189	0,9993	0,0207	0,0025	0,9998
	100	0,0363	0,0422	0,9978	0,0238	0,0331	1,0000

Os valores de umidade relativa e temperatura do ar ambiente e do ar de secagem são mostrados na Tabela 3B.1 do Apêndice 3.B.

3.4.1.4. Avaliação do critério de parada (CP)

Para possibilitar a comparação entre os consumos energéticos de secagens contínuas e intermitentes, que são dependentes da duração do processo, todas as simulações de secagem foram feitas considerando-se o mesmo critério de parada da secagem (CP, descrito pela Equação 3.14). Para determiná-lo, foram avaliados 4 valores com base na variação de umidade ocorrida nos últimos 30 minutos de secagem: $CP \leq 1\%$, $CP \leq 5\%$, $CP \leq 10\%$ e $CP \leq 15\%$. Observou-se que o critério de parada, exerceu influência na determinação da duração dos

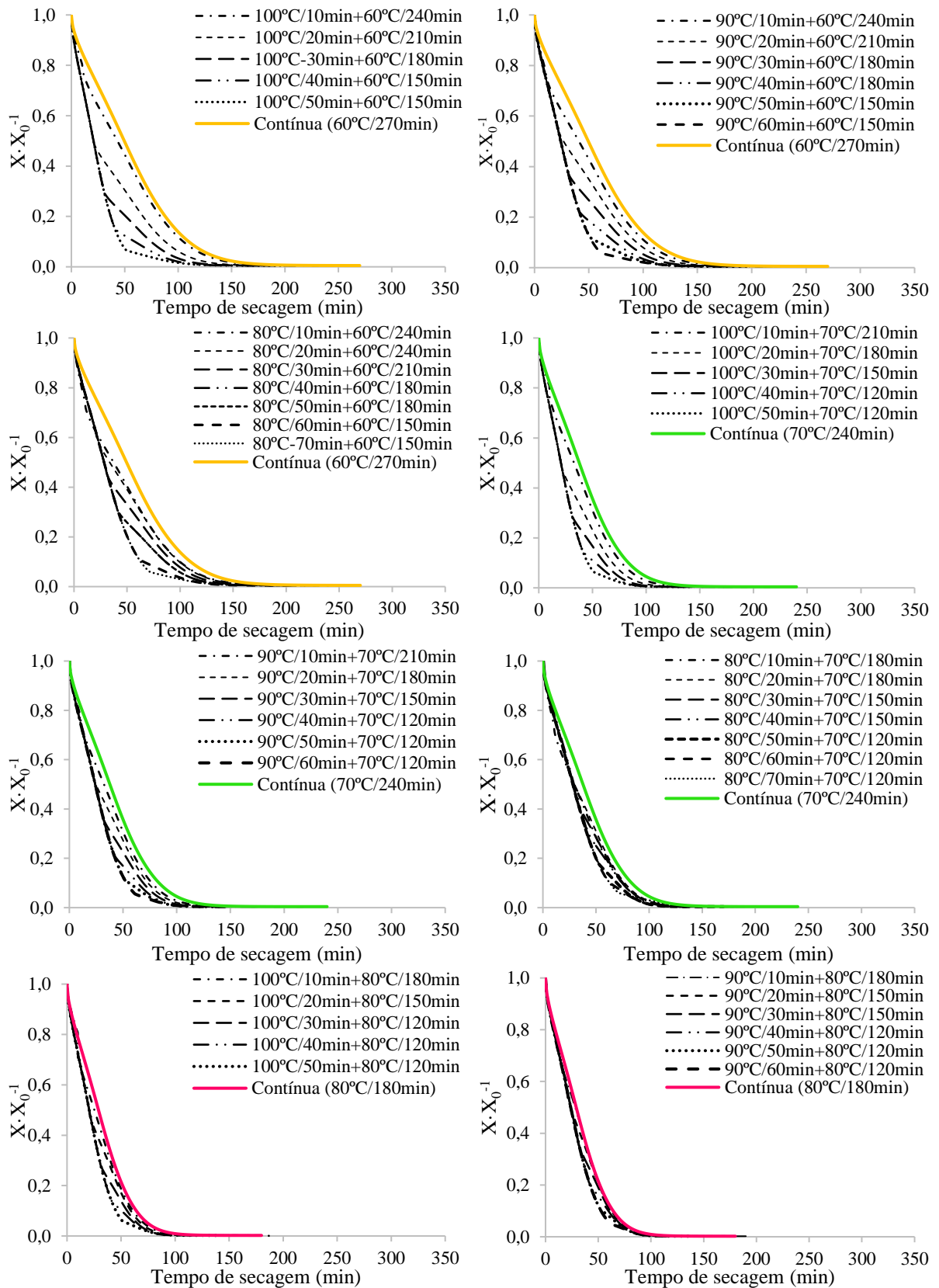
segundos estágios das secagens intermitentes e das secagens contínuas (Apêndice C). O critério $CP \leq 1\%$ mostrou-se exagerado em relação à prática da secagem, uma vez que a comparação entre as umidades é relativa e, por ser realizada com valores baixos, muitas vezes o resultado é superior às variações intrínsecas associadas a erros experimentais e precisão das balanças semi-analíticas. Por outro lado, as secagens mostraram-se muito breves quando $CP \leq 15\%$. Na grande maioria das simulações, as secagens mostraram estabilidade em relação ao tempo de secagem quando foram utilizados os critérios de 5 e 10 % para parada (Apêndice 3C). Algumas secagens não tiveram alteração no tempo total com nenhum dos critérios testados, porém, de modo geral, alterações no tempo de secagem foram observadas quando os critérios $CP \leq 1\%$ e $CP \leq 15\%$ foram comparados.

O critério de parada para as simulações foi $CP \leq 5\%$. As cinéticas de secagem e consumos energéticos serão discutidas nos tópicos subsequentes.

3.4.2. **Secagens intermitentes e contínuas: cinética e consumo de energia**

As curvas simuladas de secagens intermitentes de 47 simulações e as curvas das secagens contínuas, também simuladas, são apresentadas na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Curvas simuladas de secagens intermitentes e contínuas.



*Linhas tracejadas representam curvas simuladas de secagem intermitentes e linhas contínuas representam curvas simuladas da secagem contínua (controle)

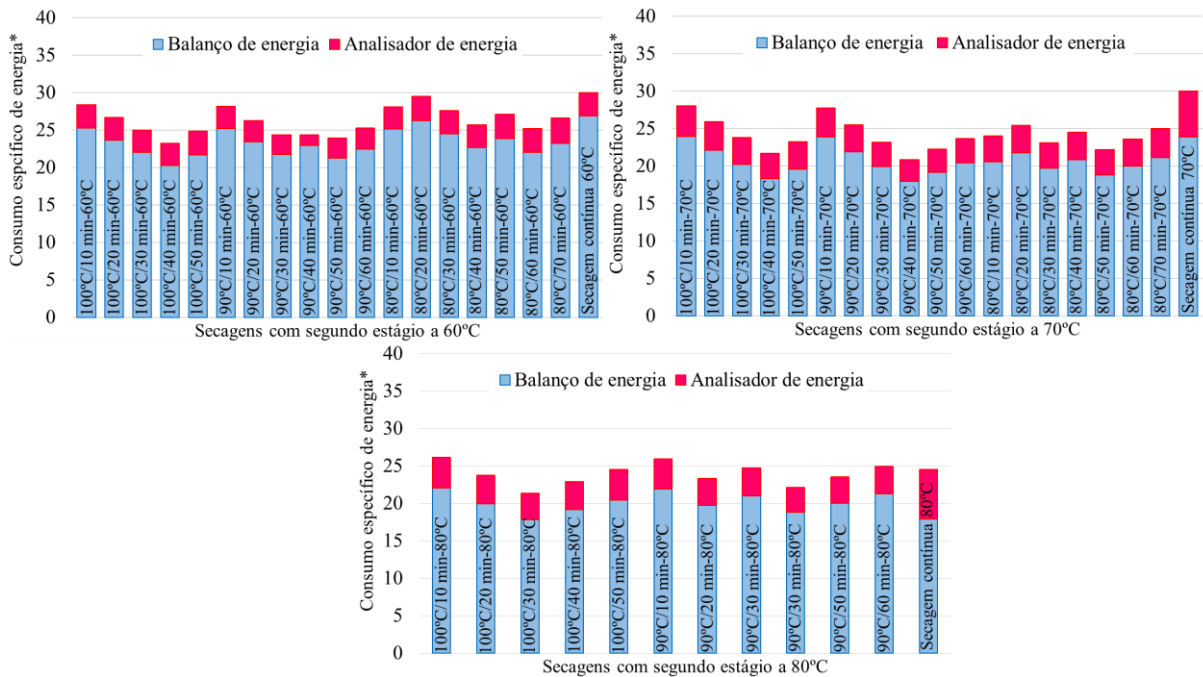
Fonte: Elaborado pelo autor

A influência do primeiro estágio foi mais acentuada com o aumento entre a diferença de temperatura entre o primeiro e o segundo estágio ($\Delta T_{1,2}$). Nos casos em que $\Delta T_{1,2}$ é ≥ 30 °C, há uma mudança acentuada nas tendências das curvas do primeiro e do segundo estágio e uma distinção visível entre as curvas com diferentes durações do primeiro estágio. À medida em que $\Delta T_{1,2}$ fica menor, as mudanças são cada vez menos abruptas e as curvas de secagem intermitente ficam mais próximas entre si e com a curva da secagem contínua.

O emprego da intermitência térmica proporcionou aumento na velocidade de secagem devido às altas taxas de remoção de água durante o primeiro estágio, conduzido em temperaturas elevadas. A maioria das configurações de secagem intermitente promoveram economias de tempo (APÊNDICE 3D) que chegaram a 33% (100°C/40min+70°C/120min e 90°C/40min+70°C/120min), comparativamente aos controles. Secagens com estágios iniciais mais breves promoveram menores ganhos e, em alguns casos (100°C/10min+80°C/180min e 90°C/10min+80°C/180min), resultaram em tempo de processo até um pouco superior ao da correspondente secagem contínua (6%). Outras configurações de secagens com baixo $\Delta T_{1,2}$ apresentaram a mesma duração que a secagem controle (contínua) (90°C/60min+80°C/120min e 90°C/30min+80°C/150min).

A redução de tempo de secagem exerce forte influência sobre o consumo de energia, não só pelo aquecimento do ar, mas também pelo tempo de uso do ventilador. No entanto, o aumento da temperatura de secagem demanda mais energia durante o estágio em que é aplicada. Por essa razão, a maior redução de tempo não indica diretamente a configuração energeticamente mais vantajosa, sendo necessário avaliar o consumo específico de energia. A Figura 3.10 mostra o consumo específico de energia ($\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ de água evaporada) de cada configuração de secagem simulada segundo dados do analisador de energia e pelo balanço de entalpia.

Figura 3.10 – Consumo específicos de energia de secagens contínuas e intermitentes, determinados pelo analisador de energia e pelo balanço de entalpia.



*Medidas de consumo específicos de energia dado em kWh·kg⁻¹ de água evaporada

Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo específico de energia mensurado pelo equipamento analisador variou de 20,89 a 29,52 e de 24,50 a 30,03 kWh·kg⁻¹ de água evaporada nas secagens intermitentes e contínuas, respectivamente, enquanto os valores calculados pelo balanço de entalpia foram menores. Os consumos específicos de energia das secagens contínuas mostram uma tendência decrescente do consumo de energia com o aumento da temperatura do ar de secagem para 80 °C, o que indica que a redução do tempo de processo exerceu mais influência sobre o consumo de energia do que a maior demanda energética para aquecer o ar em temperaturas maiores. Esse resultado também foi encontrado por outros autores (MONTEVALLI et al., 2011; KAVEH et al., 2020).

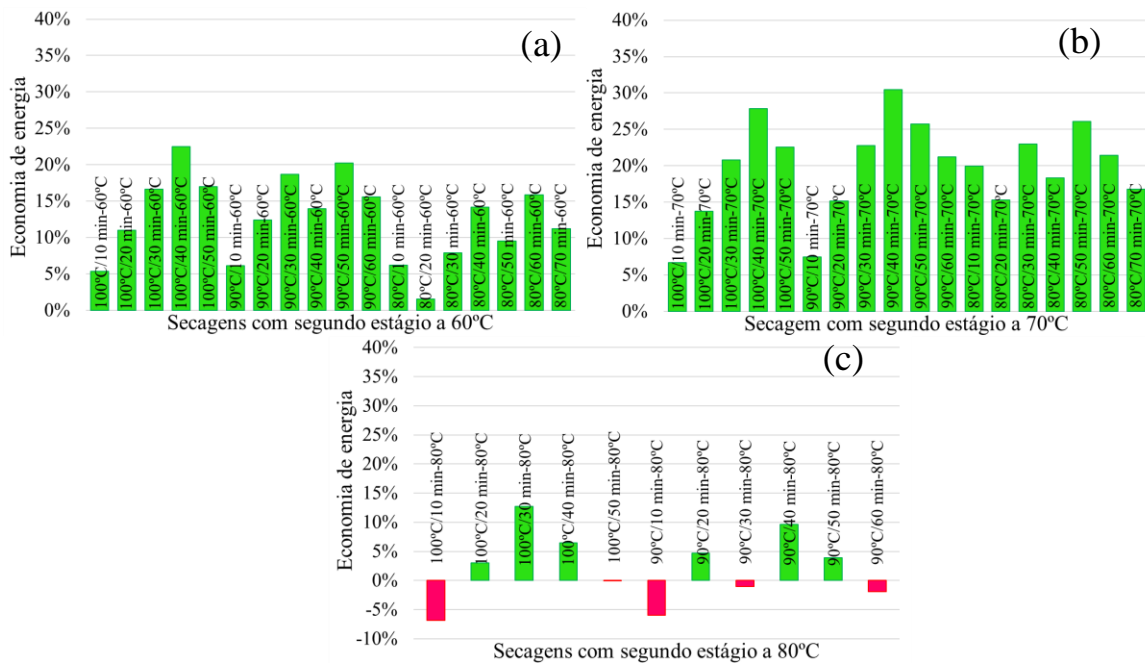
O gasto energético de cada operação de secagem depende do projeto do secador, das condições de secagem e da matéria prima a ser seca, portanto, a comparação com dados da literatura é inconclusiva. Todavia, observou-se que a ordem de grandeza dos consumos está coerente com os obtidos em outros trabalhos de secagem com ar quente. Como exemplos, no estudo de Kaveh et al. (2020), o consumo da secagem de *Pistacia atlantica* variou de 48 a 184 kWh·kg⁻¹ de matéria prima nas temperaturas de 40 °C a 70 °C; no estudo de Montevali et al. (2011) que secaram cogumelos, os autores obtiveram consumos de 47,8 a 93,4 kWh·kg⁻¹ de

matéria prima fresca; no estudo de Ozgen (2015) com secagem de cereja a 35, 45 e 55 °C, o consumo absoluto variou de 51 a 106 kWh; no estudo de Chen et al. (2020) com secagem de amêndoa foram obtidos consumos de 9,83 a 21,96 MJ·kg⁻¹ de água (equivalente à 2,73 a 6,1 kWh·kg⁻¹ de água); por fim, no estudo de Dehghannya et al. (2019) com secagem de batata a 40 °C, os consumos de energia variaram de 151,03 a 376,6 MJ·kg⁻¹ de água evaporada (41,95 a 104,61 kWh·kg⁻¹ de água evaporada).

3.4.3. Economia de energia

A Figuras 3.11(a), 3.11(b) e 3.11(c) mostram a economia de energia (calculada com dados da análise de energia) de cada configuração de secagem intermitente em relação ao consumo da secagem contínua conduzida na mesma temperatura do segundo estágio.

Figura 3.11 – Economias de energia (%) de secagens intermitentes.



Fonte: Elaborado pelo autor

A duração do primeiro estágio teve relação direta com a economia de energia. Primeiros estágios com durações intermediárias mostraram os maiores valores de economia, que decresceram à medida que a duração do primeiro estágio aumentou ou diminuiu. De modo geral, secagens com estágios iniciais com durações menores mostraram menos economia. Em alguns casos (100°C/10min+80°C, 90°C/10min+80°C, 100°C/50min+80°C, 90°C/30min+80°C

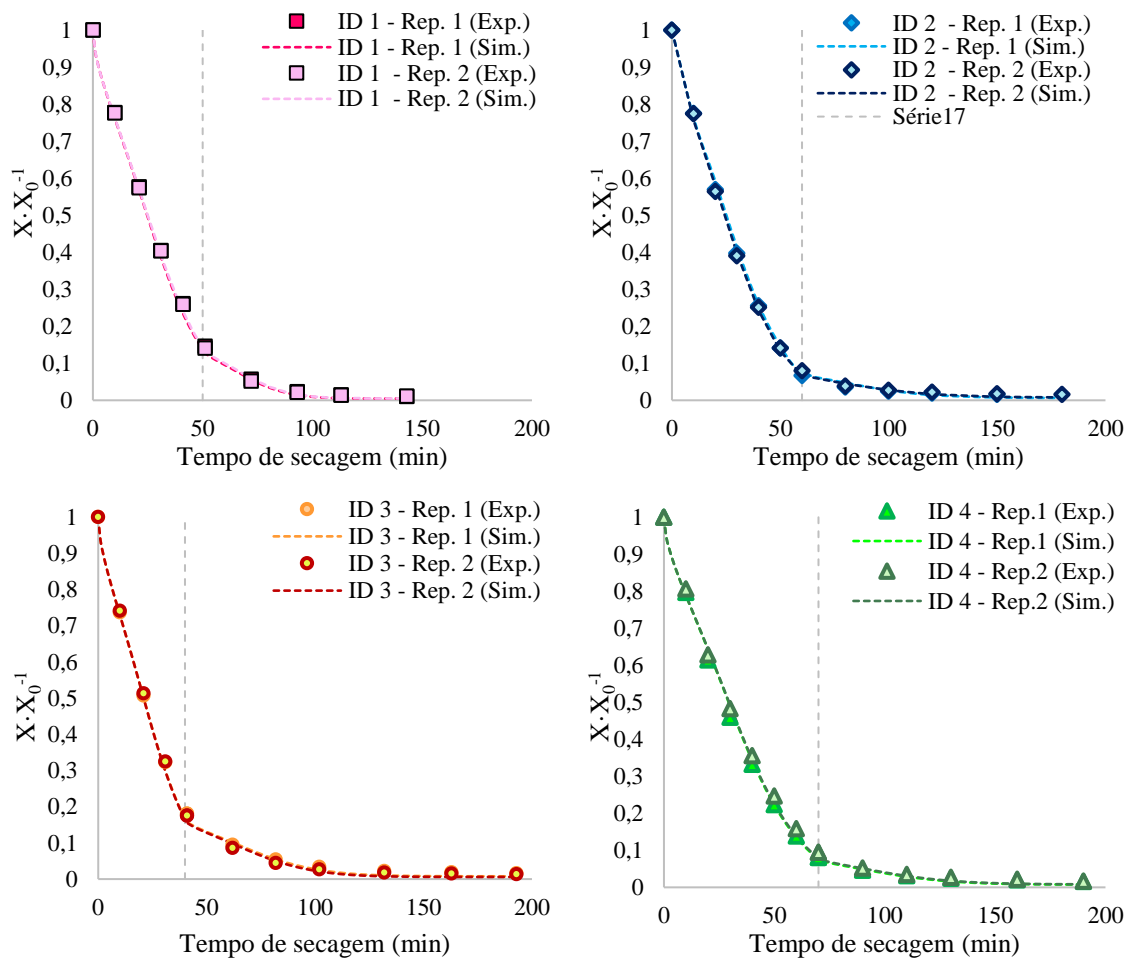
e 90°C/60min+80°C) consumiram mais energia que a secagem contínua, destacando a relevância da determinação cuidadosa das configurações de secagem com intermitência térmica, principalmente quando o primeiro estágio é breve e/ou o segundo estágio é conduzido em uma temperatura alta. Nesses casos, ou não houve aumento da eficiência da secagem ou o aumento não foi suficiente para compensar a maior demanda energética para aquecimento do ar.

Por outro lado, a grande maioria das secagens intermitentes mostraram economias significativas. Dentre as secagens intermitentes, destacam-se as secagens 90°C/40min+70°C/120min, 100°C/40min+70°C/120min, 80°C/50min+70°C/120min e 90°C/50min+70°C/120min que proporcionaram 30,5%, 27,87%, 26,1% e 26,1% de economia de energia, respectivamente. Esses valores são semelhantes a dados reportados por Kumar et al. (2014) e, em alguns casos, superiores aos alcançados por autores que usaram secagem intermitente com têmpera (HOLOWATY et al., 2012; SALEH et al., 2020), na qual há uma ou mais interrupções no fornecimento de calor durante a secagem para redistribuição de umidade, e que é uma das formas de secagem intermitente mais estudadas por apresentar bons resultados (VON ENGELAND et al., 2022). No entanto, as secagens com intermitência térmica sem tempo de têmpera são adequadas a alimentos susceptíveis a reações químicas e bioquímicas em alta umidade, e têm a vantagem de serem breves, uma vez que o tempo total de processo é uma das principais preocupações quando se trata de secagem com têmpera (DODER; DAKOVIC, 2019). Nesse sentido, podem permitir maior produção para secadores a bateladas ou então, reduzir o tempo de trabalho para pequenas produções.

3.4.4. Validação experimental

Quatro experimentos de secagem intermitente (ID 1, ID 2, ID 3 e ID 4), em duplicata, foram comparados com as respectivas simulações de secagem. Os dados experimentais e as curvas simuladas, mostradas na Figura 3.12, mostram que o modelo foi efetivo para representar as secagens intermitentes.

Figura 3.12 – Curvas de secagens intermitentes experimentais (Exp.) e simuladas (Sim.).



ID 1 – 90°C/50min+70°C/90min; ID 2 - 90°C/60min+60°C/120min; ID 3 - 100°C/40min+60°C/150min; ID 4 - 80°C/70min+60°C/120min

As linhas tracejadas verticais indicam o término do primeiro estágio.

Fonte: Elaborado pelo autor

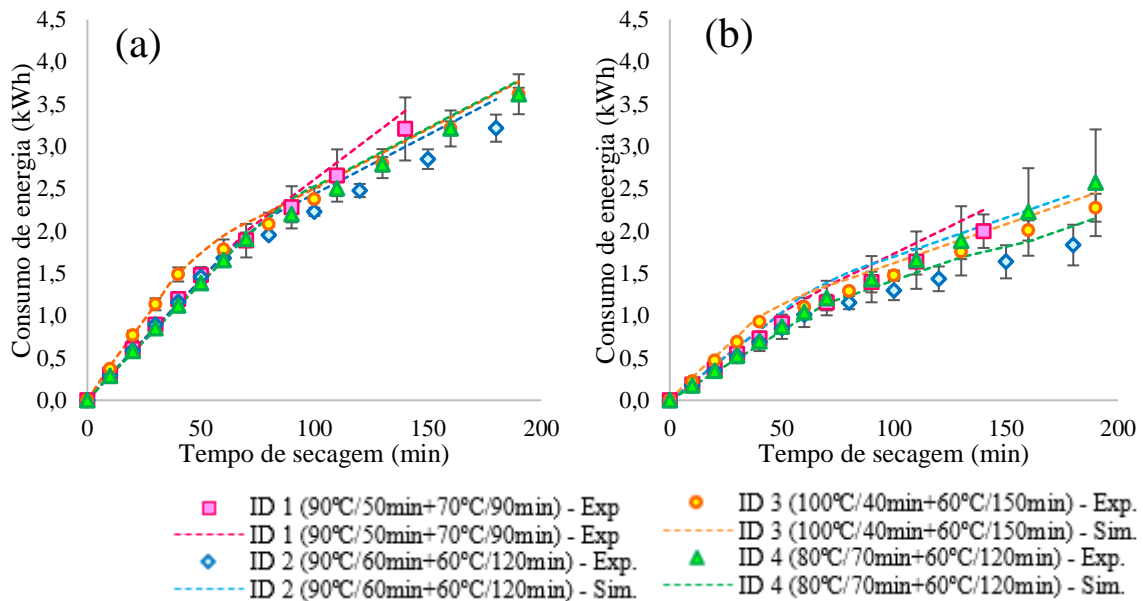
As umidades médias obtidas nas secagens simuladas foram comparadas aos dados experimentais, através de indicadores estatísticos como apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – D_{eff} utilizados nas simulações das secagens intermitentes (calculados através das Equações 10 e 11) e respectivos indicadores estatísticos de ajuste entre dados simulados e observados.

Tratamento	Rep.	$D_{eff}^{sim} \times 10^{10}$ (m ² ·s)	Indicadores estatísticos			
			R ²	P(%)	RQMR	
ID 1	1	90°C/50min	2,559	0,9992	2%	0,010
		70°C/90 min	0,459	0,9931	29%	0,006
	2	90°C/50min	2,559	0,9991	2%	0,068
		70°C/90 min	0,465	0,9912	30%	0,009
ID 2	1	90°C/60min	2,559	0,9990	4%	0,012
		60°C/120 min	0,260	0,9634	31%	0,012
	2	90°C/60min	2,559	0,9989	4%	0,011
		60°C/120 min	0,254	0,9156	27%	0,012
ID 3	1	100°C/40min	2,980	0,9998	3%	0,013
		60°C/150 min	0,343	0,9939	28%	0,008
	2	100°C/40min	2,980	0,9995	4%	0,016
		60°C/150 min	0,341	0,9799	32%	0,009
ID 4	1	80°C/70min	2,179	0,9976	3%	0,015
		60°C/120min	0,261	0,9735	28%	0,007
	2	80°C/70min	2,179	0,9982	6%	0,015
		60°C/120min	0,263	0,9686	29%	0,010

Os consumos de energia correspondentes aos ensaios para validação do modelo também foram determinados experimentalmente e comparados com os consumos simulados. A Figura 3.13 mostra os consumos de energia experimentais e simulados, resultantes da E.A e do E.B.

Figura 3.13 – Consumos de energia experimentais (Exp.) e simulados (Sim.) medidos através do analisador de energia (a) e calculados a partir do balanço de entalpia (b).



Os valores simulados e experimentais são próximos e a comparação entre eles resulta em indicadores estatísticos satisfatórios, com $R^2 > 0,99$, conforme mostra a Tabela 3.4. Os desvios padrão e os valores de P (%) foram maiores para as equações do E.B. o que ser relacionado às maiores influências das condições ambientais no balanço de entalpia, ainda que as condições do ar quente das secagens intermitentes sejam semelhantes às condições das secagens usadas para ajustar os modelos empíricos para cálculo do consumo de energia (Apêndice 3B, Tabela 3B.2).

Tabela 3.4 – Indicadores estatísticos das simulações de consumo de energia através de equações obtidas pelo analisador de energia (E.A.) e pelo balanço de entalpia (E.B.).

Tratamento	Rep.	Indicadores estatísticos			
		E.A.		E.B.	
		R ²	P%	R ²	P%
ID 1	1	0,999	5,2%	0,999	7,9%
	2	0,997	8,9%	0,994	20,8%
ID 2	1	0,998	2,6%	0,994	32,5%
	2	0,996	5,2%	0,999	20,1%
ID 3	1	0,999	2,6%	0,998	8,9%
	2	0,999	8,2%	0,999	8,7%
ID 4	1	0,999	4,8%	0,996	12,8%
	2	0,999	3,7%	0,998	5,8%

ID 1 – 90°C/50min+70°C/90min; ID 2 – 90°C/60min+60°C/120min;
ID 3 – 100°C/40min+60°C/150min; ID 4 – 80°C/70min+60°C/120min

Quando se avalia o consumo de energia específico, mostrado na Tabela 3.5, constata-se que os valores experimentais foram muito próximos aos simulados, sendo, de modo geral, um pouco superiores. Essa diferença pode ser justificada pelo fato de que a quantidade de água retirada nas secagens experimentais foi ligeiramente inferior àquela simulada, levando, portanto, a um consumo específico foi maior.

Tabela 3.5 – Consumos específicos de energia simulados e experimentais.

Tratamento	Consumo específico de energia (kWh·kg ⁻¹ de água evaporada)			
	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental
ID 1	17,63 ± 0,24	18,06 ± 0,71	15,06 ± 0,49	14,79 ± 0,66
ID 2	21,48 ± 0,72	22,20 ± 0,36	18,75 ± 0,63	20,02 ± 1,17
ID 3	22,96 ± 0,37	24,09 ± 0,86	19,65 ± 0,30	20,51 ± 0,64
ID 4	23,20 ± 0,09	24,43 ± 0,01	18,69 ± 0,49	21,61 ± 1,88

ID 1 - 90°C/50min+70°C/90min; ID 2 - 90°C/60min+60°C/120min; ID 3 - 100°C/40min+60°C/150min; ID 4 - 80°C/70min+60°C/120min

3.5. CONCLUSÃO

O modelo teórico proposto foi eficiente para simular cinéticas de secagens contínuas e intermitentes, assim como as equações empíricas utilizadas para simular o consumo das secagens. As simulações de secagens e de consumo de energia elétrica foram validadas experimentalmente com parâmetros estatísticos satisfatórios. A intermitência térmica proporcionou aumento da eficiência da secagem convectiva em termos de taxas de secagem e economia de energia em relação às secagens contínuas. No entanto, a escolha das configurações de secagem não deve ser arbitrária pois pode demandar mais energia do que o processo convencional e/ou superaquecer o produto. Os tempos máximos para primeiros estágios conduzidos a 80, 90 e 100 °C foram 70, 60 e 50 minutos, respectivamente. De modo geral, as maiores economias foram obtidas com primeiros estágios conduzidos por 40 ou 50 min e com segundo estágio conduzido a 70 °C. Várias configurações de secagem mostraram economia de energia relevante, no entanto, destaca-se a secagem 90°C/40min+70°C/120min, que apresentou 30,5 % de economia. Concluiu-se que, quando comparada com a secagem convencional, a secagem convectiva com intermitência térmica é mais sustentável e economicamente mais atraente para a indústria de alimentos.

REFERÊNCIAS

AGHILINATEGH, N.; RAFIEE, S.; GHOLIKHANI, A.; HOSSEINPUR, S.; OMID, M.; MOHTASEBI, S. S.; MALEKI, N. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes, **Food Science & Nutrition**, Vol. 3, n. 6, p. 519–526, 2015 DOI:10.1002/fsn3.241

AMADO, L. R.; SILVA, K. DE S.; MAURO, M. A. Drying of mangoes (*Mangifera indica* L, cv, Palmer) at changeable temperature conditions—Effects on energy consumption and quality of the dehydrated fruit. **Journal of Food Process Engineering**, 2020. DOI:10.1111/jfpe.13615

BIRD, R. B.; STUART, W. E.; LIGHFOOT, E. N. Transport phenomena, John Wiley and Sons, 2002.

CAO, X.; ISLAM, M. N.; XU, W.; CHEN, J.; CHITRAKAR, B.; JIA, X.; ZHONG, S. Energy Consumption, Colour, Texture, Antioxidants, Odours, and Taste Qualities of Litchi Fruit Dried by Intermittent Ohmic Heating. **Foods**, vol. 9, n. 4, p. 425, 2020. DOI:10.3390/foods9040425

CHEN, C.; VENKITASAMY, C.; ZHANG, W.; DENG, L.; MENG, X.; PAN, Z. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. **Journal of Food Engineering**, 110105, 2020. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.11010

CHUA, K. J.; CHOU, S. K. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 40, n. 1, p. 23–39, 2005. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.00903.x

DAI, J.W.; XIAO, H.W.; ZHANG, L.H.; CHU, M.Y.; QIN, W.; WU, Z.J.; YIN, P.F. Drying characteristics and modeling of apple slices during microwave intermittent drying. **Journal of Food Process Engineering**, e13212, 2019. DOI:10.1111/jfpe.13212

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes – A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323–344, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.02

DEGHANNYA, J.; KADKHODAEI, S.; KHAKBAZ HESHMATI, M.; GHANBARZADEH, B, Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave - hot air-drying process of potato: Quality aspects and energy consumption, **Ultrasonics**, 2019. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.02.005

DODER, Đ, D.; ĐAKOVIĆ, D. D. Energy savings in convective drying of various materials using variable temperature conditions. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, vol. 2019. e13277, DOI:10.1002/ep.1327

FILIPPIN, A. P.; MOLINA FILHO, L.; FADEL, V.; MAURO, M. A. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. **Drying Technology**, p. 1–16, 2018. DOI:10.1080/07373937.2017.1421549

FRANCHI, C.M. **Acionamentos elétricos**, 4Ed, São Paulo: Erica, 2008, 256p.

HADIPOUR, E.; TALEGHANI, A.; TAYARANI-NAJARAN, N.; TAYARANI-NAJARAN, Z. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. **Phytotherapy Research**, 2020. DOI:10.1002/ptr.6653

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L.A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba mate. **Journal of Food Engineering**, vol. 111, n. 1, p. 110–114, 2012. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.01.01

JOWITT, R.; ESCHER, F.; HOLLSTOM, H.F.T.; MEFFERT, W.E.L. **Physical properties of foods**: COST 90, London: Elsevier, 1987.

KAVEH, M.; CHAYJAN, R. A.; TAGHINEZHAD, E.; SHARABIANI, V, R.; MOTEVALI, A. Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: *Pistacia Atlantica*). **Journal of Cleaner Production**, 120963, 2020. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120963

KUMAR, C.; KARIM, M, A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48–57, 2014. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014

MAO, Y.; WANG, S, Simultaneous hot-air assisted radio frequency drying and disinfestation for in-shell walnuts using a two-stage strategy. **LWT - Food Science and Technology**, v. 151, 2020. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112134

MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGAZA, M. H. Evaluation of energy consumption in different drying methods. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n, 2, p. 1192–1199, 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.09.01

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**, 3 ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton (USA): CRC Press; 2006.

OZGEN, F. Experimental investigation of drying characteristics of cornelian cherry fruits (*Cornus mas L.*), **Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 3, p. 343–352, 2014. DOI:10.1007/s00231-014-1397-y

ROQUES, M.A.; ZAGROUBA, F.; DO AMARAL SOBRAL, P. Modelisation principles for drying of gels, **Drying Technology**, v. 12, p. 1245-1262, 1994. DOI: 10.1080/07373939408961004

SZADZIŃSKA, J.; MIERZWA, D.; PAWŁOWSKI, A.; MUSIELAK, G.; PASHMINEHAZAR, R.; KHARAGHANI, A. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. **Drying Technology**, p. 1–15, 2019, DOI:10.1080/07373937.2019.1624565

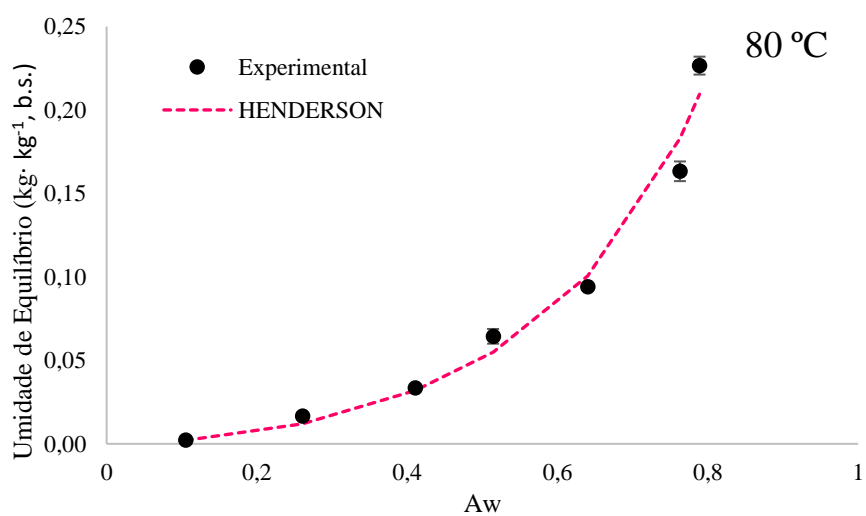
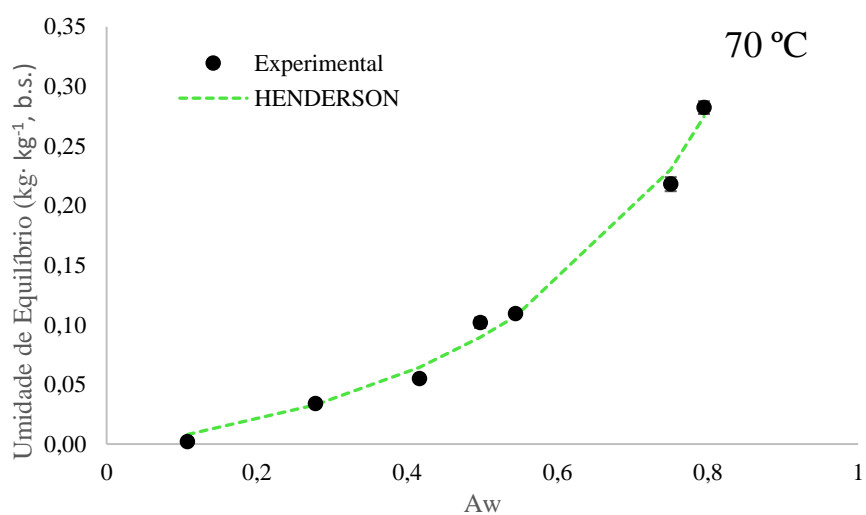
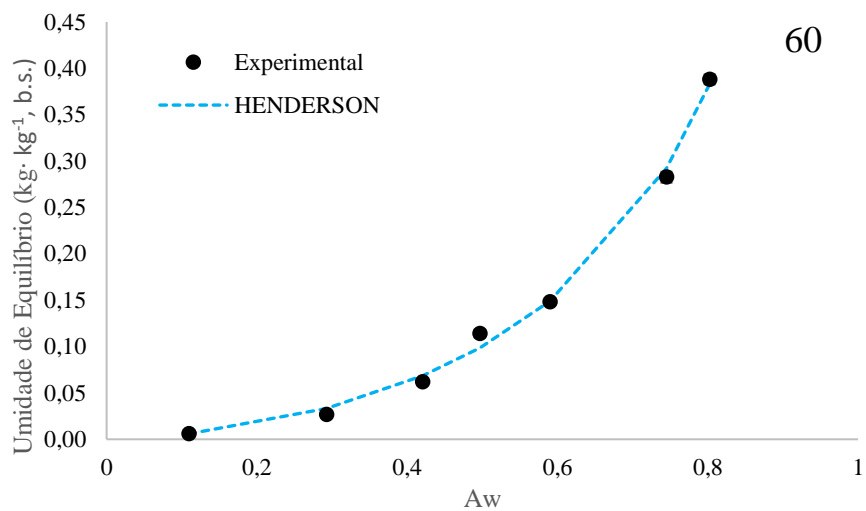
TAKOUGNADI, E.; BOROZE, T.E. T.; AZOUMA, O.Y. Development of an intermittent drying process of onion. **Cogent Food & Agriculture**, v. 4, n.1, 2017, DOI:10.1080/23311932.2017.1422225

TREYBAL, R. E. **Mass-transfer operations**, New York: McGraw-Hill, 1980.

VON ENGELAND, C.; SPREUTELS, L.; LEGROS, R.; HAUT, B. Comprehensive analysis of intermittent drying: A theoretical approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 131, p.86-101, 2022. DOI: 10.1016/j.fbp.2021.10.009

WANG, W.; CHEN, G.; MUJUMDAR, A.S. Physical Interpretation of Solids Drying: An Overview on Mathematical Modeling Research. **Drying Technology**, v, 25, n, 4, p, 659–668, 2007, DOI: 10.1080 / 07373930701285936

XANTHOPOULOS, G.; ATHANASIOU, A.; SEMPOU, A.; LENTZOU, D.; TEMPLALEXIS, C.; BOUDOUVIS, A, G, Study of the Drying Rate and Colour Kinetics during Stepwise Air-Drying of Apricot Halves. **International Journal of Food Engineering**, v. 15, 2019, DOI:10.1515/ijfe-2018-0372

APÊNDICE 3A – ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE BETERRABAFigura 3A.1 – Isotermas de dessecção de beterrabas *in natura* conduzidas a 60, 70 e 80 °C e ajuste do modelo de Henderson aos dados experimentais em cada temperatura

APÊNDICE 3B – CONDIÇÕES DO AR DE SECAGEM

Tabela 3B.1. Condições do ar de secagem durante secagens contínuas para determinação das equações de consumo de energia.

Ensaio de secagem	Rep.	Ar de secagem		Ar ambiente	
		Temperatura (°C)	UR%	Temperatura (°C)	UR%
60 °C	1	60,8 ± 0,5	8,3 ± 0,8	27,7 ± 0,2	40,9 ± 0,8
	2	60,0 ± 0,8	11,4 ± 1,5	31,2 ± 1,2	45,3 ± 2,8
	3	60,5 ± 2,8	11,2 ± 1,8	31,3 ± 0,6	44,8 ± 1,0
70 °C	1	70,1 ± 0,9	6,6 ± 1,2	27,9 ± 1,9	47,4 ± 4,1
	2	70,1 ± 0,9	6,4 ± 1,2	27,3 ± 1,3	46,8 ± 4,0
	3	70,0 ± 0,9	9,3 ± 1,5	30,6 ± 0,8	59,5 ± 3,4
80 °C	1	81,2 ± 1,3	5,2 ± 0,2	28,6 ± 1,3	52,4 ± 1,8
	2	80,8 ± 1,0	5,8 ± 0,2	27,7 ± 0,8	59,4 ± 1,3
	3	80,2 ± 1,0	5,5 ± 1,1	31,2 ± 0,6	45,0 ± 0,8

Tabela 3B.2. Condições do ar de secagem durante secagens intermitentes.

Ensaio de secagem	Condições de secagem	Rep.	Ar de secagem		Ar ambiente	
			Temperatura (°C)	UR (%)	Temperatura (°C)	UR (%)
ID 1	90 °C/50min	1	90,20 ± 1,36	3,08 ± 0,61	27,3 ± 0,75	44,97 ± 1,49
	70 °C/90min		70,95 ± 0,69	5,68 ± 1,20		
	90 °C/50min	2	90,28 ± 1,13	3,21 ± 0,71		
	70 °C/90min		71,16 ± 0,66	5,76 ± 1,26		
ID 22	90 °C/60min	1	90,10 ± 1,39	3,61 ± 0,69	34,18 ± 0,35	40,36 ± 0,46
	60 °C/120min		61,43 ± 0,66	8,42 ± 1,17		
	90 °C/60min	2	90,49 ± 1,28	4,14 ± 0,69		
	60 °C/120min		61,69 ± 0,54	10,97 ± 1,02		
ID 3	100 °C/40min	1	99,76 ± 1,21	2,90 ± 0,78	29,30 ± 0,76	47,04 ± 1,52
	60 °C/150min		60,71 ± 0,64	9,62 ± 1,22		
	100 °C/40min	2	99,61 ± 1,12	3,06 ± 1,04		
	60 °C/150min		60,88 ± 0,70	9,18 ± 1,31		
ID 4	80 °C/70min	1	80,31 ± 1,08	5,42 ± 0,59	31,28 ± 0,32	52,04 ± 0,57
	60 °C/120min		61,51 ± 1,64	11,08 ± 1,17		
	80 °C/70min	2	80,26 ± 1,18	4,58 ± 0,80		
	60 °C/120min		61,12 ± 0,55	8,58 ± 1,25		

APÊNDICE 3C – AVALIAÇÃO DO CRITÉRIO DE PARADA

Tabela B. Tempo total de secagem e economia de energia considerando diferentes critérios de parada (CP) para simulação de diversas configurações de secagens intermitentes e contínuas.

Primeiro estágio		Segundo estágio	Tempo total de secagem (min)				Economia de energia (%)			
Temperatura	Tempo (min)	Temperatura	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP
			≤ 1%	≤ 5%	≤ 10%	≤ 15%	≤ 1%	≤ 5%	≤ 10%	≤ 15%
100 °C	10	60 °C	310	250	250	250	-5%	5%	5%	-7%
	10	70 °C	220	220	190	190	7%	7%	7%	7%
	10	80 °C	220	190	190	160	-6%	-7%	-7%	9%
	20	60 °C	260	230	230	200	9%	10%	10%	12%
	20	70 °C	200	200	170	170	13%	13%	15%	15%
	20	80 °C	200	170	170	170	2%	3%	3%	3%
	30	60 °C	240	210	210	180	14%	16%	16%	18%
	30	70 °C	180	180	180	150	20%	20%	9%	23%
	30	80 °C	180	150	150	150	11%	12%	12%	13%
	40	60 °C	220	190	190	190	19%	21%	21%	12%
	40	70 °C	190	160	160	160	15%	27%	17%	17%
	40	80 °C	160	160	160	160	19%	6%	6%	6%
	50	60 °C	230	200	200	170	14%	16%	16%	18%
	50	70 °C	170	170	170	140	22%	22%	11%	25%
	50	80 °C	170	170	170	140	13%	-1%	-1%	16%
90 °C	10	60 °C	280	250	250	250	5%	6%	6%	-6%
	10	70 °C	220	220	190	190	7%	7%	8%	8%
	10	80 °C	190	190	190	160	9%	-6%	-6%	10%
	20	60 °C	260	230	230	230	11%	12%	12%	1%
	20	70 °C	230	200	200	170	3%	15%	3%	17%
	20	80 °C	200	170	170	170	4%	5%	5%	5%
	30	60 °C	240	210	210	210	16%	18%	18%	8%
	30	70 °C	210	180	180	180	10%	23%	12%	12%
	30	80 °C	180	180	150	150	13%	-1%	15%	15%
	40	60 °C	250	220	190	190	12%	13%	24%	15%
	40	70 °C	190	160	160	160	18%	30%	20%	20%
	40	80 °C	190	160	160	160	8%	9%	9%	9%
	50	60 °C	230	200	200	200	17%	19%	19%	9%
	50	70 °C	170	170	170	170	25%	25%	15%	15%
	50	80 °C	170	170	170	170	17%	4%	4%	4%
80 °C	60	60 °C	240	210	210	180	13%	15%	15%	16%
	60	70 °C	180	180	180	150	21%	21%	10%	23%
	60	80 °C	180	180	150	150	12%	-2%	14%	14%
	10	60 °C	280	250	250	220	5%	6%	6%	7%
	10	70 °C	220	190	190	190	7%	20%	9%	9%
	20	60 °C	290	260	230	230	1%	1%	12%	1%

	20	70 °C	230	200	200	200	3%	15%	3%	3%
	30	60 °C	270	240	240	210	7%	7%	7%	8%
	30	70 °C	210	180	180	180	10%	23%	12%	12%
	40	60 °C	250	220	220	220	12%	14%	14%	3%
	40	70 °C	190	190	190	160	18%	18%	7%	21%
	50	60 °C	230	230	230	230	18%	9%	9%	-2%
	50	70 °C	200	170	170	170	13%	26%	15%	15%
	60	60 °C	240	210	210	210	13%	15%	15%	4%
	60	70 °C	180	180	180	180	21%	21%	10%	10%
	70	60 °C	250	220	220	190	9%	10%	10%	11%
	70	70 °C	190	190	190	160	16%	16%	5%	19%
Secagem Contínua	-	60 °C	300	270	270	240	-	-	-	-
	-	70 °C	240	240	210	210	-	-	-	-
	-	80 °C	210	180	180	180	-	-	-	-

APÊNDICE 3D – Durações de secagens intermitentes e contínuas simuladas com CP ≤ 5%

Tabela 3D.1 – Durações de secagens intermitentes e contínuas simuladas com CP ≤ 5%, economias de tempo (%) e de energia (%) de secagens intermitentes em relação às secagens contínuas.

Primeiro estágio		Segundo estágio		Tempo total de secagem (min)	Economia de tempo (%)	Economia de energia (%)	
Temperatura	Tempo (min)	Temperatura	Tempo (min)				
100°C	10	60°C	240	250	7%	5%	
	10	70°C	210	220	8%	7%	
	10	80°C	180	190	-6%	-7%	
	20	60°C	210	230	15%	10%	
	20	70°C	180	200	17%	13%	
	20	80°C	150	170	6%	3%	
	30	60°C	180	210	22%	16%	
	30	70°C	150	180	25%	20%	
	30	80°C	120	150	17%	12%	
	40	60°C	150	190	30%	21%	
	40	70°C	120	160	33%	27%	
	40	80°C	120	160	11%	6%	
	50	60°C	150	200	26%	16%	
	50	70°C	120	170	29%	22%	
	50	80°C	120	170	6%	-1%	
	90°C	10	60°C	240	250	7%	6%
		10	70°C	210	220	8%	7%
		10	80°C	180	190	-6%	-6%
20		60°C	210	230	15%	12%	
20		70°C	180	200	17%	15%	
20		80°C	150	170	6%	5%	
30		60°C	180	210	22%	18%	
30		70°C	150	180	25%	23%	
30		80°C	150	180	0%	-1%	
40		60°C	180	220	19%	13%	
40		70°C	120	160	33%	30%	
40		80°C	120	160	11%	9%	
50		60°C	150	200	26%	19%	
50		70°C	120	170	29%	25%	
50		80°C	120	170	6%	4%	
60		60°C	150	210	22%	15%	
60		70°C	120	180	25%	21%	
60		80°C	120	180	0%	-2%	
80°C	10	60°C	240	250	7%	6%	
	10	70°C	180	190	21%	20%	
	20	60°C	240	260	4%	1%	
	20	70°C	180	200	17%	15%	

	30	60°C	210	240	11%	7%
	30	70°C	150	180	25%	23%
	40	60°C	180	220	19%	14%
	40	70°C	150	190	21%	18%
	50	60°C	180	230	15%	9%
	50	70°C	120	170	29%	26%
	60	60°C	150	210	22%	15%
	60	70°C	120	180	25%	21%
	70	60°C	150	220	19%	10%
	70	70°C	120	190	21%	16%
Secagem	-	60°C	-	270	-	-
Contínua	-	70°C	-	240	-	-
	-	80°C	-	180	-	-

Retenção de betalaínas durante secagem convectiva e efeitos da intermitência térmica

RESUMO

A secagem com intermitência térmica consiste em conduzir o processo em etapas com diferentes temperaturas. No presente trabalho, aplicou-se um estágio em alta temperatura e, após determinado tempo, um segundo estágio em temperatura menor. Para que a técnica seja vantajosa, a seleção correta dos parâmetros de processo deve ser baseada em estudos criteriosos de características particulares de cada material. Por isso, os objetivos deste capítulo foram estudar a cinética de degradação de betalaínas ao longo de secagens de fatias de beterraba vermelha conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C; e avaliar o efeito da intermitência térmica na retenção desses compostos e na cor de beterrabas desidratadas, comparando resultados de condições de secagem intermitentes (90°C/50min+70°C/90min; 90°C/60min+60°C/120min; 100°C/40min+60°C/120min e 80°C/70min+60°C/120min) aos resultados de secagens contínuas à 60, 70 e 80 °C, por 240, 210 e 180 minutos, respectivamente. As betalaínas de amostras seca e *in natura* foram obtidas através de extração aquosa e foram quantificadas através de espectrofotometria de UV-Vis. A concentração de pigmentos média das beterrabas *in natura* foi de $5,18 \pm 1,7$ mg/g de matéria seca. As retenções, em geral, tiveram decaimento no início das secagens e mantiveram-se estáveis em valores superiores a 75% durante a maior parte das secagens realizadas, exceto quando as amostras atingiram temperaturas superiores a 70 °C. Esses resultados mostram que a secagem convectiva é uma boa alternativa para produção de pigmentos. Os valores de retenção obtidos para secagens intermitentes corroboraram os resultados obtidos na cinética de degradação, em que as secagens intermitentes aplicadas em configurações que limitam a temperatura das beterrabas a 70 °C preservam as características relacionadas à qualidade do produto desidratado, além de reduzir o tempo total de processo.

4. CAPÍTULO 4 – Retenção de betalaínas durante secagem convectiva e efeitos da intermitência térmica

4.1. INTRODUÇÃO

A cor é um dos atributos sensoriais mais importantes nos alimentos, uma vez que é associada diretamente a outros parâmetros de qualidade como sabor e valor nutricional. Os corantes, responsáveis pela cor dos alimentos, podem ser produzidos artificialmente ou ser extraídos de fontes naturais, como é o caso dos pigmentos pertencentes ao grupo das betalaínas. As betalaínas são substâncias nitrogenadas, solúveis em água e derivadas do ácido betalâmico, que, quando se condensam com derivados de ciclo-DOPA, resultam em betacianinas (pigmentos vermelhos), e quando reagem com aminas ou aminoácidos, resultam em betaxantinas (pigmentos amarelos) (CHHIKARA et al., 2019). A principal fonte natural e comercial dessa classe de compostos é a beterraba vermelha (*Beta vulgaris*), uma hortaliça com elevado valor nutritivo e fonte de vitaminas e minerais (NIRMAL et al., 2021). A beterraba vermelha promove numerosos benefícios à saúde, como apontado na revisão de Akan, Gunes e Erkan (2021), dos quais destacam-se seus efeitos cardioprotetores, anti-inflamatórios e anticarcinogênicos.

O principal pigmento da beterraba é a betanina, pertencente ao grupo das betacianinas. Entre as betaxantinas, destaca-se a vulgoxantina I (CHHIKARA et al., 2019). Por serem hidrossolúveis, as betalaínas têm fácil incorporação em alimentos (GENGATHARAN; DYKES; CHOO, 2015) e, além disso, sua capacidade antioxidante, aliada a avanços em investigações sobre a estabilidade das betalaínas, tornam seu uso promissor na indústria de alimentos, sobretudo, em alimentos de baixa acidez, nos quais a pigmentação com antocianinas tende a não ser eficiente (RODRIGUEZ-AMAYA, 2019; CASTRO-ENRIQUEZ et al., 2019). As betalaínas podem ser incorporadas em alimentos através da adição de beterraba vermelha nas formas de polpa ou suco, extrato concentrado (aquoso ou em pó) e pó ou farinha. Essa incorporação, segundo estudos recentes, resulta em melhorias nas propriedades nutricionais e sensoriais de produtos lácteos, biscoitos, *snacks*, bolachas e macarrão (NIRMAL et al., 2021).

A principal forma de produção do pó de beterraba é através da secagem por pulverização do suco extraído de beterraba, no qual são adicionados agentes carreadores devido ao elevado teor de açúcares. Nesse sentido, a secagem convectiva de beterraba (e subsequente moagem) pode ser uma alternativa de menor custo e com produto com qualidade semelhante, incluindo o teor de betalaínas, β -carotenos e vitamina A (NEMZER et al., 2011).

Por se tratar de uma técnica de conservação simples e acessível, a secagem convectiva de beterrabas em pedaços é uma opção atraente para agricultores ou empreendedores com produção em baixa ou média escala, principalmente em países em desenvolvimento (GOKHALE; LELE, 2011). Além disso, a secagem convectiva pode ser uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos de linhas de produção de beterraba minimamente processada (DALLA COSTA et al., 2017) e de suco de beterraba (bagaço e casca), que, como bem apontado por Fernando et al. (2021), não têm sido suficientemente reaproveitados como os resíduos da beterraba sacarina utilizadas na produção de açúcar.

No entanto, a secagem exige altas demandas energéticas, além de expor os alimentos ao calor e ao oxigênio por longos períodos, o que pode causar alterações indesejáveis como descoloração, perda de aroma, alterações de textura e degradação de compostos antioxidantes, como é o caso das betalainas (CHHIKARA et al., 2019). Nesse sentido, determinar as condições de processo adequadas é fundamental para produção de um alimento desidratado com qualidade. Temperaturas de secagem mais altas reduzem o tempo de processo, mas podem intensificar a degradação de compostos bioativos pela ação da temperatura. Por outro lado, condições de secagem com temperaturas mais baixas reduzem a agressão aos parâmetros de qualidade do alimento, mas prolongam o período de secagem, o que reduz sua eficiência. Uma alternativa é combinar a eficiência de secagem a altas temperaturas com a menor degradação que ocorre no alimento enquanto sua temperatura ainda se mantém baixa. Essa técnica é denominada intermitência térmica. No início da secagem, aplicam-se temperaturas altas, que favorecem as taxas de evaporação e, conseqüentemente, as taxas de secagem. Nesse período, a superfície do alimento deve se manter parcialmente ou totalmente saturada de água para que sua temperatura permaneça próxima da temperatura de bulbo úmido. Conforme a secagem avança, antes que haja superaquecimento do alimento, a temperatura do ar de secagem deve ser reduzida. Assim, é possível alcançar redução no tempo de processo e economia de energia sem reduzir a qualidade do produto final. Por exemplo, Filippin et al. (2018) obtiveram 35% de redução do tempo de secagem e 17 % de economia de energia sem resultar em degradação da cor e de ácido clorogênico durante a secagem convectiva com intermitência térmica de maçã Fuji. Amado et al. (2020) obtiveram ganho na eficiência de secagem e mantiveram o conteúdo de carotenoides e a retenção de cor durante secagem intermitente de mangas. Chen et al. (2020) obtiveram, além da economia de energia, ganho na qualidade de nozes após a secagem intermitente.

A determinação das condições da secagem intermitente, sobretudo do período com temperatura elevada, é determinante para que a aplicação da intermitência térmica tenha

resultados positivos. Por isso, não podem ser definidas arbitrariamente, mas devem considerar características inerentes à cada material nas faixas das condições de processo estudadas. Por exemplo, Amado et al. (2020), em secagem de manga, sugere que os carotenos foram mais sensíveis à temperatura de secagem do que ao tempo de exposição ao oxigênio (AMADO et al., 2020); Kurozawa et al. (2014) também destacam a grande influência da temperatura sobre a retenção de vitamina C em secagem de mamão, enquanto Qiu et al. (2018) concluíram que, ambos, o efeito de temperatura e tempo de secagem, foram importantes para a retenção de antocianinas em secagem de batata roxa. No caso de betalaínas, ainda que sua estabilidade tenha sido amplamente abordada em vegetais minimamente processados, soluções (suco ou extratos concentrados), pós ou microcápsulas (MANCHALI et al., 2013; AKAN; HORZUM; AKAL, 2022; CARREÓN-HIDALGO et al., 2022), esses estudos tratam de cinéticas de degradação durante armazenamento, isto é, em condições estáticas de temperatura e umidade relativa, que podem não descrever apropriadamente a degradação destes compostos durante a secagem de beterraba. Por exemplo, Nakagawa et al. (2018) estudaram a cinética de degradação de betanina em extrato de betanina com adição de dextrina, avaliando sua a retenção durante secagem convectiva do líquido adicionado a um leito de esferas de vidro. A difusão dos sólidos em direção à interface de secagem levou à formação de um filme concentrado na interface, que afetou a predição da degradação, obrigando à introdução de considerações quanto à transferência de massa, no modelo original. Portanto, essa pesquisa mostra o quão a matriz do alimento é importante quando se estuda a cinética de degradação de betanina.

Neste contexto, ressalta-se a importância da investigação das cinéticas de degradação de betalaínas durante a secagem convectiva de beterrabas vermelhas, que, até onde se tem conhecimento, não foi abordada na literatura. Portanto, a proposta deste capítulo foi investigar a cinética de degradação de betalaínas (betacianinas e betaxantinas) ao longo de secagens de beterraba vermelha conduzidas em várias temperaturas (60, 70, 80, 90 e 100 °C). Também foram conduzidos ensaios em quatro configurações de secagem com intermitência térmica, que combina duas temperaturas, para verificar se os dados de retenção de betalaínas corroboram os avaliados na cinética de degradação, e dados de retenção de cor em secagens intermitentes e contínuas foram comparados para avaliar o efeito da intermitência térmica sobre a qualidade de beterrabas desidratadas.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. Ensaios de secagem convectiva

As beterrabas vermelhas (*Beta vulgaris*, cv. Boro), adquiridas na CEAGESP (Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo) de São José do Rio Preto (São Paulo, Brasil). As raízes foram higienizadas, cortadas em fatias (com 5 mm de espessura), dispostas em bandejas teladas de aço inoxidável e inseridas no secador. As secagens que representam os primeiros estágios de secagem intermitente foram conduzidas a 80, 90 e 100 °C por 70, 60 e 50 minutos, respectivamente (ver Capítulo 3, item 3.4.2). As secagens, que representam secagens contínuas ou os segundos estágios de secagem intermitente, foram conduzidas a 60, 70 e 80 °C até 240 minutos, em duplicata. Como apontado no item anterior, “Cinética de retenção de betalaínas”, para cada temperatura de secagem, foram tomadas amostras a cada 10 minutos na primeira hora de secagem e, posteriormente, a cada 60 minutos, para análise do conteúdo de betanina.

Os experimentos de secagem foram conduzidos em dois secadores idênticos de leito fixo com convecção forçada de ar aquecido, equipados com ventilador centrífugo (Ibran, Siroco VSI 195, São Paulo). A velocidade foi controlada por um inversor de frequência (WEG, modelo CWF10, Santa Catarina). O ar é aquecido através de resistências elétricas e os secadores são isolados com fibra de cerâmica. Cada câmara de secagem possui 4 sensores PT100 e dois higrômetros (ImPac®, DO9861T-R1 e DOHD2717, Itália) que estão conectados a um sistema de aquisição de dados (ImPac®). O controle e temperatura do ar de secagem é feito por controlador tipo PID. O sistema de secagem ainda dispõe de um termohigrômetro móvel (ImPac®, IP-747RH, São Paulo) para registro das condições do ar ambiente. Os ensaios de secagem intermitente ocorreram de forma que, durante o primeiro período de secagem, as bandejas foram colocadas no secador 1. Decorrido o tempo de secagem na temperatura alta, as bandejas foram retiradas do secador 1 e imediatamente inseridas no secador 2. Foram realizadas 4 secagens intermitentes escolhidas aleatoriamente, em duplicata, conduzidas também para a validação do modelo matemático, como mostrado no Capítulo 3. As configurações de secagem intermitente foram: 90°C/50min+70°C/90min (ID 1); 90°C/60min+60°C/120min (ID 2); 100°C/40min+60°C/120min (ID 3) e 80°C/70min+ 60°C/120min (ID 4).

4.2.2. Cinética de retenção de betalaínas

A retenção das betalaínas, descritas como betanina, foi avaliada em função do tempo de secagem nas condições do primeiro estágio de secagem intermitente e nas condições de secagens contínuas. Durante os primeiros estágios, foram tomadas amostras a cada 10 minutos de secagem até a duração máxima de cada ensaio, avaliada pela análise de temperatura de superfície (Capítulo 3, item 3.4.2). Durante as secagens contínuas, foram tomadas amostras a cada 10 minutos na primeira hora de secagem e, posteriormente, a cada 60 minutos, totalizando 78 pontos experimentais independentes. A retenção de betalaínas foi calculada através da Equação 4.1 (MURPHY, 1975):

$$Ret(\%) = \frac{Bet_f}{Bet_i} \times 100 \quad (4.1)$$

em que Ret é a retenção de betalaínas durante o processo (%); Bet_f é o conteúdo final de betalaínas na amostra ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ amostra seca), após o processo e Bet_i é o conteúdo inicial de betalaínas na amostra ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ amostra seca), antes do processo.

Para o cálculo da retenção, para cada amostra analisada após um tempo de secagem, a análise da amostra inicial foi realizada na correspondente beterraba utilizada. Portanto, durante os experimentos, cada ponto determinado pela Equação (4.1) foi calculado com concentrações sempre correspondentes à mesma beterraba.

4.2.3. Metodologia analítica

4.2.3.1. Sólidos solúveis

Para determinação do teor de sólidos solúveis a beterraba *in natura* foi triturada em um mixer e o extrato resultante analisado em um refratômetro digital portátil (Simétrica, HI 96801, Brasil), com resultado expresso em ° Brix.

4.2.3.2. Análise de umidade

A umidade foi determinada por método gravimétrico, no qual as amostras foram desidratadas em estufa a vácuo (Tecnal, TE-395, Brasil), a 60 °C e 10 kPa, até atingir peso constante.

4.2.4. Extração das betalaínas

A extração dos pigmentos das amostras *in natura* e seca foi feita através da adição de 25 mL de água destilada em 1 g de amostra. A mistura foi desintegrada e homogeneizada em homogeneizador-micro triturador, em alta velocidade (Tecnal, TURRATEC TE-102, Brasil) por 60 s. Posteriormente, foi sonificada (banho ultrassônico ECOSONIC, São Paulo) por 30 min, agitada em um agitador de tubos de ensaio (PHOENIX, AP 56, Brasil) por 1 min, centrifugada (HERMLE, Z 326K, Alemanha,) a 7500 rpm e 4 °C por 15 min e filtrada à vácuo. O sobrenadante foi coletado, armazenado em frasco âmbar e congelado (-18 °C). A determinação da metodologia de quantificação de betalaínas foi baseada em uma breve revisão da literatura científica, que está apresentada no Apêndice 4A.

4.2.5. Quantificação das betalaínas

A quantificação dos compostos foi realizada com o uso de um espectrofotômetro de UV-Visível (Thermo Scientific, Gênesys 10s, EUA), de acordo com metodologia de Von Elbe (2001), em que as leituras de absorvância dos pigmentos foram corrigidas segundo as Equações:

$$x = 1,095 \times (Abs_{538} - Abs_{600}) \quad (4.2)$$

$$imp = Abs_{538} - x \quad (4.3)$$

$$y = Abs_{476} - imp - \left[\frac{x}{3,1} \right] \quad (4.4)$$

em que x é absorção de luz corrigida de betanina, y é absorção de luz de corrigida de vulgaxantina-I, imp é absorção de luz das impurezas, Abs_{538} é absorção de luz da amostra a 538 nm; Abs_{476} é absorção de luz da amostra a 476 nm; e Abs_{600} é absorção de luz da amostra a 600 nm (leitura para correção devido a impurezas). O valor de absorvidade ($A^{1\%}$), isto é, o coeficiente de extinção representando uma solução a 1% (m/v), é 1120 para betanina e 750 para vulgaxantina-I, que expressaram as concentrações de betacianinas (betanina) e betaxantinas (vulgaxantina-I), respectivamente. As amostras foram diluídas em tampão fosfato com pH 6,5 até atingirem absorvâncias entre 0,4 e 0,5.

4.2.6. Cor

A cor das fatias de beterraba *in natura* e secas foi determinada através de um espectrofotômetro de bancada (Marca HunterLab, modelo ColorFlex45/0, Estados Unidos). As análises foram feitas utilizando o sistema CIELAB, no qual L^* é a dimensão da claridade (*lightness*), onde $L^*=100$ representa o branco e $L^*=0$ representa o preto. O valor de a^* representa a variação de cores entre verde (quando a^* é negativo) e vermelho (quando a^* é positivo). Os valores de b^* representam a variação de cor entre o azul (quando b^* é negativo) e o amarelo (quando b^* é positivo). Além desses, outros parâmetros de cor foram analisados, como o ângulo hue (h), que representa o grau de tonalidade, e o croma (C^*), que indica o grau de saturação. Foram analisadas 5 fatias secas e 5 fatias *in natura* para cada tratamento, e em cada análise, a leitura foi registrada em oito posições, ou seja, nos ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° de cada face. Para a leitura dos parâmetros de cor, foi utilizado o software Universal versão 4.10 configurado com o iluminante D65 e o observador a 10° . A diferença de cor (ΔE) foi calculada segundo a Equação 4.5.

$$\Delta E = \sqrt{(L_{\text{Seca}}^* - L_{\text{Nat}}^*)^2 + (a_{\text{Seca}}^* - a_{\text{Nat}}^*)^2 + (b_{\text{Seca}}^* - b_{\text{Nat}}^*)^2} \quad (4.5)$$

em que o subíndice “Seca” e “Nat” se referem às medidas tomadas de amostras secas e *in natura* (controle).

4.2.7. Análise estatística

Foram feitas análises de variâncias (ANOVA) e, ao se encontrarem evidências de diferenças significativas ao nível de 5% de significância entre os tratamentos, foi utilizado o teste de Tukey para comparação de médias.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

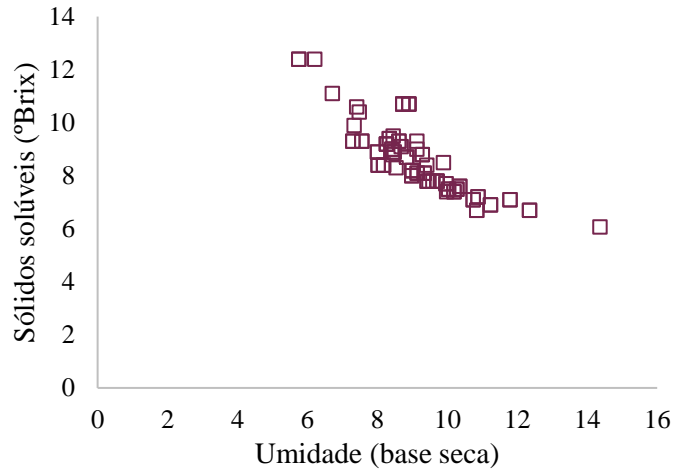
4.3.1. Cinética de degradação de betalaínas

4.3.1.1. Concentração inicial de betalaínas, teor de sólidos solúveis e umidade

No total foram avaliadas 50 beterrabas *in natura*. A umidade média foi de $9,20 \pm 1,43$ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de matéria seca. O teor de sólidos solúveis e a umidade inicial são mostrados na Figura 4.1. As beterrabas com °Brix maior apresentaram umidades iniciais menores, cujo aumento do

conteúdo de açúcar e redução do conteúdo de água estão relacionados com o avanço do grau de maturação do produto. O valor médio de sólidos solúveis foi de 8.40 ± 1.82 ° Brix.

Figura 4.1 – Teor de sólidos solúveis em função da umidade (em base seca) de beterrabas *in natura*.

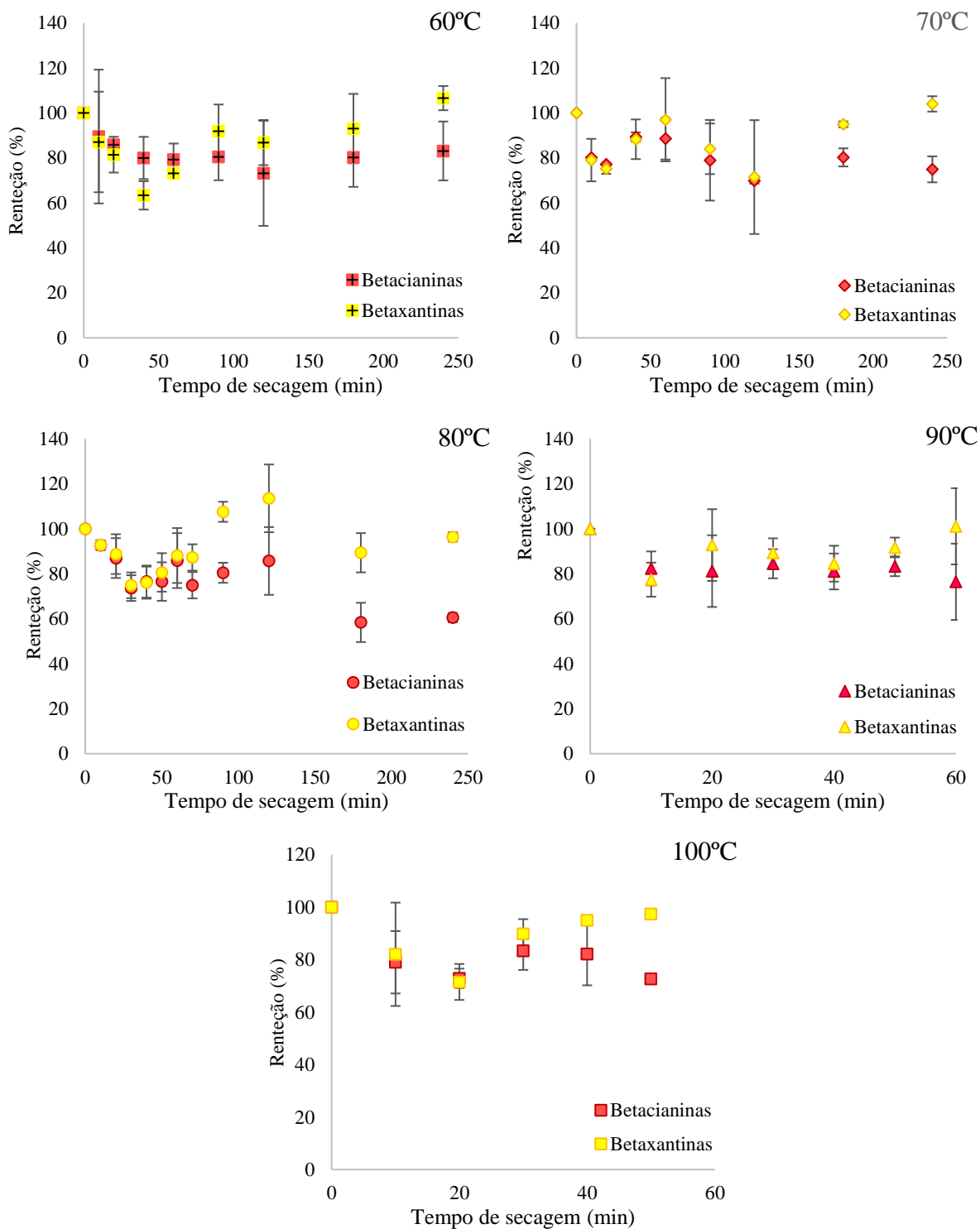


A concentração média de betalaínas nas beterrabas *in natura*, expressas como betanina, foi de $5,18 \pm 1,7$ mg/g de beterraba seca, valor compatível com dados encontrados na literatura (GOKHALE; LELE, 2014; NIRMAL et al., 2021). É válido pontuar que o conteúdo do pigmento pode variar de uma variedade para outra, apresentando diferentes proporções entre pigmentos vermelhos e amarelos (KAPADIA; RAO, 2013).

4.3.1.2. Degradação de betalaínas

A Figura 4.2 mostra a retenção de betacianinas e betaxantinas em função do tempo de secagem durante secagens contínuas conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C.

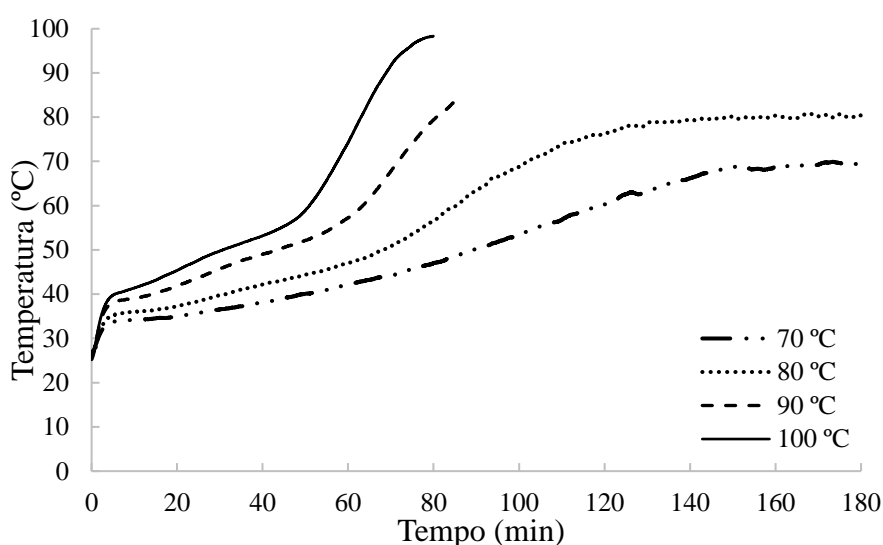
Figura 4.2 – Retenção (%) de betacianinas e betaxantinas em função do tempo de secagem em secagens conduzidas a 60, 70, 80, 90 e 100 °C.



Em secagens com apenas 10 minutos de duração houve redução da concentração tanto de betacianinas como de betaxantinas, independentemente da temperatura de secagem, o que

pode ser associado à ação das enzimas polifenol oxidases (PPOs) e peroxidases (PODs), principais catalisadoras de reações de degradação de compostos em frutas e vegetais (IQBAL et al., 2019). No caso das betalaínas, ainda se incluem as β -glicosidases (MANCHALI et al., 2013). Segundo Liu et al. (2008), a atividade de PPOs e PODs em beterrabas vermelhas permanece inalterada na temperatura de 35 °C, que é próxima à temperatura das amostras com esse tempo de secagem, conforme mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Temperatura média superficial de fatias de beterraba vermelha em função do tempo de secagem.



* Resultados apresentados no Capítulo 3

Vale ressaltar que a ação enzimática, no caso das fatias, é intensa na superfície (cuja área é aproximadamente 4 vezes superior ao volume), enquanto no centro, as células ainda estão íntegras, considerando que não sofreram com o fatiamento e nem com a desidratação celular oriunda da secagem, que ainda está em estágio inicial. Com isso, é esperado que a ação enzimática tenha efeitos sobre a concentração de pigmentos durante grande parte da secagem, principalmente durante a fase inicial de secagem. As taxas elevadas de secagem rapidamente provocam ruptura da estrutura celular nas regiões próximas à superfície das fatias, levando à liberação de enzimas e assim como de outras substâncias como as betalaínas, as quais ainda encontram elevado conteúdo de água no meio celular. Somado a isso, dados na literatura demonstram que a ação enzimática na beterraba permanece significativa em temperaturas próximas à temperatura do final dos primeiros estágios ($50,83 \pm 2,98$ °C, $57,32 \pm 1,64$ °C e $58,93 \pm 2,74$ °C para secagens do primeiro estágio conduzidas a 80, 90 e 100 °C após 70, 60 e

50 minutos, respectivamente) e de grande parte das secagens contínuas (Figura 4.3) (KAPADIA; RAO, 2013). Portanto, o meio e as condições de temperatura propiciariam reações enzimáticas.

As retenções de betacianinas tenderam a diminuir enquanto as de betaxantinas aumentaram conforme a duração da secagem e chegaram a superar 100% em alguns pontos. Sabe-se, no entanto, que as betaxantinas são menos estáveis por diversos fatores como presença de oxigênio, temperatura elevada e ação enzimática (HERBACH, 2004; MANCHALI et al., 2013). Uma das explicações para o aumento das retenção de betaxantinas seria a formação de compostos de cor amarela, como ácido betalâmico, vários ciclo-dopa-5-O-glicosídeos e neobetaninas, que podem ser resultantes da: (a) oxidação enzimática da betanina por PODs (MARTINEZ-PARRA; MUNHOZ, 2001) e por betalaínas oxidases (ZAKHAROVA et al., 1987); (b) degradação da betanina quando exposta ao oxigênio do ar (HERBACH; STINTZING; CARLE, 2006; NEMZER et al., 2011); (c) maior suscetibilidade a reações hidrolíticas (como clivagem da ligação aldimina) em faixas de atividade de água intermediárias (HERBACH, STINTZING; CARLE, 2006; SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021) e (d) degradação térmica de betacianinas, que é o principal fator extrínseco da degradação de betalaínas, cujas principais vias são a desidrogenação, descarboxilação, desglicosilação e hidrólise (NEMZER et al., 2011; CHHIKARA et al., 2019; CASTRO-ENRÍQUEZ et al., 2020).

Entretanto, outro fator pode ser responsável pelo aumento de betaxantinas em algumas amostras, após a secagem, que é a diferença entre a extração desses compostos em matrizes úmidas e matrizes secas. A extração incompleta da matriz vegetal in natura tem sido reportada como uma das causas da retenção de diversos bioativos, os quais não são sintetizados durante o processamento, resultar em valores superiores a 100% devido à proteção física da estrutura celular intacta (LAGO-VANZELA et al., 2013). Esse fato não inviabiliza a constatação feita na presente pesquisa, de que consideráveis conteúdos de betalaínas foram encontrados nas beterrabas desidratadas.

De modo geral, as retenções de betacianinas mantiveram valores elevados e foram superiores a 75 % ao final de secagens a 60 °C (240 min), 70 °C (240 min), 80 °C (70 min), 90 °C (60 min) e 100 °C (50 min). Ressalta-se que a degradação térmica depende da extensão do aquecimento e durante as secagens conduzidas a 90 e 100 °C e grande parte das secagens conduzidas a 60, 70 e 80 °C, a temperatura das fatias de beterraba não atingiu a temperatura de bulbo seco (Figura 4.3) pois a superfície estava saturada ou parcialmente saturada de água. O equilíbrio térmico ocorreu em 130 e 150 minutos nas secagens conduzidas a 70 e 80 °C, respectivamente, e ao final de 240 minutos de secagem, as retenções de betanina mostraram-se

maiores quanto menor foi a temperatura de secagem, sendo, $83,1 \pm 5,4 \%$, $74,9 \pm 5,8 \%$ e $60,5 \pm 12,9 \%$ para temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Valores semelhantes também foram encontrados por Kowalski e Szadzinska (2014), que obtiveram 68 % de retenção após secagens convectivas a 80 °C.

As retenções superiores a 60 % mostram que a secagem convectiva de beterraba é uma alternativa viável para produção de pigmento, principalmente quando comparados a valores de retenção de pós obtidos por secagem por atomização, que, de acordo com a literatura, apresentam valores semelhantes, como no caso de Bazarria e Kumar (2018), com retenções de 61 a 70 %, ou ainda, valores mais baixos como nos trabalhos de Janiszewska e Włodarczyk (2013), com retenções de 25 a 30 % e Zuaron et al. (2019), com 40 a 46% de retenção. Uma possível explicação para retenções mais baixas no caso de amostras secas por *spray drying* é que a estabilidade de betalaínas em suas matrizes naturais é maior em comparação com soluções (purificadas ou não) pois constituintes de plantas como açúcares, ácidos e substâncias pécicas reduzem a atividade de água, diminuindo a mobilidade dos reagentes (HERBACH; STINTZING; CARLE, 2006). Os resultados obtidos por Nakagawa, Tamura e Adashi, (2018) comprovam a instabilidade dos extratos, ao obterem retenções entre 10 e 40% em pó de betanina+dextrina após secagem convectiva da solução em leito de esferas de vidro às temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

A degradação de betalaínas em estudos de armazenamento de pó ou extratos, segue, em grade maioria, uma cinética de degradação de primeira ordem, como mostra o estudo de Nakagawa, Tamura e Adashi (2018) e muitos outros estudos que foram sintetizados nas revisões de Manchali et al. (2013) e Carreón-Hidalgo et al. (2022). No entanto, não foram encontrados trabalhos que avaliaram cinética de retenção de betalaínas durante a secagem de beterraba. No caso deste trabalho, não foi possível ajustar um modelo à cinética de degradação, uma vez que as retenções foram relativamente estáveis ao longo das secagens e variações nas medidas de retenção impediram de observar tendências ao longo do tempo, o que ocorreu em todas as temperaturas. As oscilações podem estar relacionadas ao fato de cada ponto experimental ter sido determinado em ensaios independentes, o que pode ter se somado aos efeitos de variação na matéria prima, o que inclui conteúdo de sólidos e de betalaínas, diferenças na atividade enzimática, dentre outros. Destaca-se que o agrupamento de dados com base no conteúdo inicial de sólidos totais, de sólidos solúveis e de betalaínas não foi eficaz na verificação de tendências.

Além disso, os desvios-padrão podem ser associados a possíveis diferenças durante a extração de pigmentos, uma vez que, em umidades intermediárias, a estrutura gomosa da beterraba dificulta a moagem.

4.3.2. Secagens intermitentes

Foram avaliadas a cor e as retenções de betalaínas de quatro configurações de secagem intermitente previamente utilizadas para a validação do modelo matemático utilizado nas simulações do Capítulo 3 (90°C/50min+70°C/90min (ID 1); 90°C/60min+60°C/120min (ID 2); 100°C/40min+60°C/150min (ID 3) e 80°C/70min+60°C/120min (ID 4)) e os resultados foram comparados com os dados de secagens contínuas, obtidos na determinação da cinética de retenção em três temperaturas (60°C/240min; 70°C/210min; 80°C/180min), como mostrados no item 4.3.1.2.

O tempo de processo das secagens contínuas a serem comparadas com as correspondentes secagens intermitentes foi determinado com base nas umidades finais obtidas nos ensaios experimentais das secagens intermitentes, sendo que a umidade reduzida (X/X^0) foi aproximadamente 0,10 em secagens finalizadas a 60 °C e aproximadamente 0,085 a 70 °C. No caso da secagem contínua a 70 °C, a umidade final estaria entre as umidades observadas em 180 e 240 minutos de secagem. Por essa razão, a retenção de betanina foi calculada como a média das retenções após 180 e 240 min, considerando um tempo de secagem de 210 minutos. O tempo de secagem a 80 °C foi estimado em 180 minutos, com base no valor aproximado de 0,06 para a umidade reduzida X/X^0 .

4.3.2.1. Cor – tempos de secagem

Os parâmetros de cor de beterrabas secas e *in natura*, assim os valores normalizados em relação à coloração inicial, são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de cor de beterrabas *in natura* e secas e valores normalizados em relação à cor inicial.

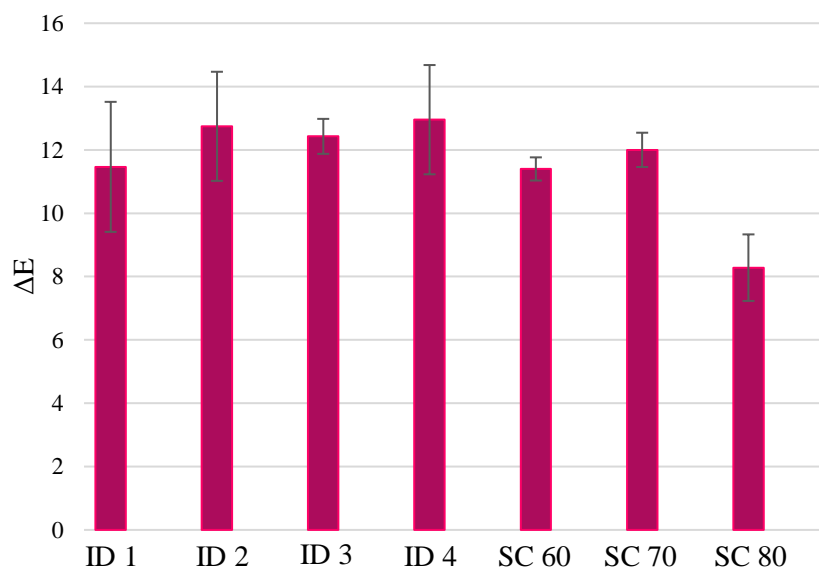
Ensaio	Rep.	L*		L* _{Seca} /L* _{Nat.}	a*		a* _{Seca} /a* _{Nat.}	b*		b* _{Seca} /b* _{Nat.}	C		C _{Seca} /C _{Nat.}	h		h _{Seca} /h _{Nat.}
		Natura	Seca		Natura	Seca		Natura	Seca		Natura	Seca		Natura	Seca	
ID 1	1	20,06 ± 0,99	24,41 ± 1,00	1,36 ^a ± 0,00	24,50 ± 2,85	19,94 ± 0,82	0,74 ^a ± 0,10	8,05 ± 1,40	3,00 ± 0,50	0,40 ^a ± 0,04	25,79 ± 3,15	20,17 ± 0,84	0,72 ^a ± 0,08	18,08 ± 0,95	8,54 ± 1,29	0,56 ^a ± 0,13
	2	21,73 ± 2,23	29,62 ± 1,17		26,64 ± 2,03	17,99 ± 1,55		9,59 ± 0,97	4,15 ± 0,71		29,31 ± 2,22	18,83 ± 1,62		19,77 ± 0,69	12,97 ± 1,62	
ID 2	1	22,17 ± 1,36	28,27 ± 1,71	1,31 ^{ab} ± 0,05	28,03 ± 2,84	17,55 ± 1,36	0,66 ^a ± 0,05	10,18 ± 1,31	3,26 ± 0,70	0,46 ^a ± 0,20	29,85 ± 3,10	17,86 ± 1,40	0,65 ^a ± 0,07	19,88 ± 0,75	10,50 ± 2,03	0,70 ^a ± 0,25
	2	21,90 ± 0,90	29,37 ± 2,14		26,34 ± 2,58	18,52 ± 1,85		10,18 ± 1,42	6,20 ± 0,77		28,24 ± 2,91	19,53 ± 1,96		21,06 ± 0,89	18,50 ± 1,19	
ID 3	1	22,96 ± 1,50	29,21 ± 1,77	1,26 ^{ab} ± 0,02	27,49 ± 3,38	18,71 ± 1,91	0,67 ^a ± 0,01	10,88 ± 2,26	5,51 ± 1,13	0,48 ^a ± 0,04	29,58 ± 3,97	19,53 ± 2,06	0,65 ^a ± 0,01	21,40 ± 1,55	16,33 ± 2,39	0,73 ^a ± 0,04
	2	23,22 ± 1,35	28,76 ± 1,51		29,24 ± 2,64	19,44 ± 1,53		11,31 ± 1,25	5,17 ± 0,82		31,35 ± 2,90	20,12 ± 1,66		21,11 ± 0,63	14,80 ± 1,43	
ID 4	1	23,26 ± 1,50	28,99 ± 1,79	1,24 ^{ab} ± 0,01	29,58 ± 2,89	18,24 ± 1,09	0,63 ^a ± 0,02	11,57 ± 1,20	5,27 ± 0,69	0,51 ^a ± 0,08	31,76 ± 3,12	18,99 ± 1,18	0,62 ^a ± 0,03	21,35 ± 0,43	16,10 ± 1,54	0,82 ^a ± 0,09
	2	24,04 ± 1,05	29,58 ± 1,68		26,87 ± 1,95	17,50 ± 1,14		10,03 ± 1,16	5,65 ± 0,51		28,69 ± 2,14	18,39 ± 1,17		20,45 ± 1,51	17,91 ± 1,40	
SC 60	1	18,82 ± 0,97	23,93 ± 1,95	1,23 ^{ab} ± 0,05	23,40 ± 3,14	14,01 ± 1,23	0,69 ^a ± 0,13	8,00 ± 1,63	3,36 ± 0,99	0,35 ^a ± 0,10	24,74 ± 3,49	14,59 ± 1,06	0,66 ^a ± 0,10	18,70 ± 1,40	15,85 ± 4,54	0,61 ^a ± 0,33
	2	23,65 ± 1,05	28,26 ± 2,81		31,45 ± 2,21	24,63 ± 1,53		10,39 ± 1,22	2,89 ± 1,63		33,13 ± 2,45	24,46 ± 1,45		18,24 ± 1,01	6,90 ± 3,72	
SC 70	1	19,25 ± 1,07	24,32 ± 2,01	1,24 ^{ab} ± 0,03	26,88 ± 3,20	18,98 ± 1,18	0,69 ^a ± 0,02	9,54 ± 1,79	1,45 ± 0,46	0,19 ^a ± 0,06	28,53 ± 3,61	19,04 ± 1,20	0,66 ^a ± 0,01	19,40 ± 1,33	4,34 ± 1,29	0,29 ^a ± 0,09
	2	18,01 ± 1,67	22,01 ± 1,39		26,43 ± 3,05	18,04 ± 1,34		9,06 ± 1,38	2,09 ± 0,36		27,95 ± 3,32	18,17 ± 1,33		18,84 ± 0,92	6,63 ± 1,18	
SC 80	1	24,36 ± 1,87	23,04 ± 1,01	1,05 ^b ± 0,15	24,47 ± 2,50	17,92 ± 0,65	0,78 ^a ± 0,06	7,53 ± 1,16	1,46 ± 0,53	0,17 ^a ± 0,03	25,61 ± 0,67	17,99 ± 0,67	0,75 ^a ± 0,06	17,02 ± 1,05	4,62 ± 1,59	0,24 ^a ± 0,05
	2	19,59 ± 1,30	22,78 ± 1,71		21,96 ± 1,79	18,07 ± 1,16		6,64 ± 0,71	1,03 ± 0,51		22,94 ± 1,90	18,11 ± 1,14		16,80 ± 0,72	3,35 ± 1,79	

ID 1 – 90°C/50min+70°C/90min; ID 2 - 90°C/60min+60°C/120min; ID 3 - 100°C/40min+60°C/150min; ID 4 - 80°C/70min+60°C/120min; SC 60 – Secagem contínua a 60°C, SC 70 – Secagem contínua a 70°C; SC 80 – Secagem contínua a 80°C

Pequenas variações de cor entre as amostras *in natura* foram observadas. A cor da beterraba depende da proporção de betacianinas (vermelho) e betaxantinas (amarelo), que pode sofrer interferência das condições durante seu cultivo (AKAN; GUNES; ERKAN, 2021), mas, de modo geral, apresentaram tonalidades avermelhadas semelhantes com ângulo hue, h, variando de 16,80 a 21,40.

Após a secagem, a cor da amostra sofreu alterações significativas (Figura 4.4). Não houve diferença significativa entre os resultados de ΔE , exceto para secagem a 80 °C, que apresentou menor valor. No entanto, como mostra a Tabela 4.1, a menor diferença pode ser atribuída ao fato de que uma das repetições da secagem a 80 °C, a beterraba estava mais escura que todas as demais, influenciando a média de $L^*_{Seca} - L^*_{Nat}$ usado para calcular o ΔE (Equação 4.5).

Figura 4.4 – Diferença de cor (ΔE) de amostras expostas à secagem intermitente (SI) e contínua (SC).



ID 1 – 90°C/50min+70°C/90min; ID 2 - 90°C/60min+60°C/120min; ID 3 - 100°C/40min+60°C/150min; ID 4 - 80°C/70min+60°C/120min; SC 60 – Secagem contínua a 60°C, SC 70 – Secagem contínua a 70°C; SC 80 – Secagem contínua a 80°C

Dados de cor normalizados (Tabela 4.1) indicam descoloração das amostras durante a secagem, com redução dos parâmetros a^* e b^* e menor saturação de cor, indicada pela redução de C^* . Resultados semelhantes foram encontrados na literatura (LATORRE et al., 2012; GOKHALE; LELE, 2014; KOWALSKY; SZADZINSKA, 2014), sendo que essas reduções foram associadas à decomposição da betalaínas. Houve menor degradação da cor vermelha do que da amarela, o que é corroborado pelo fato de que o pigmento vermelho é mais resistente à temperatura (SEREMET et al., 2019), uma vez que betacianinas são mais estáveis que as

betaxantinas devido às suas estruturas glicosiladas (AZEREDO, 2009). Observou-se uma tendência de maior degradação nas secagens contínuas em comparação às secagens intermitentes, no entanto, não foram encontradas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$). Os valores normalizados de b^* variaram de 0,17 a 0,51, enquanto os de a^* variaram de 0,63 a 0,78, o que impactou diretamente a variação da tonalidade das amostras secas, que apresentaram ângulo hue de 3,35 até 18,5, de tonalidade avermelhada.

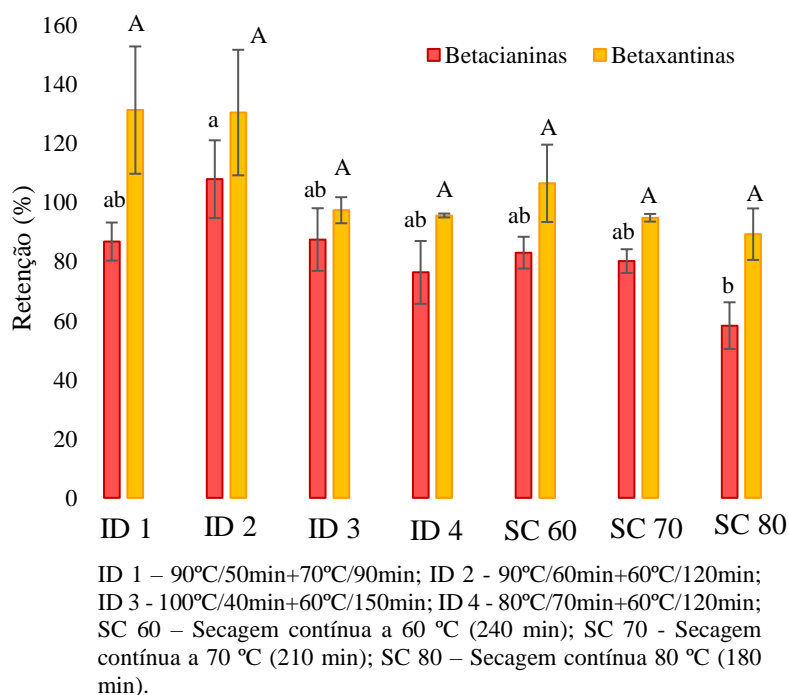
Observou-se que, em geral, a secagem causou aumento da claridade (L^*) em quase todas as configurações. O aumento de L^* pode ter contribuição do esbranquiçamento (*white blush*), que ocorre na superfície da beterraba após corte, devido à desidratação das células rompidas ou à possível formação de lignina sobre a superfície cortada (AKAN; HORZUM; AKAL, 2022).

Não foram observadas diferenças significativas quando as secagens contínuas e intermitentes foram comparadas, com exceção da secagem ID 1 que apresentou amostras mais claras que a SC 80.

4.3.2.2. Retenção de betalaínas

A Figura 4.5 mostra as retenções médias de betacianinas e betaxantinas em secagens intermitentes e secagens contínuas.

Figura 4.5 – Retenções médias (%) de betacianinas e betaxantinas em secagens intermitentes e secagens contínuas.



Os valores de retenção de betaxantinas mostraram-se próximos ou maiores que 100% em todas as secagens. Os possíveis motivos foram discutidos no item 4.3.1 deste trabalho, mas podem ser pautados de forma sintetizada em: degradação térmica de betanina, degradação enzimática de betanina e extração incompleta da matriz vegetal *in natura*.

Não se espera que tenha havido interferência da temperatura de secagem na extração, uma vez que os maiores resultados de retenção de betaxantinas são dados em secagens cujas amostras nunca alcançaram temperaturas superiores a 60 °C (ID 1, ID 2 e SC 60, Figura 4.3), diferentemente do que ocorreu nas secagens contínuas SC 70 e SC 80.

Alguma compensação da degradação de betaxantinas pela formação de compostos amarelos durante a degradação térmica ou enzimática de betacianinas poderia ter ocorrido. Entretanto, dados obtidos nas análises de cor (discutidos no item 3.3.1) sugerem o oposto, devido à degradação significativa da cor amarela durante as secagens. De qualquer forma, vale a pena pontuar que a análise de cor é feita apenas na superfície das amostras e pode não refletir alterações na amostra integral.

Por fim, como já discutido no item 4.3.1, a extração incompleta de betaxantinas da matriz vegetal *in natura*, que seria resultante da proteção física devido à estrutura celular intacta (LAGO-VANZELA et al., 2013), poderia ter influenciado os resultados.

Os valores médios de retenção de betacianinas das secagens intermitentes ID 1, ID 2 e ID 3 foram maiores que os das contínuas na mesma temperatura do segundo estágio, o que sugere que a redução do tempo total de secagem poderia ter beneficiado a retenção do pigmento pela menor exposição ao oxigênio e ao calor. Ressalta-se que, embora as secagens intermitentes e contínuas tenham a mesma duração, como é o caso da secagem contínua a 80 °C (180 min) e das secagens ID 2 (90°C-60°C, 180 min), ID 3 (100°C-60°C, 190 min) e ID 4 (80°C-70°C, 180 min), observa-se ganho na retenção de betalainas das amostras submetidas às secagens intermitentes. Nesse caso, a temperatura das amostras se manteve inferior no caso das secagens intermitentes, o que pode justificar a maior retenção.

No entanto, na maioria das secagens, não foram observadas diferenças estatísticas ($p > 0,05$) entre as retenções de betalainas. Este resultado reproduz os resultados obtidos na cinética de degradação (item 4.3.1) quanto à influência da temperatura máxima que a amostra atinge e à fraca influência do tempo de secagem numa mesma temperatura (no caso, 60 e 70 °C). A 80 °C, entretanto, com 120 minutos de secagem, a temperatura da amostra é superior a 70 °C (Figura 4.3) e as retenções apresentaram visível redução, permanecendo baixas.

Ainda que com temperaturas e tempos diferentes nos primeiros estágios, as configurações de secagem intermitente avaliadas não influenciaram na retenção de betalainas,

uma vez que a temperatura das amostras nunca ultrapassou 60 ou 70 °C nesses ensaios. Isso indica que os limites pré-determinados neste trabalho para condições de secagem intermitente asseguraram a qualidade da beterraba quanto ao teor final de pigmentos. Dessa forma, desde que respeitados os limites de 50, 60 e 70 minutos para primeiros estágios conduzidos à 100, 90 e 80 °C e que os segundos estágios sejam conduzidos à 60 e 70 °C, não se espera diferença significativa na retenção de betalaínas. Essa informação é extremamente útil para projeto e controle de processos de secagem de beterraba, sejam contínuos ou intermitentes pois, em posse desses resultados, parâmetros de processo poderão ser determinados unicamente por configurações mais econômicas, e por consequência, mais sustentáveis.

4.4. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que quando as fatias de beterraba não ultrapassaram a temperatura de 70 °C, as retenções de betacianinas mantiveram-se aproximadamente constantes e superiores a 75 %, o que mostra que a secagem convectiva é uma boa opção para produção de beterraba em pó.

Os resultados sugerem que a aplicação da intermitência térmica em algumas configurações pode contribuir com a qualidade de beterrabas desidratadas, além de reduzir o tempo total de processo. Esse resultado é promissor, principalmente quando se considera o contexto ambiental atual em que o estudo de técnicas com uso inteligente de energia é encorajado. Secagens intermitentes limitadas a 60 e 70 °C no segundo estágio são a melhor escolha devido à redução do tempo de secagem e a suas contribuições sobre a cor (parâmetro L*) e retenção de betalaínas. Os valores de retenção obtidos para secagens intermitentes corroboram os resultados na cinética de degradação e mostram que secagens conduzidas dentro dos limites de tempo e temperatura estudados neste trabalho preservarão características relacionadas à qualidade do produto desidratado.

REFERÊNCIAS

AKAN, S.; HORZUM, O.; AKAL, C. The prevention of physicochemical and microbial quality losses in fresh-cut red beets using different packaging under cold storage conditions. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 155, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112877

AKAN, S.; TUNA GUNES, N.; ERKAN, M. Red beetroot: Health benefits, production techniques, and quality maintaining for food industry. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2021. DOI:10.1111/jfpp.15781

AMADO, L.R.; SILVA, K.S.; MAURO, M.A.; Drying of mangoes (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) at changeable temperature conditions—Effects on energy consumption and quality of the dehydrated fruit. **Journal of Food Process Engineering**. p.1-13, 2020. DOI: 10.1111/jfpe.13615.

AZEREDO, H.M.C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p.2365–2376, 2009.

BAZARIA, B.; KUMAR, P. Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, n., 2018. DOI:10.1016/j.jssas.2016.09.007

CARREON-HIDALGO, J.P.; FRANCO-VASQUÉZ, D.C.; GOMEZ-LINTINM G.; PÉREZ-FLORES, L.J. Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. *Food Research International*, vol. 151, 2022. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110821

CASTRO-ENRÍQUEZ, D.D.; MONTAÑO-LEYVA, B.; DEL TORO-SÁNCHEZ, C.L.; ONOFRE, J.E.; CARVAJAL-MILLAN, E.; BURRUEL-IBARRA, S.E.; TAPIA-HERNANDEZ, L.A.; BARRERAS-URBUNA, C.G. RODRIGUES-FELIX, F. Stabilization of betalains by encapsulation—a review. **Journal of Food Science and Technology**, vol. 57, p. 1587–1600, 2020. DOI: 10.1007/s13197-019-04120-x

CHEN, C.; VENKITASAMY, C.; ZHANG, W.; DENG, L.; MENG, X.; PAN, Z. EFFECT of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. **Journal of Food Engineering**, vol. 285, 110105, 2020. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.1101

CHHIKARA, N. ; KUSHWAHA, K. ; SHARMA, P. ; GAT, Y. ; PANGHAL, A. Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. **Food Chemistry**, vol. 272, p.192–200, 2019. doi:10.1016/j.foodchem.2018.08.02

COSTA, A. P. D.; HERMES, V. S.; RIOS, A. O.; FLÔRES, S. H. Minimally processed beetroot waste as an alternative source to obtain functional ingredients. **Journal of Food Science and Technology**, vol. 54, n. 7, p. 2050–2058, 2017. DOI:10.1007/s13197-017-2642-4

FERNANDO, G. S. N., WOOD, K., PAPAIOANNOU, E. H., MARSHALL, L. J., SERGEEVA, N. N., & BOESCH, C. Application of an Ultrasound-Assisted Extraction Method to Recover Betalains and Polyphenols from Red Beetroot Waste. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Vol. 9, n. 26, p. 8736–8747. DOI:10.1021/acssuschemeng.1c01203

FILLIPIN, A.P.; FILHO, L.M.; FADEL, V.; MAURO, M.A. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. **Drying Technology**. vol. 36, n.14, p 1662-1677, 2018. DOI: 10.1080/07373937.2017.1421549

GENGATHARAN, A.; DYKES, G. A.; CHOO, W. S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 64, n. 2, 645–649, 2015. DOI:10.1016/j.lwt.2015.06.052

GOKHALE, S. V.; LELE, S. S. Betalain content and antioxidant activity of *Beta vulgaris*: Effect of hot air convective drying and storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, vol. 38, n. 1, p. 585–590. 2014 DOI:10.1111/jfpp.12006

GOKHALE, S.V.; LELE, S.S. Dehydration of Red Beet Root (*Beta vulgaris*) by Hot Air Drying: Process Optimization and Mathematical Modeling. *Food Science and Biotechnology*, vol. 20, n. 4, p. 955-964, 2011. DOI 10.1007/s10068-011-0132-4

HERBACH, H.M.; STINTZING, F.C.; CARLE, R. Betalain Stability and Degradation - Structural and Chromatic Aspects. **Journal of Food Science**, v. 71, n.4, 2006.

HERBACH, K.M.; STINTZING F.C.; CARLE, R. Impact of Thermal treatment on Color and Pigment Pattern of Red Beet (*Beta vulgaris* L.) Preparations. **Food Chemistry and Toxicology**, vol. 69, n. 6, 2004.

IQBAL, A.; MURTAZA, A.; HU, W.; AHMAD, I.; AHMAD, A.; XU, X. Activation and inactivation mechanisms of polyphenoloxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006>

JANISZEWSKA, E.; WÁODARCZYK, J. Influence of spray drying conditions on beetroot Pigments retention after microencapsulation process. *Acta Agrophysica*, Vol. 20, n. 2, p. 343-356, 2013.

KAPADIA, Govind; RAO, Subba. Anticancer Effects of Red Beet Pigments. *In: NEELWARNE, Bhagyalakshmi. Red Beet Biotechnology Food and Pharmaceutical Applications*, New York, Springer, 2013, p. 125-144. DOI: 10.1007/978-1-4614-3458-0_3.

KERR, W.L.; AUDREY VARNER, A. Chemical and physical properties of vacuum-dried red beetroot (*Beta vulgaris*) powders compared to other drying methods, *Drying Technology*, Vol. 38, n. 9, p. 1165-1174, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2019.1619573

KOWALSKI, S.J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*. v.82, p. 65-70, 2014.

KUROZAWA, L. E.; TERNG, I.; HUBINGER, M. D.; PARK, K. J. Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon. **Journal of Food Engineering**, vol. 123, p. 157–164, 2014. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.03

LAGO-VANZELA, E.S.; DO NASCIMENTO, P.; FONTES, E.A.F.; MAURO, M.A.; KIMURAM M. Edible coatings from native and modified starches retain carotenoids in pumpkin during drying LWT - *Food Science and Technology*, Vol. 50, 420-425, 2013. DOI: 10.1007/s13197-018-3258-z

LATORRE, M. E.; BONELLI, P. R.; ROJAS, A. M.; GERSCHENSON, L. N. Microwave inactivation of red beet (*Beta vulgaris* L. var. conditiva) peroxidase and polyphenoloxidase and the effect of radiation on vegetable tissue quality. **Journal of Food Engineering**, vol. 109, n. 4, p; 676–684, 2012. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.11.03.

LIU, X.; GAO, Y.; PENG, X.; YANG, B.; XU, H.; ZHAO, J. Inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase in red beet (*Beta vulgaris L.*) extract with high pressure carbon dioxide. **Innovative. Food Science and Emerging Technologies**, v.9, p. 24-31, 2008.

MANCHALI S., MURTHY K.N.C., NAGARAJU S., NEELWARNE B. (2013) Stability of Betalain Pigments of Red Beet. In: Neelwarne B. (eds) Red Beet Biotechnology. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4614-3458-0_3.

MARTÍNEZ-PARRA, J.; MUÑOZ, R. Characterization of Betacyanin Oxidation Catalyzed by a Peroxidase from *Beta vulgaris L.* Roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, vol. 49, n. 8, p. 4064–4068, 2001. DOI:10.1021/jf0013555.

MUMFORD, P. W.; KEPHART, W. C.; ROMERO, M. A.; HAUN, C. T.; MOBLEY, C. B.; OSBURN, S. C.; HEALY, J.C.; MOORE, A.N.; PASCOE, D.D.; RUFFIN, W.C.; BECK, D.T.; MARTIN, J.S.; ROBERT, M.D.; YOUNG, K. C. Effect of 1-week betalain-rich beetroot concentrate supplementation on cycling performance and select physiological parameters. **European Journal of Applied Physiology**, vol. 118, p. 2465–2476, 2018. doi:10.1007/s00421-018-3973-1

MURPHY, E.W.; CRINER, P.E. ; GRAY, B.C. Comparisons of Methods for Calculating Retentions of Nutrients in Cooked Foods. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. vol. 23, n. 6, p. 1153-1157, 1975.

NAKAGAWA, K.; TAMURA, A.; ADACHI, S. Optimization of food dye (betanin) retention during hot air drying: Design space calculation with consideration of reaction and substrate transfer kinetics. **Drying Technology**, vol. 36, n. 15, p. 1920–1929, 2018. DOI:10.1080/07373937.2018.1463538.

NEMZER, B., PIETRZKOWSKI, Z.; SPÓRNA, A.; STALICA, P.; THRESHER, W.; MICHAŁOWSKI, T.; WYBRANIEC, S. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris L.*) dried extracts. **Food Chemistry**, vol. 127 n.1, p.42–53. 2011. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.12.08

NG, M. L.; SULAIMAN, R. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 88, p. 80–86, 2018. DOI:10.1016/j.lwt.2017.08.032

NIRMAL, N. P., MEREDDY, R. ; MAQSOOD, S. Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications. **Food Chemistry**, vol. 356, 129611, 2021. doi:10.1016/j.foodchem.2021.12961

QIU, G.; WANG, D.; SONG, X.; DENG, Y.; ZHAO, Y. Degradation kinetics and antioxidant capacity of anthocyanins in air-impingement jet dried purple potato slices. **Food Research International**, vol. 105, p. 121–128, 2018. DOI:10.1016/j.foodres.2017.10.050

RAVICHANDRAN, K.; SAW, N.M.M.T.; MOHDALY, A.A.A.; GABR, A.M.M.; KASTELL, A.; RIEDEL, H.; CAI, Z.; KNORR, D.; SMETANSKA, Y. Impact of processing of red beet on betalain content and antioxidant activity. **Food Research International**, vol. 50, p. 670–675, 2013. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.07.002.

- RODRIGUEZ-AMAYA, D.B.; Betalains. Encyclopedia of Food Chemistry, Vol. 1, 2019.
- SADOWSKA-BARTOSZ, I.; BARTOSZ, G. Biological Properties and Applications of Betalains. **Molecules**, vol. 26, n. 9, 2520, 2021. DOI:10.3390/molecules26092520.
- SADOWSKA-BARTOSZ, I.; BARTOSZ, G. Biological Properties and Applications of Betalains. **Molecules**, Vol. 26, n. 9, p. 2520, 2021. DOI:10.3390/molecules26092520.
- SEREMET, L.; NISTOR, O. V.; GEORGETA ANDRONOIU, D.; DANUT MOCANU, G., VASILICA BARBU, V.; MAIDAN, A., RUDI, L.; BOTEZ, E. (2019). Development of several hybrid drying methods used to obtain red beetroot powder. **Food Chemistry**, Vol. 310, 125637, 2019. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.12563
- STINTZING, F.C.; CARLE, F. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 15, p.19–38, 2004.
- TUTUNCHI, P.; ROUFEGARINEJAD, L.; HAMISHEHKAR, H.; ALIZADEH, A. Extraction of red beet extract with β -cyclodextrin-enhanced ultrasound assisted extraction: A strategy for enhancing the extraction efficacy of bioactive compounds and their stability in food models. **Food Chemistry**, 124994, 2019. doi:10.1016/j.foodchem.2019.12499
- VON ELBE, Joachim H. et al. Betalains. **Food Analytical Chemistry**, p. F3.1.1-F3.1.7, 2001.
- ZAKHAROVA, N.S.; PETROVA, T.A.; BOKUCHAVA, M.A. BETANIN enzymatic conversion. *Applied Biochemistry and Microbiology*, vol. 25, p. 768–74, 1987.
- ZUANON, L. A. C.; FUZARI, C. N.; FERREIRA, S.; FREITAS, L. F. M.; MOSER, P.; NICOLETTI, V, R.. Production and Storage Properties of Spray-Dried Red Beet Extract Using Polysaccharide-Based Carrier Systems. **International Journal of Food Engineering**, vol. 15, n. 7, p. 20180371, 2019. DOI: 10.1515/ijfe-2018-0371.

APÊNDICE 4A – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE METODOLOGIAS DE EXTRAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE BETALAÍNAS

Foi feito um breve levantamento bibliográfico, considerando os últimos 20 anos, para avaliar as condições de extração e quantificação dos testes experimentais.

Metodologias de extração

A Tabela A4.1 descreve a metodologia de extração de betalaínas utilizada em diversos trabalhos. Durante a pesquisa, observou-se que a partir da metade da última década foram propostas novas tecnologias como alternativas às técnicas de extração convencionais que são baseadas unicamente na maceração (CASTRO-ENRIQUEZ et al., 2020). Cardoso-Ugarte et al (2014) utilizaram microondas e tiveram rendimentos duas vezes superiores aos obtidos com a extração convencional. Nunes, Carmo e Duarte (2015), utilizaram CO₂ em alta pressão, que em condições otimizadas, também obtiveram o dobro de betalaínas em comparação com a extração convencional. Loginova, Lebovka e Vorobiev (2011) obtiveram ganho em tempo de extração utilizando campo elétrico pulsado. Roriz et al. (2017) estudaram a extração de betalaínas de *Gomphrena globosa* L. assistida por microondas e por ultrassom e concluíram que a segunda técnica foi a mais satisfatória pois extraiu maior concentração de pigmentos. Sobre isso, Sivakumar et al. (2019), que também estudaram o uso do ultrassom, comprovaram que a técnica mostra resultados significativos na melhoria da extração de betalaínas em beterrabas vermelhas. Outros autores também estudaram e otimizaram extrações assistidas por ultrassom (MARAN et al. 2015; SILVA et al., 2018; TUTUNCHI et al., 2019)

O principal solvente utilizado foi a água destilada que apresenta bons resultados devido à natureza hidrossolúveis das betalaínas. A partir de 2010, as extrações passaram a contar com outros solventes, como o metanol e o etanol, em concentrações variadas. Sanchez-Gonzalez et al. (2013) testaram soluções com diferentes concentrações de metanol e etanol (0 - 40% - 80%) para extração de betacianinas em *Opuntia joconostle* e mostraram que a extração com água (0% de solvente) foi a mais eficiente pois, através dela, foi obtida a maior concentração de pigmentos.

Tabela 4A.1 - Metodologias de extração de betalainas

Autor	Ano	Revista	Matéria Prima	Material	Solvente	m/V	Centrifugação/ Filtração	Ultrassom/ Microondas
Von Elbe	2001	Current Prot. in Food Analytical Chemistry	Beterraba vermelha	Extrato aquoso	Água + Diluição em tampão fosfato	50g/150mL	Filtração	-
Fernandez-Lopez	2001	Journal of Chromatography A	<i>Opuntia ficus-indica</i>	Natura	Metanol	1g/5mL	Filtração	-
Stintzing et al.	2003	Eur Food Res Technol	<i>Opuntia ficus-indica</i>	Suco	Água + Diluição em tampão fosfato	-	-	-
Jiratanan e Liu	2004	J. Agric. Food Chem.,	Beterraba vermelha	Extrato aquoso	Água destilada	-	-	-
Stintzing et al.	2005	J. Agric. Food Chem.,	<i>Opuntia spp.</i>	Suco	Sem solvente + Diluição em tampão fosfato (McIlvaine)	-	Filtração	-
Gandía-Herrero et al.	2005	Planta	Portulaca grandiflora	Natura	Tampão Fosfato	-	120g/40min	-
Pavlov et al.	2005	Process Biochemistry Brazilian	Beterraba vermelha	Natura	Etanol (50%)	1g /10mL	10000/10 min	-
Vitti et al.	2005	Archives of Biology and Tech.	Beterraba vermelha	Extrato aquoso	Água destilada	1mL/24mL	15000/40min/4°C	-
Herbach et al.	2006	Food Research International	Pitaya	Suco	Sem solvente + Diluição em tampão fosfato (McIlvaine)	-	-	-
Moßhammer et al.	2006	Food Chemistry and Toxicology	<i>Opuntia ficus - indica</i>	Suco	Sem solvente + Diluição em	-	-	-

Castellanos-Santiago e Yahia	2008	J. Agric. Food Chem.,	<i>Opuntia spp.</i>	Pó liofilizado	tampão fosfato (McIlvaine) Tampão fosfato (McIlvaine) ou água destilada	100mg/20mL/10min	12000G/15°C/15min	-
Georgiev et al.	2010	Plant Foods for Human Nutrition	Beterraba vermelha	Extratos liofilizados	Etanol (70%)	50mg/10 mL	10000/30min	-
Cayupán et al.	2011	Food Chemistry	<i>Opuntia spp.</i>	Fruta seca	Metanol (80%)	10g/30mL/3min	-	-
Nemzer et al.	2011	Food Chemistry	Beterraba vermelha	Suco	Sem solvente	-	-	-
Sanchez-Gonzalez et al.	2013	J. Agric. Food Chem.,	<i>Opuntia joconostle</i>	Pó	Metanol (0-80%) e Etanol (0 a 80%)	1g/20mL	Filtração	-
Ravichandran et al.	2013	Food Research International	Beterraba vermelha	Pó liofilizado	Etanol (50%)	0.1g / 10mL	6000 rpm/10min	-
Maran et al.	2013	Industrial Crops and Products	<i>Opuntia ficus-indica</i>	Extrato aquoso	Metanol (50%)	0mL/10mL	4731/15min	-
Gokhale e Lele	2014	Journal of Food Proc. and Preservation	Beterraba vermelha	Pó de beterraba	Sem solvente + Diluição em tampão fosfato (McIlvaine)	1g/25mL	-	-
Kowalsky et al.	2014	Drying Technology	Beterraba vermelha	Extrato aquoso	Tampão fosfato (McIlvaine)	-	-	-
Cardoso-Ugarte et al.	2014	LWT - Food Science and Technology	Beterraba vermelha	Pó liofilizado	Etanol (50%) + Agitação por 30 min	0.1g /25mL	20000G e filtro	Microondas (ciclo de 120s)
Ramli et al.	2014	The Scientific World Journal	Beterraba vermelha	Polpa	Água destilada + Diluição tampão fosfato	1g/ 25mL	6000/15 min	Ultrassom (30 minutos)
Kumat et al.	2015	Journal of Functional Foods	Basella Rubra		Água destilada	10g/100mL	29690g/10min	-

Maran et al.	2015	Industrial Crops and Products	Bougainvillea glabra	Extrato aquoso	Metanol (50%)	1g /17mL (otimizado)	6500 rpm /15min e filtro	Ultrassom (37 min- otimizado)
Abderrahim et al.	2015	Food Chemistry	Quinoas coloridas	Natura	Metanol (20%) e agitação por 30 min	20g /L	2100G/10min/4°C	-
Khatabi et al.	2016	Arabian Journal of Chemistry	Opuntia ficus indica)	Suco	Metanol	1suco/5metanol	Filtração	-
Roriz et al.	2017	Industrial Crops and Products	Gomphrena globosa	-	-	-	14000 rpm/10min filtro	Ultrassom (22 min - otimizado)
Silva et al.	2018	Journal of food process Eng.	Beterraba vermelha	Beterraba desidratada	Etanol (25%) - otimizado	1g / 25mL	Filtração	Ultrassom (90 min -otimizado)
Amjadi et al.	2018	Food Chemistry	Betanina (Sigma Aldrich)	-	-	-	-	-
Tutunchi et al.	2019	Food Chemistry	Beterraba vermelha	Pós liofilizados	Água destilada	40 mg / 10mL	6000 rpm/10min + filtração	Ultrassom (30 min)
Sivakumar et al.	2019	Ultrasonics Sonochemistry	Beterraba vermelha	Extrato aquoso	Etanol (50%)	1g / 50mL	-	Ultrassom (3 horas)
Kerr e Varner	2020	Drying Technology	Beterraba vermelha	Pó de beterraba	Água destilada + Diluição tampão fosfato	0.1g / 10mL	3300G/10min	-
Akan. Horzum e Akal	2022	Food Science and Technology	Beterraba vermelha	Natura	Água destilada	50g / 150 mL	10000G/15 min	-

Quantificação de betalainas por espectrofotometria de UV-Vis

Diversas técnicas têm sido utilizadas para a identificação e quantificação de betalainas, dentre elas, espectrometria de massa (MS/MS, ESI/MS/MS, FT-ICR-MS), HPLC (HPLC-DAD, HPLC-MS, HPLC-ESI-MS), ressonância magnética nuclear (^1H NMR 1D/2D) e espectrofotometria de UV-Vis (COY-BARERRA, 2020), sendo essa última a técnica a ser pesquisada e utilizada neste trabalho. Na Tabela 2, são apresentados trabalhos que utilizaram essa técnica assim como as condições utilizadas para a análise.

Os trabalhos listados utilizaram absorvâncias em comprimentos de onda dentro da faixa de 470-483 nm para a quantificação de betaxantinas e de 530-538 nm para quantificação de betacianinas. Sabe-se que a betanina também absorvem luz na região entre 475-480 nm (COY.BARERRA, 2020), por isso, algumas metodologias propõem a subtração de uma porção absorvância nessa região (referente a absorvância da betanina), como é o caso dos trabalhos baseados nas metodologias de Nilsson (1970) e de Von Elbe (2001). A vulgoxantina I não absorve luz em 538 nm, por isso, não há necessidade de correção. Parte considerável dos trabalhos pesquisados fazem a subtração de impurezas que são medidas em 600 nm.

Várias diluições foram propostas a fim de que a solução obtivesse absorvâncias dentro de faixas específicas. Por exemplo, em trabalhos escritos por Stintzing ou trabalhos que usaram seus trabalhos como referência, as absorvâncias das amostras ficaram entre valores de 0,8 e 1. Já trabalhos baseados na metodologia de Von Elbe (2001), as absorvâncias ficaram entre 0,4 e 0,5, devido ao fato de que, segundo os autores, nessa faixa, as soluções obedeceram a lei de Beer com menor erro relativo. As diluições são feitas com tampões com pH 6,5. Segundo Von Elbe (2001), pHs diferentes podem ser usados, porém, nesses casos, é necessária uma correção na taxa de absorção de luz pois os espectros dos pigmentos puros usados como referência foram obtidos de soluções com pH 6,5.

Os valores de absorvidades molares foram 48000 L/(mol·cm) para as betaxantinas e variaram entre 60000 e 65000 L/(mol·cm) para as betacianinas. A maioria dos autores utilizaram valores de absorvidades molares para esses compostos em água, independentemente do solvente utilizado.

Tabela 4A.2 - Metodologias de quantificação de betalaínas por espectrofotometria

Autores	Ano	Revista	pH	Abs	λ Bc	λ Bx	Corr.	ϵ Bc	ϵ Bx	Cálculo de concentração de pigmentos	Referência
Von Elbe	2001	Current Prot. in Food Analytical Chemistry	6.5	0.4 <A< 0.5	538	476	600	-	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Fernandez-Lopez	2001	Journal of Chromatography	-	-	535	480	-	$A_{1\%}$ 1120	$A_{1\%}$ 650	-	Piattelli et al., 1964
Stintzing et al.	2003	Eur Food Res Technol	6.5	0.8 <A< 1	538	480	600	60000	48000	$(A \times FD \times MM \times 1000) / \epsilon \times 1$	Nilsson 1970, Cai et al., 1999 e outros
JIRATANAN e LIU	2004	J. Agric. Food Chem.,	-	0.18 <A< 1.8	535	476	-	$A_{1\%}$ 1120	$A_{1\%}$ 650	$c = A/Rb$	Fernandes-Lopes, 2001
Stintzing et al.	2005	J. Agric. Food Chem.,	6.5	0.9 <A< 1	538	480	600	60000	48000	$(A \times FD \times MM \times 1000) / \epsilon \times 1$	Stintzing, Carle e Shieber, 2001
Gandía-Herrero et al.	2005	Planta	6	-	536	480	-	65000	48000	-	Trezzini e Zrýd 1991b, Schwartz e von Elbe 1980
Pavlov et al.	2005	Process Biochemistry Brazilian Archives of Biology and Tech.	-	-	538	476	600	-	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Vitti et al.	2005	Archives of Biology and Tech.	-	0.2 <A< 0.8	538	476	600	-	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Herbach et al.	2006	Food Research International	6.5	± 1	538	-	600	60000	-	$(A \times FD \times MM \times 1000) / \epsilon \times 1$	Herbach 2004
Moßhammer et al.	2006	Food Chemistry and Toxicology	6.5	-	-	-	600	60000	48000	$(A \times FD \times MM) / \epsilon \times 1$	-
Castellanos-Santiago e Yahia	2008	J. Agric. Food Chem.,	6.5	0.9 <A< 1.1	536	483	-	60000	48000	$(A(DF)(MW)Vd / \epsilon LWd)$	Cai et al., 1999
Georgiev et al.	2010	Plant Foods for Human Nutrition	-	-	-	-	600	-	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Pavlov et al. 2005
Cayupán et al.	2011	Food Chemistry	-	0.2 <A< 0.7	536	480	-	65000	48000	-	Gandía-Herrero, Escribano, Garcia-Carmona, 2005
Nemzer et al.	2011	Food Chemistry	8.2	-	538	470	-	$A_{1\%}$ 1120	$A_{1\%}$ 750	-	Nilsson. 1970
Sanchez-Gonzalez et al.	2013	J. Agric. Food Chem.,	5	0.25 <A< 0.6	535	-	-	$A_{1\%}$ 1120	-	-	Kujala et al., 2001
Ravichandran et al.	2013	Food Research International	-	0.8 <A< 1	538	480	-	60000	48000	$(A \times FD \times MM \times 1000) / \epsilon \times 1$	Stintzing, Shieber e Carle, 2003

Gokhale e Lele	2014	Journal of Food Proc. and Preservation	6.5	$0.9 < A < 1$	480	600	65000)	48000	-	Stintzing et al., 2005	
Kowalsky et al.	2014	Drying Technology	6.5	$0.2 < A < 0.8$	538	-	600	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970	
Cardoso-Ugarte et al.	2014	LWT - Food Science and Technology	-	< 1	537	476	600	$A_{1\%} 1120$	$A_{1\%} 750$	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Ramli et al.	2014	The Scientific World Journal	6.5	$0.2 < A < 0.8$	538	-	-	65000	-	$(A(DF)(MW)Vd * 100 / \epsilon L W d)$	Wybraniec e Mizrahi. 2002
Kumar et al.	2005	Journal of Functional Foods	-	-	535	477	-	60000	48000	-	Castellanos-Santiago & Yahia, 2008
Nunes et al.	2015				538	476	600	$A_{1\%} 1120$	$A_{1\%} 750$	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Maran et al.	2015	Industrial Crops and Products	-	$0.2 < A < 0.8$	600	600	-	60000	48000	$(A \times FD \times MM) / \epsilon \times 1$	MoBhammer et al., 2006
Abderrahim et al.	2015	Food Chemistry	-					60000	48000	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Nilsson, 1970
Khatabi et al.	2016	Arabian Journal of Chemistry	-	$0.2 < A < 0.8$	532	482	-	62000	48000	$A = \log (I10/I) = \epsilon \cdot L \cdot c,$	Girod e Zhryd, 1991
Silva et al.	2018	Journal of food process Eng.	-	$0.2 < A < 0.8$	538	480	-	60000	48000	$(A \times FD \times MM \times 1000) / \epsilon \times 1$	-
Amjadi et al.	2018	Food Chemistry	-	-	538	-	-	-	-	$x = 0,0002a + 0,0017$	-
Tutunchi et al.	2019	Food Chemistry	-	-	538	-	-	-	-	$x = 0,0001a + 0,1271$	Gengatharan et al., 2015
Sivakumar et al.	2019	Ultrasonics Sonochemistry	-	-	530	480	-	-	-	$x = a / 0,501$ (uso de padrão)	Amjadi et al., 2018
Kerr e Varner	2020	Drying Technology	6,5	-	538	476	600	60000	48000	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	-
Akan, Horzum e Akal	2022	Food Science and Technology	6,5	$0,4 < A > 0,5$	538	476	600	-	-	$x = 1,095 (a-c), y = b-z-x/3,1$ e $z = a-x$	Von Elbe, 2001

Em que λ é o comprimento de onda (nm), ϵ é absortividade molar (L/mol·cm), x é a absorbância de betacianinas (Bc), y é absorbância corrigida de betaxantinas (Bx), a é absorbância lida em 538 nm, b é a absorbância lida em 476 nm, c é a absorbância lida em 600 nm, A é absorbância, DF é o fator de diluição das amostras, Vd é volume de solução da polpa seca, L é comprimento da cubeta (1cm), ϵ é a absortividade molar e MW é a massa molar.

Quanto às equações utilizadas para cálculo da concentração de pigmentos, observou-se que a grande maioria dos autores utilizaram a Lei de Beer, com poucas exceções de trabalhos recentes que optaram por isolar os compostos de interesses através de técnicas analíticas como o HPLC e a partir do composto puro, determinaram uma curva padrão cuja equação obtida dela foi utilizada para o cálculo (AMJADI et al., 2018; TUTUNCHI et al., 2019; SIVAKUMAR et al., 2019). Além disso, parte considerável dos trabalhos utilizaram as equações propostas por Nilsson (1970) e por Von Elbe (2001) (Equações 4A.1, 4A.2 4A.3) para a correção das absorvâncias dos compostos antes do cálculo da concentração.

$$x = 1,095 \times (a - c) \quad (4A.1)$$

$$z = a - x \quad (4A.2)$$

$$y = b - z - \left[\frac{x}{3,1} \right] \quad (4A.3)$$

em que x é absorvância corrigida de betacianinas, y absorção de luz de vulgaxantina-I corrigida, z absorção de luz das impurezas a é a absorção de luz da amostra a 538 nm; b é absorção de luz da amostra a 476 nm; e c é absorção de luz da amostra a 600 nm (leitura para correção devido impurezas). As constantes são resultado dos testes experimentais dos autores. O valor 3,1 é razão da absorvância em 538 nm e da absorvância em 476 nm que se manteve constante ($3,13 \pm 0,03$) em pH 6,5.

Conclusão

Com base nas metodologias utilizadas por diversos autores que extraem e quantificam betalaínas e em seus resultados, determinou-se que a extração de betalaínas deste trabalho seria feita com água destilada como solvente, na proporção de 25mL para 1g de beterraba. A mistura foi homogeneizada em alta velocidade por 1 minuto, sonificada por 30 minutos e agitada em agitador de tubos de ensaio por 1 minuto. Logo após, foi centrifugada (7500 rpm/15 min/4°C) e filtrada. A quantificação foi realizada segundo metodologia de Von Elbe (2001).

Referências

ABDERRAHIM, F.; HUANATICO, E.; SEGURA, R., ARRIBAS, S.; GONZALEZ, M. C.; CONDEZO-HOYOS, L. Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Peruvian Altiplano. **Food Chemistry**. v. 183, p. 83–90, 2015. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.02

AMJADI, S.; GHORBANI, M.; HAMISHEHKAR, H.; ROUFEGARINEJAD, L. Improvement in the stability of betanin by liposomal nanocarriers: Its application in gummy candy as a food model. **Food Chemistry**. v. 256, p. 156–162, 2018. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.02.114

AKAN, S.; HORZUM, O.; AKAL, C. The prevention of physicochemical and microbial quality losses in fresh-cut red beets using different packaging under cold storage conditions. **LWT - Food Science and Technology**, v. 155, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112877.

CAI, Y.; SUN, M.; WU, H.; HUANG, R.; CORKE, H. Characterization and Quantification of Betacyanin Pigments from Diverse Amaranthus Species. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 46, n. 6, p. 2063-2070, 1999.

CARDOSO-UGARTE, G. A.; SOSA-MORALES, M. E.; BALLARD, T., LICEAGA, A.; SAN MARTÍN-GONZÁLEZ, M. F. Microwave-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*). **LWT - Food Science and Technology**. v. 59, n. 1, p. 276–282, 2014. doi:10.1016/j.lwt.2014.05.025

CASTELLANOS-SANTIAGO, E.; YAHIA, E. M. Identification and Quantification of Betalains from the Fruits of 10 Mexican Prickly Pear Cultivars by High-Performance Liquid Chromatography and Electrospray Ionization Mass Spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 56, n. 14, p. 5758–5764, 2008.

CASTRO-ENRÍQUEZ, D.D.; MONTAÑO-LEYVA, B.; DEL TORO-SÁNCHEZ, C.L.; ONOFRE, J.E.; CARVAJAL-MILLAN, E.; BURRUEL-IBARRA, S.E.; TAPIA-HERNANDEZ, L.A.; BARRERAS-URBUNA, C.G. RODRIGUES-FELIX, F. Stabilization of betalains by encapsulation - a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, p. 1587–1600, 2020. DOI: 10.1007/s13197-019-04120-x

CAYUPÁN, Y. S. C; OCHOA, M. J.; NAZARENO, M. A. Health-promoting substances and antioxidant properties of Opuntia sp. fruits. Changes in bioactive-compound contents during ripening process. **Food Chemistry**, v. 126 n. 2, p. 514–519, 2011. doi:10.1016/j.foodchem.2010.11.03

COY-BARRERA, E. Analysis of betalains (batacyanins and betaxanthins). *In*: SILVA, Ana; NABAVI, Seyed; SAEEDI, Mina. Recent Advances *in natura* Products Analysis, Elsevier, 2020, p. 593-619.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A.; ALMELA, L. Application of high-performance liquid chromatography to the characterization of the betalain pigments in prickly pear fruits. **Journal of Chromatography A**. v. 913, n. 1-2, p. 415–420, 2001.

GANDÍA-HERRERO, F.; ESCRIBANO, J.; GARCÍA-CARMONA, F. Betaxanthins as pigments responsible for visible fluorescence in flowers. **Planta**, v. 222, p.586–593 2005.

GEORGIEV, V. G.; WEBER, J.; KNESCHKE, E.-M.; DENEV, P. N.; BLEY, T.; PAVLOV, A. I. Antioxidant Activity and Phenolic Content of Betalain Extracts from Intact Plants and Hairy Root Cultures of the Red Beetroot *Beta vulgaris* cv. Detroit Dark Red. **Plant Foods for Human Nutrition**, v.65, n. 2, p. 105–111, 2010. DOI:10.1007/s11130-010-0156-6

GENGATHARAN, A.; DYKES, G. A.; CHOO, W. S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 64, n. 2, 645–649, 2015. DOI:10.1016/j.lwt.2015.06.052

GIROD, P.A.; ZRYD, J.P. Biogenesis of betalains – purification and partial characterization of DOPA 4,5-dioxygenase from *Amanita muscaria*. **Phytochemistry**. v. 30, p. 169–174, 1991.

GOKHALE, S.V.; LELE, S.S. Betalain content and antioxidant activity of beta vulgaris: Effect of hot air convective drying and storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 38, n. 1, p. 585-590, 2014.

HERBACH, K.M.; STINTZING, F.C.; CARLE, R. Impact of thermal treatment on color and pigment pattern of red beet (*Beta vulgaris* L.) preparations. **Journal of food science**. v. 69, p. C491-C498, 2004.

HERBACH, K. M.; ROHE, M.; STINTZING, F. C.; CARLE, R. Structural and chromatic stability of purple pitaya (*Hylocereus polyrhizus* [Weber] Britton & Rose) betacyanins as affected by the juice matrix and selected additives. **Food Research International**. v. 39, n. 6, p. 667–677, 2006.

JIRATANAN, T. ; LIU, R.H. Antioxidant Activity of Processed Table Beets (*Beta vulgaris* var, conditiva) and Green Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 52, p. 2659-2670, 2004.

KERR, W. L.; VARNER, A. Chemical and physical properties of vacuum-dried red beetroot (*Beta vulgaris*) powders compared to other drying methods. **Drying Technology**, v. 28, n.9, p. 1–10, 2019. DOI:10.1080/07373937.2019.1619573

KHATABI, O.; HANINE, H.; ELOTHMANI, D.; HASIB, A. Extraction and determination of polyphenols and betalain pigments in the Moroccan Prickly pear fruits (*Opuntia ficus indica*). **Arabian Journal of Chemistry**, v. 9, p. S278–S281, 2016. DOI:10.1016/j.arabjc.2011.04.001

KUJALA, T.; LOPONEN, J.; PIHLAJA, K. Betalains and Phenolics in Red Beetroot (*Beta vulgaris*) Peel Extracts: Extraction and Characterisation. **Verlag der Zeitschrift für Naturforschung**, v. 56, n. 5-6, p. 343-8, 2001. DOI: 10.1515/znc-2001-5-604.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J. Kinetics and Quality Aspects of Beetroots Dried in Non-Stationary Conditions. **Drying Technology**. v. 32 n. 11, p. 1310–1318, 2014. doi:10.1080/07373937.2014.915555

KUMAR, S.S.; MANOJ, P.; GIRIDHAR, P.; SHRIVASTAVA, R.; BHARADWAJ, M. Fruit extracts of *Basella rubra* that are rich in bioactives and betalains exhibit antioxidant activity and cytotoxicity against human cervical carcinoma cells. **Journal of Functional Foods**, v.15, p. 509–515, 2015. DOI: 10.1016/j.jff.2015.03.052.

LOGINOVA, K. V., LEOVKA, N. I., & VOROBIEV, E. Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. **Journal of Food Engineering**, v. 106, n. 2, p. 127–133, 2011. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.04.01

MARAN, J. P.; PRIYA, B. Multivariate statistical analysis and optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from waste red beet stalks. **Journal of Food Science and Technology**, v. 53 n. 1, p.792–799, 2015. DOI:10.1007/s13197-015-1988-8

MOBHAMMER, M. R., MAIER, C., STINTZING, F. C.; CARLE, R. Impact of Thermal Treatment and Storage on Color of Yellow-Orange Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill. cv. Gialla) Juices. **Journal of Food Science**. v. 71, n.7, p. C400–C40, 2006. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00134.x

NEMZER, B., PIETRZKOWSKI, Z.; SPÓRNA, A.; STALICA, P.; THRESHER, W.; MICHAŁOWSKI, T.; WYBRANIEC, S. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. **Food Chemistry**, v. 127 n.1, p.42–53. 2011. doi:10.1016/j.foodchem.2010.12.08

NILSSON, T. Studies into the pigments in beetroot. **Lantbrukshoegskolans Annl.** v. 36, p. 179-219, 1970.

NUNES, A. N.; SALDANHA DO CARMO, C.; DUARTE, C. M. M. Production of a natural red pigment derived from *Opuntia* spp. using a novel high pressure CO₂ assisted-process. **RSC Advances**, v. 5 n. 101, p. 83106–83114, 2015. doi:10.1039/c5ra14998c

PAVLOV, A.; BLEY, T. Betalains biosynthesis by *Beta vulgaris* L. hairy root culture in a temporary immersion cultivation system. **Process Biochemistry**. v. 41, n. 4, p. 848–852, 2015. PAVLOV, A.; GEORGIEV, V.; ILIEVA, M. Betalain biosynthesis by red beet (*Beta vulgaris* L.) hairy root culture. **Process Biochemistry**, v. 40 n. 5, p. 1531–1533, 2005. doi:10.1016/j.procbio.2004.01.001

PIATTELLI, M.; MINALE, L. Pigments of centrospermae-II: Distribution of betacyanins. **Phytochemistry**. v. 3, n. 5, p. 547–557, 1964.

RAMLI, N. S.; ISMAIL, P.; RAHMAT, A. Influence of Conventional and Ultrasonic-Assisted Extraction on Phenolic Contents, Betacyanin Contents, and Antioxidant Capacity of Red Dragon Fruit (*Hylocereus polyrhizus*). **The Scientific World Journal**. p. 1–7, 2014. DOI:10.1155/2014/964731

RAVICHANDRAN, K.; SAW, N.M.M.T.; MOHDALY, A.A.A.; GABR, A.M.M.; KASTELL, A.; RIEDEL, H.; CAI, Z.; KNORR, D.; SMETANSKA, Y. Impact of processing of red beet on betalain content and antioxidant activity. **Food Research International**. v. 50, p. 670–675, 2013.

SILVA, R.P H.; DA SILVA, C.; BOLANHO, B. C. Ultrasonic-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Food Process Engineering**. e12833, 2018. DOI:10.1111/jfpe.12833

RORIZ, C. L.; BARROS, L.; PRIETO, M. A.; BARREIRO, M. F.; MORALES, P.; FERREIRA, I. C. F. R. Modern extraction techniques optimized to extract betacyanins from *Gomphrena globosa* L. **Industrial Crops and Products**, v. 105, p. 29–40, 2017. DOI:10.1016/j.indcrop.2017.05.008

WYBRANIEC, I. PLATZNER, S. GERESH et al. Betacyanins from vine cactus *hylocereus polyrhizus*, **Phytochemistry**. v. 58, n. 8, p. 1209–1212, 2002.

SANCHEZ-GONZALEZ, N., JAIME-FONSECA, M. R., SAN MARTIN-MARTINEZ, E.; ZEPEDA, L. G. Extraction, Stability, and Separation of Betalains from *Opuntia joconostle* cv. Using Response Surface Methodology. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61 n. 49, p. 11995–12004, 2013. DOI:10.1021/jf401705h

SCHWARTZ SJ, VON ELBE JH. Quantitative determination of individual betacyanin pigments by high-performance liquid chromatography. **Journal of Agricultural Food Chemistry**. v. 28, p. 540–543, 1980.

SIVAKUMAR, V.; ANNA, J. L.; VIJAYEESWARRI, J.; SWAMINATHAN, G. Ultrasound assisted enhancement in natural dye extraction from beetroot for industrial applications and natural dyeing of leather. **Ultrasonics Sonochemistry**. v. 16 n. 6, p. 782–789, 2019. DOI:10.1016/j.ultsonch.2009.03.00

STINTZING, F.C., SCHIEBER, A. ; CARLE, R. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. **European Food Research and Technology**, v. 212, p. 396–407, 2001.

STINTZING, F.C., SCHIEBER, A. ; CARLE, R. Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. **European Food Research and Technology**, v. 216, n. 4, p. 303-311, 2003.

STINTZING, F.C.; HERBACH, K.M.; MOSSHAMMER, M.R.; CARLE, R; YI, W.; SELLAPPAN, S.; AKOH, C.C.; BUNCH, R.; FELKER, P. Color, Betalain Pattern, and Antioxidant Properties of Cactus Pear (*Opuntia spp.*) Clones. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 53, n. 2, p. 442–451, 2005.

TREZZINI GF, ZRYD JP. Characterization of some natural and semi-synthetic betaxanthins. **Phytochemistry**. v.30 p. 1901–1904, 1991.

TUTUNCHI, P.; ROUFEGARINEJAD, L.; HAMISHEHKAR, H.; ALIZADEH, A. Extraction of red beet extract with β -cyclodextrin-enhanced ultrasound assisted extraction: A strategy for enhancing the extraction efficacy of bioactive compounds and their stability in food models. **Food Chemistry**, 124994, 2019. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.12499

VITTI, M.C.D.; YAMAMOTO, L.K.; SASAKI, F.F.; AGUILA, S.A.; KLUGE, R.A.; JACOMINO, A.P. Quality of Minimally Processed Bet Roots Stored in Different Temperatures. **Brazilian archives of biology and technology**. v. 48, n. 4, p. 503-510, 2005.

VON ELBE, Joachim H. et al. Betalains. **Food Analytical Chemistry**, p. F3.1.1-F3.1.7, 2001.

CONCLUSÕES GERAIS

A secagem convectiva convencional de beterrabas vermelhas foi avaliada neste trabalho sob vários pontos de vista, dentre os quais se destacam alguns achados:

- O encolhimento da beterraba foi fortemente dependente da umidade (apresentando relação linear), independente da temperatura do ar de secagem e predominante ao longo da espessura;

- O consumo de energia foi linearmente dependente do tempo de secagem e proporcional à temperatura do ar;

- A degradação de betalaínas em função do tempo mostra um decaimento inicial em todas as temperaturas e, a partir daí, as retenções de betacianinas mantêm-se estáveis e em valores satisfatórios dentro do período avaliado;

- Quando as amostras atingem temperaturas superiores a 70 °C durante a secagem, a degradação de betalaínas aumenta.

Este trabalho também propôs a modelagem matemática de curvas de secagem através da solução numérica de um modelo teórico. A consideração do encolhimento foi fundamental para predição adequada de perfis espaciais e temporais de umidade e para a determinação dos coeficientes de difusão efetivos, que variaram com a temperatura de acordo com uma função tipo Arrhenius e tiveram seus valores superestimados quando o encolhimento foi desprezado. O modelo matemático proposto, quando considera o encolhimento, mostra-se eficiente e capaz de descrever com suficiente precisão a evolução temporal da secagem.

Com base nos resultados obtidos da avaliação de secagens contínuas, secagens com intermitência térmica e correspondentes consumos energéticos foram avaliados através de simulações numéricas cujos modelos foram satisfatoriamente validados com secagens experimentais. A intermitência térmica proporcionou aumento da eficiência da secagem convectiva em termos de taxas de secagem e economia de energia em relação às secagens contínuas. Os resultados simulados evidenciaram a importância da escolha de condições de processo adequadas para que a intermitência térmica seja vantajosa. Várias configurações de secagem mostraram economia de energia relevante, destacando-se a secagem 90°C/40min+70°C/120min, que apresentou 30,1 % de economia.

O efeito do uso da secagem com intermitência térmica sobre a retenção de pigmentos e a cor de beterrabas desidratadas também foi analisado. Valores médios de retenção sugerem que a aplicação da intermitência térmica em algumas configurações pode manter a qualidade

de beterrabas desidratadas em níveis desejáveis, ainda que as diferenças não tenham sido todas significativas. A presente pesquisa disponibilizou informações úteis para projeto e controle desses processos e, desde que os parâmetros estejam dentro dos limites de tempo e temperatura estudados, e a máxima temperatura da amostra seja limitada a 70 °C, as características relacionadas à qualidade do produto desidratado se manterão adequadas.

De maneira geral, concluiu-se que a secagem convectiva com intermitência térmica é uma técnica economicamente atraente para a indústria de alimentos pois aumenta a eficiência do processo e reduz significativamente seu gasto energético, mantendo a qualidade dos produtos desidratados.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O modelo matemático proposto neste trabalho mostrou eficiência na previsão de perfis de umidade durante a secagem. No entanto, foi utilizado considerando a secagem isotérmica, geometria aproximada à uma placa infinita e transferência de massa unidimensional. Sugere-se a avaliação de outras geometrias para casos de transferência de massa 2D ou 3D, a fim de aumentar a aplicabilidade do modelo. Outra sugestão é o acoplamento da transferência de calor durante a modelagem.

O encolhimento das fatias de beterraba foi muito bem descrito pela equação empírica abordada neste trabalho. No entanto, sabe-se que equações empíricas são limitadas em aplicabilidade. Portanto, uma abordagem teórica de encolhimento poderia ser explorada.

Por fim, a secagem convectiva de beterrabas é uma alternativa para produção de pó, que é a principal forma de incorporação de beterraba em alimentos. Se as condições de secagem propostas neste trabalho forem utilizadas, espera-se alta retenção de betalaínas. Seria interessante a comparação entre o pó produzido por secagem convectiva e pó produzido pela principal forma de produção (*spray drying*). Para isso, a caracterização dos pós e as condições de armazenamento devem ser estudadas. Outras análises trariam resultados importantes, como atividade antioxidante e teor de vitamina C. Uma das possíveis restrições para o uso da beterraba na sua incorporação em alimentos é o gosto de terra resultante da presença de geosmina. Portanto, características sensoriais também seriam importantes de serem comparadas.