



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

**DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE
SECAGEM DA CENOURA (*Daucus carota*
L.) ATRAVÉS DE MODELOS EMPÍRICOS**

Marconi Silva Santos Junior

Cuité-PB

2018

Marconi Silva Santos Junior

DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA CENOURA (*Daucus carota L.*)
ATRAVÉS DE MODELOS EMPÍRICOS

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Física, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande, como requisito de obtenção do título de Graduado em Licenciatura em Física

Orientadores: Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde
Prof. Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias

Cuité-PB

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE
Responsabilidade Rosana Amâncio Pereira – CRB 15 – 791

S237d Santos Junior, Marconi Silva.

Descrição da cinética de secagem da cenoura (*Daucus carota* L.) através de modelos empíricos. / Marconi Silva Santos Junior. – Cuité: CES, 2018.

57 fl.

Monografia (Curso de Licenciatura em Física) – Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2018.

Orientador: Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde
Coorientadora: Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias-

1. Formação de professores. 2. Licenciatura em Física. 3. Ensino superior. I. Título.

Biblioteca do CES - UFCG

CDU 633.43

Marconi Silva Santos Junior

DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DA CENOURA (*Daucus carota L.*)
ATRAVÉS DE MODELOS EMPÍRICOS

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Física, Unidade Acadêmica de Física e Matemática, Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande, como requisito de obtenção do título de Graduado em Licenciatura em Física

Aprovada em Março de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde - Orientador

UFCG/CES

Prof^a. Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias - Co-Orientadora

UFCG/CES

Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Júnior - Membro

UFCG/CES

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas - Membro

UFCG/CES

Cuité-PB

2018

“Nós somos aquilo que fazemos repetidamente.
Excelência, então, não é um ato, mas um
hábito.”

Aristóteles

Aos amigos, colegas e professores, pelo incentivo e apoio constantes. A minha família pelo carinho e atenção, em especial, aos meus pais que acreditaram e torceram por mim, me ensinando o caminho certo a seguir, e sempre me incentivando a estudar para me tornar um ser humano melhor.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que me permitiu alcançar mais essa conquista em minha vida.

Aos meus pais, Marconi Silva Santos com todo o meu amor, por me apoiar em todas as minhas escolhas e Rosa Nilce Costa Silva Santos (*in memoriam*) que certamente estaria orgulhosa do filho.

Aos meus Irmãos Zayne e Gustavo, pelo amparo nos momentos difíceis e a minha madrastra Socorro, pelo incentivo e confiança.

Aos meus avós Terezinha Barreto (Dona Tê) e José Martins (Seu Zói), pelo carinho, incentivo e apoio durante toda a graduação.

Aos meus tios(as), Marcela, Márcia, Múcio e Marcos pelo apoio incondicional durante toda a graduação.

Ao professor Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde pela sua dedicação na orientação deste trabalho, presteza nos ensinamentos, paciência e apoio em cada etapa deste trabalho.

A professora Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias pela sua grande contribuição para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço pela sua dedicação e paciência.

Ao professor Dr. Aluízio Freire da Silva Júnior, por participar da banca de defesa da monografia e por todas as sugestões de melhoria deste trabalho.

Ao professor Dr. Joseclécio Dutra Dantas pelo auxílio durante a graduação e por participar da banca.

A todos os amigos do grupo de pesquisa pela ajuda na realização dos experimentos, Willian Oliveira, Helymarckson Azevedo e Issac Ferreira.

A todos os professores, pelos ensinamentos e incentivos durante toda a graduação.

A todos que embora não diretamente citados, mas que de alguma forma colaboraram para a concretização deste trabalho de conclusão de curso, o meu sincero AGRADECIMENTO.

Resumo

A cenoura (*Daucus carota L.*) é uma raiz tuberosa pertencente à família *Apliaceae*. Este legume possui um importante valor nutricional, pois apresenta em sua composição, diversos componentes responsáveis por manter o bom equilíbrio do corpo (potássio, magnésio, cobre, cálcio e fósforo), bem como vitaminas do complexo B, que são importantes para a regulação do sistema nervoso e do aparelho digestivo. Como a cenoura é um legume conhecido por possuir alto teor de umidade, logo, a sua vida útil se torna curta. Diante disso, a secagem se torna um procedimento para aumentar a sua vida de prateleira. Nessa perspectiva, objetivou-se nesse trabalho avaliar o processo de secagem da cenoura através de modelos empíricos e determinar por meio de dados experimentais as curvas de secagem da cenoura para as temperaturas estudadas. As condições operacionais usadas no procedimento foram para discos de cenoura com 10 mm de espessura e 30 mm de diâmetro, em média. Nessa metodologia, foram usadas as temperaturas de 40, 50 e 70°C. Foi possível observar, através dos resultados, que as equações de Page e Silva et alii foram as melhores que se ajustaram aos dados experimentais, e as mesmas foram utilizadas para obter a taxa de secagem. No estudo das taxas de secagem, foi observada a existência de um período de indução para todas as temperaturas estudadas. O fim destes períodos e o início do período de taxa decrescente ocorreram próximos aos 40 min (a 40°C), 36 min (a 50°C) e 30 min (a 70°C). Portanto, com o aumento da temperatura, o período de indução tende a diminuir.

Palavras-chave: Secagem, Modelos empíricos, Cinética de secagem, Taxa de secagem.

Abstract

The carrot (*Daucus carota* L.) is a tuberous root belonging to the family Apiaceae. This vegetable has an important nutritional value, since it has in its composition, several components responsible for maintaining the good balance of the body (potassium, magnesium, copper, calcium and phosphorus), as well as B vitamins, which are important for the regulation of nervous system and digestive system. As the carrot is a vegetable known to have high moisture content, therefore, its useful life becomes short. Faced with this, drying becomes a procedure to increase your shelf life. In this perspective, the aim of this work was to evaluate the carrot drying process through empirical models and to determine the drying curves of the carrot at the temperatures studied. In this perspective, the aim of this work was to evaluate the carrot drying process through empirical models and to determine the drying curves of the carrot at the temperatures studied. In this methodology, the temperatures of 40, 50 and 70°C. It was possible to observe, through the results, that the equations of Page and Silva et alii were the best that fit the experimental data, and they were used to obtain the drying rate. In the study of the drying rates, it was observed the existence of an induction period for all temperatures studied. The end of these periods and the beginning of the period of decreasing rate occurred near 40 min (at 40 ° C), 36 min (at 50°C) and 30 min (at 70°C). Therefore, with increasing temperature, the induction period tends to decrease.

Keywords: Drying, Empirical models, Kinetics of drying, Rate of drying.

Sumário

Agradecimentos	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Cenoura	3
2.1.1 Aspectos Gerais	3
2.1.2 Morfologia	5
2.1.3 Classificação da cenoura	5
2.1.4 Características Nutricionais	7
2.2 Secagem	8
2.2.1 Aspectos gerais	8
2.3 Teor de Umidade	10
2.4 Cinética de secagem	12
2.5 Secagem de produtos agrícolas	14
2.6 Modelagem matemática de secagem	15

3	Materiais e Métodos	17
3.1	Matéria-prima	17
3.2	Metodologia experimental	18
3.3	Modelos empíricos para descrever a secagem	19
3.4	Software utilizado neste trabalho	20
4	Resultados e Discussões	21
4.1	Descrição da cinética de secagem utilizando modelos empíricos	21
4.2	Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas . . .	22
4.3	Análise dos resultados dos modelos empíricos	30
5	Conclusões	36
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	36
	Referências Bibliográficas	37
A	Resultados dos Dados Experimentais	41
A.1	Dados Experimentais da cinética de secagem da cenoura	41

Lista de Figuras

2.1	Morfologia da Cenoura.	5
2.2	(a) Kuroda, (b) Nantes e (c) Brasília.	6
2.3	Diagrama dos processos envolvidos na secagem.	9
2.4	Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio \bar{M}_e	11
2.5	Curvas de secagem.	12
3.1	Cenouras utilizadas neste experimento.	17
3.2	Discos de cenoura nos cestos de alumínio.	18
3.3	Balança digital utilizada nos experimentos.	18
4.1	Simulações de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	24
4.2	Simulações de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	25
4.3	Simulações de secagem usando o modelo 3 (Peleg) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	26
4.4	Simulações de secagem usando o modelo 4 (Wang e Singh) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	27
4.5	Simulações de secagem usando o modelo 5 (Lewis) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	28
4.6	Simulações de secagem usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) para as temperaturas: (a) $T = 40^\circ\text{C}$, (b) $T = 50^\circ\text{C}$ e (c) $T = 70^\circ\text{C}$	29
4.7	Simulações de secagem usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T=40^\circ\text{C}$; (b) $T=50^\circ\text{C}$ e (c) $T=70^\circ\text{C}$	31
4.8	Simulação da cinética de secagem usando o modelo 1 (Page) para todas as temperaturas estudadas.	32

4.9 Simulações da taxa de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$ 33

4.10 Simulações da taxa de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$ 34

Lista de Tabelas

2.1	Produção de cenoura no Brasil.	4
2.2	Classes da cenoura de acordo com o seu comprimento.	6
2.3	Limites máximos de defeitos graves e leves.	7
2.4	Composição nutricional de 100 gramas de cenoura crua.	8
3.1	Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem.	19
4.1	Teor de umidade inicial e de equilíbrio para diferentes temperaturas.	22
4.2	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 1 (Page).	22
4.3	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 2 (Silva et alii).	23
4.4	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 3 (Peleg).	23
4.5	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 4 (Wang e Singh).	23
4.6	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 5 (Lewis).	23
4.7	Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 6 (Henderson e Pabis).	23
4.8	Resultados para a taxa de secagem descrito pela Eq. (4.1).	35
4.9	Resultados para a taxa de secagem descrito pela Eq. (4.2).	35
A.1	Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 40°C	42
A.2	Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 50°C	43
A.3	Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 70°C	44

Capítulo 1

Introdução

A cenoura (*Daucus carota L.*) é uma das principais hortaliças cultivadas no Brasil, onde se destacam os estados de Minas Gerais e São Paulo por serem os maiores produtores. Esta hortaliça é bastante apreciada na culinária brasileira, seja *in natura* ou processada, pois possui importante valor nutricional, por estarem presentes em sua composição nutrientes responsáveis por manter o bom funcionamento do corpo.

De acordo com Araújo (2010), o consumo diário dessa hortaliça traz diversos benefícios a saúde, dos quais podem-se citar a prevenção de doenças na visão, a contribuição para o bom estado da pele e mucosas e o melhoramento da digestão.

Por ser uma hortaliça, a cenoura possui um alto teor de umidade, o que a torna um produto perecível. O pequeno tempo de vida de prateleira de alimentos com elevado teor de umidade é consequência da disponibilidade de água para a propagação de micro-organismos e reações químicas indesejáveis. Então, para evitar a rápida deterioração do alimento, é usado o processo de secagem, como forma de conservação do alimento, por propiciar a redução do teor de umidade.

De acordo com FIOREZE (2004), secagem é a remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, envolvendo exclusivamente a transferência de calor e massa. O principal objetivo desse processo é aumentar a vida de prateleira do produto alimentício pela redução da atividade de água. Além desse aumento de vida útil, a secagem diminui os custos com armazenamento e transporte.

Para uma análise do processo de secagem, diversas técnicas são empregadas, dentre elas os modelos empíricos. Um modelo empírico consiste numa correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo de secagem. E eles geralmente descrevem bem a cinética

de secagem dos produtos estudados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o processo de secagem da cenoura através de modelos empíricos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar por meio de dados experimentais as curvas de secagem da cenoura para diferentes temperaturas.
- Avaliar o ajuste dos modelos empíricos no processo de secagem.
- Comparar os melhores modelos empíricos.
- Determinar e avaliar as curvas da taxa de secagem para os melhores modelos empíricos.

Desta forma, com este trabalho tem o intuito de disponibilizar as análises de uma secagem convectiva de discos de cenouras e considerar os fenômenos existentes nestes processos, bem como a utilização dos resultados obtidos em modelos existentes na literatura, com a intenção de predizer o modelo que melhor se adéqua à secagem realizada neste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Cenoura

2.1.1 Aspectos Gerais

A cenoura (*Daucus carota L.*) é uma planta hortense da família das *Apiaceae* (BALBACH; BOARIM, 1993). Era uma hortaliça muito apreciada pelos povos da antiga Grécia e Roma, e os mesmos a utilizavam como medicamento para o tratamento de problemas urinários. A história da cenoura começa ainda na Antiguidade, período em que era cultivada na região do Mar Mediterrâneo e usada como planta medicinal. O vegetal, de origem afegã, no século XIII se popularizou na Europa, de onde mais tarde migrou para a América (DELMIRO, 2016).

Geralmente as cenouras são consumidas cruas, fazendo parte de saladas, ou cozidas em sopas e refogados. Dentre as hortaliças, a cenoura pode ser classificada como um legume, haja vista que a sua parte comestível é a raiz. Além dessa classificação, as cenouras podem também ser caracterizadas quanto a sua coloração, comprimento e forma (DELMIRO, 2016). Entre as hortaliças cujas partes comestíveis são as raízes, a cenoura é a de maior valor econômico (FILGUEIRA, 2008). A cultura ainda se destaca por apresentar elevada capacidade de geração de emprego e renda em todos os segmentos de sua cadeia produtiva durante o ano inteiro (VILELA, 2008).

A cenoura de cor alaranjada, como a que conhecemos hoje em dia, foi desenvolvida na França e na Holanda. A seleção foi iniciada na Holanda, no início do século XVII, com vistas a obter raízes de cor alaranjada mais intensa, o que por sua vez deu origem a

variedades *Long Orange* e esta deu origem a outras três variedades: *Late Half Long*, *Early Half Long* e *Early Scarlet Horn* (EMBRAPA, 1984).

O transporte de cenouras deve ser feito observando, além da temperatura adequada, a profundidade dos recipientes, pois ela se deteriora facilmente pela pressão exercida através das camadas superiores sobre as inferiores (EVANGELISTA, 1992).

A produção brasileira de cenoura foi de 780,6 mil toneladas em 2014 e foi favorecida pelo desenvolvimento de cultivares para o verão e pelas novas tecnologias. Mais da metade da produção brasileira de cenouras é colhida em Minas Gerais. A colheita mineira contribuiu com 394 mil toneladas das 780,6 mil toneladas produzidas no Brasil em 2014, de acordo com a pesquisa Produção Agrícola Municipal (PAM), do instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE).

Na Tabela 2.1 podemos observar um comparativo de produção no Brasil, área cultivada e produtividade da cenoura dos anos de 2012, 2013 e 2014.

Tabela 2.1: Produção de cenoura no Brasil.

ANO	ÁREA (mil/ha)	PRODUÇÃO (mil/t)	PRODUTIVIDADE (t/ha)
2012	26,5	780,5	29,5
2013	26,0	780,0	30,0
2014	23,1	780,6	33,8

Fonte: (IBGE, 2014).

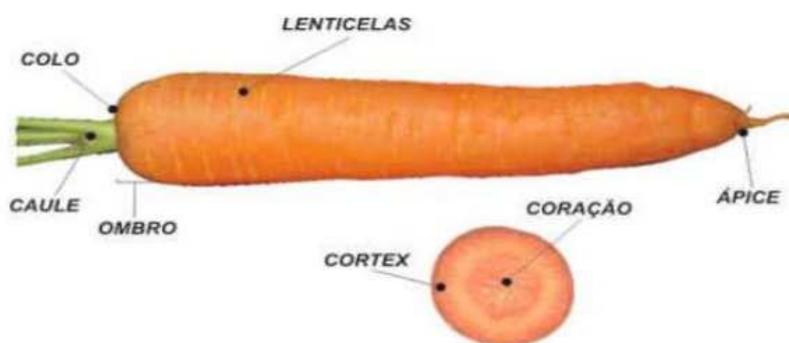
Já em 2015, a produção total de cenoura foi de 760.600 toneladas, de acordo com os dados mais recentes da PAM. O resultado é menor do que a média de 780,3 mil toneladas obtida nos três anos anteriores, conforme cálculo da pesquisadora Nirlene Junqueira Vilela, da Embrapa Hortaliças, de Brasília (DF). Ela se baseia nas informações apuradas pelo IBGE (HORTALIÇAS, 2017).

O cultivo da cenoura vem ganhando espaço na agricultura de hortaliças no Brasil, onde se destacam os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Goiás, Bahia e Rio Grande do Sul, por serem os estados com maior área cultivada e conseqüentemente com a maior produção de cenoura no país. No mundo os maiores produtores de cenoura são a China, Estados Unidos e a Rússia.

2.1.2 Morfologia

A estrutura morfológica da cenoura pode ser observada na Figura 2.2.

Figura 2.1: Morfologia da Cenoura.



Fonte:(ARAÚJO, 2010)

Segundo Araújo (2010), o caule é a parte aérea da cenoura, ou seja, ela não está aterrada no solo. Em seguida, encontra-se o colo, que é a região de transição entre o caule e a raiz. Também há o ombro, que é o local na cenoura onde se pode encontrar a maior reserva de nutrientes. As lenticelas são responsáveis pela fixação da raiz no solo, e também pela retirada de água e minerais do mesmo. Ao se fazer um corte na secção transversal da cenoura, pode-se identificar outras duas partes: cortex e o coração. O primeiro é responsável por auxiliar na condução de água e minerais dissolvidos através da raiz, desde a epiderme até o xilema, e armazena várias moléculas translocadas. A segunda é a parte central da cenoura, que é a região mais fibrosa da raiz. Por fim, tem-se o ápice, que ajuda a raiz penetrar no solo.

2.1.3 Classificação da cenoura

A classificação da cenoura é dividida em: Grupos, Classes e Categoria (ou Tipo).

Grupos

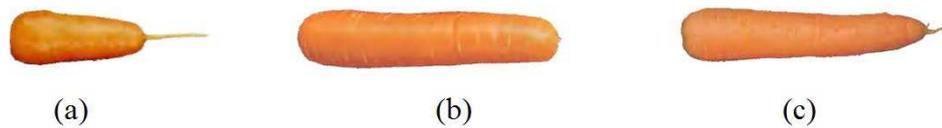
De acordo com o tipo varietal, a cenoura será classificada em 3 grupos:

- **Nantes:** 90% da produção cilíndrica, ponta arredondada, coração pouco evidente, pele lisa, coloração laranja escura, caule pequeno, produção/inverno.

- **Kuroda:** Formato cônico, ponta pouco fechada, coração pouco evidente, coloração laranja avermelhada, caule pequeno, produção primavera/verão.
- **Brasília:** Formato cônico, ponta pouco fechada, coração evidente, pele pouco lisa, coloração laranja clara, caule grande, produção/verão.

Os grupos de cenoura podem ser observados na Figura 2.1.

Figura 2.2: (a) Kuroda, (b) Nantes e (c) Brasília.



Fonte: (HORTICULTURA, 2015)

Classes

De acordo com o comprimento da raiz, a cenoura será classificada em 4 classes, como pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classes da cenoura de acordo com o seu comprimento.

CLASSE	COMPRIMENTO (cm)
10	Maior ou igual a 10 e menor que 14
14	Maior ou igual a 14 e menor que 18
18	Maior ou igual a 18 e menor que 22
22	Maior ou igual a 22 e menor que 26

Fonte: (HORTICULTURA, 2015).

Categoria

De acordo com as porcentagens toleráveis de defeitos que podem ser encontrados nas raízes contidas na embalagem de comercialização, os defeitos podem ser classificados

em: Defeitos graves e Defeitos leves.

- **Defeitos graves:** Podridão mole, Deformação, Podridão seca, Ombro verde/roxo (> 10% da área), Lenhosa, Murcha, Rachada, Dano mecânico (> 10% da área ou > 3mm de profundidade) e Injúria por pragas ou doenças.
- **Defeitos Leves:** Corte inadequado do caule, Ombro verde/roxo (< 10% da área), Dano mecânico (< 10% da área ou 3mm de profundidade), Manchas e Presença de radicela.

Portanto, na Tabela 2.3 são estabelecidas os limites de tolerância de ambos os defeitos e para cada categoria de qualidade.

Tabela 2.3: Limites máximos de defeitos graves e leves.

Defeitos Graves (%)	Extra	Cat I	Cat II	Cat III
Podridão mole	0	0	1	3
Deformação	0	1	3	5
Podridão seca	0	1	2	5
Ombro verde/roxo > 10%	2	3	4	6
Lenhosa	1	2	3	4
Murcha	0	2	3	4
Rachada	0	1	2	5
Dano mecânico > 10% ou > 3mm	1	2	3	5
Injúria por pragas ou doenças	0	1	3	5
Total Graves	3	6	10	20
Total Leves	4	10	25	100
Total Geral	6	10	25	*100

Fonte:(HORTICULTURA, 2015).

2.1.4 Características Nutricionais

A cenoura contém um importantíssimo valor nutricional, por estarem presentes em sua composição nutrientes responsáveis por manter o bom funcionamento do corpo. A vitamina A presente na mesma é uma grande aliada do fígado para expulsar as toxinas do corpo. As fibras promovem o movimento intestinal e remove as células mortas. Na Tabela

2.4, estão representados as quantidades de nutrientes presentes em 100 gramas de cenoura crua.

Tabela 2.4: Composição nutricional de 100 gramas de cenoura crua.

Nutriente	Quantidade	Unidades
Fibra	3,00	g
Calorias	50,00	Kcal
Água	87,79	%
Matéria Seca	34,70	g
Vitamina A	1100	μg
Vitamina B	60,00	μg
Vitamina C	26,80	μg
Cálcio	56,00	mg
Potássio	328,60	mg
Sódio	53,70	mg
Ferro	0,60	mg
Cobre	0,14	mg
Fósforo	46,00	mg
Zinco	0,30	mg
Cobre	0,14	mg

Fonte: (EMBRAPA, 2011)

A cenoura é uma das hortaliças mais populares, pela sua versatilidade de uso e formas de apresentação ao consumidor, podendo ser ralada em diversos tamanhos ou cortada na forma de fatias, cubos, palitos, e ainda apresentada na forma de mini-cenoura “baby-carrot”. Em função do processamento, tornam-se suscetíveis a várias mudanças fisiológicas e microbiológicas que depreciam a sua qualidade sensorial e limitam sua vida-de-prateleira (RESENDE et al., 2004).

2.2 Secagem

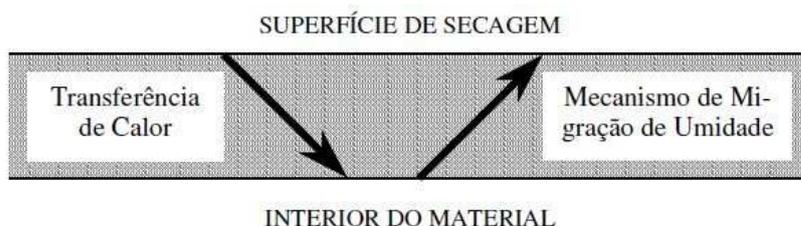
2.2.1 Aspectos gerais

Embora a secagem e desidratação sejam termos congêneres, para quem é da área, os mesmos têm significados diferentes. A secagem é um processo que envolve a transferência de calor para o produto em questão através de procedimentos como: condução, convecção e radiação, acarretando a remoção da água líquida do produto e a evaporação da mesma.

O termo desidratação pode ser utilizado de forma mais vasta, e pode ser denominado como um processo de remoção de água sem que haja a necessidade da transferência de calor do meio para o produto, e também sem a evaporação de água líquida (FARIAS, 2011).

Durante a secagem, o calor é transferido ao material por convecção, através do ar, ou por condução, através do contato com uma superfície quente. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido ou próximo da superfície, se a mudança de estado ocorrer no interior do corpo (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). A partir disso ocorre uma retirada de umidade da superfície e das camadas externas; cria-se um gradiente de concentração internamente ao produto, causando um processo migratório de umidade do centro para a superfície (FIOREZE, 2004). Um diagrama de secagem pode ser observado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Diagrama dos processos envolvidos na secagem.



Fonte:(PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007)

A secagem é um processo complexo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar, ocorrendo remoção de umidade do meio poroso, pela difusão desta e evaporação, normalmente causada por convecção forçada de ar aquecido, de modo a garantir a manutenção de sua qualidade durante o período de armazenagem (BORGES, 2016). A retirada de água da matriz sólida é uma parte integrante do processo de uma grande variedade de produtos. Dentre os principais objetivos desta secagem está a prolongação da vida de prateleira, a diminuição de custos de manuseio e preparo para processamentos futuros (ROSA, 2010).

A temperatura do ar de secagem é fundamental no processo de secagem, pois, juntamente com o fluxo de ar, é o principal fator determinante da velocidade de secagem (SILVA; AFONSO; FILHO, 2000).

A secagem é um processo que deve ser previsto, dimensionado e planejado, sendo útil para qualquer projetista ou pesquisador a utilização de um programa que permita a simulação desse processo de forma a prever, de acordo com as condições de uma região,

o melhor tipo de secador a ser usado e as condições de secagem, bem como o tempo necessário para realizá-lo (MATA; DANTAS; BRAGA, 1999).

A secagem destaca-se por sua grande importância dentro do sistema de produção agrícola, ressaltando-se que, por meio dela, pode-se antecipar a colheita, armazenar o produto por longo tempo sem que haja deterioração do mesmo, manter a viabilidade de sementes e, também, permitir ao produtor comercializar um produto de melhor qualidade (HENDERSON; PERRY, 1997).

A secagem é um processo muito antigo no meio industrial, tendo relevante importância principalmente na indústria de produtos agrícolas, cerâmicos, farmacêuticos, construção civil, entre outros. Na indústria agrícola, ela é usualmente usada em produtos higroscópicos, que são produtos que têm a facilidade de ceder ou receber vapor d'água do ar que os cercam. Logo, para armazenar esse tipo de produto é preciso reduzir o seu teor de umidade para aumentar a durabilidade do mesmo.

Na indústria farmacêutica, a aplicação da secagem também é de suma importância, tendo em vista que qualquer tipo de umidade no produto, como nos comprimidos, tende a comprometer a durabilidade, a alterar o volume e o peso, e até mesmo afetar as substâncias ativas contidas no mesmo.

2.3 Teor de Umidade

De modo geral, o teor de umidade (\bar{M}) é a quantidade de água em relação à massa do corpo (m). O teor de umidade que relaciona a massa de água presente no corpo e a massa total do corpo é chamado de teor de umidade em base úmida (\bar{M}_{bu}) (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007), que pode ser expresso da seguinte forma:

$$\bar{M}_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_s}, \quad (2.1)$$

onde m_s representa a massa seca.

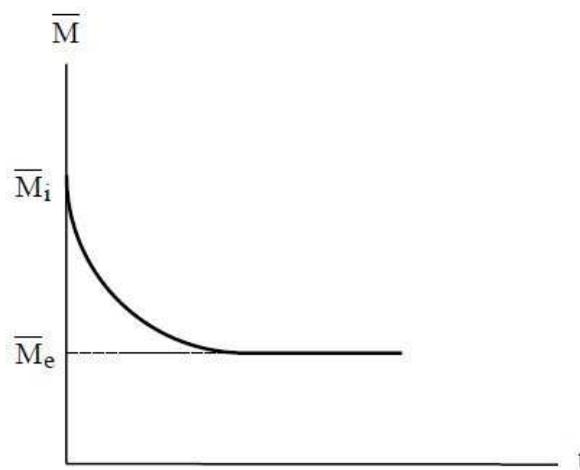
Mas também pode ser obtido em relação a base seca (\bar{M}_{bs}); é definido como a massa de água em relação à massa seca deste corpo (SILVA, 2007). É expresso do seguinte modo:

$$\bar{M}_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.2)$$

O teor de umidade de equilíbrio (\bar{M}_e) é definido como o valor do teor de umidade

de um corpo que, exposto a certas condições experimentais por um longo período de tempo não sofra variações consideráveis em seu teor de umidade, ou seja, que nestas condições não há mais fluxo de massa considerável do corpo para o meio. Isto significa que o corpo e o ambiente estão nas mesmas condições (concentração de umidade, temperatura, etc.) (SILVA, 2007). A Figura 2.4 apresenta uma curva em que pode ser observado o teor de umidade de equilíbrio (\bar{M}_e) e teor de umidade inicial (\bar{M}_i).

Figura 2.4: Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio \bar{M}_e .



Fonte: (SILVA, 2007)

Os valores de \bar{M}_e e \bar{M}_{bs} só serão conhecidos após a secagem, pois é imprescindível conhecer a massa seca do objeto. Vale destacar que a massa seca não é o valor medido no final do processo de secagem; esta é massa de equilíbrio do objeto naquela situação de secagem, onde não há mais perda de umidade. Para determinar a massa seca é necessário que o produto seja colocado na estufa e submetido a uma temperatura de 105°C, para que sua umidade seja retirada por completo. A diferença entre a massa do objeto antes e após a secagem fornece a massa de água presente no corpo.

As razões de umidade e as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem podem ser obtidas a partir dos dados de perda de massa das amostras durante secagens sucessivas e dos teores de umidade determinados ao final de cada secagem. A expressão utilizada para o cálculo da razão de umidade média do produto, na sua forma adimensional, está expressa na Equação (2.3).

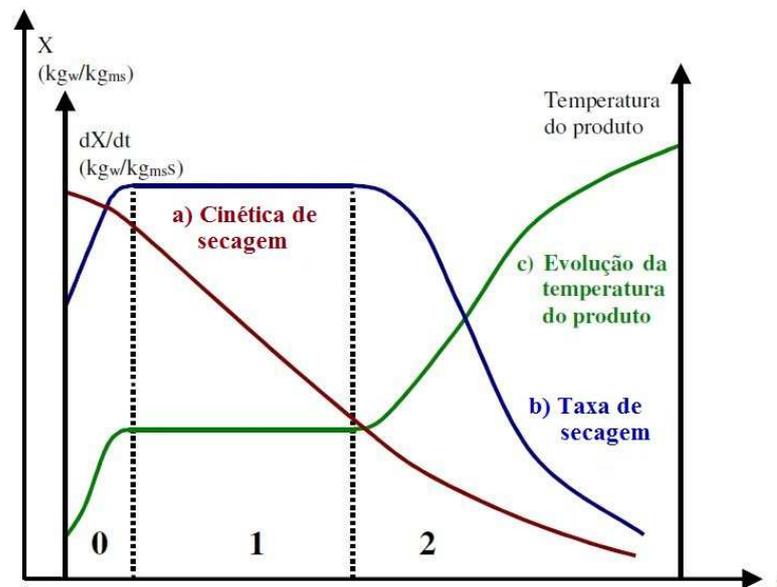
$$\bar{M}^* = \frac{\bar{M}_{bs} - \bar{M}_e}{\bar{M}_i - \bar{M}_e} \quad (2.3)$$

2.4 Cinética de secagem

A cinética de secagem é a relação entre o teor de umidade do material e o tempo. Ela é frequentemente utilizada para descrever os mecanismos macro e microscópicos de transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem (ROSA, 2010). A obtenção da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelagem matemática da operação e projeto de secadores (GOUVEIA et al., 2011). Possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes (FERREIRA, 2004).

A curva de cinética de secagem em geral pode ser dividida em três períodos distintos, sejam eles: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem à taxa constante; e período 2 ou de secagem à taxa decrescente (PARK; YADO; BROD, 2001a), como pode ser observado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Curvas de secagem.



Fonte: (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007)

O período 0 é conhecido como período de indução, em que o produto geralmente pode ser mais frio que o ar (FIOREZE, 2004; PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007). O calor que chega através do ar acarreta elevação da temperatura do produto e da velocidade

de secagem até que o produto e o ar de secagem estejam na mesma temperatura. A duração desse período é pequena em relação ao período total de secagem. O período 1 que pode ser verificado nos estudos sobre a velocidade de secagem é o período de taxa de secagem constante. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007). E por fim, o período 2, também conhecido como período de taxa de secagem decrescente, onde a água diminui drasticamente na superfície do produto, e por consequência disso a velocidade de secagem diminui.

Com relação às curvas, temos que: a curva (a) caracteriza a diminuição do teor de umidade do produto durante a secagem, ou seja, o teor de umidade do produto em relação à evolução do tempo de secagem (t). Logo, a curva é obtida através do peso do produto durante o procedimento da análise numa determinada condição do processo. A curva (b) caracteriza a taxa de secagem do produto, ou seja, a variação do teor de umidade do produto por tempo, $(d\bar{M}/dt)$ em relação à evolução do tempo (t), sendo que quanto maior o tempo do processo mais demorada é a perda de umidade do produto. Finalmente, a curva (c) demonstra as mudanças da temperatura do produto no decorrer da secagem (variação da temperatura do produto T em relação à evolução do tempo t), ou seja, representa a curva resultante da medição da temperatura do produto durante o processo.

Segundo Ferreira (1999), as curvas de secagem à taxa constante podem ser côncavas, convexas ou se aproximando de uma linha reta; podem apresentar um ponto de inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco.

De acordo com Cano-Chauca et al. (2004), as curvas de secagem permitem prever o momento do processo em que se atinge o teor de umidade desejado e, dessa forma, obtém-se um produto de boa qualidade.

No processo de secagem de cenoura, a difusão é geralmente aceita como o principal mecanismo de transporte de umidade para a superfície de evaporação (DOYMAZ, 2004; PRAKASH; JHA; DATTA, 2004). Alguns autores estudaram essa hipótese. Pinedo (2003) estudou a secagem de cenoura a vácuo e segundo ele a secagem da cenoura ocorre

principalmente no período de taxa decrescente.

2.5 Secagem de produtos agrícolas

Conforme explica Alves et al. (2010), embora exista uma grande oferta de produtos agrícolas no Brasil, os níveis de perda pós colheita é grande. Por isso, são necessário processos que possam oferecer meios para aumentar a conservação desses alimentos.

Entre os processos de conservação de alimentos, segundo FIOREZE (2004), a secagem é um dos métodos mais antigos que se tem conhecimento, usado na preservação e armazenamento de alimentos. Sua utilização, há séculos, ou mesmo milênios, ainda que de forma empírica, sem levar em consideração as diversas variáveis envolvidas no processo, tem permitido ao homem retardar a deterioração de produtos biológicos por períodos variáveis, após sua maturidade fisiológica.

Alguns alimentos como cereais já são colhidos consideravelmente secos. Por essa razão, os mesmos, sendo adequadamente armazenados, permanecem em condições de consumo por longos períodos de tempo. Mas existem muitos alimentos que são colhidos com alto teor de umidade, logo permitindo a ação de agentes microbiológicos que certamente comprometerão a vida útil e a qualidade do produto. Assim, faz-se necessário a remoção da maior quantidade possível de água.

A secagem se caracteriza pela evaporação da água do material biológico. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, formado a partir da superfície do material a ser seco (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, 2007).

Pensando no fator financeiro para a indústria de alimentos, a secagem é essencial, segundo Gurgel (2014), pois permite a redução de custos com a armazenagem, proporciona uma maior facilidade no transporte dos alimentos, bem como garante um maior valor agregado ao produto.

Existe na literatura uma grande quantidade de trabalhos sobre secagem de produtos alimentícios. Delmiro (2016) estudou e avaliou a secagem da cenoura pelo método foam-mat (camada de espuma), utilizando como agente emulsificante o Emustab. Lauriano, Giacomini e Silvério (2005) desenvolveram experimentos em camada delgada com o objetivo de realizar um estudo sobre cinética de secagem de frutos de aroeira-vermelha, considerando

a forma esférica para o produto. Araújo (2010) estudou o processo de secagem com pré-tratamento osmótico de cenouras em fatias com finalidade de obter um produto com elevado valor agregado e boas condições para conservação e armazenamento que possa vir a ser consumido seco e reidratado. SILVA (2012) realizou experimentos relativos à secagem de bananas inteiras e em pedaços, usando ar quente em várias temperaturas e comparou os resultados experimentais com aqueles obtidos através das simulações analíticas e numéricas, determinando os coeficientes de transferência de massa. Júnior e Corrêa (1999) realizaram a secagem de sementes de feijão, com o objetivo de determinar as curvas de secagem em camada fina, para quatro níveis de temperatura do ar de secagem (35, 40, 45 e 50 °C) e três níveis de teor de umidade inicial (0,206; 0,373 e 0,596 b.s.). Faria, Teixeira e Devilla (2012) buscaram avaliar a capacidade de ajuste de nove modelos matemáticos comumente utilizados para descrever o processo de secagem em sementes de crambe. E Silva Junior (2015) realizou experimentos visando à secagem convencional complementar dos pedaços de banana pré-tratados osmoticamente, usando ar quente nas temperaturas de 40 e 70°C.

2.6 Modelagem matemática de secagem

Os modelos matemáticos buscam estimar as transferências simultâneas de calor e massa envolvidas na cinética de secagem. Portanto, estes modelos são empregados para prever o comportamento das curvas de secagem do material.

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência de massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores, sendo de grande utilidade para o cálculo do desenvolvimento eficiente de cada análise, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final (DANTAS; MATA; DUARTE, 2011).

O método empírico é um método de abordagem com base em dados experimentais e na análise adimensional. Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor médio de umidade e o tempo de secagem (MARTINAZZO et al., 2007). Entre diversos modelos, os de Thompson, Foster et al. (1963) e Wang e Singh (1978) geralmente são usados para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Esses métodos possibilitam a simulação do processo de secagem sem que seja necessária a construção de protótipos de secadores, trazendo diversos benefícios, além

da redução no tempo necessário para o seu desenvolvimento. Os modelos de simulação permitem avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, no teor de água final do produto, na eficiência do processo em termos energéticos e na relação custo/benefício dos diversos métodos de secagem (BORGES, 2016).

A cinética de secagem é uma análise sobre o comportamento da transferência de massa entre o produto e o agente de secagem, e contribui com informações sobre o comportamento do mesmo durante o processo (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012).

As relações empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Bromatologia (LABROM), do Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), CAMPUS DE CUITÉ-PB.

3.1 Matéria-prima

Neste trabalho, foi utilizado como matéria-prima a cenoura (Figura 3.1), que foi adquirida na feira livre de Barra de Santa Rosa, Estado da Paraíba, Brasil.

Figura 3.1: Cenouras utilizadas neste experimento.



Fonte: Própria (2018)

3.2 Metodologia experimental

Antes de iniciar as secagens, as cenouras foram lavadas em água corrente, e logo em seguida descascadas e fatiadas em discos com 10 mm de espessura e 30 mm de diâmetro, em média. E em seguida, os discos foram colocados em dois cestos de alumínio identificados por um código, cada uma com aproximadamente 40g de cenoura, conforme mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Discos de cenoura nos cestos de alumínio.



Fonte: Própria (2018)

Antes de iniciar o experimento, os dois cestos utilizados nas secagens foram pesados, sendo descartado o peso do cesto para saber o peso inicial das amostras. As pesagens foram realizadas utilizando uma balança digital da marca BIOPRECISA modelo JH2102, com resolução de 0,01 g e capacidade máxima de 2100 g, conforme mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Balança digital utilizada nos experimentos.



Fonte: Própria (2018)

Após isso, os cestos foram colocados simultaneamente dentro da estufa de circulação e renovação de ar para iniciar o experimento. Nos intervalos de 2, 5, 10, 20, 30, 60 e 120 min, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas. Esse procedimento foi repetido até que o peso constante fosse alcançado. Finalmente, a temperatura da estufa foi ajustada para 105°C e as amostras foram deixadas por 24 h a fim de determinar a massa seca. Essa metodologia foi utilizada nos processos com as temperaturas de 40, 50 e 70°C.

3.3 Modelos empíricos para descrever a secagem

Um modelo empírico consiste numa correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo de secagem. Segundo Silva (2007), o modelo empírico geralmente descreve bem a cinética de secagem, mas não possibilita visualizar a distribuição de umidade no interior do produto, em um instante de tempo previamente especificado. Esses modelos negligenciam os fundamentos termodinâmicos dos processos de secagem, o que permite considerar o teor de água e a temperatura uniforme para toda a amostra. Procuram relacionar o teor de água e o tempo de secagem com dados obtidos experimentalmente (BORGES, 2016).

Várias pesquisas foram realizadas na literatura a fim de encontrar equações empíricas que satisfaçam os pressupostos estabelecidos (TURHAN; SAYAR; GUNASEKARAN, 2002; AKPINAR; BICER, 2005; KALETA; GÓRNICKI, 2010; MERCALI et al., 2010; DIAMANTE et al., 2010; SILVA et al., 2012; BORGES, 2016).

Alguns modelos empíricos e suas respectivas equações utilizados neste trabalho para descrever a cinética de secagem são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem.

Modelo	Nome	Equação Empírica	Referência
1	Page	$M^* = \exp(-at^b)$	(DIAMANTE et al., 2010)
2	Silva et alii	$M^* = \exp(-at - bt^{1/2})$	(SILVA et al., 2012)
3	Peleg	$M^* = 1 - t/(a + bt)$	(MERCALI et al., 2010)
4	Wang e Singh	$M^* = 1 + at + bt^2$	(KALETA; GÓRNICKI, 2010)
5	Lewis	$M^* = \exp(-at)$	(KALETA; GÓRNICKI, 2010)
6	Henderson e Pabis	$M^* = a \exp(-bt)$	(DIAMANTE et al., 2010)

em que:

a e b são parâmetros de ajuste;

t: tempo (em minutos);

\bar{M}^* : é a razão de umidade.

3.4 Software utilizado neste trabalho

Para a determinação dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos, foi utilizado o programa *LAB Fit Curve Fitting Software*, versão 7.2.49, desenvolvido por (SILVA; SILVA, 2011). O *software* apresenta interface simples, onde deve-se carregar o conjunto de pontos experimentais obtidos na secagem (teor de umidade, tempo) num arquivo de texto (txt).

Primeiramente, clica-se em “New” e colam-se os dados diretamente no *LAB Fit* usando o botão “Paste” na caixa de diálogo “Data: general information”. São duas colunas, a primeira referente à variável independente, ou seja, o tempo, e a segunda para a variável dependente, que é o teor de umidade. Em seguida, o usuário deve clicar no botão “User”, aparecerá uma caixa de diálogo onde o usuário ao escrever, usando o padrão *Fortran* para expressões matemáticas, a função de ajuste e o número de parâmetros da função. Quando “OK” é clicado, uma caixa de diálogo com os valores iniciais dos parâmetros a serem determinados, o número máximo de iterações e a tolerância aparecerão. Se o usuário faz uma ideia aproximada dos valores iniciais dos parâmetros, eles devem ser escritos. Caso contrário, após a inspeção, basta clicar em “OK”. Uma caixa de diálogo chamada “Power” aparecerá. Para os acessórios mais simples, o usuário deve clicar no botão “Fit”. A caixa de diálogo “Results” aparecerá com os resultados de montagem (valor médio e incerteza dos parâmetros). Os resultados completos (incluindo a matriz de covariância) estão disponíveis através do botão “Details”. A avaliação da função de ajuste para valores x é realizada clicando no botão “Evaluate” e a análise dos pontos experimentais está disponível através do botão “Rejection”.

Quando “OK” é clicado na caixa de diálogo “Results”, o gráfico da função será traçado.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Descrição da cinética de secagem utilizando modelos empíricos

Muitos trabalhos são encontrados na literatura com a finalidade de descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas utilizando modelos empíricos (SOUZA, 2002; ARAÚJO, 2010; ROSA, 2010; DIAMANTE et al., 2010; MERCALI et al., 2010; KALETA; GÓRNICKI, 2010; ANDREOLA, 2013; GURGEL, 2014; SILVA JUNIOR, 2015; SILVA, 2015; BORGES, 2016).

A utilização de modelos matemáticos nas simulações das operações de secagem tem auxiliado o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores (PALACIN et al., 2005).

Os procedimentos realizados neste trabalho analisaram os valores do teor de umidade em base seca, medido em cada instante de tempo. Após os experimentos, foram obtidos os valores do teor de umidade em base seca de acordo com a Equação (2.2). Os teores de umidade em base seca são apresentados nas Tabelas A.1 a A.3 do Apêndice A. Em seguida os conjuntos de dados foram analisados para cada modelo apresentado na Tabela 3.1. Neste trabalho, o teor de umidade de equilíbrio e o teor de umidade inicial foram determinados experimentalmente e podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Teor de umidade inicial e de equilíbrio para diferentes temperaturas.

T (°C)	M_i	M_e
40	7,3203	0,5283
50	9,3951	0,2731
70	10,1448	0,2047

4.2 Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas

O tratamento das equações empíricas apresentadas na Tabela 3.1, para a determinação dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos foi realizado utilizando o programa *LAB Fit Curve Fitting Software* (SILVA, 2011), como também os gráficos apresentados para cada um dos modelos que serão apresentados a seguir.

Os resultados obtidos para os parâmetros de ajuste e para os indicadores estatísticos, através da realização de regressões não-lineares para cada um dos modelos propostos na Tabela 3.1, são apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.7 para a razão de umidade utilizando os dados das Tabelas A.1 a A.3 do Apêndice A e as simulações das cinéticas de secagem nas Figuras 4.1 a 4.6. As análises destes dados estatísticos e a observação dos gráficos permitem a escolha do modelo empírico mais adequado para este trabalho.

Tabela 4.2: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 1 (Page).

T(°C)	a	b	R^2	χ^2
40	$1,7888 \times 10^{-3}$	1,0703	0,99979	$1,2342 \times 10^{-3}$
50	$1,6116 \times 10^{-3}$	1,1482	0,99964	$2,1814 \times 10^{-3}$
70	$2,1368 \times 10^{-3}$	1,2127	0,99932	$2,8577 \times 10^{-3}$

Tabela 4.3: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 2 (Silva et alii).

T(°C)	a	b	R^2	χ^2
40	$2,9379 \times 10^{-3}$	$-4,0722 \times 10^{-3}$	0,99957	$2,6498 \times 10^{-3}$
50	$4,3385 \times 10^{-3}$	$-9,9189 \times 10^{-3}$	0,99904	$6,3582 \times 10^{-3}$
70	$7,6772 \times 10^{-3}$	$-1,6868 \times 10^{-2}$	0,99772	$9,8788 \times 10^{-3}$

Tabela 4.4: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 3 (Peleg).

T(°C)	a	b	R^2	χ^2
40	$3,3629 \times 10^2$	$7,1341 \times 10^{-1}$	0,99772	$1,2764 \times 10^{-2}$
50	$2,5161 \times 10^2$	$7,1085 \times 10^{-1}$	0,99497	$3,0434 \times 10^{-2}$
70	$1,5379 \times 10^2$	$6,8424 \times 10^{-1}$	0,99050	$4,0206 \times 10^{-2}$

Tabela 4.5: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 4 (Wang e Singh).

T(°C)	a	b	R^2	χ^2
40	$-1,9080 \times 10^{-3}$	$8,9774 \times 10^{-7}$	0,99176	$5,3189 \times 10^{-2}$
50	$-2,4897 \times 10^{-3}$	$1,4809 \times 10^{-6}$	0,99023	$5,9333 \times 10^{-2}$
70	$-4,3204 \times 10^{-3}$	$4,3291 \times 10^{-6}$	0,99278	$2,8534 \times 10^{-2}$

Tabela 4.6: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 5 (Lewis).

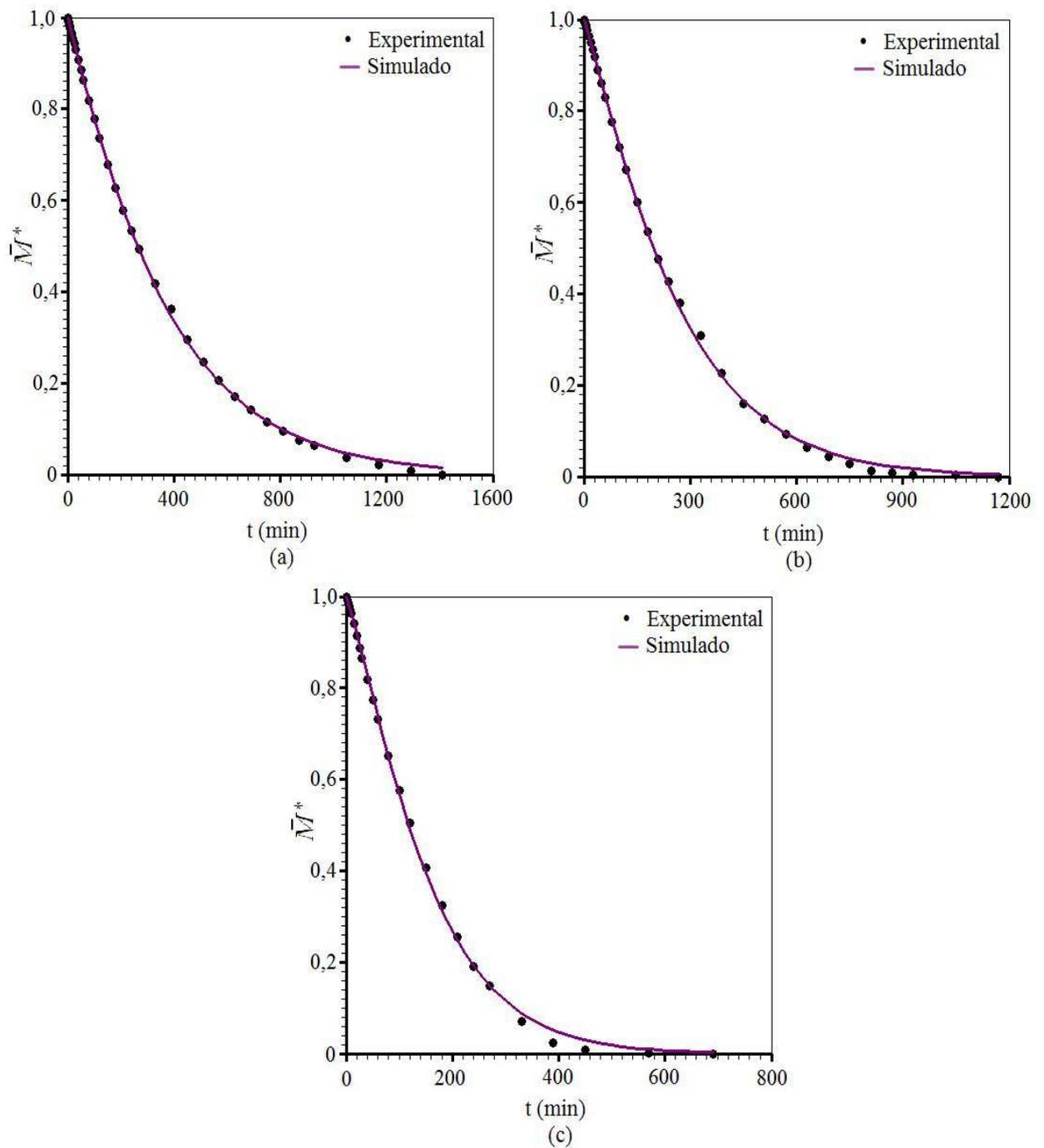
T(°C)	a	R^2	χ^2
40	$2,7032 \times 10^{-3}$	0,99948	$5,8036 \times 10^{-3}$
50	$3,6659 \times 10^{-3}$	0,99864	$1,9253 \times 10^{-2}$
70	$6,1507 \times 10^{-3}$	0,99662	$2,8728 \times 10^{-2}$

Tabela 4.7: Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos discos de cenoura descrito pelo modelo empírico 6 (Henderson e Pabis).

T(°C)	a	b	R^2	χ^2
40	1,0101	$2,7438 \times 10^{-3}$	0,99930	$4,6011 \times 10^{-3}$
50	1,0242	$3,7966 \times 10^{-3}$	0,99807	$1,3200 \times 10^{-2}$
70	1,0332	$6,4648 \times 10^{-3}$	0,99553	$1,9658 \times 10^{-2}$

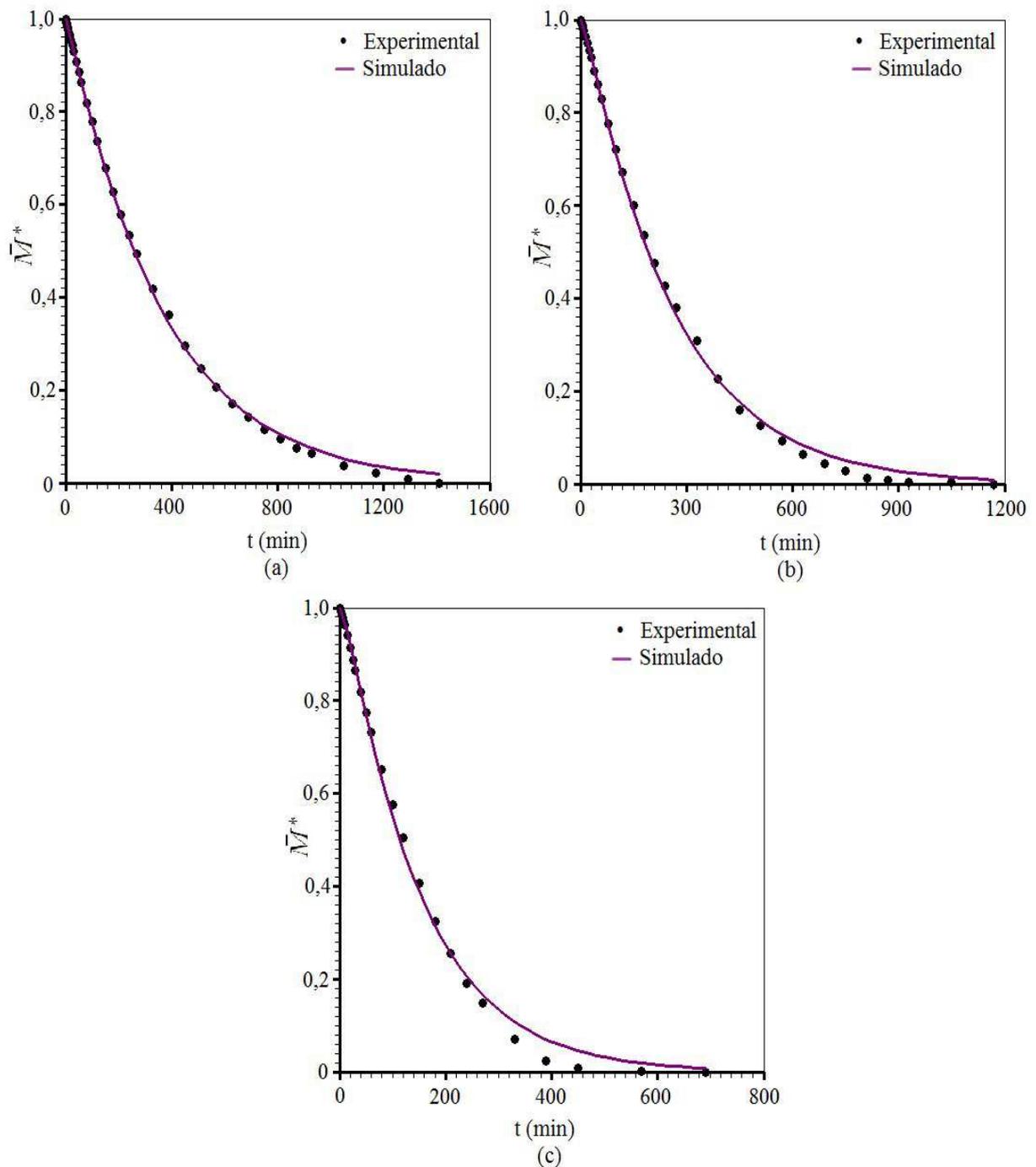
As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 1 (Page) ajustando os parâmetros da Tabela 4.1 podem ser observadas na Figura 4.1, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.1: Simulações de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



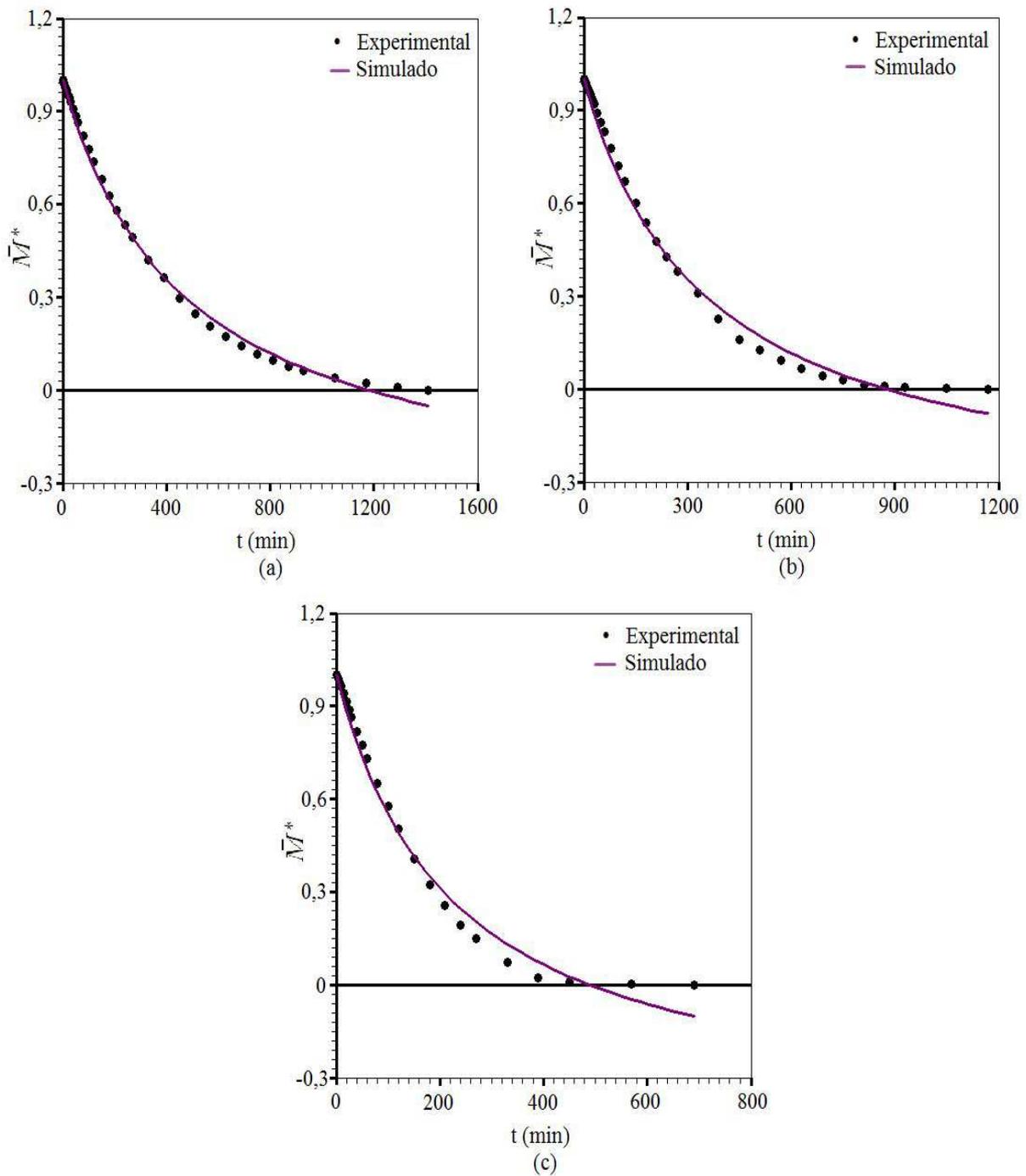
As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 2 (Silva et alii) usando os parâmetros da Tabela 4.2 podem ser observadas na Figura 4.2, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.2: Simulações de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



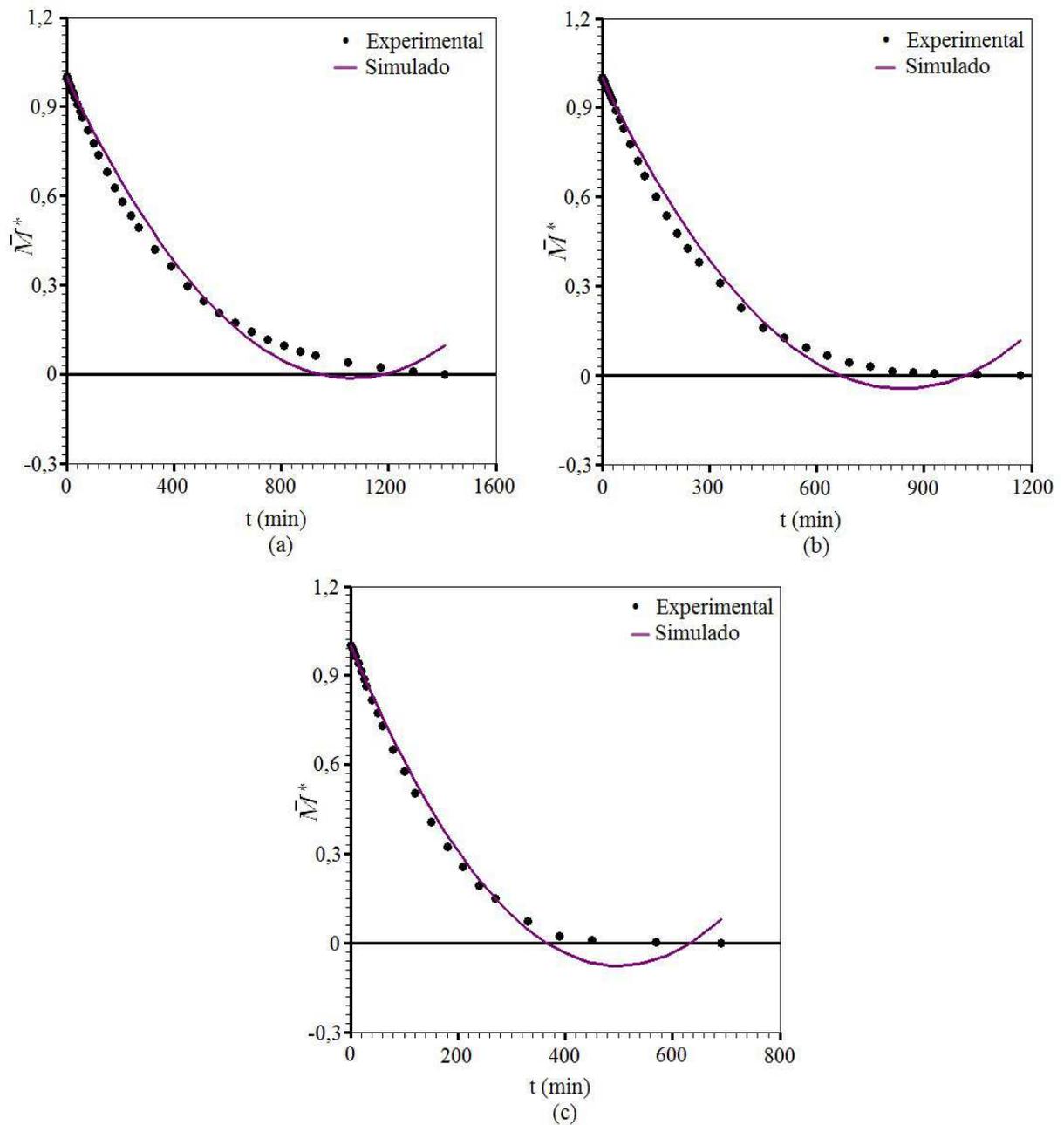
As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 3 (Peleg) ajustando os parâmetros da Tabela 4.3 podem ser observadas na Figura 4.3, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.3: Simulações de secagem usando o modelo 3 (Peleg) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



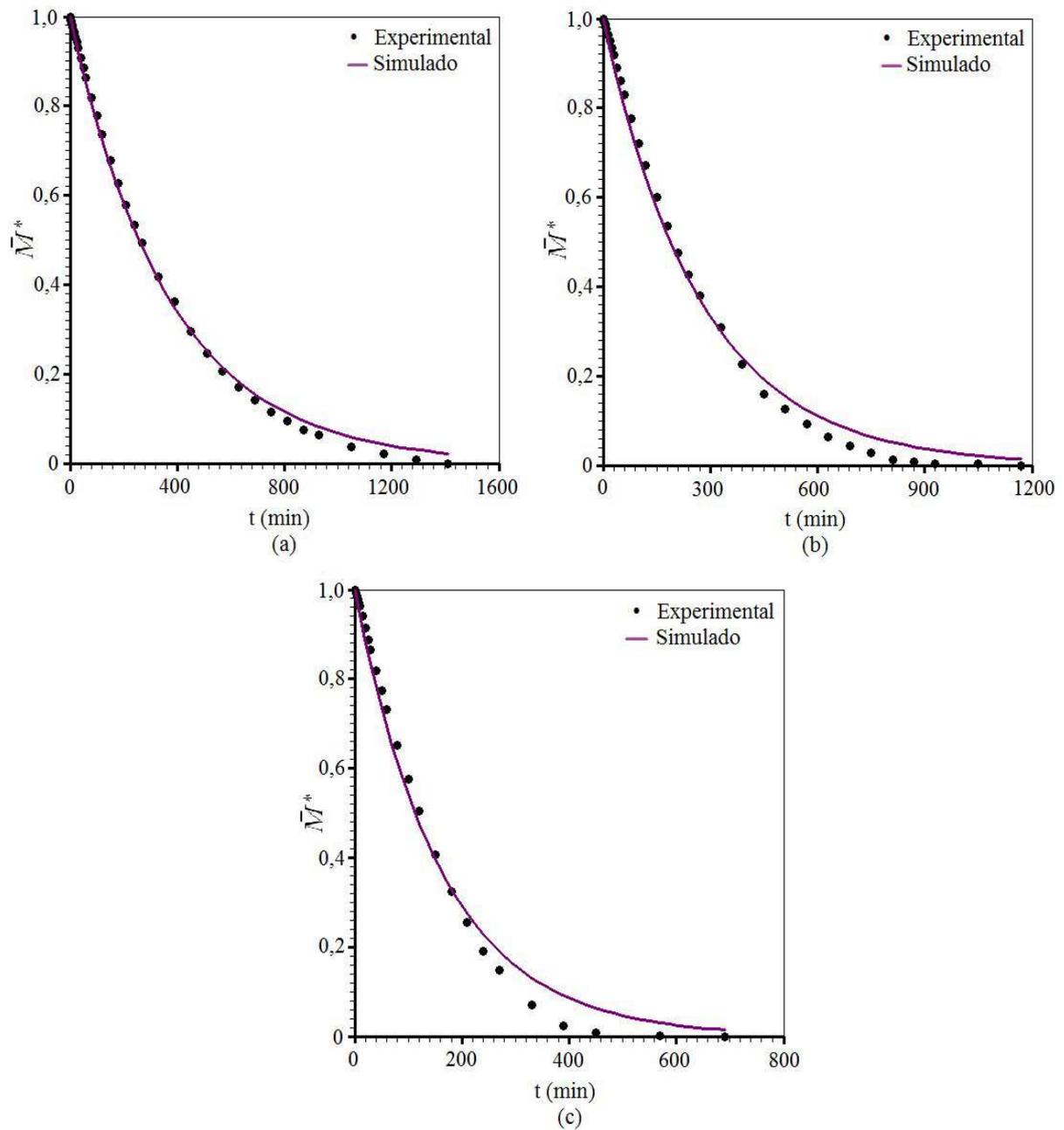
As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 4 (Wang e Singh) ajustando os parâmetros da Tabela 4.4 podem ser observadas na Figura 4.4, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.4: Simulações de secagem usando o modelo 4 (Wang e Singh) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



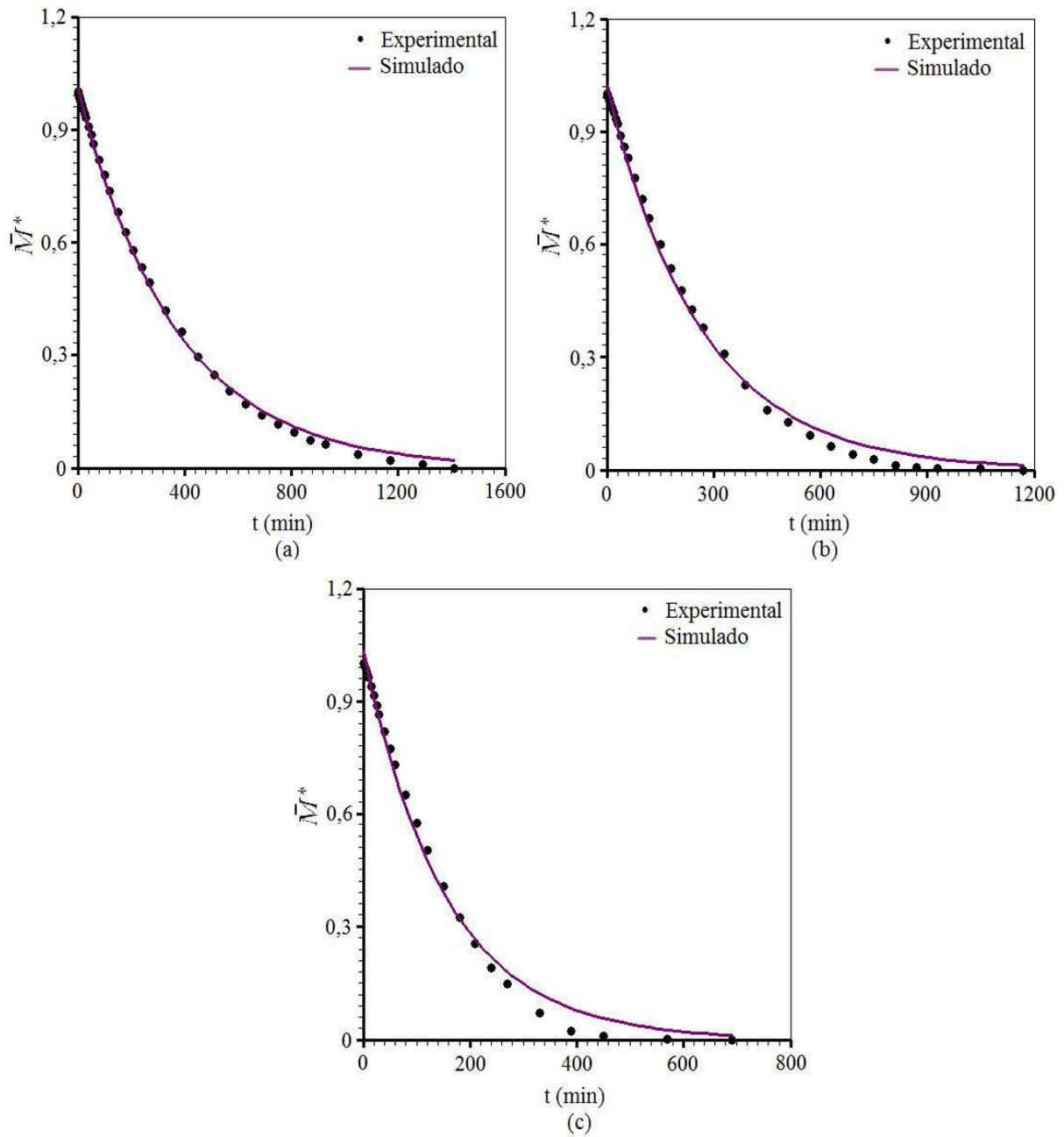
As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 5 (Lewis) ajustando os parâmetros da Tabela 4.5 podem ser observadas na Figura 4.5, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.5: Simulações de secagem usando o modelo 5 (Lewis) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



As simulações da cinética de secagem da cenoura usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) ajustando os parâmetros da Tabela 4.6 podem ser observadas na Figura 4.6, para as temperaturas estudadas.

Figura 4.6: Simulações de secagem usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) para as temperaturas: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



4.3 Análise dos resultados dos modelos empíricos

Analisando os indicadores estatísticos das Tabelas 4.1 a 4.6, verifica-se que para a temperatura de 40°C, o modelo de Wang e Singhe e o modelo de Peleg apresentaram os piores resultados dentre os seis modelos estudados. O modelo de Henderson e Pabis apresentou resultados satisfatórios, enquanto o modelo de Lewis apresentou resultados melhores que estes. No entanto, os melhores resultados foram obtidos através do modelo 1, Page (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99979 e $1,2342 \times 10^{-3}$, respectivamente) e o modelo 2, Silva et alii (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99957 e $2,6498 \times 10^{-3}$, respectivamente).

Examinando a temperatura de 50°C, observa-se que o modelo de Peleg e o modelo de Wang e Singh apresentaram resultados não aceitáveis e devem ser descartados. Os modelos de Henderson e Pabis e Lewis apresentaram resultados razoáveis. Para esta temperatura, os melhores resultados foram obtidos através dos modelos de Page (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99964 e $2,1814 \times 10^{-3}$, respectivamente) e Siva et alii (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99904 e $6,3582 \times 10^{-3}$, respectivamente).

E por fim, para a temperatura de 70°C, o modelo 4, Wang e Singh e o modelo 3, Peleg apresentaram resultados inadmissíveis. Os modelos de Henderson e Pabis e Lewis apresentaram resultados convincentes. Entretanto, o modelo de Page (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99932 e $2,8577 \times 10^{-3}$, respectivamente) e o modelo de Silva et alii (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99772 e $9,8788 \times 10^{-3}$, respectivamente) mostraram os melhores resultados.

Os melhores resultados obtidos fora para a temperatura de 40°C, enquanto os resultados mais desfavoráveis foram os da temperatura de 70°C. Os resultados da cinética de secagem para todos os modelos estudados podem ser visualizados através das Figuras 4.1 a 4.6. Como já foi mencionado, o modelo de Page apresenta-se como o que melhor descreve a cinética de secagem dos discos de cenoura.

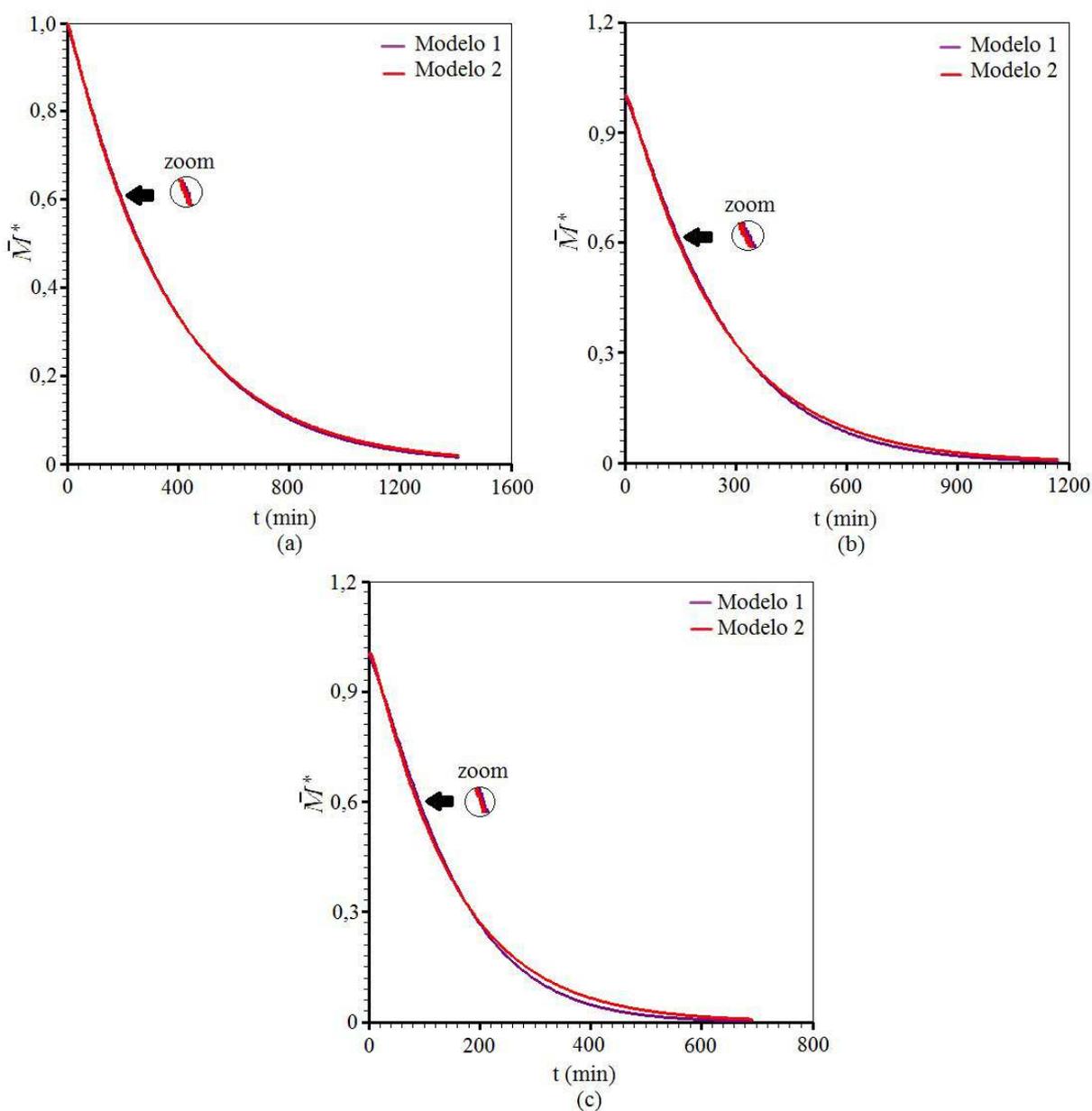
Com a finalidade de se fazer uma comparação mais direta entre os modelos que apresentaram os melhores resultados, a Figura 4.7 apresenta simulações da cinética de secagem, utilizando os modelos empíricos 1, (Page) e 2, (Silva et alii), num mesmo gráfico, para cada uma das temperaturas estudadas e, a partir destes gráficos, é possível observar que as curvas se ajustam perfeitamente para as temperaturas de 40 e 50°C, havendo uma

pequena diferença na temperatura de 70°C.

Pode-se observar que os coeficientes de correlação obtidos para os dois modelos que apresentaram os melhores resultados, Page e Silva et alii, para as três temperaturas estudadas, foram maiores do que $R = 0,997$.

As simulações da cinética de secagem da cenoura usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) podem ser observados na Figura 4.7, num mesmo gráfico, para cada uma das temperaturas estudadas.

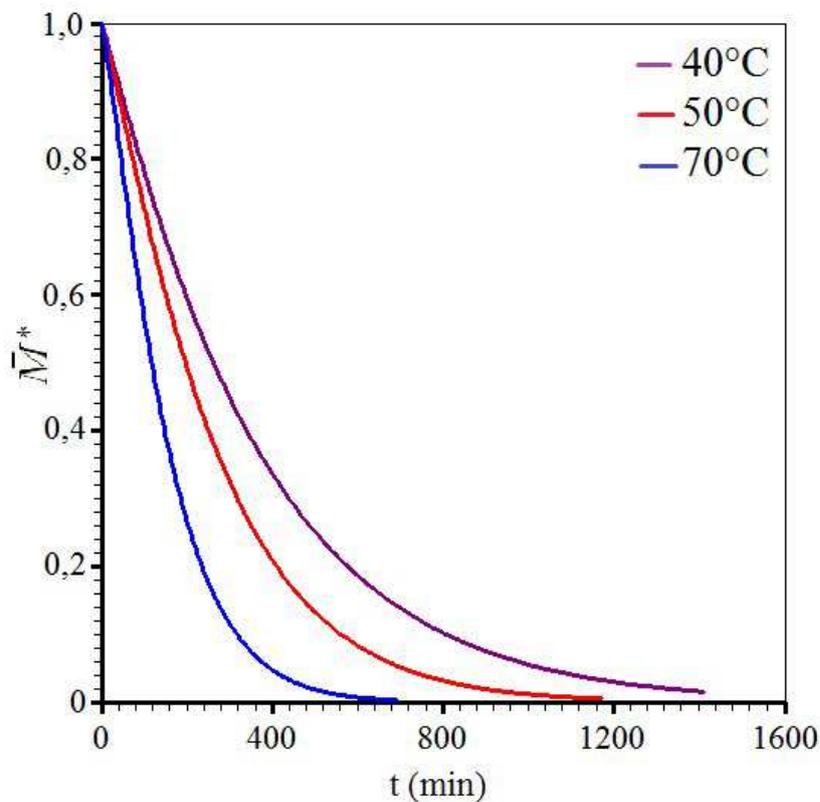
Figura 4.7: Simulações de secagem usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T=40^{\circ}\text{C}$; (b) $T=50^{\circ}\text{C}$ e (c) $T=70^{\circ}\text{C}$.



Na análise dos resultados, para os dois modelos comparados (Figura 4.7), foram utilizados como indicadores estatísticos o coeficiente (R^2) e o qui-quadrado (χ^2). Os parâmetros desses modelos, podem ser observados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Sabe-se que, quanto menor for (χ^2) e mais próximo de 1 for (R^2), melhor será o ajuste das equações propostas pelos modelos empíricos analisados.

Na Figura 4.8 observam-se num mesmo gráfico, para todas as temperaturas estudadas, as curvas de secagem dos discos de cenoura estimadas pelo Modelo 1 (Page). A simulação da cinética de secagem da cenoura usando este modelo apresentou os melhores indicadores estatísticos. Verificou-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando o aumento da taxa de secagem.

Figura 4.8: Simulação da cinética de secagem usando o modelo 1 (Page) para todas as temperaturas estudadas.



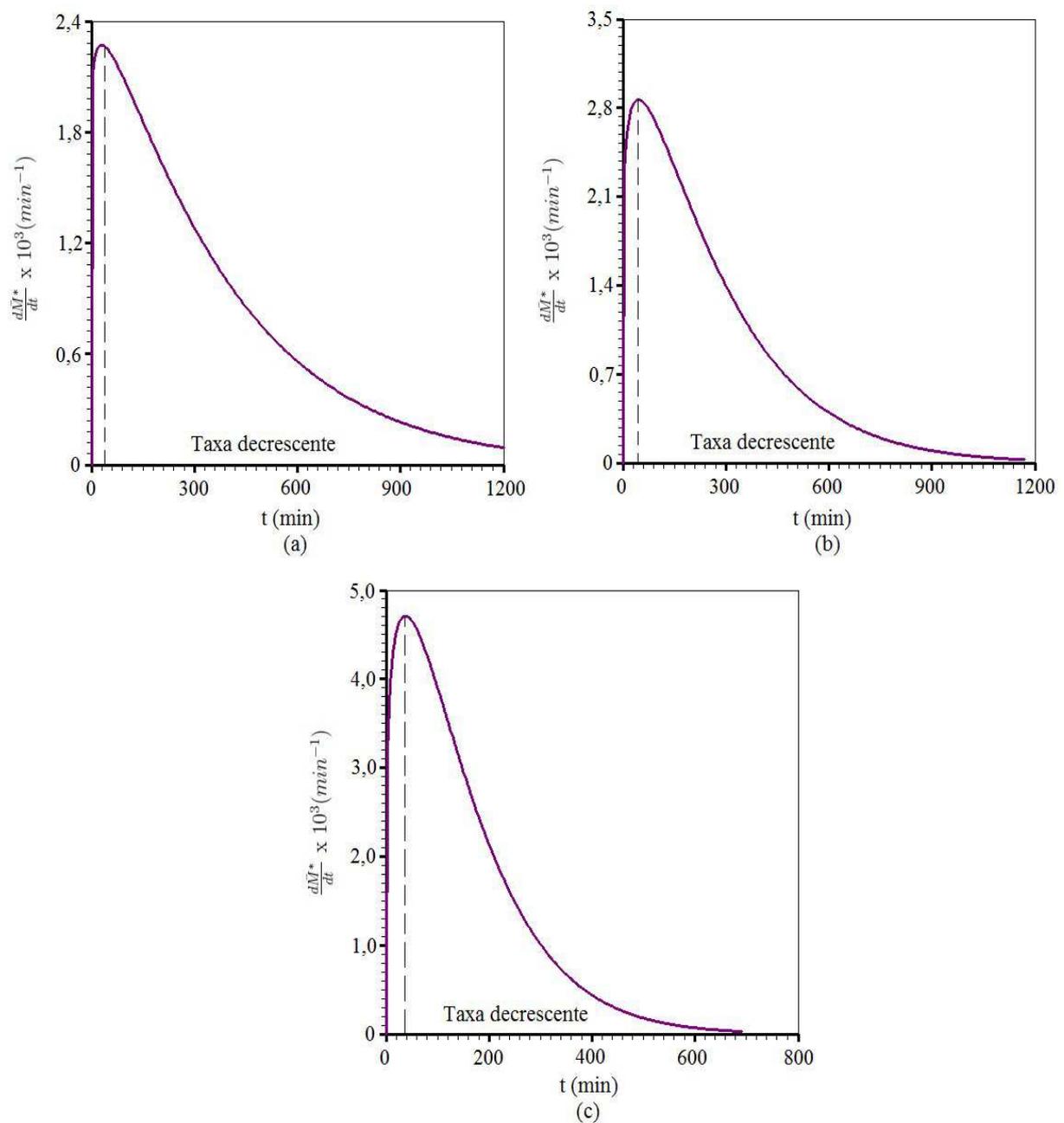
Para obter a taxa de secagem para todas as temperaturas estudadas, as equações dos melhores modelos que descreveram a cinética de secagem (modelos 1 e 2) foram derivadas

em função do tempo. Para o modelo de Page, a seguinte expressão foi obtida.

$$\frac{d\bar{M}^*}{dt} = -abt^{b-1}e^{-at^b} \quad (4.1)$$

A partir da Eq. (4.1), foram obtidas as taxas de secagem para as temperaturas de 40, 50 e 70°C. Os gráficos dessas taxas podem ser observados na Figura 4.9.

Figura 4.9: Simulações da taxa de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a) T = 40°C; (b) T = 50°C e (c) T = 70°C.

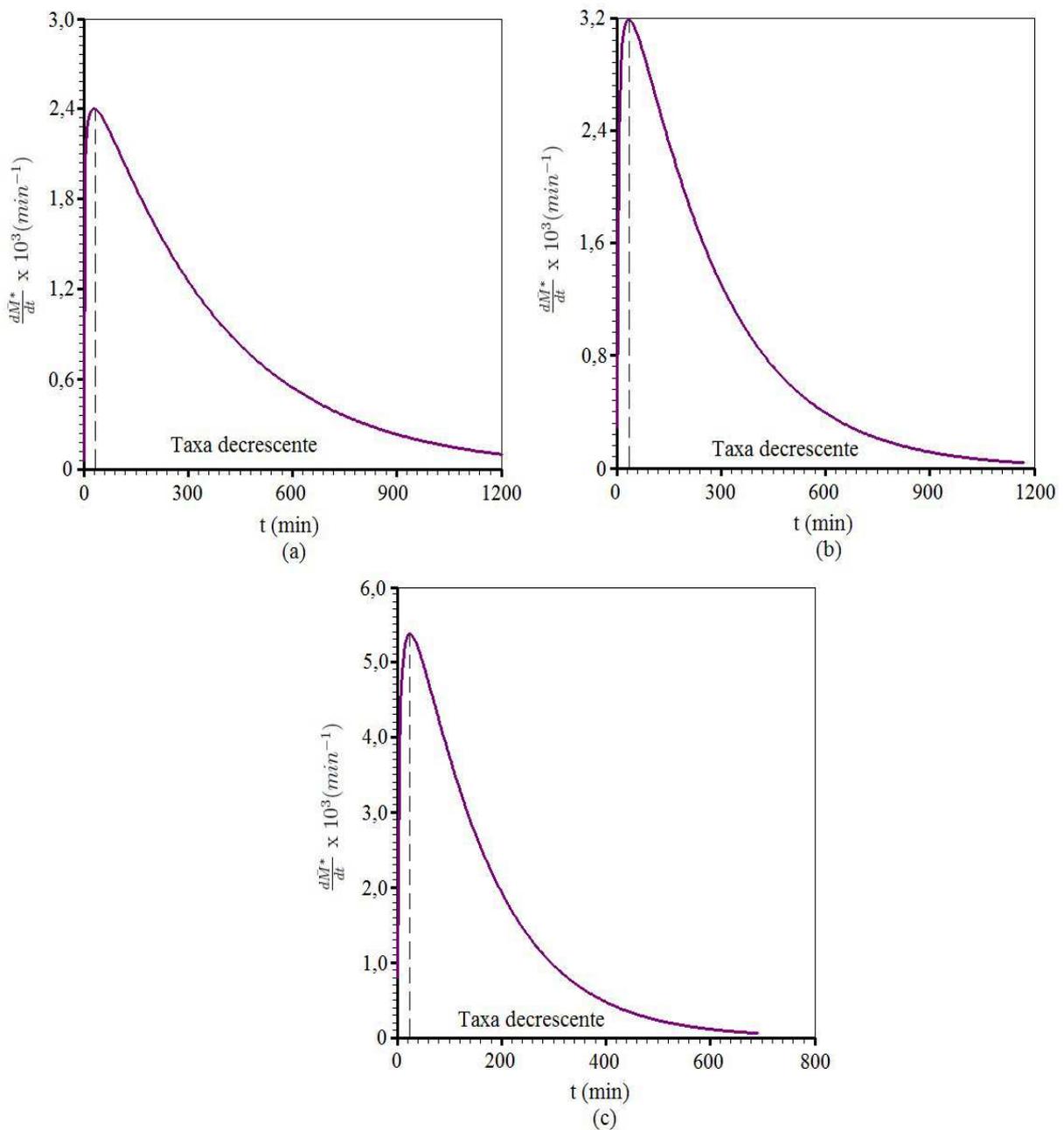


Para o modelo de Siva et alii, a seguinte expressão foi obtida.

$$\frac{d\bar{M}^*}{dt} = -(a + bt^{-1/2}/2)e^{-at-b\sqrt{t}} \quad (4.2)$$

A partir da Eq. (4.2), foram obtidas as taxas de secagem para as temperaturas de 40, 50 e 70°C. Os gráficos dessas taxas podem ser observados na Figura 4.10.

Figura 4.10: Simulações da taxa de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) T = 40°C; (b) T = 50°C e (c) T = 70°C.



Com auxílio do *software xyExtract* (SILVA, 2011) foi determinado o tempo exato do início do período de taxa decrescente. Para a Eq. (4.1) os resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Resultados para a taxa de secagem descrito pela Eq. (4.1).

T(°C)	Período de indução (min)	Taxa de secagem (min^{-1})
40	42	$2,26 \times 10^{-3}$
50	38	$2,87 \times 10^{-3}$
70	35	$4,72 \times 10^{-3}$

Para a Eq. (4.2) os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resultados para a taxa de secagem descrito pela Eq. (4.2).

T(°C)	Período de indução (min)	Taxa de secagem (min^{-1})
40	39	$2,40 \times 10^{-3}$
50	35	$3,20 \times 10^{-3}$
70	24	$5,37 \times 10^{-3}$

Em determinadas situações, os modelos difusivos não conseguem prever o comportamento da taxa de secagem. Contudo, neste trabalho para ambos os modelos, é possível notar a influência da temperatura sobre a taxa de secagem e sobre o período de indução. Com o aumento da temperatura, o período de indução diminui e a taxa aumenta.

Capítulo 5

Conclusões

Entre todos os modelos usados para descrever as cinéticas de secagem da cenoura, os que apresentaram os melhores indicadores estatísticos foram os modelos 1 e 2 (Page e Silva et alii). Comparando ambos os modelos, nota-se que existe uma diferença entre as curvas de secagem com o aumento da temperatura. Para 40 e 50°C, as curvas de cinética de secagem dos melhores modelos praticamente se sobrepõem uma à outra, havendo uma pequena diferença. Para a temperatura de 70°C, nota-se com mais clareza a diferença entre as curvas dos modelos.

Os mesmos modelos foram usados para obter a taxa de secagem. O estudo da taxa de secagem demonstrou a existência de um período de indução. Logo, podemos concluir que todo o processo dentro do intervalo de tempo estudado foi não isotérmico. Logo após o período de indução, o restante do processo se dá através de uma taxa decrescente.

Os períodos de taxa decrescente para as temperaturas de 40 e 50°C indicados pelos modelos estudados iniciaram em torno dos 40 e 36 min, respectivamente. Para 70°C houve uma pequena diferença entre as taxas analisadas, mas para essa temperatura o período de taxa decrescente iniciou em aproximadamente 30 min.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar os procedimentos descritos neste trabalho em outros produtos alimentícios, mantendo a geometria utilizada.
- Descrever o aquecimento de produtos alimentícios na forma geométrica de cilindros e cubos durante o processo de secagem.

Referências Bibliográficas

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. **International journal of food science & technology**, Wiley Online Library, v. 40, n. 3, p. 273–281, 2005.

ALVES, J. A. et al. Qualidade de produto minimamente processado à base de abóbora, cenoura, chuchu e mandioquinha-salsa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, SciELO Brasil, v. 30, n. 3, p. 625–634, 2010.

ANDREOLA, K. **Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) assistida por microondas**. 205 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas – SP, 2013.

ARAÚJO, P. M. d. **Estudo da desidratação osmótica da cenoura (*Daucus carota*) em fatias**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

BALBACH, A.; BOARIM, D. S. F. As hortaliças na medicina natural. **Edições vida plena**, 1993.

BORGES, F. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande–PB, 2016.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1992.

CANO-CHAUCA, M. et al. Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, n. 1, 2004.

DANTAS, L. A.; MATA, M.; DUARTE, M. E. M. Programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes de milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindust**, v. 13, n. 3, p. 309–318, 2011.

DELMIRO, T. M. **Secagem da cenoura (*Daucus carota* L.) pelo método foam-mat**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

DIAMANTE, L. M. et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International journal of food science & technology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 9, p. 1956–1962, 2010.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of food engineering**, Elsevier, v. 61, n. 3, p. 359–364, 2004.

EMBRAPA. Cenouras: resumos informativos. EMBRAPA - DDT, 1984.

_____. **Tabela de Composição Nutricional das Hortaliças**. 2011. Acessado em 29/12/2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/1355126/9124396/Tabela\%2BNutricional\%2Bde\%2BHortali\%25C3\%25A7as/d4ae0965-9e94-4f19-a20e-b7721bdc1266l>>.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de Alimentos**. [S.l.]: Livraria Atheneu Editora, 1992.

FARIA, R. Q. de; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 573–584, 2012.

FARIAS, V. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 265 f. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2011.

FERREIRA, M. M. P. **Estudo o desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas: análise da influência das variáveis operacionais**. 75 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande–PB, 1999.

FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. 235 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos. São Carlos–SP, 2004.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2008.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004.

GOUVEIA, D. S. et al. Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja. **HOLOS**, v. 1, p. 38–48, 2011.

GURGEL, C. E. M. R. **Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma-desempenho do processo e características do produto**. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2014.

HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. **Principles of process engineering**. [S.l.]: Kenya Agricultural Research Institute (KARI), 1997.

HORTALIÇAS, A. B. D. **Para não ficar ralado**. 2017. Acessado em 28/12/2017. Disponível em: <<http://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-hortalicas2-2017/files/assets/basic-html/page43.html>>.

HORTICULTURA, P. B. p. a. M. d. **Normas de Classificação - Cenoura**. 2015. Disponível em: <<http://www.editoragazeta.com.br/wp-content/uploads/2016/11/Hortali\%C3\%A7as-2016.pdf>>.

IBGE, P. **Anuário Brasileiro de Hortaliças, Tabela de Composição Nutricional das Hortaliças**. 2014. 44–50 p. Acessado em 08/01/2018. Disponível em: <<http://www.editoragazeta.com.br/wp-content/uploads/2016/11/Hortali\%C3\%A7as-2016.pdf>>.

- JÚNIOR, P. A.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349–353, 1999.
- KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. mcintosh) dried in a convective dryer. **International journal of food science & technology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 5, p. 891–898, 2010.
- LAURIANO, A. C.; GIACOMIN, R. P.; SILVÉRIO, J. Estudo da cinética de secagem de frutos de aroeira em camada delgada. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 6, p. 1–6.
- MARTINAZZO, A. P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 11, n. 3, p. 301–306, 2007.
- MATA, M.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, v. 1, n. 1, p. 33–50, 1999.
- MERCALI, G. D. et al. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (musa sapientum, shum.). **International journal of food science & technology**, Wiley Online Library, v. 45, n. 11, p. 2281–2289, 2010.
- PALACIN, J. J. F. et al. Determinações das curvas de secagem de milho nas espigas (zea mays l.). **Engenharia na Agricultura, Viçosa**, v. 13, n. 4, p. 300–313, 2005.
- PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. d. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. **Campinas: Unicamp**, 2007.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pera bartlett (pyrus sp.) em fatias. v. 1, n. 1, p. 288–292, 2001a.
- PINEDO, A. A. **Secagem a vácuo de cenoura (Daucus carota) e abóbora (Cucúrbita máxima): Estudo das características do processo**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas. Campinas–SP, 2003.
- PRAKASH, S.; JHA, S.; DATTA, N. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. **Journal of Food Engineering**, Elsevier, v. 62, n. 3, p. 305–313, 2004.
- RESENDE, J. M. et al. Modificações sensoriais em cenoura minimamente processada e armazenada sob refrigeração. **Horticultura Brasileira**, SciELO Brasil, 2004.
- ROSA, J. G. Secagem de cenoura (daucus carota l.) em microondas. Universidade Federal de São Carlos, 2010.
- SILVA, C. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsóides**. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2012.

SILVA, J. d. S.; AFONSO, A.; FILHO, A. d. L. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. **Viçosa: Aprenda Fácil**, 2000.

SILVA JUNIOR, A. F. **Desenvolvimento de ferramentas numérica e computacionais para a descrição de transferência de massa em corpos cilíndricos: Aplicação em desidratação osmótica e secagem complementar de banana**. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2015.

SILVA, M. G. d. Cinética de secagem de hortaliças: Estudo preliminar. 2015.

SILVA, W. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande–PB, 2007.

SILVA, W. P. **xyExtract**. 2011. Disponível em: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/index_xyExtract.htm>.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LAB Fit Curve Fitting Software**. 2011. Disponível em: <<http://www.labfit.net>>.

SILVA, W. P. D. et al. Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions. **Agricultural Sciences**, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 04, p. 545, 2012.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of jatropha seeds. **Revista Ceres**, SciELO Brasil, v. 59, n. 2, p. 171–177, 2012.

SOUZA, J. S. d. **Estudo da desidratação de tomates (*Lycopersicon esculentum*) em pedaços com pré-tratamento osmótico**. 105 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2002.

THOMPSON, R. A.; FOSTER, G. H. et al. Stress cracks and breakage in artificially dried corn. US Dept. of Agriculture, Agricultural Marketing Service, Transportation and Facilities Research Division, 1963.

TURHAN, M.; SAYAR, S.; GUNASEKARAN, S. Application of peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. **journal of food engineering**, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 153–159, 2002.

VILELA, N. **Retrospectiva e situação atual da cenoura no Brasil**. [S.l.]: Embrapa Hortaliças, 2008.

WANG, C.; SINGH, R. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v. 11, n. 6, p. 668–672, 1978.

Apêndice A

Resultados dos Dados Experimentais

Neste apêndice são apresentados, sob a forma de tabelas, os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Bromatologia (LABROM), do Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande, nos meses de Novembro e Dezembro de 2017. Também são apresentados nestas tabelas resultados calculados através dos dados experimentais para obter valores característicos do produto em estudo, utilizando os estudos teóricos, para viabilizar a obtenção dos resultados desejados.

A.1 Dados Experimentais da cinética de secagem da cenoura

As Tabelas de A.1 a A.3 apresentam os dados experimentais da cinética de secagem em função do tempo de secagem da cenoura com condições do ar de secagem.

Tabela A.1: Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 40°C

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M_{bs}	M^*
0	39.605	34.845	4.760	7.323	1.0000
2	39.385	34.625	4.760	7.277	0.9931
4	39.265	34.505	4.760	7.251	0.9894
6	39.140	34.380	4.760	7.225	0.9856
8	39.015	34.255	4.760	7.199	0.9817
10	38.880	34.120	4.760	7.171	0.9775
15	38.505	33.790	4.760	7.092	0.9659
20	38.130	33.370	4.760	7.013	0.9543
25	37.745	32.985	4.760	6.932	0.9424
30	37.365	32.605	4.760	6.852	0.9307
40	36.620	31.860	4.760	6.696	0.9076
50	35.880	31.120	4.760	6.540	0.8847
60	35.165	30.405	4.760	6.390	0.8626
80	33.760	29.000	4.760	6.095	0.8192
100	32.430	27.670	4.760	5.815	0.7780
120	31.105	26.345	4.760	5.536	0.7370
150	29.225	24.465	4.760	5.141	0.6789
180	27.530	22.770	4.760	4.784	0.6265
210	25.970	21.210	4.760	4.456	0.5782
240	24.525	19.765	4.760	4.152	0.5335
270	23.220	18.460	4.760	3.878	0.4931
330	20.790	16.030	4.760	3.367	0.4180
390	18.970	14.210	4.760	2.984	0.3617
450	16.825	12.065	4.760	2.534	0.2953
510	15.245	10.485	4.760	2.201	0.2465
570	13.920	8.485	4.760	1.923	0.2055
630	12.795	8.035	4.760	1.686	0.1707
690	11.815	7.055	4.760	1.480	0.1404
750	11.000	6.240	4.760	1.309	0.1152
810	10.335	5.575	4.760	1.169	0.0946
870	9.655	4.895	4.760	1.027	0.0736
930	9.310	4.550	4.760	0.954	0.0629
1050	8.475	3.715	4.760	0.779	0.0371
1170	7.965	3.205	4.760	0.672	0.0213
1290	7.560	2.800	4.760	0.587	0,0088
1410	7.275	2.515	4.760	0.527	0,0000

Tabela A.2: Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 50°C

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M_{bs}	M^*
0	40.905	36.970	3.935	9.395	1.0000
2	40.725	36.790	3.935	9.349	0.9949
4	40.605	36.670	3.935	9.318	0.9916
6	40.455	36.520	3.935	9.280	0.9874
8	40.255	36.320	3.935	9.229	0.9818
10	40.100	36.165	3.935	9.190	0.9775
15	39.600	35.665	3.935	9.063	0.9636
20	39.115	35.180	3.935	8.940	0.9501
25	38.565	34.630	3.935	8.800	0.9348
30	38.015	34.080	3.935	8.660	0.9194
40	36.935	33.000	3.935	8.386	0.8893
50	35.885	31.950	3.935	8.119	0.8601
60	34.810	30.875	3.935	7.846	0.8301
80	32.840	28.905	3.935	7.345	0.7753
100	30.910	26.975	3.935	6.855	0.7215
120	29.090	25.155	3.935	6.392	0.6708
150	26.540	22.605	3.935	5.744	0.5998
180	24.220	20.285	3.935	5.155	0.5351
210	22.100	18.165	3.935	4.616	0.4761
240	20.290	16.355	3.935	4.156	0.4256
270	18.605	14.670	3.935	3.728	0.3787
330	16.105	12.170	3.935	3.092	0.3090
390	13.130	9.195	3.935	2.336	0.2262
450	10.695	6.760	3.935	1.717	0.1583
510	9.535	5.600	3.935	1.423	0.1260
570	8.325	4.390	3.935	1.115	0.0923
630	7.300	3.365	3.935	0.855	0.0637
690	6.540	2.605	3.935	0.662	0.0426
750	6.035	2.100	3.935	0.533	0.0285
810	5.140	1.205	3.935	0.306	0.0114
870	5.420	1.485	3.935	0.377	0.0068
930	5.255	1.320	3.935	0.335	0.0036
1050	5.110	1.175	3.935	0.298	0.0027
1170	5.010	1.075	3.935	0.273	0.0000

Tabela A.3: Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 70°C

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	\bar{M}_{bs}	\bar{M}^*
0	40.010	36.420	3.590	10.144	1.0000
2	39.750	36.160	3.590	10.072	0.9927
4	39.520	35.930	3.590	10.008	0.9862
6	39.235	35.645	3.590	9.928	0.9782
8	38.960	35.370	3.590	9.852	0.9705
10	38.665	35.075	3.590	9.770	0.9623
15	37.885	34.295	3.590	9.552	0.9404
20	36.965	33.375	3.590	9.296	0.9146
25	36.035	32.445	3.590	9.037	0.8886
30	35.170	31.580	3.590	8.796	0.8643
40	33.525	29.935	3.590	8.338	0.8182
50	31.915	28.325	3.590	7.889	0.7731
60	30.425	26.835	3.590	7.474	0.7313
80	27.570	23.980	3.590	6.679	0.6513
100	24.865	21.275	3.590	5.926	0.5755
120	22.315	18.725	3.590	5.215	0.5041
150	18.845	15.255	3.590	4.249	0.4068
180	15.870	12.280	3.590	3.420	0.3235
210	13.415	9.825	3.590	2.736	0.2547
240	11.135	7.545	3.590	2.101	0.1908
270	9.640	6.050	3.590	1.685	0.1489
330	6.855	3.265	3.590	0.909	0.0708
390	5.140	1.550	3.590	0.431	0.0228
450	4.635	1.045	3.590	0.291	0.0086
570	4.325	0.735	3.590	0.213	0.0008
690	4.325	0.735	3.590	0.204	0.0000