

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 07/03/2024



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. Betalínas

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 betaláinas. 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)
\bar{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
tol	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 predição 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.

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 (betacyanins 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. **Lantbrukshögskolans 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.