



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

GEOVANE TAVARES NOGUEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DESCREVER A SECAGEM DE DISCOS DE  
CENOURA (*Daucus carota L.*)**

CUITÉ - PB  
2019

GEOVANE TAVARES NOGUEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DESCREVER A SECAGEM DE DISCOS DE  
CENOURA(*Daucus carota L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Matemática da Unidade Acadêmica de Física e Matemática do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do grau de licenciado em Matemática.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Titular Dr<sup>a</sup>. Vera Solange de Oliveira Farias

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

N778m	<p data-bbox="544 1218 863 1240">Nogueira, Geovane Tavares.</p> <p data-bbox="544 1272 1198 1352">Modelagem matemática para descrever a secagem de discos de cenoura (<i>Daucus carota L.</i>). / Geovane Tavares Nogueira – Cuité: CES, 2019.</p> <p data-bbox="603 1384 655 1406">81 fl.</p> <p data-bbox="544 1438 1216 1496">Monografia (Curso de Licenciatura em Matemática) – Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2019.</p> <p data-bbox="603 1527 1145 1585">Orientadora: Dr<sup>a</sup> Vera Solange de Oliveira Farias. Coorientador: Dr. Aluizio Freire da Silva Junior.</p> <p data-bbox="544 1617 1216 1697">1. Análises físico-químicas. 2. Processo de alimentos. 3. Qualidade do produto final. 4. Modelos empíricos. 5. Modelos difusivos. I. Título.</p>
Biblioteca do CES – UFCG	CDU 51

GEOVANE TAVARES NOGUEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DESCREVER A SECAGEM DE DISCOS DE  
CENOURA (*Daucus carota L.*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Matemática da Unidade Acadêmica de Física e Matemática do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do grau de licenciado em Matemática.

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em 03 de dezembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Titular Dr<sup>a</sup>. Vera Solange de Oliveira  
Farias  
UFCG -CES  
Orientadora

---

Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Júnior  
UFCG-CES  
Coorientador

---

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde  
UFCG-CES  
Examinador

Ao meu Senhor e meu Deus.  
Aos meus pais José Geraldo e Maria Arlete.  
Aos meus irmãos Aridomar e Leonardo.  
As minhas tias Albanete e Madalena.  
Ao meu tio Joacil e sua esposa Francisca.  
A minha namorada Jucimeri Ismael.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço e sou grato primeiramente ao Senhor Deus por ter me permitido chegar até aqui e por tudo que eu sou hoje.

Agradeço aos meus pais Geraldo e Maria Arlete pelo amor, carinho e compreensão durante todo o tempo do curso, o que sempre me fez continuar e querer chegar ao fim desta jornada. Aos meus irmãos Aridomar e Leonardo por sempre torcerem por mim.

Aos meus familiares, em especial as minhas tias Madalena e Albanete que sempre acreditaram em mim e pelos incentivos a nunca desistir.

Ao meu tio Joacil e sua esposa Francisca que sempre me deram seu amor incondicional, mostrando-me os melhores trilhos para permanecer na luta por dias melhores com seus conselhos que lembrarei por toda minha vida.

A minha namorada Jucimeri Ismael, por todo amor, carinho, paciência, compreensão e força para seguir em frente dia após dia.

A minha outra família que ganhei na vinda a cuité, Maria do Socorro, José da Costa, Mateus e Jucinaldo, os quais sempre serei grato.

A professora Vera Solange de Oliveira Farias que com muita paciência e atenção, dedicou do seu valioso tempo para me orientar em cada passo deste trabalho.

Ao professor Aluízio Freire por coorientar este trabalho, e também pelas grandes contribuições que me proporcionou durante todo esse tempo no curso.

Ao professor Jair Stefanini por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora deste trabalho.

A professora Célia Maria por suas contribuições durante a realização deste trabalho e durante todo o meu trajeto acadêmico.

A minha coorientadora do PIBIC Raquel Medeiros pelas suas contribuições e dedicação durante o projeto.

Ao técnico Carlos Eduardo por suas contribuições nas análises físico-químicas.

Ao casal Renato e Ioneris pela grande amizade e pelas ajudas durante o curso, além de conselhos e incentivos para sempre perseverar na luta.

Ao grande amigo Veridiano dos Anjos pelo incentivo a continuar os estudos.

A Pedro Custódio por suas palavras de perseverança e seus muitos conselhos durante toda a nossa amizade.

Aos professores Alda Leaby, Alexandre Alves, Clebson Huan, Edna Cordeiro, Fabíola

Martins, Gerivaldo, Glageane da Silva, Jaqueline Lixandrão, Jorge Alves, Leonardo Lira, Luando, Luciano Martins, Márcia Cristina, Marciel Medeiros, Maria de Jesus, Maria Gisélia, Heron Freitas, Nilton Frazão, Fábio Ferreira, Vladimir Catão e aos demais que contribuíram de alguma forma para a minha formação.

Ao professor Ednaldo Bernardo pelas suas contribuições que me ajudaram na minha vida acadêmica e pessoal.

Aos meus colegas, em especial André Macedo, Junior Leal, Ygor dos Santos, Anderson, Leandro, Marcos Vagner, Marcos Sérgio, Ivo Dantas, Ítalo, Cleano, Ismael (conceição), Isaac Ferreira, João Batista, Thiago Ismael, Ivo Senna, Willian, Maria da Paz, Girlene, Vanderlúcia, Anailde, Mônica, Natália, Maria Cláudia, Samara, Alane, Brenda, Edilza, Jeane e aos demais que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa. Obrigado por todos os momentos em que fomos estudiosos, brincalhões. Porque em vocês encontrei verdadeiros irmãos. Obrigado pela paciência, pelo sorriso, pelo abraço, pela mão que sempre se estendia quando eu precisava. Esta caminhada não seria a mesma sem vocês.

Aos meus colegas de quarto da Residência Universitária Dimas Garcia, Fred e Paulo Henrique por sempre estarmos juntos e fazerem parte de todo esse percurso acadêmico.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação a docência (PIBID) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) por me fazer participar da realidade escolar e científica, além de adquirir experiências que jamais esquecerei.

A Família da Residência Universitária e a todos os terceirizados.

Ao meu cachorro palmeirense que me distraiu muitas das vezes durante esse trabalho.

O meu muito obrigado a todos aqueles que sempre torceram por mim e me incentivaram a prosseguir.

# RESUMO

A secagem é um processo utilizado em diversos setores produtivos, dentre os quais, destaca-se a indústria de alimentos. Nessa perspectiva, estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de aperfeiçoar os processos de secagem para obtenção de melhorar a qualidade do produto final. Diante disso, apresenta-se nesse trabalho o estudo da modelagem matemática que descreve a secagem da cenoura que é um legume conhecido por possuir alto teor de umidade. Além disso, avaliar o processo de secagem através de modelos empíricos e difusivos e determinar por meio de dados experimentais as curvas de secagem da cenoura para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, bem como caracterizar a cenoura ao longo do processo, disponibilizando as análises físico-químicas para toda a comunidade científica. Desta forma, diversos modelos matemáticos são propostos na literatura para o estudo da cinética de secagem da cenoura, buscando estimar as transferências simultâneas de calor e massa envolvidas na cinética de secagem. Estes modelos são empregados para prever o comportamento das curvas de secagem do material. As condições operacionais utilizadas no procedimento foram para discos de cenoura com 5 mm de espessura e de aproximadamente 38 mm de diâmetro em média. Foi perceptível através dos resultados que dentre os modelos empíricos o de Page foi o que melhor se adequou aos dados experimentais. Por outro lado, encontram-se os modelos difusivos que têm sido amplamente empregados na descrição de processos que envolvem os fenômenos de transporte, uma vez que estes modelos além de apresentar parâmetros com significados físicos, também conseguem descrever a distribuição do teor de umidade no interior do produto num determinado tempo especificado e numa posição determinada. Através das análises físico-químicas pode-se dizer que com o processo de secagem, não foram detectadas perdas significantes nos nutrientes, assim, conclui-se que esse procedimento de conservação utilizado é vantajoso, pois reduzem gastos como transporte, armazenamento e aumenta o tempo de prateleira desse produto.

**Palavras-chave:** Análises físico-químicas, processo de alimentos, qualidade do produto final, modelos empíricos, modelos difusivos, ampliação da vida de prateleira do produto.



# ABSTRACT

Drying is a process used in several productive sectors, among which stands out the food industry. From this perspective, studies have been developed in order to improve the drying processes in order to improve the quality of the final product. Given this, we present in this work the study of mathematical modeling that describes the drying of carrots which is a vegetable known to have high moisture content. In addition, to evaluate the drying process through empirical and diffusive models and to determine through experimental data the carrot drying curves for temperatures of 40, 50, 60 and 70 ° C, as well as to characterize the carrot throughout the process. by making physicochemical analyzes available to the entire scientific community. Thus, several mathematical models are proposed in the literature for the study of carrot drying kinetics, seeking to estimate the simultaneous heat and mass transfers involved in drying kinetics. These models are used to predict the behavior of drying curves of the material. The operating conditions used in the procedure were for carrot discs 5 mm thick and approximately 38 mm in diameter on average. It was noticeable from the results that among the empirical models Page was the one that best fit the experimental data. On the other hand, there are diffusive models that have been widely used in the description of processes involving transport phenomena, since these models, besides presenting parameters with physical meanings, can also describe the distribution of moisture content inside. product at a specified time and in a specified position. Through the physicochemical analysis it can be said that with the drying process, no significant losses in the nutrients were detected, thus concluding that this conservation procedure used is advantageous, since they reduce expenses such as transport, storage and increase the time, shelf life of this product.

**Keywords:** Physicochemical analysis, food process, end product quality, empirical models, diffusive models, extending product shelf life.

# SUMÁRIO

	<b>Lista de ilustrações</b>	<b>11</b>
	<b>Lista de tabelas</b>	<b>12</b>
	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivo Específico	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	<b>Cenoura</b>	<b>16</b>
2.1.1	Aspectos Gerais	16
2.1.2	Classificação da cenoura	18
2.1.3	Características nutricionais	21
2.2	<b>Secagem</b>	<b>22</b>
2.2.1	Aspectos Gerais	22
2.3	<b>Teor de umidade</b>	<b>24</b>
2.4	<b>Modelagem matemática de secagem</b>	<b>26</b>
2.4.1	Cinética de secagem	26
2.4.2	Modelos matemáticos	27
2.4.2.1	Modelos empíricos	28
2.4.2.2	Modelos difusivos	28
2.4.2.3	Equação de difusão em coordenadas cartesianas	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>33</b>
3.1	<b>Matéria prima</b>	<b>33</b>
3.1.1	Metodologia experimental	33
3.2	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>35</b>
3.2.1	Modelos empíricos para descrever a cinética	35
3.2.2	Solução numérica da equação de difusão para parede infinita	36
3.2.3	Volume de controle a leste (e)	39
3.3	<b>Análises Físico- químicas</b>	<b>41</b>
3.4	<b>Softwares utilizados</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>47</b>
4.1	<b>Modelos empíricos</b>	<b>47</b>

4.1.1	Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas	47
<b>4.2</b>	<b>Modelos difusivos</b>	<b>53</b>
4.2.1	Resultados das otimizações com o software Infinite Slab Numerical	53
<b>4.3</b>	<b>Gráficos de contorno</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise físico-químicas</b>	<b>66</b>
	<b>Conclusão</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>84</b>

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Morfologia da cenoura . . . . .	17
Figura 2 – Variedades de cenouras . . . . .	18
Figura 3 – diagrama dos processos envolvidos na secagem . . . . .	23
Figura 4 – Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio( $\bar{M}_e$ ) . . . . .	25
Figura 5 – Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio ( $\bar{M}_e$ ) . . . . .	26
Figura 6 – Representação esquemática de uma parede infinita (J representa o fluxo de massa e $M_{eq}$ o teor de umidade de equilíbrio). . . . .	30
Figura 7 – Cenouras utilizadas no processo de secagem . . . . .	33
Figura 8 – Cestos utilizados no processo de secagem . . . . .	34
Figura 9 – Balança utilizada no processo de secagem . . . . .	34
Figura 10 – Representação da geometria parede infinita discretizada - balanço dos volumes de controle. . . . .	37
Figura 11 – Domínio discretizado com um volume de controle a oeste em destaque . . . . .	39
Figura 12 – Caixa de diálogo com todas as funções para a difusividade. . . . .	45
Figura 13 – Simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software <i>LAB FIT</i> para a temperatura de 40 °C. . . . .	49
Figura 14 – Simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software <i>LAB FIT</i> para a temperatura de 50 °C. . . . .	51
Figura 15 – simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software <i>LAB FIT</i> para a temperatura de 60 °C. . . . .	69
Figura 16 – simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software <i>LAB FIT</i> para a temperatura de 70 °C. . . . .	70
Figura 17 – simulações da taxa de secagem usando o modelo M1 (Page) para as temperaturas: (a) T= 40 °C; (b) T= 50 °C; (c) T= 60 °C e (d) T= 70 °C. . . . .	72
Figura 18 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_1$ ; (c) $F_4$ e (d) $F_3$ . . . . .	72
Figura 19 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_1$ ; (c) $F_4$ e (d) $F_3$ . . . . .	74
Figura 20 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_4$ ; (c) $F_1$ e (d) $F_3$ . . . . .	75

Figura 21 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_1$ ; (c) $F_4$ e (d) $F_3$ . . . . .	76
Figura 22 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a) $F_1$ ; (b) $F_4$ ; (c) $F_2$ ; (d) $F_3$ . . . . .	77
Figura 23 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_3$ ; (c) $F_1$ ; (d) $F_4$ . . . . .	77
Figura 24 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_3$ ; (c) $F_4$ ; (d) $F_1$ . . . . .	78
Figura 25 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a) $F_2$ ; (b) $F_1$ ; (c) $F_4$ ; (d) $F_3$ . . . . .	79
Figura 26 – Gráficos de contorno usando a equação $F_1$ do experimento para a temperatura de 40 °C nos instantes: (a) 25,2 min; (b)252 min; (c) 315 min; (d) 630 min; (e) 1260 min. . . . .	80
Figura 27 – Gráficos de contorno usando a equação $F_4$ do experimento para a temperatura de 40 °C nos instantes: (a) 25,2 min; (b)252 min; (c) 315 min; (d) 630 min; (e) 1260 min. . . . .	80
Figura 28 – Gráficos de contorno usando a equação $F_2$ do experimento para a temperatura de 70 °C nos instantes: (a) 13.20 min; (b)132 min; (c) 165 min; (d) 330 min; (e) 660 min. . . . .	81

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes da cenoura de acordo com o seu comprimento. . . . .	19
Tabela 2 – Classes da cenoura de acordo com o seu diâmetro. . . . .	19
Tabela 3 – Limites máximos de defeitos graves e leves ( expressos por porcentagens). .	21
Tabela 4 – Composição nutricional de 100 gramas de raízes de cenoura <i>in natura</i> . . .	22
Tabela 5 – Modelos empíricos utilizados para descrever as cinéticas de secagem . . . .	36
Tabela 6 – Teor de umidade inicial e de equilíbrio para as quatro diferentes temperaturas.	47
Tabela 7 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 40 °C. . . . .	48
Tabela 8 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 50 °C. . . . .	49
Tabela 9 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 60 °C. . . . .	52
Tabela 10 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 70 °C. . . . .	52
Tabela 11 – Funções e sua representação . . . . .	54
Tabela 12 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 40 °C. . . . .	54
Tabela 13 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 50 °C. . . . .	56
Tabela 14 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 60 °C. . . . .	56
Tabela 15 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 70 °C. . . . .	58
Tabela 16 – Resultados dos ajuste da equação (4.2) aos dados do encolhimento. . . . .	59
Tabela 17 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 40 °C e espessura variável. . . . .	60
Tabela 18 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 50 °C e espessura variável. . . . .	61
Tabela 19 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 60 °C e espessura variável. . . . .	62
Tabela 20 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 70 °C e espessura variável. . . . .	63
Tabela 21 – Resultados das análises físico-químicas para a cenoura <i>in natura</i> e para as temperaturas de secagens estabelecidas. . . . .	67

# INTRODUÇÃO

Existe na literatura algumas técnicas de conservação de alimentos perecíveis que foram sendo aprimoradas ao longo do tempo, acarretando em uma forma de retardar o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela degradação da qualidade desses produtos.

Dentre 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, pois se caracteriza como um procedimento para a retirada total ou parcial de substâncias voláteis de materiais, permitindo uma retardação da deterioração de produtos biológicos.

Sendo assim, a secagem é um processo que envolve os fenômenos de transferência de calor e massa simultaneamente e, tem como objetivo reduzir a quantidade de um fluido (líquido ou vapor) presente num corpo. Isso deve ocorrer através da evaporação do líquido, perante um fornecimento de calor ao corpo.

Vários mecanismos de migração de massa são descritos pela literatura, como a difusão de vapor, escoamento de líquido e de vapor e de difusão líquida. O modelo de difusão líquida tem sido empregado por diversos autores Silva et al., (2009); Farias, (2011); Silva, (2012); Silva et al., (2013) e Silva Júnior, (2015).

Segundo Andréola (2013), a maioria das frutas e hortaliças apresentam alto teor de umidade quando na forma *in natura*, o que as caracteriza como produtos perecíveis, assim, o pouco tempo de vida desses produtos na prateleira se dá por reações de microrganismos indesejáveis causados principalmente pela quantidade de água presente nesses alimentos.

Desta forma, o processo de secagem consegue diminuir o teor de umidade, resultando num maior tempo de conservação desses tipos de alimentos e numa diminuição com os custos de transporte e armazenamento desses alimentos. Porém, o processo de secagem pode ter consequências negativas como: ocasionar a degradação de componentes nutricionais; alterações de cor; endurecimento superficial e encolhimento dos produtos, o que é indesejável. Essas limitações de qualidade têm despertado o interesse de diversas pesquisas no decorrer dos anos, visto que a utilização de frutas e hortaliças desidratadas na formulação de produtos industrializados tem apresentado crescimento considerável, por agregarem maior valor nutricional a esses produtos.

Entre os mais variados legumes perecíveis, encontra-se a cenoura (*Daucus carota L.*) que é uma hortaliça da família das *Apiaceae* de origem afegã, destacou-se no século XIII se popularizando na Europa, de onde mais tarde migrou para a América. Esta hortaliça é bastante apreciada na culinária brasileira, seja *in natura* ou processada, pois contém importantes valores

nutricionais presentes em sua composição responsáveis por manter o bom funcionamento do corpo.

No Brasil, de acordo com Vilela (2008), a produção da cenoura tem destaque principalmente nas regiões sul, sudeste e nordeste, onde os estados que lideram essa produtividade são: Minas Gerais, Bahia, Paraná e São Paulo.

Diante disso, estudos têm sido desenvolvidos buscando aperfeiçoar os processos de secagem para obtenção de melhor qualidade do produto final. É nessa perspectiva que o estudo da secagem de cenoura realizou-se, objetivando determinar a melhor equação empírica e difusiva das cinéticas de secagem para quatro temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C, bem como caracterizar a cenoura ao longo do processo, disponibilizando as análises para a comunidade científica.

Portanto, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: destinado aos objetivos do trabalho;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica: revisão da literatura pertinente ao estudo realizado, bem como das ferramentas matemáticas utilizadas neste estudo; ;
- Capítulo 3: Materiais e métodos: descrição das ferramentas matemáticas, computacionais e experimentais utilizadas neste trabalho;
- Capítulo 4: Resultados e discussões: apresentação e discussões dos resultados obtidos;
- Conclusão: Conclusão a respeito dos resultados obtidos neste trabalho.



# 1 OBJETIVOS

Estudos têm sido desenvolvidos buscando aperfeiçoar os processos de secagem para obtenção de melhor qualidade do produto final. Dentro deste contexto, neste trabalho realizou-se o estudo da secagem da cenoura objetivando determinar as cinéticas de secagem, bem como caracterizar a cenoura ao longo do processo, disponibilizando as análises para a comunidade científica. Para tal, fez-se a determinação de propriedades físico-químicas da cenoura, no estado fresco e ao final das secagens para as quatro temperaturas diferentes.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral um estudo teórico e experimental para determinar, por meio de dados experimentais, as curvas de secagem da cenoura para diferentes temperaturas, bem como a caracterização da cenoura ao longo da secagem.

## 1.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos desta pesquisa estão enumerados a seguir, pressupondo que o domínio a ser estudado seja um sólido que possa ser considerado um paralelepípedo.

- Determinar por meio de dados experimentais as curvas de secagem da cenoura para diferentes temperaturas;
- Caracterização da cenoura ao longo de secagem sob diferentes temperaturas, no estado fresco e ao final de cada secagem;
- Análise das propriedades físico-químicas da cenoura fresca e da cenoura ao final da secagem;
- Avaliar o ajuste dos modelos empíricos e difusivos no processo de secagem;
- Comparar os melhores modelos empíricos e difusivos;
- Determinar e avaliar as curvas da taxa de secagem para os melhores modelos empíricos e difusivos;
- Estudar a influência das condições operacionais no processo de secagem da cenoura, como a temperatura do ar de secagem e o tempo de duração do processo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cenoura

#### 2.1.1 Aspectos Gerais

A cenoura (*Daucus carota L.*), é uma planta da família das *Apiaceae*, que produz uma raiz aromática e comestível, sendo um vegetal de grande importância devido ao seu grande consumo em todo mundo, pela extensão de área plantada e pelo grande envolvimento socioeconômico dos produtores rurais (ALVES et al., 2010). Sendo uma hortaliça muito apreciada pelos povos da antiga Grécia e Roma, onde os mesmos a utilizavam como medicamento para o tratamento de problemas relacionados com o corpo humano, como por exemplo nos problemas urinários.

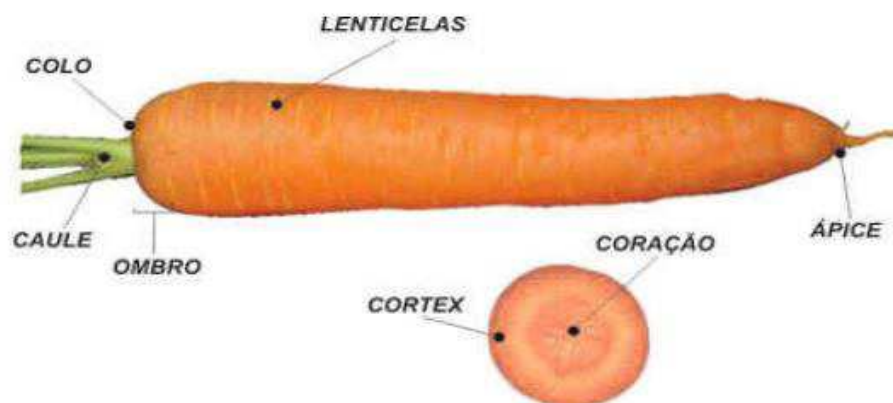
Segundo Delmiro (2016), a cenoura é um vegetal de origem afegã e passou a fazer parte da cultura alimentar a partir do século XII onde se popularizou pela Europa e mais tarde migrou para a América. Esta hortaliça é bastante apreciada na culinária brasileira, seja *in natura* ou processada, pois possui importantes valores nutricionais presentes em sua composição, responsáveis por manter o bom funcionamento do corpo como o sistema digestivo.

Araújo (2010) explica que o consumo diário dessa hortaliça traz grandes benefícios a saúde, dos quais pode-se citar a prevenção de doenças relacionadas com a visão, melhorias no processo digestivo e a contribuição para o bom estado da pele e mucosas. A cenoura é classificada como um legume, pois a sua parte comestível é a raiz, além dessa classificação segundo (FILGUEIRA 2008), as cenouras podem também ser caracterizadas de acordo com sua coloração, comprimento e forma:

A planta possui ciclo bienal, embora cultivada como anual, é herbácea, apresenta caule pouco perceptível, as folhas são constituídas por folíolos finamente recortados, com pecíolos longos e afinados, formando um tufo de folhas em posição vertical, atingindo cerca de 50 cm de altura. A parte comercializável é uma raiz pivotante, tuberosa, carnuda, lisa, reta e sem ramificações, de formato cilíndrico ou cônico (FILGUEIRA, 2008).

A cenoura é morfológicamente dividida em caule, colo, ombro, lenticelas e ápice, a parte interior inclui o córtex e coração, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Morfologia da cenoura



Fonte: ARAÚJO,2010.

Cada parte apresenta uma característica específica (Araújo, 2010):

- **Córtex:** Auxilia a condução da água e minerais dissolvidos através da raiz, desde a epiderme até ao xilema;
- **Coração:** Parte central da cenoura, região mais fibrosa da raiz;
- **Caule:** Parte aérea da cenoura, através do qual circulam as seivas;
- **Colo:** Região de transição entre a raiz e o caule;
- **Ombro:** Local de maior reserva de nutrientes.
- **Lenticela:** Responsável pela fixação da raiz no solo, como também absorvem a água e minerais do solo;
- **Ápice:** Ajuda a raiz a penetrar no solo.

A cenoura laranja que hoje faz parte da alimentação passou a ser cultivada somente no final do século XVI. Antes disso, os fazendeiros holandeses e franceses plantavam cenouras roxas, mas eram eventualmente surpreendidos com alguns vegetais mutantes que apresentavam coloração branca ou amarela. Essa diferença na cor se justifica por causa da falta do pigmento conhecido como *antocianina*, que confere tons de roxo e azul às plantas.

Segundo a Embrapa (1984), 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 variedade *Long Orange* que por sua vez, a qual deu origem a três novas variedades: *Late Half Long*, *Early Half Long*; e *Earlt Scarlet Horn*, onde estas deram origem a atual cenoura de cor alaranjada.

Depois que as cenouras são colhidas, as mesmas precisam ser transportadas, e segundo Evangelista (1992), o transporte de cenouras deve ser feito observando, além da sua temperatura adequada, a profundidade dos recipientes, pois elas se deterioram muito rapidamente, principalmente pela pressão exercida através das camadas superiores sobre as inferiores. Fato esse, que mostra a importância do processo de secagem no ramo de produtos agrícolas.

No que diz respeito a produção mundial da cenoura, a China, os Estados Unidos e a Rússia são os maiores produtores desta hortaliça. Já no Brasil, de acordo com Vilela (2008) a produção da cenoura tem destaque principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste e os estados que lideram essa produtividade são: Minas Gerais, Bahia, Paraná e São Paulo.

Para Rosa (2010), a principal forma de consumo da cenoura é *in natura*, contudo, a mudança de estilo de vida das pessoas tem aumentado a demanda por alimentos práticos, previamente modificados, mas que possuam os nutrientes preservados. Além do consumo *in natura*, são também observados a utilização da cenoura como matéria prima para indústrias processadoras de alimentos, que a comercializam na forma minimamente processada (minicenouras, cubos, ralada, em rodelas) ou processada na forma de seleta de legumes, alimentos infantis e sopas instantâneas.

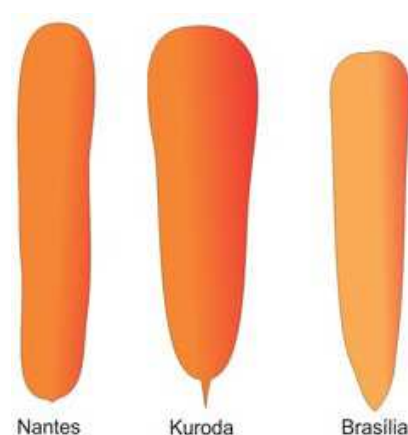
### 2.1.2 Classificação da cenoura

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

#### Grupos

Existem diferentes variedades de cenouras, destacando-se a Nantes, a Kuroda e a Brasília, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Variedades de cenouras



Fonte: Hortibrasil, (2019)

- **Nantes**: sua produção apresenta cerca de 90% cilíndrica, ponta arredondada, coração

pouco evidente, pele lisa, coloração laranja escura, caule pequeno e sua produção ocorre no inverno;

- **Kuroda** formato cônico, ponta arredondada, coração pouco evidente, coloração laranja avermelhada, caule pequeno e sua produção ocorre na primavera/ verão;
- **Brasília** formato cônico, ponta pouco fechada, coração evidente, pele pouco lisa, coloração laranja clara, caule grande e sua produção ocorre no verão;

### Classes

A cenoura também pode ser classificada de acordo com o comprimento de sua raiz, sendo dividida em 4 classes como pode ser observado Tabela 1.

Tabela 1 – Classes da cenoura de acordo com o seu comprimento.

CLASSES	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:** Hortibrasil, (2019)

### Subclasses

A cenoura também pode ser classificada de acordo com o diâmetro de sua raiz, sendo dividida em 3 subclasses como pode ser observado Tabela 2.

Tabela 2 – Classes da cenoura de acordo com o seu diâmetro.

CALIBRE	DIÂMETRO(mm)
2	Maior que 20 até 30
3	Maior que 30 até 40
4	Maior que 40

**Fonte:** Hortibrasil, (2019)

### Tipo ou categoria

De acordo com as porcentagens toleráveis de defeitos que podem ser encontrados nas raízes contidas na embalagem de comercialização. Esses defeitos podem ser classificados como graves ou leves.

**Defeitos graves:**

- **Podridão seca e/ou úmida:** dano patológico e/ou fisiológico que implique em qualquer grau de deterioração dos tecidos;
- **Raiz murcha:** raiz sem turgescência, enrugada ou flácida e sem brilho;
- **Ombro verde ou arroxeadado:** raiz que apresenta a região próxima da inserção do caule com coloração verde ou arroxeadado em proporção superior a 10% da superfície total da raiz;
- **Lenhosa:** raiz em avançado estágio de desenvolvimento caracterizado, principalmente pela lignificação do “coração”;
- **Injúrias por pragas ou doenças:** presença de “caroços” ou lesões causadas por nematóides, ferimentos causados por brocas ou outros insetos e lesões escuras;
- **Rachada:** raiz que apresenta rachadura causada por excesso hídrico ou por deficiência de cálcio;
- **Dano mecânico:** lesão de origem diversa que ultrapasse a profundidade de 3mm ou 10% da superfície da raiz;
- **Deformação:** raiz com formato diferente da forma característica do cultivar.

**Defeitos leves:**

- **Corte inadequado do caule:** caracterizado quando o corte da parte aérea não é realizado rente ao colo da raiz;
- **Raiz com radícula:** presença de radículas por toda extensão da raiz, fazendo com que ela não possa ser considerada uma raiz lisa;
- **Ombro verde ou arroxeadado:** raiz que apresenta a região próxima da inserção do caule com coloração verde ou arroxeadada inferior a 10% da superfície total da raiz;
- **Manchas:** alterações da coloração normal da variedade. Considera-se defeito quando a área afetada superar 10% da superfície total da raiz;
- **Dano mecânico:** lesão de origem diversa que ultrapasse a profundidade de 3mm ou 10% da superfície da raiz;

Portanto, na Tabela 3 a seguir é estabelecido os limites de defeitos para cada categoria de qualidade.

Tabela 3 – Limites máximos de defeitos graves e leves ( expressos por porcentagens).

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:** Hortibrasil, (2019)

As cenouras devem apresentar características do cultivar bem definidas, serem limpas e livres de umidade externa anormal.

O lote de cenouras que não atender os requisitos previstos nesta norma será classificado como “FORA DO PADRÃO”, podendo ser:

- Comercializado como tal, desde que perfeitamente identificado em local de destaque e de fácil visualização.
- Rebeneficiado, desdobrado, reembalado, reetiquetado e reclassificado, para efeito de enquadramento da norma.
- Não se utiliza o rebeneficiamento e/ou reclassificação dos lotes de cenoura que apresenta índice de podridão úmida acima de 10% (dez por cento).

### 2.1.3 Características nutricionais

De acordo com Teixeira (2008), a cenoura tem um sabor muito apreciado por pessoas de todas as idades, devido aos seus componentes voláteis, açúcares e aminoácidos livres, proporcionando vários benefícios para a saúde do consumidor, uma vez que, contém carotenóides, fibras, vitaminas, minerais e outros componentes importantíssimos para o bom funcionamento do corpo humano.

Desta maneira, a cenoura possui valor nutricional, já que em sua composição apresenta componentes responsáveis por manter o bom equilíbrio do corpo humano (potássio, magnésio, cálcio, cobre e fósforo), bem como vitaminas do complexo B, que são fundamentais para a regulamentação do aparelho digestivo e do sistema nervoso.

De acordo com Resende et al, (2004), a cenoura é uma das hortaliças mais populares, pela sua versatilidade de uso e formas de se apresentar ao consumidor, podendo ser encontrada

como ralada em diversos tamanhos ou cortadas na forma de cubos, fatias, palitos, além de ser apresentadas na forma de mini-cenoura (*baby-carrot*), que em função do processamento torna-se possível sofrer várias mudanças microbiológicas e fisiológicas que depreciam na grande maioria das vezes a sua qualidade sensorial, tornando sua vida de prateleira curtíssimo.

Desta forma, na Tabela 4 a seguir estão apresentadas as quantidades de determinados componentes presentes em 100 gramas de cenoura na sua forma *in natura*.

Tabela 4 – Composição nutricional de 100 gramas de raízes de cenoura *in natura*

Componentes	Unidade	Quantidade
Calorias	Kcal	43,00
Gorduras	g	0,19
Carboidratos	g	10,14
Fibras	g	3,00
Proteínas	g	11,03
Sódio	mg	35,00
Potássio	mg	323,00
Cálcio	mg	27,00
Ferro	mg	0,50
Zinco	mg	0,20
Vitamina A	UI	12.000
Vitamina C	mg	9,00
Vitamina E	mg	0,46

**Fonte:** Hortibrasil, (2019)

## 2.2 Secagem

### 2.2.1 Aspectos Gerais

A secagem é um método muito antigo de conservação de alimentos, que se baseia na remoção da água do alimento na forma de vapor de água para o ar não saturado. Este método vem sendo estudado e melhorado de forma a obter produtos de maior qualidade e menor tempo de processamento (Akipinar et al., 2006).

De acordo com Fioreze (2004) a 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. Embora secagem e desidratação sejam termos congêneres, para quem é da área, esses termos possuem significados diferentes.



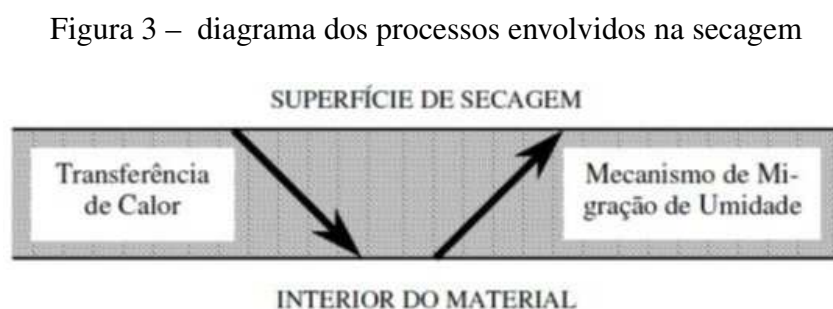
Segundo Farias (2011) a secagem envolve a transferência de calor para o produto que se está trabalhando através de procedimentos como: condução, convecção e radiação, acarretando a remoção da água líquida presente nesse produto e a evaporação da mesma. Já o termo desidratação pode ser usado de forma mais vasta, e pode ser denominado como um processo de remoção da água sem que haja a necessidade da transferência de calor do meio para o produto, assim como a utilização da evaporação de água.

O processo de secagem apresenta inúmeras vantagens, das quais podemos destacar: a facilidade de conservação do produto; a estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; a proteção contra a degradação enzimática e oxidativa; redução do peso; economia de energia por não precisar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante todo o ano Park, (2001).

Porém, a secagem de alimentos não tem apenas vantagens. Durante o processo de secagem podem ocorrer várias alterações, tais como: alterações na cor, textura e valor nutricional dos alimentos Hiranvarachat et al., (2008), afetando assim as propriedades do produto final e/ou a qualidade, principalmente, quando comparados com os produtos frescos Sacilik, (2007).

De acordo ( BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992), durante o processo de secagem, o calor é transferido para o material por condução através do contato com uma superfície quente ou por meio de convecção através do ar. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido presente na superfície do sólido ou próximo da superfície se a mudança de estado ocorrer no interior do corpo.

Diante disso, Fioreze (2004) afirma que ocorre uma retirada de umidade da superfície e das camadas externas criando-se um gradiente de concentração internamente ao produto, causando um processo migratório de umidade do centro do produto para as superfícies que se está trabalhando. A Figura 3 a seguir apresenta um diagrama de secagem:



**Fonte:** PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, (2007)

A temperatura do ar de secagem é fundamental no processo de secagem, pois, junto com o fluxo de ar, é o principal fator determinante da velocidade de secagem. Segundo Mata et al.,(1999) a secagem é um processo que deve ser previsto, dimensionado e planejado, sendo

necessário por parte do pesquisador, utilizar um programa de simulação desse processo de forma a prever e encontrar através de simulação o melhor tipo de secador a ser utilizado e as condições necessárias para o êxito da secagem de acordo com as condições climáticas da região.

A secagem é um método muito antigo no meio industrial, onde se destaca principalmente na indústria de produtos farmacêuticos, agrícolas, cerâmicos, construção civil e etc. Na indústria de produtos agrícolas é utilizado em produtos higroscópicos que são produtos que possuem facilidades de ceder e receber vapor de água. Porém para armazenar esse tipo de produto é necessário reduzir o seu teor de umidade para aumentar a durabilidade do mesmo.

Na indústria farmacêutica, a presença da secagem é muito importante, assim, qualquer tipo de umidade nos produtos como os comprimidos, tendem a comprometer a durabilidade, a alterar o volume, o peso e até mesmo afetar as substâncias ativas presentes nos mesmo.

Portanto 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).

## 2.3 Teor de umidade

De acordo com (PARK; ANTONIO; OLIVEIRA 2007), o teor de umidade ( $\bar{M}$ ) é a quantidade de água em relação a 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 ( $\bar{M}_{bu}$ ), que pode ser expressa da seguinte forma:

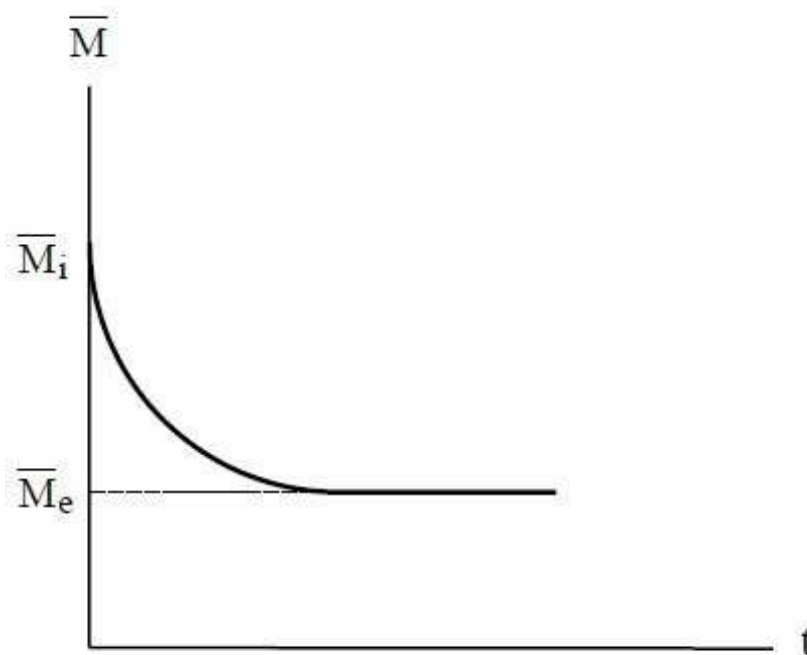
$$\bar{M}_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_s} \quad (2.1)$$

Porém, de acordo com SILVA (2007), também pode ser obtido o teor em relação a base seca ( $\bar{M}_{bs}$ ), sendo definido como a massa de água em relação à massa seca deste corpo. Expresso da seguinte maneira:

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

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 que não sofrem alterações significativas por um longo período de tempo, ou seja, não há mais fluxo e massa considerável do corpo para o meio. De acordo com Silva (2007) o corpo e o ambiente já estão nas mesmas condições de concentração de umidade, temperatura, etc.

A Figura (4) a seguir mostra a curva para o comportamento dos teores de umidade inicial ( $\bar{M}_i$ ) e de umidade de equilíbrio ( $\bar{M}_e$ ).

Figura 4 – Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio ( $\overline{M}_e$ )

**Fonte:** SILVA, (2007)

É importante ressaltar que os valores de  $\overline{M}_{bs}$  e  $\overline{M}_e$ , somente são conhecidos após o processo de secagem, uma vez que é imprescindível conhecer a massa seca do objeto. Destaca-se que a massa seca não é simplesmente o valor medido no final do processo de secagem, esta é a massa de equilíbrio do objeto naquela situação de secagem, onde não há mais perda de umidade.

Para se obter a massa seca é necessário submeter o produto que está trabalhando no processo de secagem há uma temperatura de 105°C, por um período de 24 horas, sendo assim, garantindo a retirada completa de toda a água presente no produto. Não é necessário fazer toda a secagem, a fim de se obter a massa seca, podendo ser feita a qualquer momento, desde que obedeça a temperatura mínima para se garantir a retirada de toda a água. A diferença entre a massa do objeto antes e após a secagem fornece a massa de água presente no corpo do produto.

Portanto, as razões de umidade e as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem, pode ser obtido a partir dos dados experimentais da perda de massa das amostras durante a secagem sucessiva e dos teores de umidade determinados ao final da secagem. A seguir apresenta-se a expressão na sua forma adimensional utilizada para a realização dos cálculos da razão média da umidade do produto:

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

Desse modo, Gouveia et al., (2011) traz que a obtenção da cinética de secagem é de

fundamental importância para a modelagem matemática da operação e projeto de secadores, possibilitando a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa para o fluido e as equações matemáticas correspondentes.

Portanto, a cinética de secagem é uma análise sobre o comportamento da transferência de massa entre o produto e o agente de secagem, contribuindo com as informações sobre o comportamento do mesmo durante todo o processo.

## 2.4 Modelagem matemática de secagem

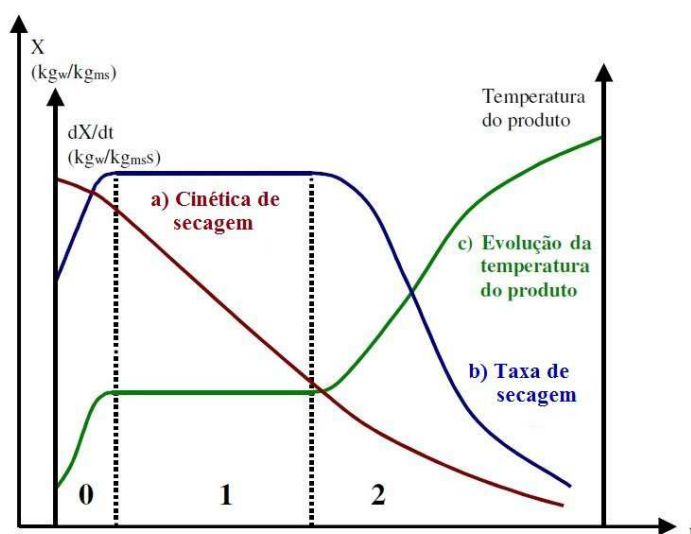
### 2.4.1 Cinética de secagem

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 envolvido do processo de secagem Rosa, (2010).

Desta maneira, a obtenção da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelação matemática da operação e projeto de secadores Gouveia et al., (2011). Possibilitando a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes Ferreira,(2004).

Logo, de acordo com ( PARK; YADO; BROD, 2001) a curva de cinética de secagem em geral pode ser dividida em três períodos distintos, tais como: 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. A Figura (5) a seguir apresenta a cinética das curvas de secagem.

Figura 5 – Curva de secagem destacando o teor de umidade de equilíbrio ( $\bar{M}_e$ )



Fonte: PARK; ANTONIO; OLIVEIRA, (2007)

O período 0 (zero) 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 (um) 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 elevada. A água evapora-se e 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).

Por fim, o período 2 (dois), 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.

Já em 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,  $(\frac{dM}{dt})$  em relação à evolução do tempo (t), sendo que o tempo do processo mais demorado é a perda de umidade do produto.

Por último tem-se a curva (c), que demonstra as mudanças da temperatura do produto no decorrer da secagem (variação da massa do produto M em relação a evolução do tempo t) ou seja, representa a curva resultante da mediação da massa do produto durante o processo de secagem.

Sendo assim, 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 desta forma pode-se realizar o procedimento de análises físico-químicas afim de averiguar se com processo de secagem, obtêm-se um produto de boa qualidade.

## 2.4.2 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos buscam estimar as transferências simultâneas de calor e massas envolvidas durante a secagem, assim os modelos são os responsáveis por prever o comportamento das curvas de secagem do material em relação aos dados experimentais.

Desta forma, segundo Dantas, Mata e Duarte (2011), a utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferências de massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores, sendo muito útil para os cálculos do desenvolvimento eficiente de cada análise, tendo sempre em vista a melhoria do processamento,

redução de perdas de nutrientes e uma ótima qualidade do produto final.

#### 2.4.2.1 Modelos empíricos

O método empírico consiste numa correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo com base em dados experimentais. Segundo Silva (2007), os modelos empíricos geralmente descrevem muito bem a cinética de secagem, mas não conseguem prever a distribuição de umidade no interior do produto num determinado tempo especificado.

Assim, existem vários modelos empíricos presentes na literatura a fim de encontrar equações empíricas que se ajustem aos dados experimentais, pois os modelos empíricos devem se ajustar aos dados experimentais e não o contrário como a maioria das pessoas acreditam que acontece.

Segundo Borges (2016), os modelos de simulação avaliam o efeito de combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, em sua eficiência do processo e no teor de água final do produto. Desta forma, a cinética de secagem é uma análise sobre o comportamento da transferência de massa entre o produto e o agente de secagem, contribuindo com as informações sobre o comportamento do mesmo durante todo o processo.

As relações empíricas vem ganhando muito espaço, pois tem-se mostrado como as melhores opções para prever o comportamento do processo de secagem, ressaltando que os modelos difusivos e numéricos descrevem as cinéticas melhor que os empíricos, porém é um pouco mais trabalhoso para se obter as curvas de secagem.

#### 2.4.2.2 Modelos difusivos

O modelo de difusão líquida (Difusivo) tem sido amplamente utilizado por pesquisadores para descrever o processo de transferência de massa Goneli et al, (2007); Silva et, (2009); Farias, (2011). Este modelo desconsidera a variação do volume do produto a ser seco, assim como algumas de suas propriedades termofísicas. Estas considerações fazem com que o modelo seja criticado, uma vez que em alguns trabalhos isso provoca discrepâncias entre os resultado teóricos e experimentais (FARIAS, 2011).

Este modelo é uma equação diferencial parcial obtida a partir da conservação de massa e energia, podendo se obter soluções analíticas quanto numéricas com bases nos dados obtidos experimentalmente durante o processo de secagem.

Na teoria de secagem, o fenômeno pode acontecer em dois períodos. O primeiro período acontece a uma taxa de secagem constante e o segundo ocorre a uma taxa de secagem decrescente. O modelo de difusão não descreve apropriadamente o período de taxa constante, sendo empregado a partir do momento em que se inicia o período de taxa decrescente Silva, (2012).

### 2.4.2.3 Equação de difusão em coordenadas cartesianas

A Equação pode ser obtida a partir da Equação de transporte (2.4), expressa na sua forma geral pela Equação (SILVA, 2007):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) + \nabla \cdot (\lambda\vec{V}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.4)$$

onde:

$\Phi$  é a variável dependente de interesse;

$\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são coeficientes de transporte;

$\vec{V}$  é o vetor velocidade do meio;

$S^\Phi$  é o termo fonte;

$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi)$  é o termo transiente;

$\nabla \cdot (\lambda\vec{V}\Phi)$  é chamado de termo advectivo;

$\nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi)$  é o termo difusivo.

Para um meio estacionário, a velocidade ( $v$ ) é igual a zero (0), então a Equação (2.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.5)$$

A equação 2.5 é conhecida como a equação da difusão.

Fazendo  $\lambda = 1$ ,  $\Phi = M$ ,  $\Gamma^\Phi = D$  e  $S^\Phi = 0$  na Equação (2.5), obtém-se a equação da difusão de massa, onde  $M$  (função espaço-temporal) representa o teor de umidade e  $D$  é a difusividade efetiva de massa.

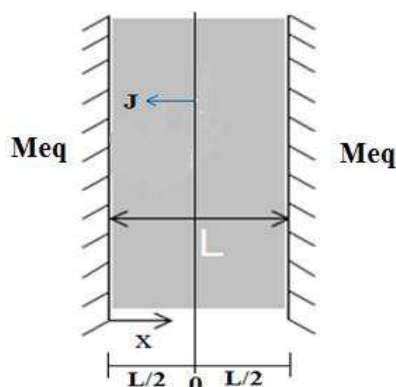
$$\frac{\partial}{\partial t}(M) = \nabla \cdot (D\nabla M) \quad (2.6)$$

Na Equação 2.6, o termo entre parênteses do lado direito é o negativo da conhecida primeira lei de Fick. Esta lei diz que o fluxo de massa por unidade de tempo e área ( $\vec{J}$ ) é expresso por:

$$\vec{J} = -(D\nabla M) \quad (2.7)$$

A Figura(6) a seguir representa a região de uma parede infinita :

Figura 6 – Representação esquemática de uma parede infinita (J representa o fluxo de massa e  $M_{eq}$  o teor de umidade de equilíbrio).



Fonte: FARIAS, (2011)

Deste modo, a Equação da difusão de massa, em coordenadas cartesianas e considerando regime transiente (variação de  $M$  com o tempo e difusividade efetiva de massa constante), é escrita na forma unidimensional através da Equação (2.8):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Para trabalhar com grandezas mensuráveis do teor de umidade ( $M$ ), define-se a grandeza adimensional para o teor de umidade ( $M^*$ ), expresso por:

$$M^* = \frac{M(x, t) - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (2.9)$$

onde:  $M$  é o teor de umidade;

$M_{eq}$  é o teor de umidade de equilíbrio;

$M_i$  é o teor de umidade no início do processo.

Ao substituir  $M$  por  $M^*$  não existe alteração da grandeza tratada, visto que a igualdade da Equação (6) continua válida após as diferenciações. Desta forma, a Equação (2.8) fica da forma:

$$\frac{\partial M^*}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M^*}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

Para utilização desta solução em um problema real, algumas considerações devem ser levadas em consideração Farias et al, (2009), que são:

- As dimensões do sólido não variam durante o processo de difusão;



- O sólido é considerado homogêneo e isotrópico;
- A temperatura do meio permanece constante durante o processo;
- A distribuição inicial da temperatura dever ser uniforme;
- A condução é o único mecanismo de transporte de calor no interior do sólido;
- O coeficiente de transferência convectiva de calor permanece constante durante o processo;
- A difusividade efetiva não varia durante o processo;
- Não há fonte geradora de calor no interior do produto.

Solucionar analiticamente a equação da difusão tem se mostrado uma forma eficiente de descrever processos que envolvam transferência de massa ou calor. No entanto, estes métodos apresentam limitações por serem realizados partindo de simplificações como já foi citado.

Apesar das limitações, soluções analíticas podem ser utilizadas para realizar descrições de processos simples de transferência de massa ou calor, principalmente quando estas soluções são usadas para fazer a validação de soluções numéricas da referida equação.

Existe vários trabalhos na literatura que apresentam soluções analíticas da equação da difusão para diferentes geometrias (CRANK, 1992; BIRD, 2001; INCROPERA, 2008; FARIAS et al., 2011, SILVA et al., 2012). Nestes trabalhos podem ser encontradas soluções da equação para diferentes geometrias simples e sob diferentes condições de contorno.

As geometrias simples mais utilizadas para soluções analíticas são: parede infinita, placa retangular, cilindro finito, cilindro infinito e esfera.

A exigência de estudos cada vez mais precisos quanto a processos que envolvam transporte de massa e/ou energia para servirem de subsídio em aplicações tecnológicas em indústrias, fez com que vários métodos computacionais fossem desenvolvidos para a solução da equação da difusão, uma vez que este modelo matemático é amplamente utilizado em estudos sobre fenômenos de transporte. O forte desenvolvimento computacional possibilitou soluções cada vez mais precisas para essa equação (ATAÍDE, 2014; ARAÚJO, 2018).

Nas soluções analíticas a equação é resolvida a partir da solução de um conjunto de equações diferenciais, onde é obtida uma solução exata e as grandezas de interesse podem ser obtidas para infinitos pontos do domínio estudado.

Já os métodos numéricos baseiam-se numa divisão do domínio estudado em pequenas partes, onde cada parte é representada por uma equação diferencial a ser resolvida, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. O conjunto de equações diferenciais formará um sistema de equações onde as variáveis são os valores da grandeza a ser calculada. Assim, a solução é dada para um número discreto de pontos e, quanto mais pontos forem considerados, mais precisa será a solução.

A vantagem deste método é permitir uma maior aproximação da solução para descrever as condições reais do objeto de estudo Maliska, (2012); (FARIAS, 2011) e Ataíde, (2014).

Quando se pretende obter soluções cada vez mais próximas da realidade nos processos difusivos, não se deve fazer hipóteses simplificadoras relacionadas à geometria do objeto estudado e, como consequência, a solução analítica se torna, em muitos casos, inviável. Neste caso, a solução da equação de difusão pode ser obtida por métodos numéricos e, portanto, sua aplicabilidade é bastante ampla. Os métodos numéricos podem ser utilizados para quaisquer situações físicas, desde as mais simples, quando as formas geométricas têm alto grau de simetria, como placas planas, esferas, cilindros infinitos e finitos, até as mais complexas formas geométricas.

Entre os métodos numéricos de solução de equações diferenciais podem ser citados os Métodos de Elementos Finitos (MEF), Diferenças Finitas (MDF) e de Volumes Finitos (MVF).

O método das diferenças finitas (MDF) consiste numa divisão discreta do domínio e na substituição das derivadas parciais por aproximações numéricas Maliska, (2012).

O MEF consiste em dividir o domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos. De acordo Maliska (2012), existem vários métodos para se definir a forma como o erro será minimizado. Tanto o MDF como o MEF não trabalham com volumes de controle e, sim, com pontos da malha e, conseqüentemente, em nível discreto.

Já o MVF consiste em dividir o domínio físico sob estudo em um número finito de subdomínios de volumes elementares denominados volumes de controle, que satisfazem a conservação da propriedade em questão em nível desses volumes elementares. A discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno, sobre cada volume de controle, no espaço e no tempo.

Segundo Maliska (2012) e Farias(2011) a vantagem do MVF é que ele permite trabalhar com volumes de controle, diferentemente do MDF e MEF que só trabalham com pontos da malha.

Pode-se encontrar vários trabalhos em que os autores utilizam o MVF para resolverem a equação de difusão numericamente, dos quais podemos citar: Silva et al. (2007); Farias, (2011); Silva L., (2012); Ataíde, (2014); Araújo (2018).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

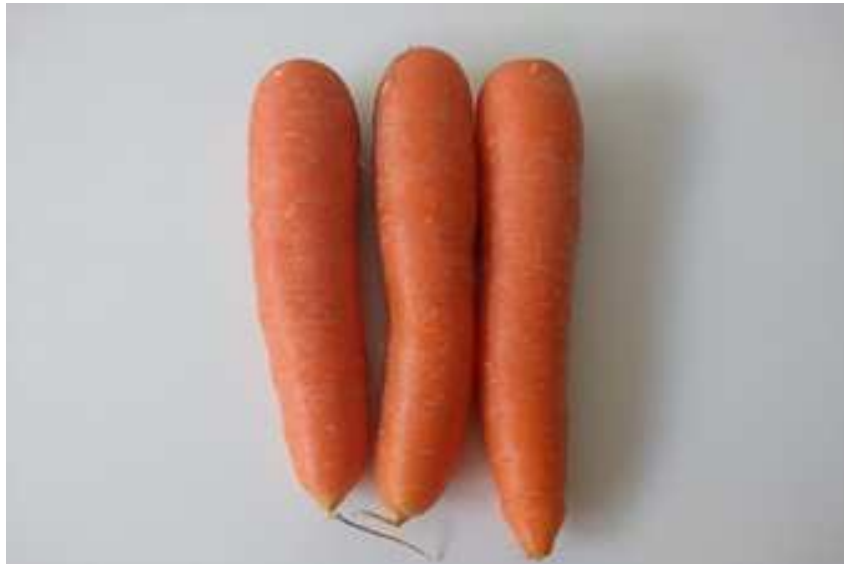
A pesquisa foi desenvolvida com o suporte do laboratório de Bromatologia (LABROM) do Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Cuité-PB.

Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa sem circulação forçada de ar. Onde foram feitas as secagens de discos de cenoura para as quatro seguintes temperaturas, 40, 50, 60 e 70 °C, e a partir dos dados experimentais encontrar a melhor equação dentre os modelos presentes na literatura que se ajuste a esses dados experimentais.

### 3.1 Matéria prima

Para a realização do experimento foram utilizadas cenouras adquiridas em um supermercado na cidade de Cuité-PB. Como pode ser veisto na Figura 7 a seguir:

Figura 7 – Cenouras utilizadas no processo de secagem



**Fonte:** Própria autoria

#### 3.1.1 Metodologia experimental

Antes de iniciar o processo de secagem, as cenouras foram lavadas em água corrente, aguardou-se as mesmas secarem a água e logo em seguida, foram fatiadas em discos com 5 mm

de espessura e, aproximadamente, 38 mm de diâmetro em média. Em seguida, os discos foram colocados em três cestos de alumínio identificados por códigos para facilitar na hora da pesagem.

Foram utilizados três cestos para cada temperatura ao qual o produto foi exposto, fazendo uma média aritmética dos dados obtidos, desta forma, conseguiu-se obter um resultado mais preciso.

Na Figura 8 a seguir apresentam-se os cestos juntamente com os discos de cenouras momento antes de iniciar o processo de secagem.

Figura 8 – Cestos utilizados no processo de secagem



**Fonte:** Própria autoria

Em cada um dos cestos da Figura 8 foi colocado aproximadamente 40g de discos de cenoura. Antes de iniciar o experimento, os três cestos utilizados nas secagens foram pesados e esses pesos foram denominados tara para fins de saber o valor da massa dos discos de cenouras presentes em cada um dos cestos durante o processo de secagem.

As pesagens foram feitas com uma balança digital pertencente ao laboratório do curso de licenciatura em Física da UFCG, campus Cuité, de marca BIOPRECISA modelo JH2102, com resolução de 0,01g e capacidade de 2100g, conforme mostrada na Figura 9 a seguir:

Figura 9 – Balança utilizada no processo de secagem



**Fonte:** Própria autoria

Em seguida, os cestos foram colocados, simultaneamente, dentro da estufa de circulação e renovação de ar para iniciar o experimento, regulada em uma das seguintes temperaturas, 40, 50, 60 e 70 °C.

Os intervalos de tempo para a realização da secagem foram inicialmente 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120 min e, assim por diante, sempre aumentando o tempo conforme a variação de massa em relação à medida pesada anteriormente. Assim nesses instantes de tempo, os cestos foram retirados e anotados sua respectiva massa naquele instante.

Este procedimento repetiu-se até que o peso constante (equilíbrio) fosse alcançado. Finalmente, ao chegar na temperatura de equilíbrio, a estufa foi ajustada para 105 °C, pois esta temperatura se encontra acima da temperatura de ebulição e, assim, pode-se garantir a retirada de toda a água presente na cenoura. Além disso, as amostras foram deixadas na estufa de circulação de ar por 24 horas a fim de determinar a massa seca.

Esta metodologia foi utilizada nos procedimentos com todas as temperaturas previamente definidas, ou seja, 40, 50, 60 e 70 °C.

## 3.2 Modelagem Matemática

### 3.2.1 Modelos empíricos para descrever a cinética

O método empírico consiste numa correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo com base em dados experimentais. Segundo Silva (2007), os modelos empíricos geralmente descrevem muito bem a cinética de secagem, mas não consegue prever a distribuição de umidade no interior do produto num determinado tempo especificado e nem numa dada posição.

Desta forma, Borges (2016) afirma que 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, procurando relacionar o teor de água e o tempo de secagem com dados obtidos experimentalmente. Diversos modelos matemáticos são propostos na literatura para o estudo da cinética de secagem dos materiais.

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

Os modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem deste trabalho, estão descritos na Tabela 5 a seguir, onde  $a$  e  $b$  são parâmetros de ajuste,  $t$  é o tempo (em minutos) e  $\bar{M}$  é a razão de umidade.

Tabela 5 – Modelos empíricos utilizados para descrever as cinéticas de secagem

Modelo	Nome	Equação empírica	Referência
M1	Page	$\bar{M} = \exp(-at^b)$	(DIAMANTE et al., 2010)
M2	Silva et alii	$\bar{M} = \exp(-at - bt^{1/2})$	(SILVA, et al., 2012)
M3	Peleg	$\bar{M} = \frac{a + t(b - 1)}{a + bt}$	(MERCALI et al., 2010)
M4	Wang e Singh	$\bar{M} = 1 + at + bt^2$	(KALETA; GÓRNICKI, 2010)
M5	Lewis	$\bar{M} = \exp(-at)$	(KALETA; GÓRNICKI, 2010)
M6	Henderson e Pabis	$\bar{M} = a \exp(-bt)$	(DIAMANTE et al., 2010)

### 3.2.2 Solução numérica da equação de difusão para parede infinita

A discretização da equação de difusão em coordenadas cartesianas foi feita utilizando o método dos volumes finitos (MVF), que se baseia no balanço de fluxos da grandeza de interesse, em um determinado volume de controle e intervalo de tempo, uma vez que o domínio deve ser discretizado.

A equação de difusão de massa (2.6) como já foi expressa anteriormente da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(M) = \nabla(D\nabla M) \quad (3.1)$$

onde M (função espaço-temporal) representa o teor de umidade e D é a difusividade efetiva de massa.

Assumindo a forma da geometria de uma parede infinita, onde x representa a posição da parede, a equação da difusão de massa, em coordenadas cartesianas e considerando regime transiente (variação de M com o tempo e difusividade efetiva de massa variável), é escrita na forma unidimensional através da seguinte equação:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), D é escrito dentro do parênteses, pois numa solução numérica, este parâmetro pode ser considerado como função indireta da posição, variando conforme a grandeza de interesse que é a massa (M). Esta é uma das vantagens de fazer a utilização de solução numérica, uma vez que a aproximação de que os parâmetros de transporte são constantes durante todo o processo, pode causar resultados inconsistentes com o fenômeno físico na sua forma real.

Assim, para resolver a equação (3.2), algumas considerações devem ser levadas em conta Farias et al., (2011), que são:

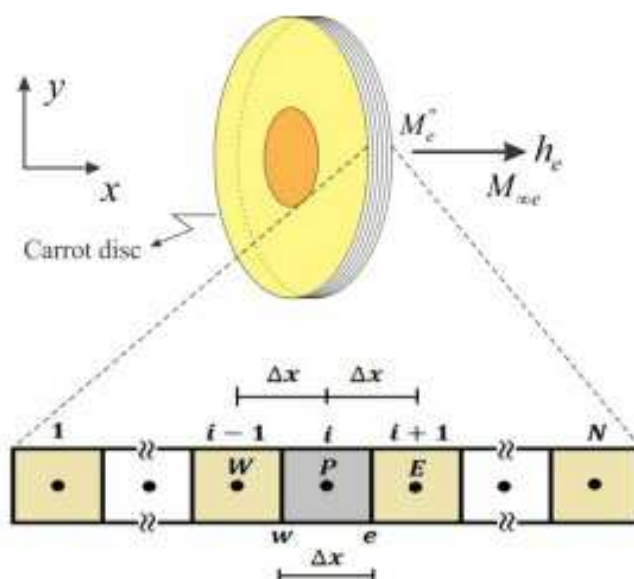
- O único mecanismo de transferência de massa é a difusão líquida;
- O sólido é considerado homogêneo e isotrópico;

- A temperatura do meio permanece constante durante o processo;
- A distribuição inicial da água dentro do produto dever ser uniforme;
- O coeficiente de transferência convectiva de calor permanece constante durante o processo;
- A difusividade efetiva de massa e a espessura do material podem variar durante o processo de secagem;

Por outro lado, para resolver a referida equação numericamente é necessário definir como será feita a divisão dos volumes de controle e como será o balanço dos fluxos da grandeza de interesse nesses elementos.

Desta maneira, o domínio unidimensional foi dividido em  $N$  volumes de controle, destacando um dos volumes de controle interno como o ponto nodal  $P$  e seus vizinhos a leste ( $E$ ) e a oeste ( $W$ ), como mostra a Figura 10 a seguir:

Figura 10 – Representação da geometria parede infinita discretizada - balanço dos volumes de controle.



**Fonte:** Silva junior et al. (2019)

Como pode-se observar na Figura 10, o ponto  $P$  é chamado de ponto nodal, onde o mesmo está ligado a dois volumes de controles, sendo um a oeste (representado por  $W$ ) e o outro a leste (representado por  $E$ ). Logo, neste domínio discretizado existem três tipos de volumes de controle. Pode-se inferir ainda da figura, que o fluxo da grandeza de interesse é considerado apenas na direção da parede infinita. A distância entre duas superfícies de um volume de controle é  $\Delta x$ , mesma distância entre os pontos centrais de dois volumes de controle vizinhos. As regiões de fronteiras são representadas por letras minúsculas ( $w$ ,  $e$ ).

Para integrar a Equação (3.2) para um volume de controle no espaço  $\Delta x$  e no tempo  $\Delta t$ , supõe-se que o teor de umidade em todos os pontos do volume de controle interno seja constante e igual ao valor no seu respectivo ponto nodal.

$$\int_t^{\Delta t} \int_w^e \frac{\partial M}{\partial t} dx dt = \int_t^{\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) dx dt \quad (3.3)$$

No entanto, as derivadas presentes na Equação (3.3) podem ser aproximadas da seguinte forma Maliska, (2012):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_p - M_p^0}{\Delta t} \quad (3.4)$$

onde o sobrescrito zero indica que a grandeza deve ser avaliada num instante anterior. Assim,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) = \frac{D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e - D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w}{\Delta x} \quad (3.5)$$

onde

$$\frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e = \frac{M_E - M_P}{\Delta x_e} \quad \text{e} \quad \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w = \frac{M_P - M_W}{\Delta x_w} \quad (3.6)$$

Substituindo as Equações (3.4) e (3.5) em (3.3) obtém-se:

$$\int_w^e \frac{M_P - M_P^0}{\Delta t} dx = \int_t^{\Delta t} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e - D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w \right) dt \quad (3.7)$$

O tratamento feito é sobre um domínio discretizado, mas o instante que deve-se considerar a avaliação da grandeza deve ser definido. De forma mais rigorosa, a Equação (3.7) deve ser reescrita como:

$$\int_w^e \left( \frac{M_P - M_P^0}{\Delta t} \Delta t \right) dx = \int_t^{t+\Delta t} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e - D \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w \right) dt \quad (3.8)$$

Resolvendo as integrais da Equação(3.8) e considerando as aproximações (3.6) de Maliska, (2012) obtém-se:

$$(M_P - M_P^0) \Delta x = \left( D_e \frac{M_e - M_P}{x_e} \Delta t \right) - \left( D_w \frac{M_P - M_W}{x_w} \Delta t \right) \quad (3.9)$$

Onde  $M_P$ ,  $M_E$  e  $M_W$  representam o teor de umidade nos pontos nodais dos volumes de controle interno ( $P$ ) e de seus vizinhos a leste ( $E$ ) e a oeste ( $W$ ), respectivamente;  $D_e$  e  $D_w$  são os valores das difusividades efetivas de massa nas interfaces leste e oeste, respectivamente;  $M_P^0$  é o teor de umidade no ponto nodal  $P$  no início do intervalo de tempo.

Estas aproximações mostradas na Equação (3.6), consistem basicamente em considerar que as variações do fluxo da grandeza de interesse entre dois pontos pode ser escrita como a



diferença entre o valor que a grandeza de interesse assume entre um ponto e outro, dividida pela distância entre esses dois pontos, considerando os volumes de controle mostrado na Figura (10)

Dividindo ambos os lados da equação (3.9) por  $\Delta t$  e reorganizando os termos semelhantes, obtém-se:

$$M_P \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{D_e}{\Delta x_e} + \frac{D_w}{\Delta x_w} M_W - \left( \frac{D_e}{\Delta x_e} + \frac{D_w}{\Delta x_w} \right) M_P \quad (3.10)$$

Da qual obtém a solução numérica da equação de difusão unidimensional para os volumes internos, cuja Equação está apresentada a seguir:

$$A_P M_P = A_e M_E + A_w M_W + B \quad (3.11)$$

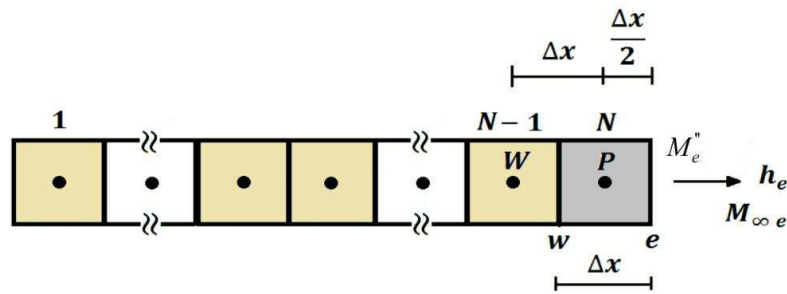
Onde os termos que estão nesta equação são expressos por:

$$A_P = \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\Delta_e}{\Delta x_e} + \frac{\Delta_w}{\Delta x_w} \right); \quad A_e = \frac{D_e}{\Delta x_e}; \quad A_w = \frac{D_w}{\Delta x_w} \quad \text{e} \quad B = M_P^0 \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.12)$$

### 3.2.3 Volume de controle a leste (e)

Na Figura (11) a seguir, pode-se ser visto que o volume de controle está a leste numa região de fronteira.

Figura 11 – Domínio discretizado com um volume de controle a oeste em destaque



Fonte: Silva junior et al., (2019)

Na Figura (11), os termos  $M_e''$  e  $h_e$  representam, respectivamente o fluxo de massa por unidade de comprimento e o coeficiente de transferência convectiva de massa no contorno leste, e  $M_{\infty e}$  é o teor de umidade de equilíbrio ao longo do contorno. O ponto P (nodal) desta Figura, indica qual o volume de controle que está sendo analisado.

A Equação (3.8) devidamente integrada, pode-se ser reescrita da seguinte maneira para o volume de controle a leste:

$$(M_P - M_P^0) \frac{\Delta x}{\Delta t} = \left( D_e \frac{M_e - M_P}{\frac{\Delta x_e}{2}} \right) - \left( D_w \frac{M_P - M_W}{\Delta x_w} \right) \quad (3.13)$$

onde:  $M_e$  é o valor da grandeza na fronteira a leste,  $M_P$  é o valor da grandeza no ponto nodal  $P$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo e as distâncias  $\frac{\Delta t}{2}$  e  $\Delta x_w$  são mostradas na figura (11).

Definindo-se o fluxo difusivo a leste ( $M_e''$ ) da seguinte forma:

$$M_e'' = -D_e \frac{M_e - M_P}{\frac{\Delta x_e}{2}} \quad (3.14)$$

Definindo-se o fluxo convectivo na fronteira a leste ( $M_e''$ ) como:

$$M_e'' = h_e (M_e - M_{\infty e}) \quad (3.15)$$

onde  $h_e$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa no contorno leste e  $M_{\infty e}$  é o valor da grandeza de interesse no meio exterior.

Daí, da condição de contorno convectiva, os fluxos difusivos e convectivos respectivamente são iguados na superfície do sólido, neste caso, fronteira leste, de modo que:

$$-D_e \frac{M_e - M_P}{\frac{\Delta x_e}{2}} = h_e (M_e - M_{\infty e}) \quad (3.16)$$

Da Equação (3.16) pode-se escrever  $M_e$  como sendo:

$$M_e = \frac{h_e M_{\infty e} + \frac{2D_e M_P}{\Delta x_e}}{h_e + \frac{2D_e}{\Delta x_e}} \quad (3.17)$$

Substituindo a Equação (3.17) em (3.13), obtém-se que a Equação de difusão unidimensional discretizada para o volume de controle a leste é dado por:

$$M_P \frac{\Delta x}{\Delta t} + \left[ \left( \frac{2h_e}{h_e \Delta x_e + 2D_e} \right) + \frac{D_w}{\Delta x_w} \right] M_P = \left( \frac{D_w}{\Delta x_w} \right) M_W + \left( \frac{2D_e h_e}{h_e \Delta x_e + 2D_e} \right) M_{\infty e} + M_P^0 \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.18)$$

Ainda pode-se escrever a Equação (3.18) da seguinte maneira:

$$A_P M_P = A_w M_W + B \quad (3.19)$$

onde os termos  $A_P$ ,  $A_w$  e  $B$  são expressos por:

$$A_P = \frac{\Delta x}{\Delta t} + \left( \frac{2D_e h_e}{h_e \Delta x_e + 2D_e} \right) + \frac{D_w}{\Delta x_w} \quad (3.20)$$

$$A_w = \frac{D_w}{\Delta x_w} \quad \text{e} \quad B = \left( \frac{2D_e h_e}{h_e \Delta x_e + 2D_e} \right) N_{\infty e} + M_P^0 \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.21)$$

**Observação 3.1** *A solução da equação para o volume de controle a oeste é feita de modo análogo ao tratamento feito para o volume de controle a leste.*

Considerando as hipóteses para a obtenção da solução numérica para a Equação difusão, a discretização foi realizada assumindo que a difusividade  $D$  pode variar com o valor local do teor de umidade, isto é,

$$D = f(M, a, b) \quad (3.22)$$

onde  $a$  e  $b$  são parâmetros de ajuste da expressão para  $D$ , obtidos por meio de otimização computacional a partir dos dados experimentais, e  $M$  é o teor de umidade local. Desta forma, o valor do parâmetro  $D$  nos pontos nodais pode ser calculado fazendo-se uso da Equação (3.22). Por outro lado, pelas discretizações apresentadas, é perceptível que é necessário a obtenção do valor do parâmetro  $D$  nas interfaces de cada volume de controle.

Numa malha em que é considerada uniforme, o valor de  $D$  na interface entre os volumes de controle  $P$  e  $E$ , é obtido através da seguinte expressão:

$$D_e = \frac{2D_P D_E}{D_P + D_E} \quad (3.23)$$

Quando os valores para o parâmetro  $D$  não puderem ser calculados usando a equação (3.23), considera-se que para os volumes de controle de contorno, esses valores são iguais aos valores para  $D$  nos seus pontos nodais do respectivo volume que se estiver analisando.

### 3.3 Análises Físico- químicas

Em relação às análises físico-químicas realizou-se a determinação da umidade, cinzas, proteínas, lipídeos, pH, acidez, atividade de água ( $W_a$ ) e carboidratos (por diferença). Os resultados das análises físico-químicas foram expressos em base úmida, de modo a permitir a comparação direta entre os valores das diferentes amostras.

Para a determinação das análises físico-químicas as amostras de cenoura foram trituradas ficando tipo farinha, tanto para as análises da cenoura em fresco como para as amostras submeti-

das a secagem. Para as análises foram efetuadas 5 amostras, sendo que para cada uma delas, foi feita em triplicata como recomenda a literatura para um resultado mais preciso.

O conselho da nutrição recomenda que para

### **Umidade**

A determinação da umidade dos alimentos é uma das medidas mais utilizadas em análise dos alimentos, sendo uma das mais importantes a realizar. No processo de secagem esta determinação é fundamental, uma vez que a umidade de um alimento está relacionada com a sua estabilidade, qualidade e composição Park; Antonio; (2007).

Para a realização da análise de umidade foi utilizada uma balança analítica de precisão do laboratório da UFCG – CES, assim como todas as demais condições para a realização da análise. Sendo assim, foi definido que a massa fosse de 2g da amostra da farinha de cenoura.

O cálculo da análise da amostra de umidade se dar da seguinte maneira:

$$\frac{10 \times N}{P} = \text{Umidade ou substâncias voláteis a } 105^{\circ} \text{ C m/m}$$

onde:

N= nº de gramas de umidade (perda de massa em g)

P= nº de gramas da amostra

### **Cinzas**

A cinza (total) refere-se ao resíduo após a incineração de matéria orgânica. Na via seca, os alimentos são incinerados num cadinho, geralmente feito de silicone, porcelana ou platina. De forma a evitar a formação de espuma de lípidos (e açúcares), a matriz alimentar deve ser destruída por aquecimento suave numa mufla a 550 °C, até ser produzido um resíduo branco ou cinza claro. Um aquecimento acima dos 550 °C pode originar a perda de metais alcalinos Greenfield e Southgate, (2003).

As cinzas foram determinadas através do método de Weende AOAC, (2000). Colocaram-se os cadinhos na mufla a 550 °C durante 1 hora, para serem calcinados. Após este tempo, foram colocados num exsiccador até temperatura ambiente.

Logo adiante, determinou-se o peso dos cadinhos, adicionou-se cerca de 2 g de amostra e estes foram colocados na mufla à temperatura de 550 °C até a obtenção de um resíduo branco.

Por fim, colocou os cadinhos novamente no exsiccador até sua temperatura ambiente ser atingida, e em seguida foram feitas as pesagens dos mesmos.

O cálculo da análise da amostra de Cinzas se dar da seguinte maneira:

$$\frac{P_{final} - T}{B - T} \times 100 = \text{Cinzas } \%$$

onde:

$$P_{final} = \text{Peso cadinho} + \text{amostra (conjunto)} + \text{cinza (g)}$$

$T$  = tara do cadinho

$B$  = peso do cadinho + amostra(g)

$P$  = n° de gramas da amostra

### **pH e acidez**

Os processos que avaliam o pH são colorimétricos ou eletrométricos. Os primeiros usam certos indicadores que produzem ou alteram sua coloração em determinadas concentrações de íons de hidrogênio.

São processos de aplicação limitada, pois as medidas são aproximadas e não se aplicam às soluções intensamente coloridas ou turvas, bem como às soluções coloidais que podem absorver o indicador, falseando os resultados.

Desta forma, foram pesados 10g da amostra em um béquer e diluído com auxílio de 100 mL de água. Agitando-se o conteúdo até que as partículas fiquem uniformemente suspensas. Assim o pH foi determinado com o aparelho previamente calibrado. A determinação de acidez pode fornecer um dado valioso na apreciação do estado de conservação de um produto alimentício.

Um processo de decomposição, seja por hidrólise, oxidação ou fermentação, altera quase sempre a concentração dos íons de hidrogênio.

O método de determinação da acidez foi os que avaliam a acidez titulável por meio do pH, utilizando o reagente hidróxido de sódio.

### **Atividade de água $W_a$**

A  $W_a$  tem sido considerada uma propriedade fundamental no controle da qualidade dos alimentos. Nenhum microrganismo cresce num meio totalmente seco, necessitando de água para desenvolver as suas funções, sendo que essa água tem que ser livre, ou seja, não pode estar ligada a nenhuma outra substância.

Cada tipo e espécie de organismo tem uma exigência mínima e máxima de teor de água no meio, uma vez que fora desta faixa poderá ter o seu metabolismo comprometido Neto et al., (2005).

A atividade de água  $W_a$  foi realizada pelo equipamento *AquaLab* que é um psicrômetro que utiliza a técnica do ponto de orvalho em espelho resfriado para medida de atividade de água.

### **Lipídeos**

Os lipídios são compostos orgânicos altamente energéticos, contêm ácidos graxos essenciais ao organismo e atuam como transportadores das vitaminas lipossolúveis. Os lipídios são substâncias insolúveis em água, solúveis em solventes orgânicos, tais como éter, clorofórmio

e acetona, dentre outros. Estes são classificados em: simples (óleos e gorduras), compostos (fosfolipídios, ceras etc.) e derivados (ácidos graxos, esteróis).

Os óleos e gorduras diferem entre si apenas na sua aparência física, sendo que à temperatura ambiente os óleos apresentam aspecto líquido e as gorduras, pastoso ou sólido.

### **Proteínas e carboidratos**

As proteínas seguiram a metodologia de micro-Kjeldhal (960.42), e para estimar sua quantidade, o valor do nitrogênio foi multiplicado pelo fator de conversão para proteínas vegetais ( $N \times 5,75$ ). A quantificação de carboidratos “disponíveis” foi feita pelo método fenolsulfúrico e expressa na base úmida (g/100g). Os carboidratos “disponíveis” por diferença foram obtidos pela somatória dos valores de umidade, proteínas, lipídios, cinzas, atividade de água, pH e acidez subtraídos de 100.

## **3.4 Softwares utilizados**

Usando a Equação a seguir, foi possível encontrar a média para os valores de  $\bar{M}$  dos três cestos utilizados para cada temperatura.

$$\bar{M} = \frac{\bar{M}_{bs} - \bar{M}_e}{\bar{M}_i - \bar{M}_e}$$

Desta forma, obtém-se os dados necessários para a construção dos gráficos com os dados experimentais e averiguar quais dos modelos empíricos melhor simulam os gráficos em relação aos dados experimentais.

A partir das tabelas contendo as informações da média dos  $\bar{M}$  para cada temperatura e o tempo medido, foi utilizado um software para determinação dos parâmetros dos modelos empíricos já mencionados na Tabela 5.

Assim, o programa utilizado foi *LAB Fit Curve Fitting Software*, versão 7.2.49, desenvolvido por (SILVA, 2011). Este *software* apresenta uma interface muito simples, onde deve-se carregar o conjunto de pontos experimentais obtidos no processo de secagem (teor de umidade, tempo) num arquivo texto.

Com os dados obtidos para cada temperatura analisada, vai-se na interface do *software Lab Fit*, clica-se em *New* e cola os dados diretamente usando o botão *paste* na caixa de diálogo “*Data: general information*” que irá aparecer após clicar em *New*, abrindo duas colunas, onde a primeira se refere a variável independente e a segunda referente à variável dependente que é o teor de umidade.

Em seguida, procura nos atalhos *Curve Fit*, e vai em 3 para inserir a função referente ao modelo empírico, colocando o número de parâmetros a determinar de acordo com cada modelo especificado. Em seguida clica-se em *OK* e assim abre uma caixa de diálogo, onde pode-se

salvar os detalhes dos parâmetros obtidos pelo programa para cada modelo empírico. Por último vai em *Graph* e gera o gráfico em 2D, onde no mesmo aparecem os dados experimentais e a curva simulada pelo programa.

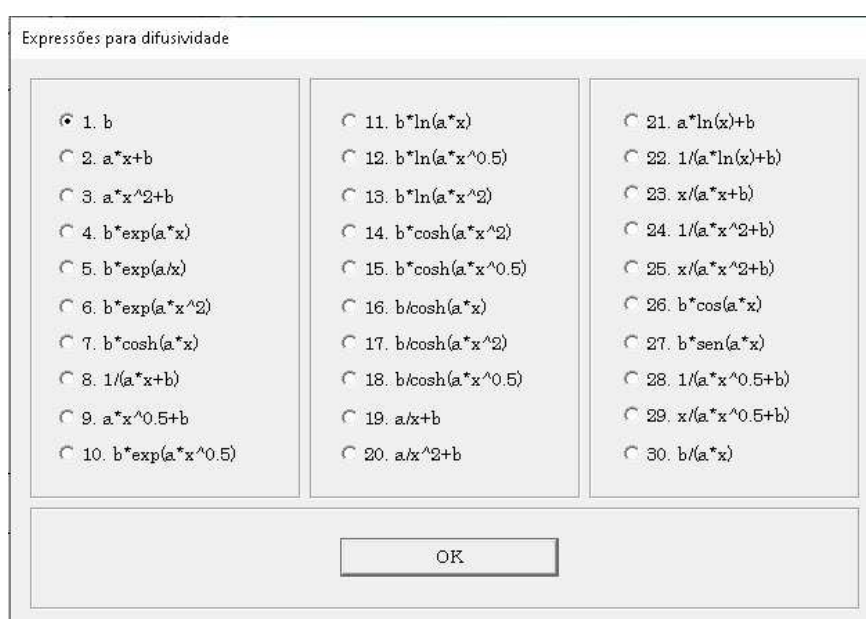
O processo de otimização com a solução numérica deve ser realizado por meio do acoplamento a um otimizador computacional. Assim, se emprega o método inverso, que consiste na atribuição de valores aos parâmetros da solução da equação que descreve o sistema, criar uma solução e compará-la com os dados experimentais conhecidos do referido sistema estudado Silva, (2007); Farias, (2011); Araújo, (2016).

Neste sentido, existe um software que é um otimizador acoplado a solução numérica da equação de difusão unidimensional. Trata-se do “*Infinite Slab Numerical*”, desenvolvido por Silva Júnior, (2018).

Esse software possui uma interface gráfica muito bem autoexplicativa. Para a realização das simulações é necessário carregar o conjunto de dados experimentais e em seguida clicar na aba “*otim*”, que fará com que surja no momento uma caixa de diálogo onde devem ser informados a espessura do objeto dado em metros; os valores dos teores inicial e de equilíbrio; número de *volumes de controle* (em quantas partes a malha vai ser dividida); número de *steps de tempo* (divisão do tempo total do processo em instantes iguais).

Logo em seguida, após o carregamento de todos estes dados e clicar em “*ok*” na caixa de diálogo, surgirá outra caixa de diálogo, onde são disponibilizadas trintas (30) funções para a difusividade, onde a grandeza de interesse nessas funções da Figura(12) a seguir, é representada pela letra “*x*”.

Figura 12 – Caixa de diálogo com todas as funções para a difusividade.



Fonte: *Infinite Slab Numerical*

Logo adiante, após a escolha de uma das funções para a difusividade e clicar-se em "OK", outra caixa de diálogo surgirá solicitando que o usuário suponha valores iniciais para os parâmetros " $a$ " e " $b$ ", bem como o do coeficiente convectivo ( $h$ ) que é considerado constante. Em seguida o processo de otimização é iniciado e quando obter os dados procurados, uma nova caixa de diálogo surgirá na interface no *software*.

Pode-se encontrar maiores detalhes sobre o processo de otimização deste software em Silva Junior (2015). Após obter os valores da otimização, pode-se fazer a simulação, gerando o gráfico da simulação da cinética de secagem, onde podem ser visualizadas as distribuições do teor de umidade durante a secagem para os devidos instantes de tempo que deseja visualizar esses gráficos de contorno.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Modelos empíricos

Como já foi mencionado anteriormente, Borges et al., (2016) enfatizam que muitos trabalhos são encontrados facilmente na literatura com a finalidade de descrever a cinética do processo de secagem de um determinado produto, sejam farmacêuticos, agrícolas, cerâmicos, construção civil e etc.

Os modelos empíricos são geralmente mais simples e de fácil aplicação, uma vez que são fundamentais na análise de dados experimentais e dimensionais, bem como na análise estatística.

Segundo Palacin et al., (2005), a utilização de modelos matemáticos nas simulações de secagens tem auxiliado o desenvolvimento, a avaliação de programa e a otimização de secadores.

Sendo assim, após a realização dos experimentos, foram obtidos os valores do teor de umidade em base seca de acordo com a equação (2.2). Em seguida os conjuntos de dados foram analisados para cada modelo apresentado na Tabela (5).

Neste trabalho, o teor de umidade de equilíbrio (quando o objeto de estudo, neste caso a cenoura, não perde mais água ou sua perda já é insignificante em relação a sua última pesagem) e o teor de umidade inicial (quantidade de água presente no material no início do processo de secagem) foram determinados experimentalmente e podem ser observados na tabela (6) a seguir.

Tabela 6 – Teor de umidade inicial e de equilíbrio para as quatro diferentes temperaturas.

$T^{\circ}C$	$\bar{M}_i$	$\bar{M}_e$
40	8.070	0.178
50	8.238	0.184
60	8.836	0.108
70	8.698	0.114

**Fonte:** Própria autoria

#### 4.1.1 Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas

Com o auxílio do *LAB Fit Curve Fitting Software*, foi possível determinar os parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos em relação aos modelos empíricos apresentados na Tabela (5).

Os resultados obtidos para os parâmetros de ajuste estatísticos, com o auxílio na realização de regressões não lineares para cada um dos modelos e temperaturas usadas neste trabalho,

apresentam-se nas Tabelas (7), (8), (9) e (10) a seguir, nas quais estão os parâmetros calculados a partir do ajuste de cada equação aos dados experimentais, bem como os indicadores estatísticos dos quais pôde-se escolher o melhor modelo com base no coeficiente de determinação  $R^2$  e qui-quadrado  $\chi^2$ .

As classificações dos modelos empíricos estudados estão em ordem decrescente, do melhor ao menos favorável aos dados experimentais. Após cada uma das tabelas, apresentam-se os gráficos de cada modelo empírico referente aos dados experimentais com relação aos dados simulados para as respectivas temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C.

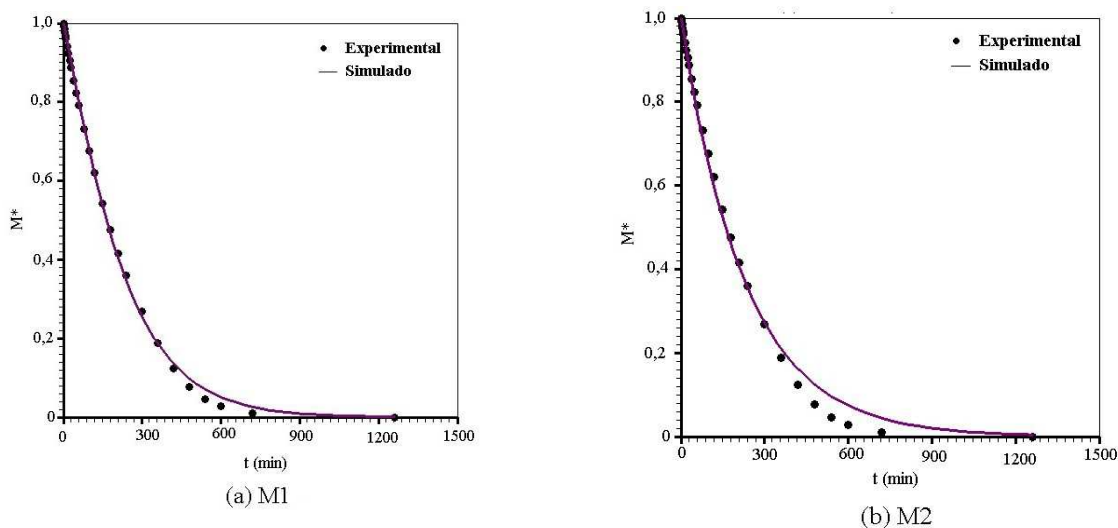
Tabela 7 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 40 °C.

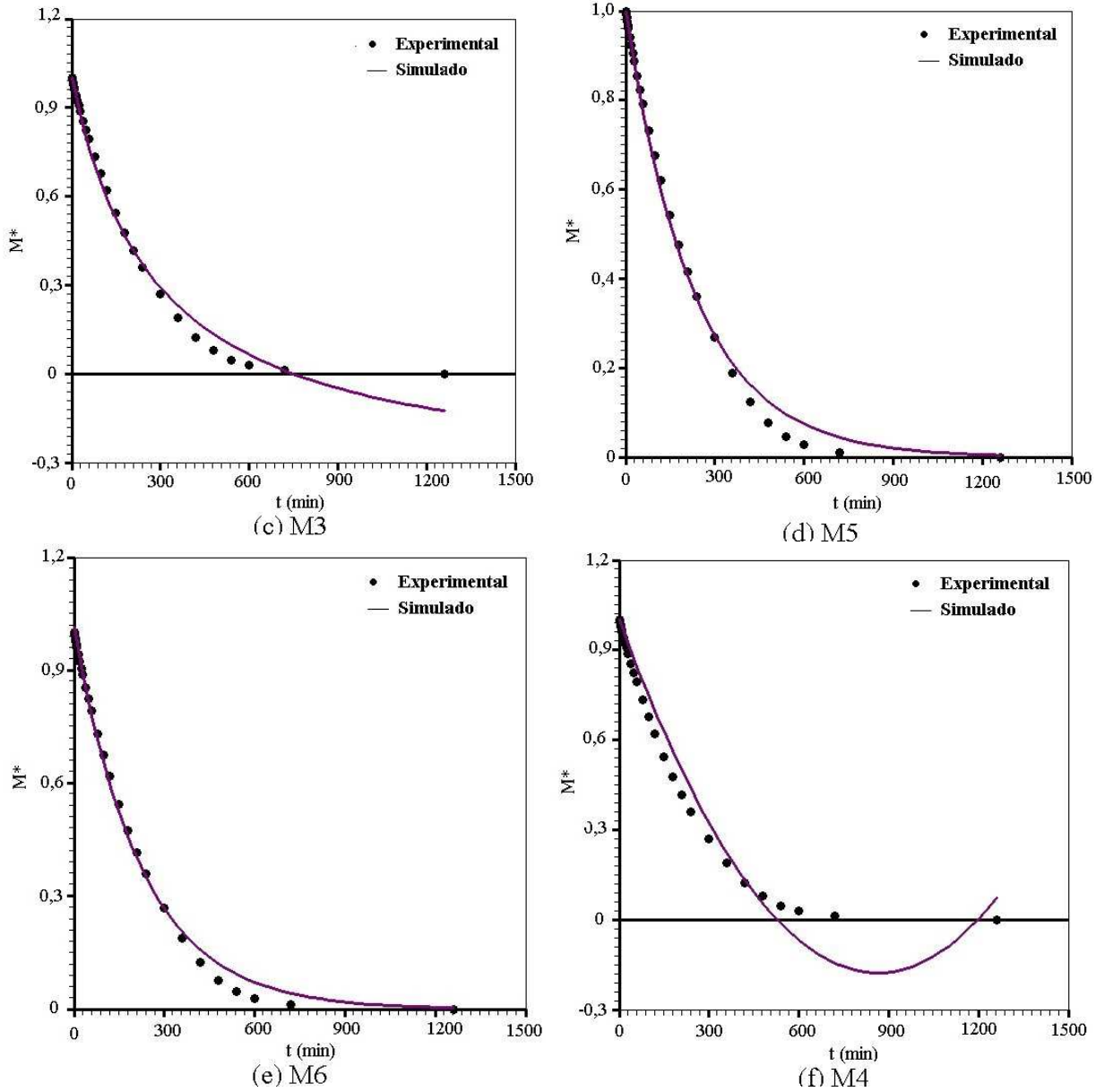
Modelo	$a$	$b$	$R^2$	$\chi^2$
M1	$2.24856 \times 10^{-3}$	1.12393	0.9990470	$4.16549 \times 10^{-3}$
M2	$-7.82877 \times 10^{-3}$	$2.43423 \times 10^{-2}$	0.9976518	$1.42777 \times 10^{-2}$
M3	$2.05834 \times 10^2$	0.72421	0.9910186	$3.55246 \times 10^{-2}$
M5	$4.34240 \times 10^{-3}$	-	0.9976518	$2.70000 \times 10^1$
M6	1.014086	$4.43951 \times 10^{-3}$	0.9972255	$1.23924 \times 10^{-2}$
M4	$-2.73128 \times 10^{-3}$	$1.58269 \times 10^{-6}$	0.9814657	$9.61071 \times 10^{-2}$

Fonte: Própria autoria

Observando os indicadores estatísticos na Tabela (7), pôde-se concluir que o melhor modelo para descrever as cinéticas de secagem na temperaturas de 40 °C foi o modelo M1 (Page), pois apresenta os melhores indicadores estatísticos, o segundo melhor modelo foi o M2 (Silva et alii) e o menos favorável aos dados experimentais foi o M4 (Wang e Singh). Na Figura (13) a seguir estão os gráficos da curva para os modelos empíricos com temperatura de 40 °C.

Figura 13 – Simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software *LAB FIT* para a temperatura de 40 °C.





Fonte: Própria autoria

Na Figura anterior, pode-se perceber que a cinética da curva feita pelo software sobrepõe muito bem os dados experimentais, destacando que o modelo M1 realmente consegue descrever a melhor curva de cinética para a temperatura de 40 °C.

Na Tabela (8) a seguir é apresentado os dados para a temperatura de 50 °C e em seguida estão os gráficos referentes à simulação feita pelo *software LAB Fit*.

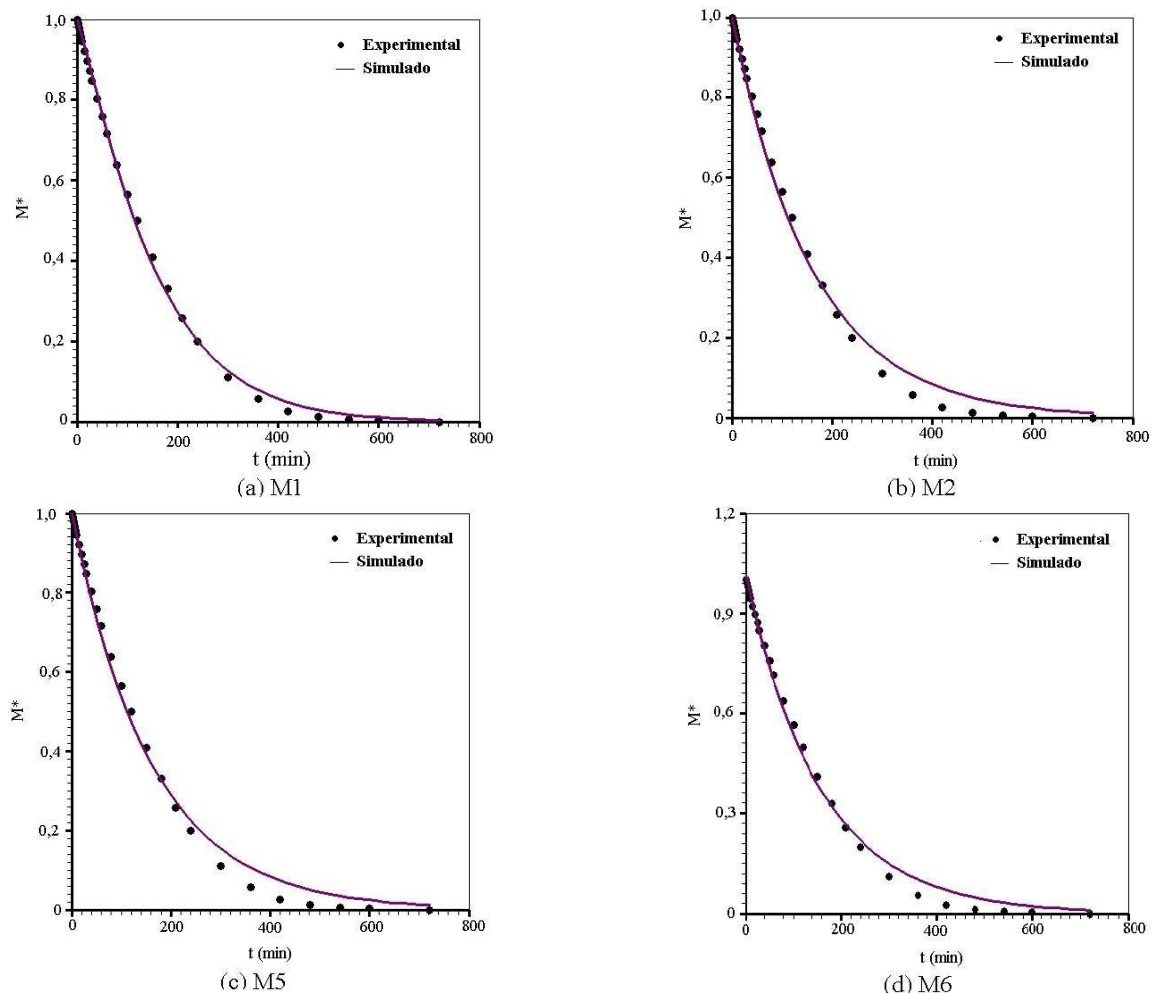
Tabela 8 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 50 °C.

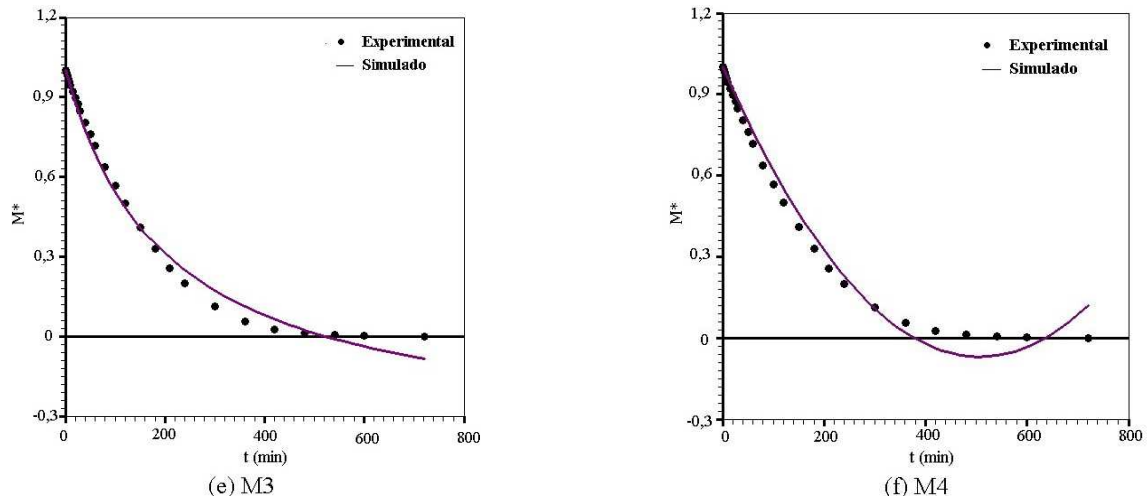
Modelo	$a$	$b$	$R^2$	$\chi^2$
M1	$3.14530 \times 10^{-3}$	1.13734	0.9991564	$3.98413 \times 10^{-3}$
M2	$-6.89204 \times 10^{-3}$	$2.62158 \times 10^{-2}$	0.9978413	$1.57979 \times 10^{-2}$
M5	$6.21594 \times 10^{-3}$	-	0.9978411	$1.57979 \times 10^{-2}$
M6	1.01785	$6.39014 \times 10^{-3}$	0.9973224	$1.31914 \times 10^{-2}$
M3	$1.46595 \times 10^2$	$7.18570 \times 10^{-1}$	0.9932693	$2.8207 \times 10^{-2}$
M4	$-4.22014 \times 10^{-3}$	$4.15971 \times 10^{-6}$	0.9890490	$5.55086 \times 10^{-2}$

Fonte: Própria autoria

Observando os indicadores estatísticos na tabela (8), pode-se concluir que o melhor modelo para descrever as cinéticas de secagem na temperatura de 50 °C também foi o modelo M1 (Page), seguido pelo modelo M2 (Silva et Alii) e o menos favorecido foi M5 de (Wang e Singh). A seguir apresentam-se os gráficos referentes à simulação feita pelo *LAB Fit* para a temperatura de 50 °C, em relação aos dados experimentais e os simulados pelo *Software*.

Figura 14 – Simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software *LAB FIT* para a temperatura de 50 °C.





Fonte: Própria autoria

A seguir apresenta-se a Tabela (9) os dados obtidos pelo Software para a temperatura de 60 °C.

Tabela 9 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 60 °C.

Modelo	$a$	$b$	$R^2$	$\chi^2$
M1	$3.64853 \times 10^{-3}$	1.18665	0.9993666	$3.13354 \times 10^{-3}$
M5	$8.63531 \times 10^{-3}$	-	0.9970638	$2.24011 \times 10^{-2}$
M6	1.02941	$9.03164 \times 10^{-3}$	0.9967429	$1.63396 \times 10^{-2}$
M2	$9.03176 \times 10^{-3}$	$5.79728 \times 10^{-2}$	0.9967427	$1.63396 \times 10^{-2}$
M3	$9.46919 \times 10^1$	$8.03170 \times 10^{-1}$	0.9837337	$8.01898 \times 10^{-2}$
M4	$-4.09096 \times 10^{-3}$	$3.45762 \times 10^{-6}$	0.914728	$5.25962 \times 10^{-1}$

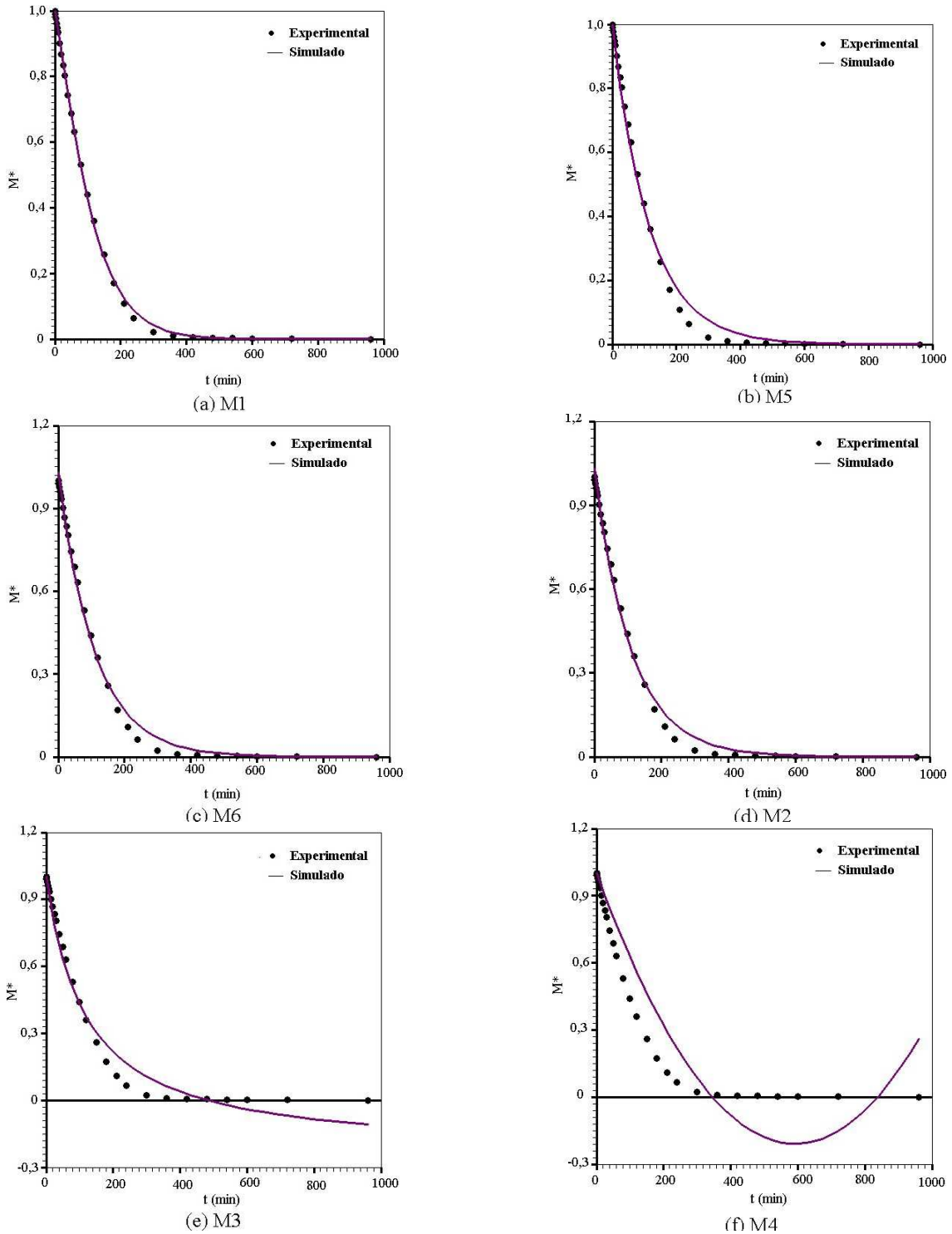
Fonte: Própria autoria

Observando os indicadores estatísticos na Tabela a seguir, pode-se concluir que o melhor modelo para descrever as cinéticas de secagem na temperatura de 60 °C foi o modelo M1 (Page), o segundo melhor modelo foi o M5 (Lewis) e o menos favorecido foi M4 de (Wang e Singh).

Um fato bastante interessante são os valores estatísticos entre os modelos M6 (Henderson e Pabis) e o M2 de (Silva et Alii) que são praticamente os mesmos.

Na Figura a seguir, estão apresentados os gráficos que descrevem simulação das curvas para os modelos empíricos com o auxílio do software *LAB FIT*.

Figura 15 – simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software *LAB FIT* para a temperatura de 60 °C.



Fonte: Própria autoria

A seguir apresenta-se a Tabela (10) com os dados para a temperatura de 70 °C.

Tabela 10 – Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais para a temperatura de 70 °C.

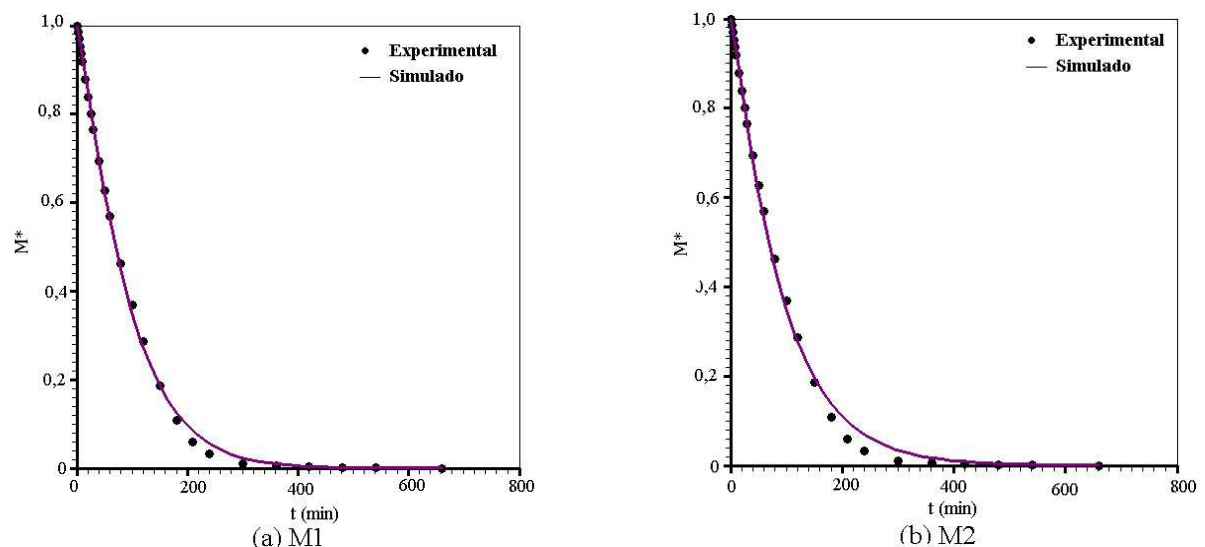
Modelo	$a$	$b$	$R^2$	$\chi^2$
M1	$5.04000 \times 10^{-3}$	1.159531	0.9992687	$3.23383 \times 10^{-3}$
M2	$1.22175 \times 10^{-2}$	$-0.16808 \times 10^{-2}$	0.9982674	$7.76574 \times 10^{-3}$
M5	$1.02402 \times 10^{-2}$	-	0.9975279	$1.75268 \times 10^{-2}$
M6	1.02631	$1.06626 \times 10^{-2}$	0.9971698	$1.30754 \times 10^{-2}$
M3	$8.13046 \times 10^1$	$7.90093 \times 10^{-1}$	0.9860118	$6.16111 \times 10^{-2}$
M4	$-5.61026 \times 10^{-3}$	$6.72286 \times 10^{-6}$	0.9498894	$2.71940 \times 10^{-1}$

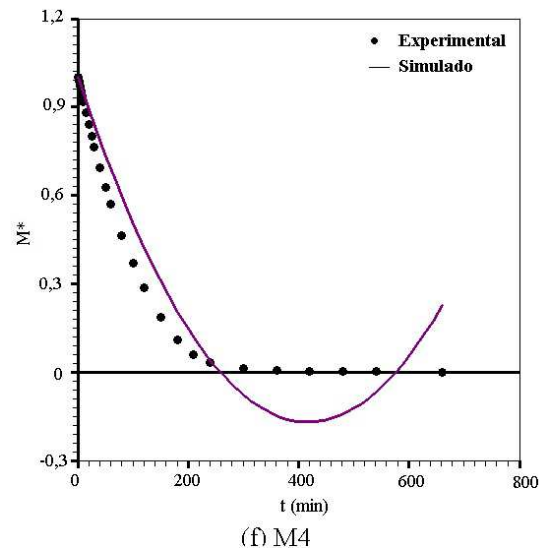
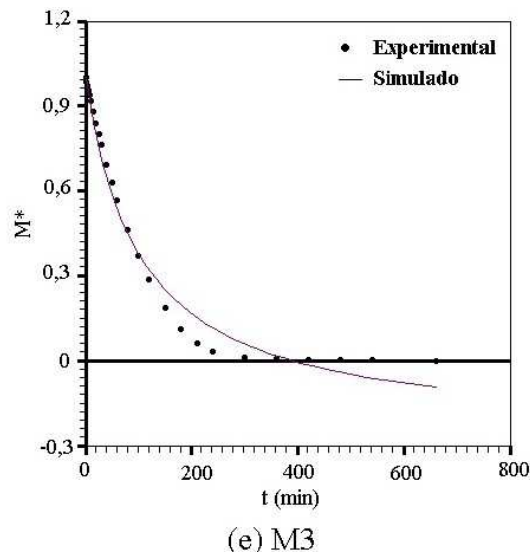
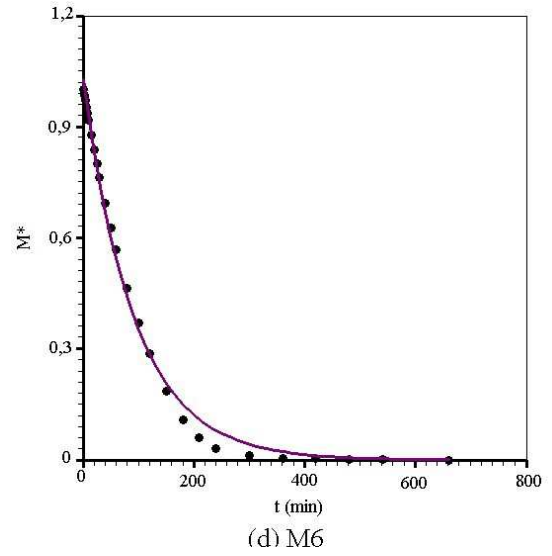
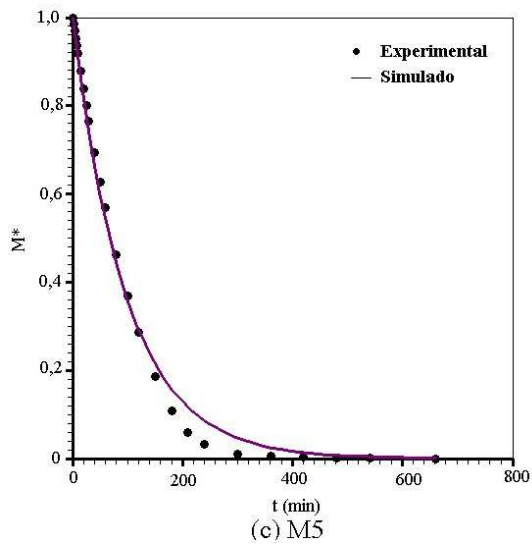
Fonte: Própria autoria

Assim, observando os indicadores estatísticos na Tabela (10), pode-se concluir que o melhor modelo para descrever as cinéticas de secagem na temperatura de 70 °C foi o modelo M1 (Page), o segundo melhor modelo foi o M2 (Silva et Alii) e o menos favorecido foi M4 de (Wang e Singh).

A seguir apresentam-se a Figura (16) com os gráficos referentes à simulação feita pelo *LAB Fit* para a temperatura de 70 °C, em relação aos dados experimentais e os simulados pelo Software.

Figura 16 – simulação das curvas para os modelos empíricos pelo software *LAB FIT* para a temperatura de 70 °C.





**Fonte:** Própria autoria

Diante disso, pode-se afirmar que o melhor modelo empírico que descreve a cinética de secagem dos discos de cenoura entre as temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C, foi o M1 (Modelo de Page).

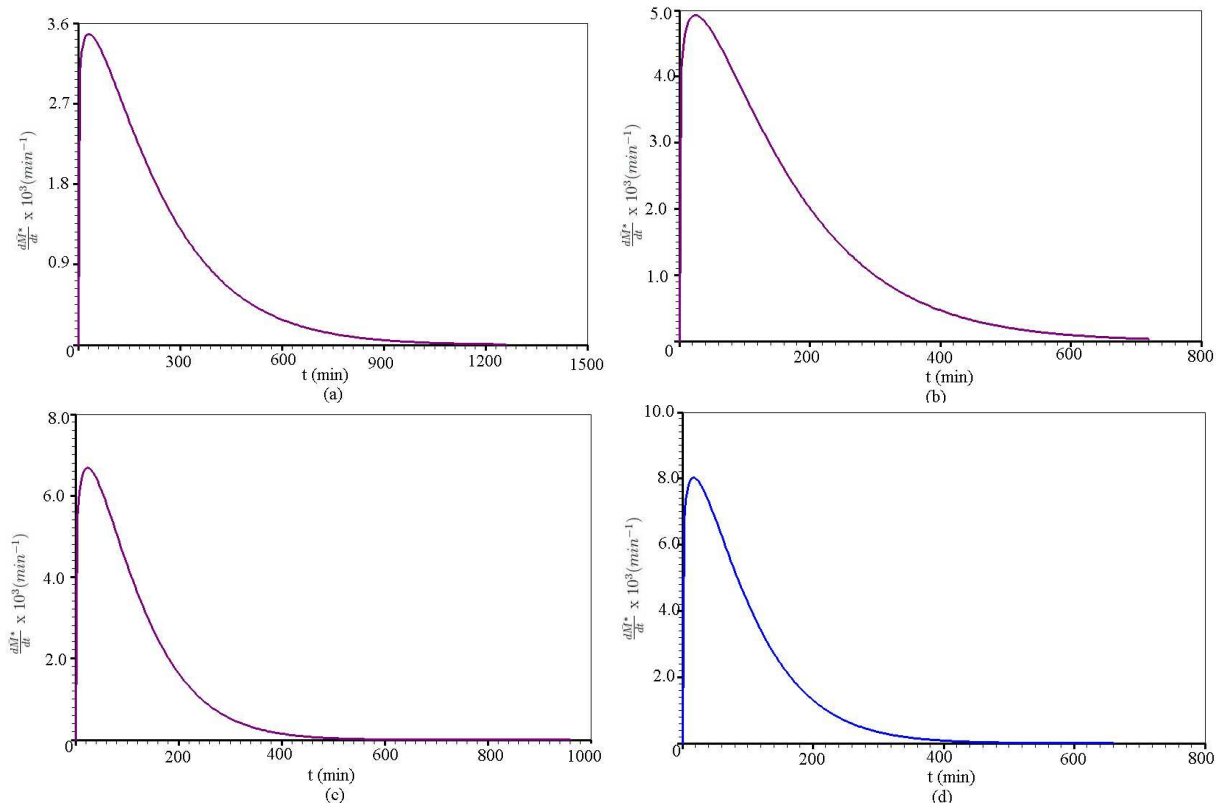
Para obter a taxa de secagem para todas as temperaturas estudadas, a equação do melhor modelo que descreveu a cinética de secagem Modelo de Page (M1) foi derivada em função do tempo, sendo expressa da seguinte maneira:

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

A partir da equação (4.1), foram obtidas as taxas de secagem para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os gráficos dessas taxas podem ser observados na Figura (17) a seguir:



Figura 17 – simulações da taxa de secagem usando o modelo M1 (Page) para as temperaturas: (a)  $T= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $T= 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $T= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  e (d)  $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Fonte:** Própria autoria

Através da Figura (17) é possível observar que a taxa de secagem apresenta um período inicial no qual é crescente. Este período ocorre durante o aquecimento do produto. A medida que este produto é aquecido pelo ar de secagem, ocorre um aumento na pressão de vapor e na taxa de secagem até que a temperatura de bulbo úmido seja atingida por ele. Este período é conhecido como Período de Indução Fioreze, (2004).

## 4.2 Modelos difusivos

Agora serão apresentados os resultados das otimizações realizadas com o otimizador acoplado à solução numérica da equação de difusão unidimensional (parede infinita) com condição de contorno convectiva. Foram testadas 4 funções para a difusividade do programa *Infinite Slab Numerical*, o qual já foi descrito no capítulo 3, considerando a espessura constante e 4 funções para a espessura variável.

Os resultados das otimizações estão mostradas na subseção a seguir, onde as funções utilizadas estão colocadas em ordem decrescente para os valores dos indicadores estatísticos qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### 4.2.1 Resultados das otimizações com o software Infinite Slab Numerical

O processo de otimização consistiu na utilização de algumas funções para a difusividade ( $D$ ), considerada como sendo função dependente do teor de umidade. As funções utilizadas são mostradas na tabela a seguir, onde a forma das funções e sua representação estão destacadas.

Tabela 11 – Funções e sua representação

Função	Representação
$b$	$F_1$
$aM^2 + b$	$F_2$
$bexp(aM)$	$F_3$
$bcosh(aM)$	$F_4$

**Fonte:** Própria autoria

Os dados obtidos foram simulados com uma malha unidimensional de 500 volumes de controle (a espessura da cenoura foi dividida em 500 volumes de controle iguais) e com 500 passos no tempo (steps de tempo) para as devidas temperaturas já definidas. Ao todo foram realizadas 32 simulações, sendo 16 considerando a espessura da cenoura constante e 16 considerando-a variável.

Os resultados das otimizações com os dados dos quatro (4) experimentos realizados estão destacados a seguir, onde são mostrados os valores de  $a$  e  $b$  que são os parâmetros de ajuste que aparecem nas funções do software acoplado a solução numérica, bem como os valores ótimos para os indicadores estatístico ( $\chi^2$ ) e ( $R^2$ ) e do coeficiente convectivo ( $h$ ), gerados a partir da otimização do referido programa, assim as funções estão organizadas em ordem decrescente do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), juntamente com o menor valor para o qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

### Resultados para o experimento da cenoura com espessura constante para a temperatura de 40 °C

As otimizações com os dados experimentais para a temperatura de 40 °C no Infinite Slab Numerical, disponibilizaram os resultados mostrados na Tabela (12) a seguir:

Tabela 12 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 40 °C.

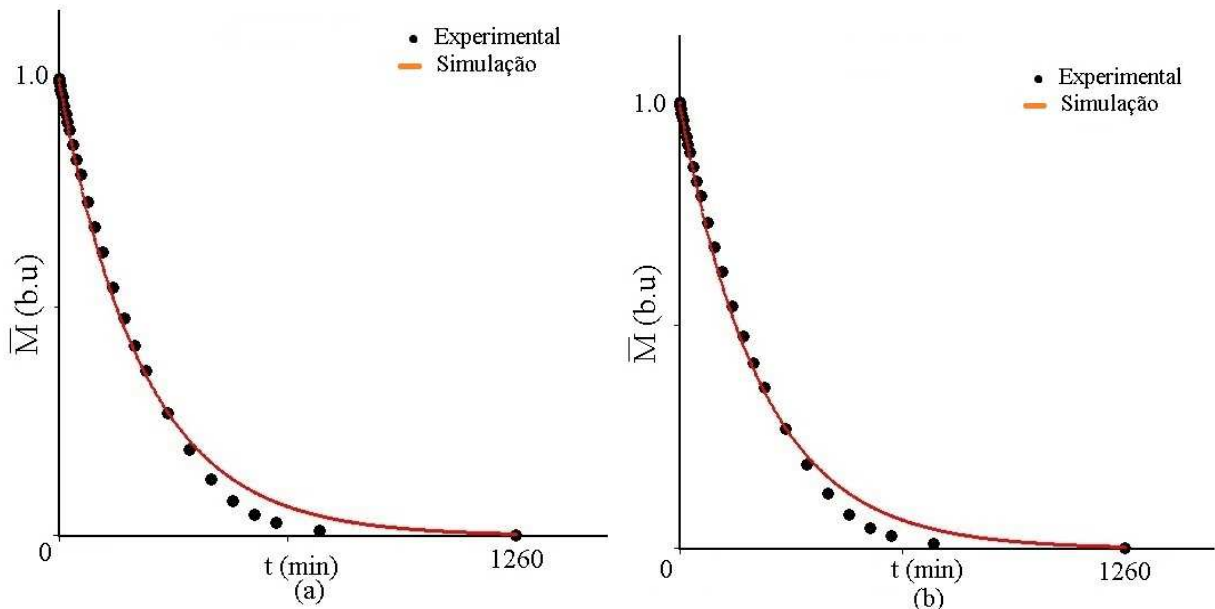
função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	2.001500	$3.002250 \times 10^{-6}$	$1.092050 \times 10^{-5}$	$1.426800 \times 10^{-2}$	0.995800
$F_1$	0	$2.998500 \times 10^{-6}$	$1.095600 \times 10^{-5}$	$1.427550 \times 10^{-2}$	0.995798
$F_4$	$9.995 \times 10^{-4}$	$3.101550 \times 10^{-7}$	$1.123926 \times 10^{-5}$	$1.432136 \times 10^{-2}$	0.995782
$F_3$	0.999500	$3.001500 \times 10^{-6}$	$1.093965 \times 10^{-5}$	$1.435001 \times 10^{-2}$	0.995775

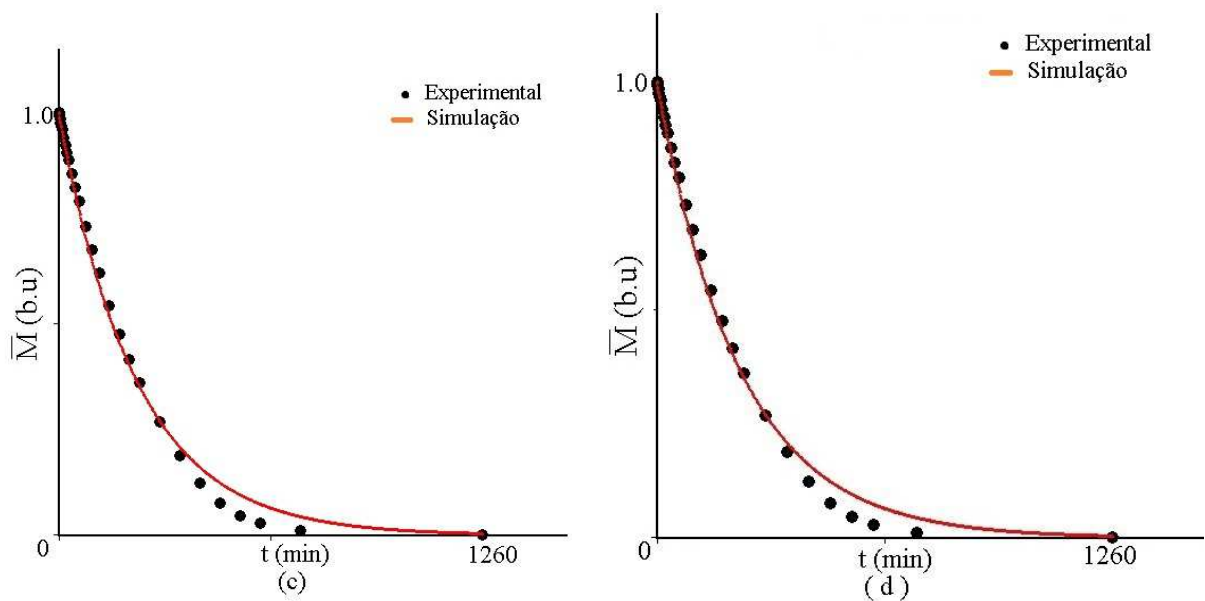
Fonte: Própria autoria

Observando os dados da Tabela (12), pode-se dizer que a melhor equação que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ), pois apresenta o maior valor para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o menor valor para o ( $\chi^2$ ).

Na Figura (18) a seguir está apresentada a cinética das curvas para a temperatura de 40°C considerando a espessura constante da cenoura, feitas com o auxílio do software Infite Slab Numerical, destacando as curvas simuladas e os dados coletados experimentalmente no processo de secagem para a cenoura.

Figura 18 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a)  $F_2$  ; (b)  $F_1$ ; (c)  $F_4$  e (d)  $F_3$ .





Fonte: Própria autoria

É perceptível que nas curvas simuladas para a cinética de secagem, há muitos dados experimentais fora da curva, o que acarreta que as funções não conseguem representar bem os dados coletados experimentalmente para a cenoura com temperatura de 40 °C.

### Resultados para o experimento da cenoura com espessura constante para a temperatura de 50 °C

Encontra-se a seguir a Tabela (13) com os dados obtidos a partir dos dados experimentais para a temperatura de 50 °C.

Tabela 13 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 50 °C.

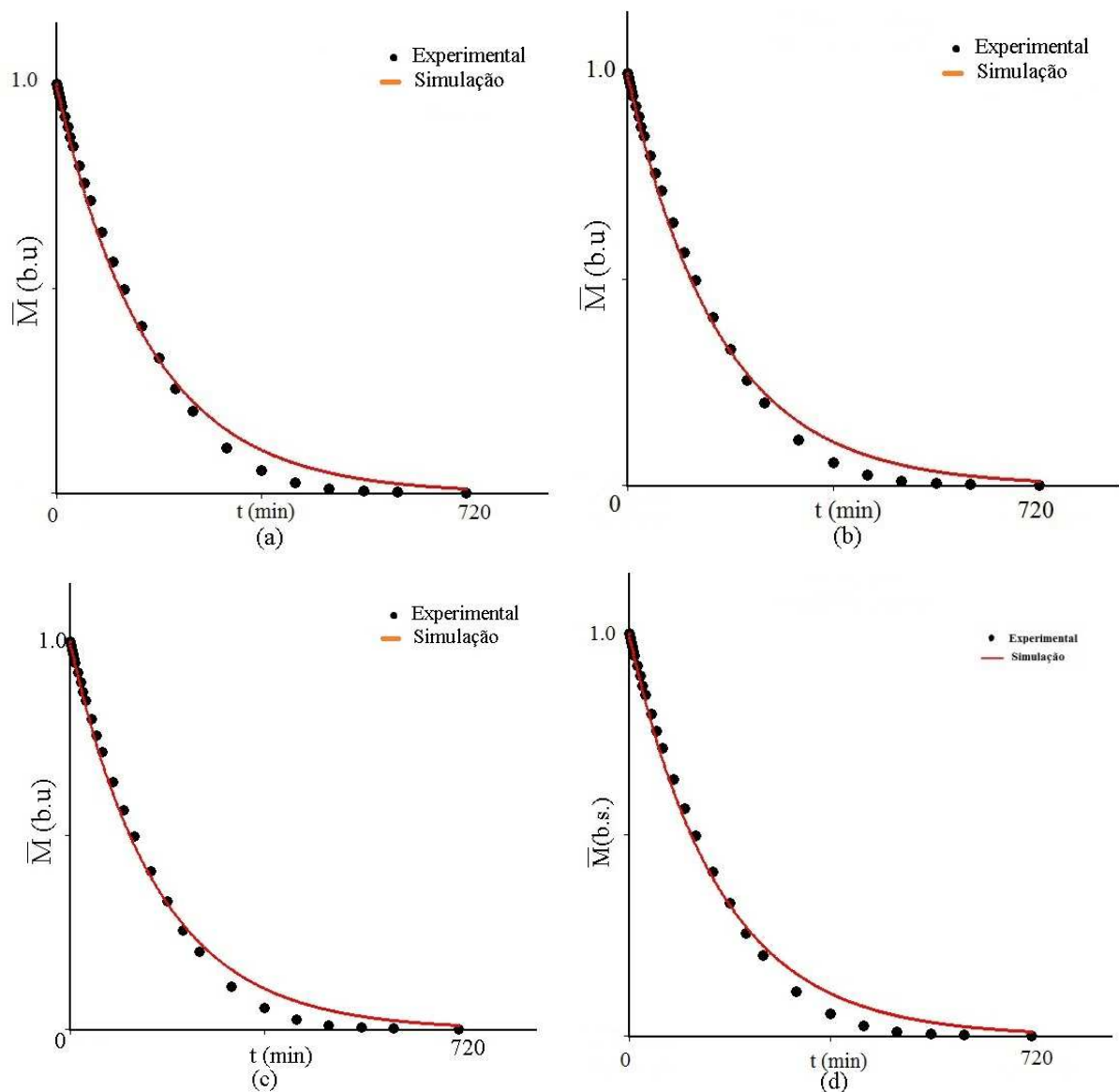
função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	2.001000	$2.001000 \times 10^{-6}$	$1.561029 \times 10^{-5}$	$1.579083 \times 10^{-2}$	0.995516
$F_1$	0	$2.001000 \times 10^{-6}$	$1.570291 \times 10^{-5}$	$1.579799 \times 10^{-2}$	0.995513
$F_4$	$9.595794 \times 10^{-4}$	$1.153037 \times 10^{-6}$	$1.579515 \times 10^{-5}$	$1.580330 \times 10^{-2}$	0.995513
$F_3$	2.001	$1.100550 \times 10^{-6}$	$1.565588 \times 10^{-5}$	$1.618122 \times 10^{-2}$	0.995399

Fonte: Própria autoria

Observando os dados da tabela (13) pode-se dizer que a melhor equação que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ).

Na Figura (19) a seguir, estão apresentadas as cinéticas das curvas para a temperatura de 50 °C utilizando o *software infinite Slab Numerical*. Nas quais, pode-se perceber que as curvas não sobrepõe os dados experimentais, o que acarreta que as equações não descrevem satisfatoriamente os dados experimentais.

Figura 19 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a)  $F_2$ ; (b)  $F_1$ ; (c)  $F_4$  e (d)  $F_3$ .



Fonte: Própria autoria

### Resultados para o experimento da cenoura com espessura constante para a temperatura de 60 °C

A seguir, encontra-se a tabela (14) com os dados obtidos pelo software Infinite Slab Numerical a partir dos dados experimentais para a temperatura de 60 °C.

Observando os dados da Tabela (14) pode-se dizer que a melhor equação que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ).

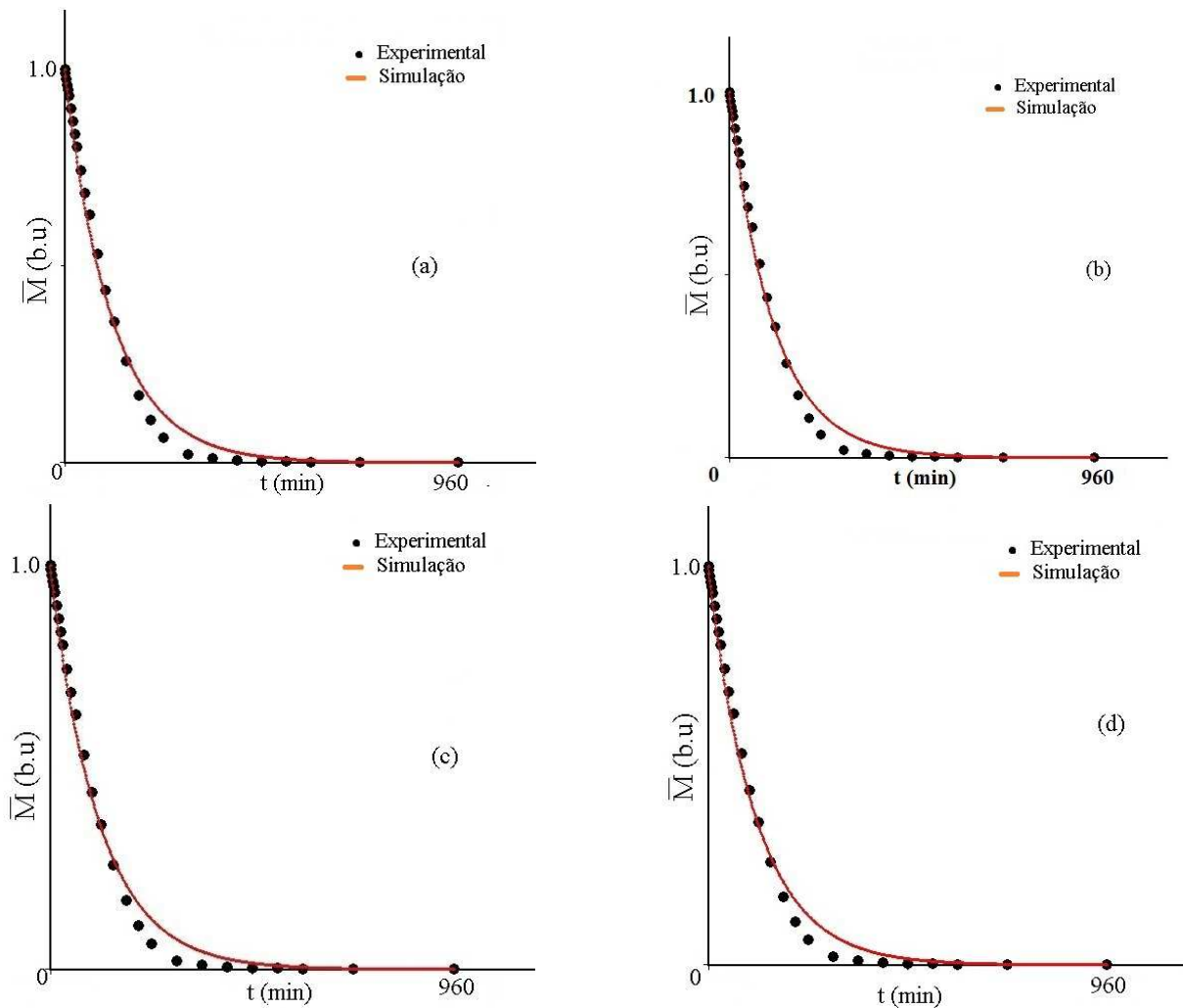
Tabela 14 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 60 °C.

função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	1.501125	$2.000000 \times 10^{-6}$	$2.178104 \times 10^{-5}$	$2.239181 \times 10^{-2}$	0.994419
$F_4$	$9.200995 \times 10^{-4}$	$2.490332 \times 10^{-6}$	$2.193840 \times 10^{-5}$	$2.239788 \times 10^{-2}$	0.994417
$F_1$	0	$2.001000 \times 10^{-6}$	$2.195309 \times 10^{-5}$	$2.240006 \times 10^{-2}$	0.994416
$F_3$	2.501250	$3.201600 \times 10^{-6}$	$2.181255 \times 10^{-5}$	$2.259811 \times 10^{-2}$	0.994365

Fonte: Própria autoria

Na Figura (20) a seguir, apresenta as cinéticas das curvas para o processo de secagem da cenoura para a temperatura de 60 °C feito pelo *software* acoplado a solução numérica.

Figura 20 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a)  $F_2$  ; (b)  $F_4$ ; (c)  $F_1$  e (d)  $F_3$ .



Fonte: Própria autoria

Pode-se perceber na Figura anterior, que a cinética da simulação da curva não descreve bem os dados experimentais, pois há alguns dados experimentais fora da curva feita pelo *software* acoplado a solução numérica.

## Resultados para o experimento da cenoura com espessura constante para a temperatura de 70 °C

Por fim, encontra-se a seguir a última tabela contendo os resultados para o experimento da temperatura de 70 °C com espessura constante para a cenoura.

A seguir encontra-se a Tabela (15) com os dados obtidos a partir dos dados experimentais para a temperatura de 70 °C.

Tabela 15 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 70 °C.

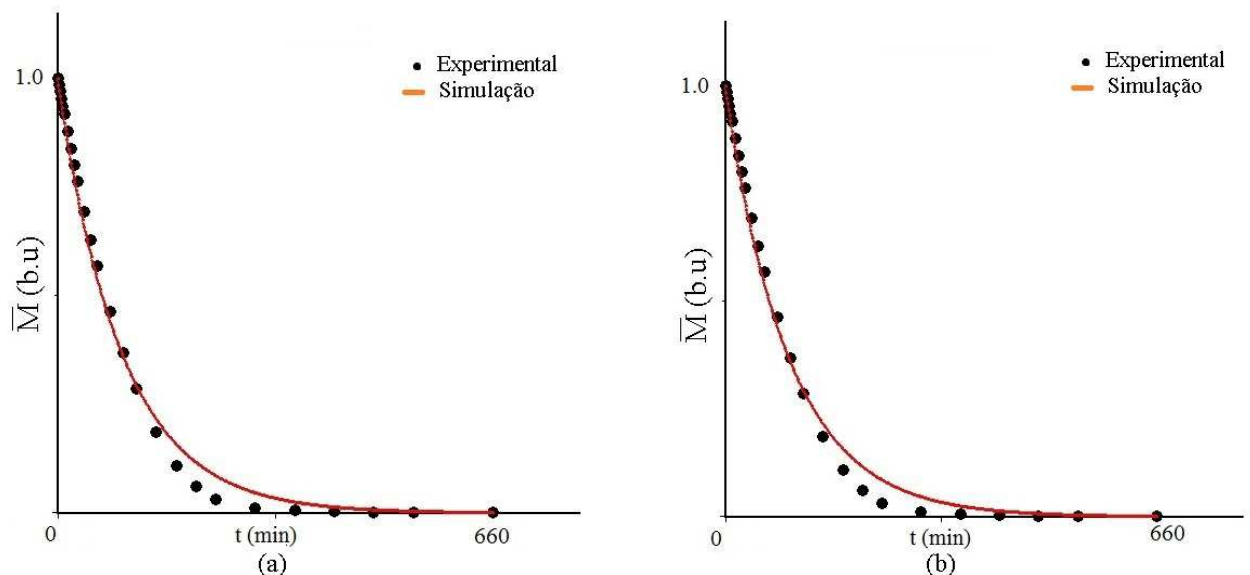
função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	1.501124	$2.002005 \times 10^{-6}$	$2.577012 \times 10^{-5}$	$1.751971 \times 10^{-2}$	0.995154
$F_1$	0	$2.498750 \times 10^{-6}$	$2.601470 \times 10^{-5}$	$1.752670 \times 10^{-2}$	0.995153
$F_4$	$9.9975 \times 10^{-6}$	$1.249375 \times 10^{-6}$	$2.623915 \times 10^{-5}$	$1.754181 \times 10^{-2}$	0.995149
$F_3$	0.859570	$2.901450 \times 10^{-6}$	$2.589886 \times 10^{-5}$	$1.770470 \times 10^{-2}$	0.995102

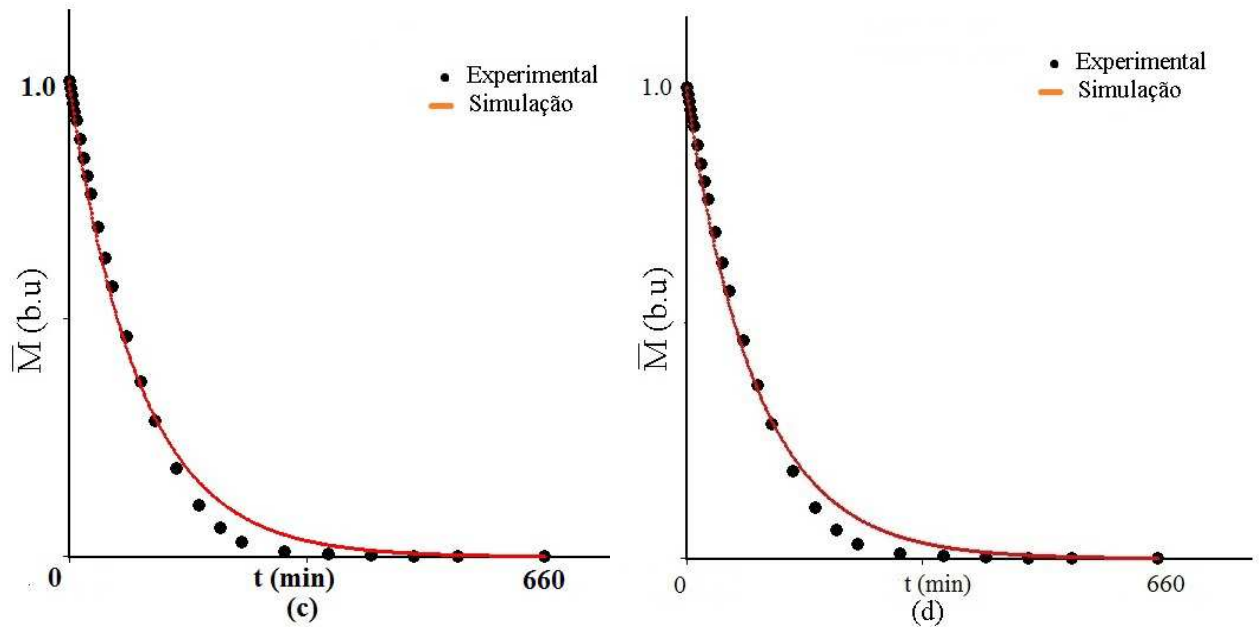
**Fonte:** Própria autoria

Observando os dados da tabela (15) pode-se dizer que a melhor equação que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ).

A Figura (21) a seguir apresenta as cinéticas das curvas para a temperatura de 70°C utilizando o *software infinite Slab Numerical*.

Figura 21 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura constante para a cenoura: (a)  $F_2$ ; (b)  $F_1$ ; (c)  $F_4$  e (d)  $F_3$ .





Fonte: Própria autoria

Analisando a Figura anterior, pode-se perceber que a equação que representa a curva (a), descreve satisfatoriamente os dados experimentais.

De modo geral, pode-se dizer com base nos indicadores estatísticos do *Software Infinite Slab Numerical* que a melhor equação que descreveu os dados do processo de secagem para às quatro (4) temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C, foi a  $F_2 (D = aM^2 + b)$ , onde as simulações da curva de cinética para cada temperatura descreve a maioria dos pontos obtidos experimentalmente, e para a temperatura de 70 °C a curva quase sobrepôs todos os dados obtidos experimentalmente no processo de secagem.

Diante disso, iremos considerar a espessura variável a fim de melhorar os resultados da cinética de secagem para a cenoura, uma vez que essa consideração representa de forma mais real o processo de secagem, pois durante o processo de secagem a espessura da cenoura diminui.

Silva Júnior et al.,(2019) traz que o encolhimento é um fenômeno conhecido na literatura, mas que é negligenciado pela maioria dos estudos relacionados à secagem de produtos biológicos. No entanto, aqueles que tem considerado esse fenômeno, também tem observado que o modelo linear é o mais adequado para a descrição desse fenômeno.

Nesta perspectiva, Silva Júnior et al., (2019), trabalhou com o mesmo produto estudado neste trabalho e considerou as mesmas condições para o seu processo de secagem, obtendo que a melhor expressão encontrada para a espessura variável da cenoura foi a da equação da reta expressa por:

$$L(\bar{M}) = P\bar{M} + Q \quad (4.2)$$



onde  $\bar{M}$  é o teor médio de umidade,  $P$  e  $Q$  são constantes de ajuste.

Diante dessa equação, Silva Júnior et al., (2019), obteve as seguintes expressões para cada temperatura que pode-se ser vista na tabela (16):

Tabela 16 – Resultados dos ajuste da equação (4.2) aos dados do encolhimento.

Temperatura	$P$	$Q$
$40^{\circ}C$	$3.037797 \times 10^{-3}$	$4.130382 \times 10^{-4}$
$50^{\circ}C$	$3.945411 \times 10^{-3}$	$1.106016 \times 10^{-3}$
$60^{\circ}C$	$3.730136 \times 10^{-3}$	$7.493691 \times 10^{-4}$
$70^{\circ}C$	$3.706917 \times 10^{-3}$	$8.546001 \times 10^{-4}$

**Fonte:** Silva Júnior et al.,(2019)

Desta forma, temos na Tabela (17) a seguir, os resultados para o experimento com temperatura de  $40^{\circ}C$  com espessura variável para a cenoura, afim de obter melhores curvas de cinéticas de secagem em relação aos dados obtidos experimentalmente.

## Resultados para o experimento da cenoura com espessura variável para a temperatura de $40^{\circ}C$

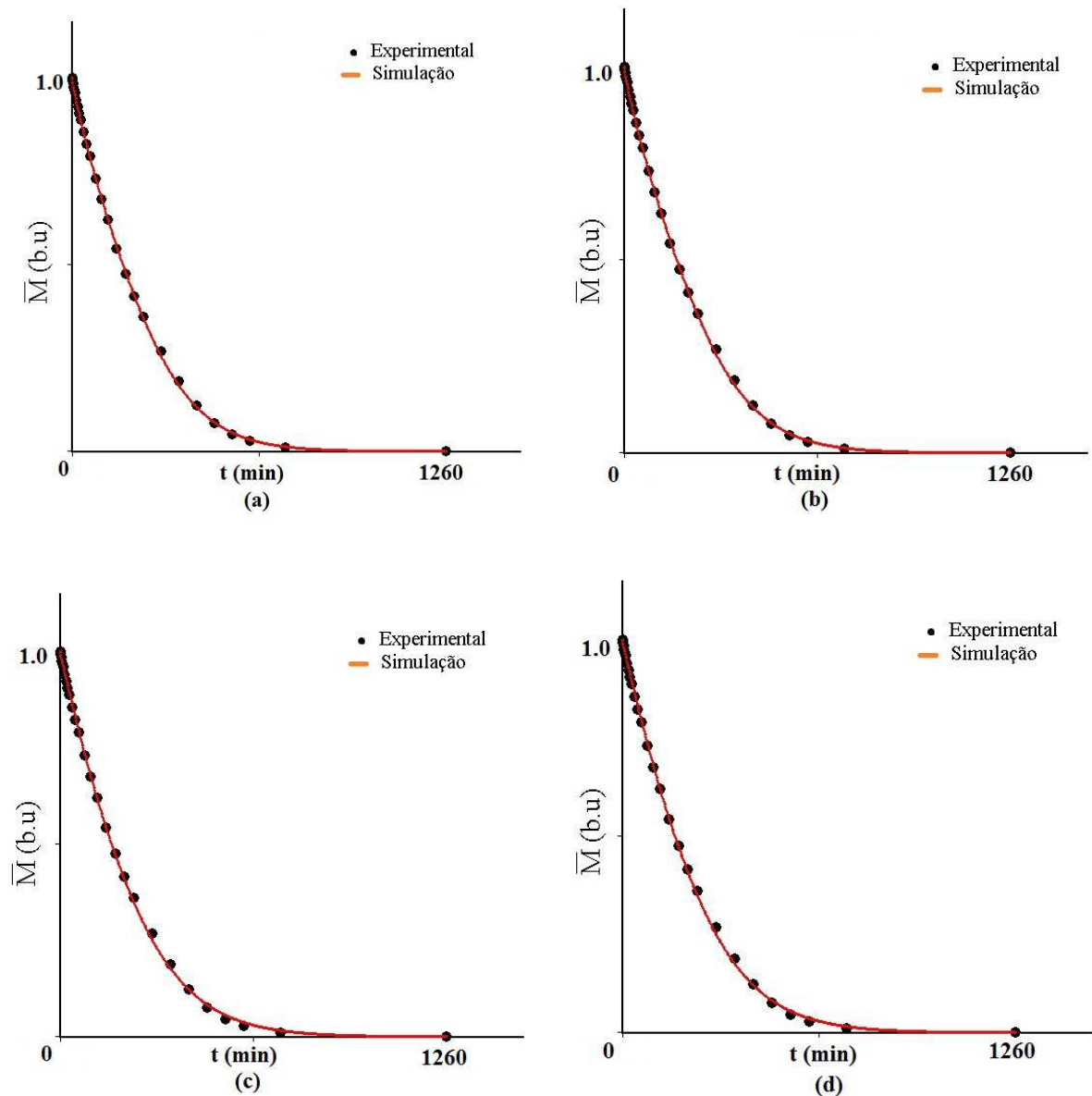
Tabela 17 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de  $40^{\circ}C$  e espessura variável.

função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_1$	0	$4.019778 \times 10^{-8}$	$2.266013 \times 10^{-5}$	$6.621874 \times 10^{-4}$	0.9998184
$F_4$	$1.022235 \times 10^{-2}$	$4.018976 \times 10^{-8}$	$2.266278 \times 10^{-5}$	$6.622897 \times 10^{-4}$	0.999819
$F_2$	$1.000500 \times 10^{-3}$	$3.000000 \times 10^{-7}$	$1.436868 \times 10^{-5}$	$1.255243 \times 10^{-3}$	0.999661
$F_3$	$1.000500 \times 10^{-3}$	$3.001500 \times 10^{-7}$	$1.516572 \times 10^{-5}$	$1.306017 \times 10^{-3}$	0.999649

**Fonte:** Própria autoria

Observando os valores dos indicadores estatísticos da Tabela (17) pode-se dizer que todas os modelos utilizados se adequaram muito bem aos dados experimentais, porém o melhor entre eles foi que descreveu os dados experimentais foi a ( $F_1$ ), pois quando mais perto de 1 for o coeficiente de determinação  $R^2$  e quanto menor for o desvio padrão ( $\chi^2$ ) melhor é o modelo analisado.

Diante disso, com o recurso do *software Infinite Slab Numerical*, foi simulada a curva de cinética para cada modelo descrito na Tabela anterior, que pode-se ser observada na Figura (22) a seguir.

Figura 22 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a)  $F_1$ ; (b)  $F_4$ ; (c)  $F_2$ ; (d)  $F_3$ 

**Fonte:** Própria autoria

Diante da Figura anterior, pode-se concluir pelos valores dos indicadores estatísticos e pelas curvas de simulação para a cinética de secagem da cenoura, que todos os modelos de equação analisado, conseguem descrever muito bem os dados obtidos experimentalmente, pois a curva simulado sobrepõe todos os dados obtidos durante o processo de secagem e os indicadores estatísticos são melhores que os apresentados anteriormente.

## Resultados para o experimento da cenoura com espessura variável para a temperatura de 50 °C

Desta forma, temos na Tabela (18) a seguir, os resultados para o experimento com temperatura de 50 °C com espessura variável para a cenoura, a fim de obter melhores curvas de cinéticas de secagem em relação aos dados obtidos experimentalmente.

Tabela 18 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 50 °C e espessura variável.

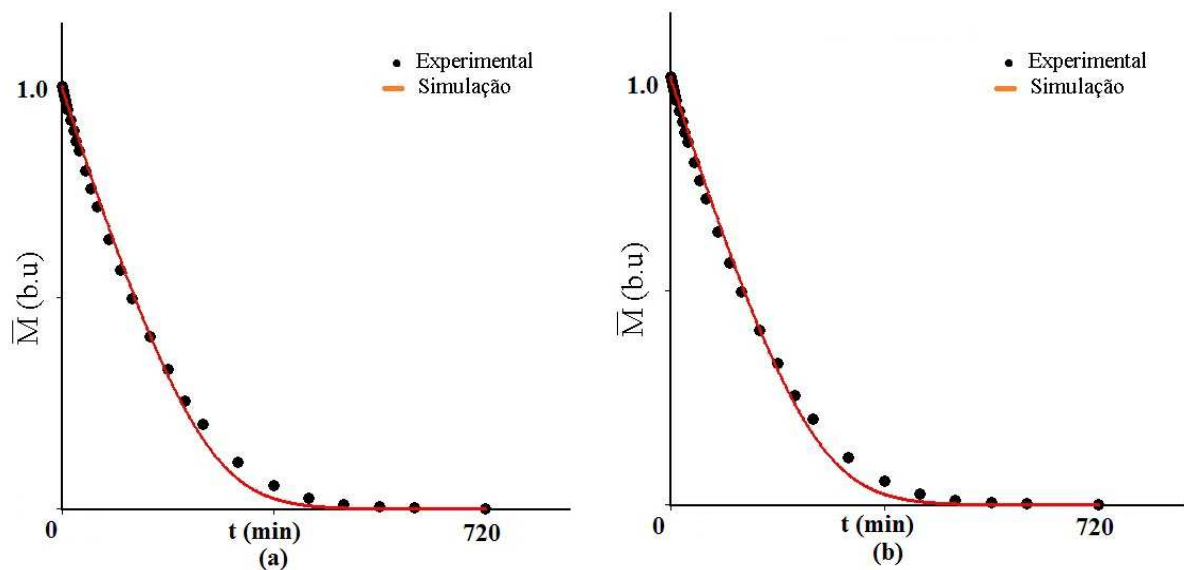
função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	$1.050367 \times 10^{-3}$	$1.069975 \times 10^{-7}$	$1.107342 \times 10^{-5}$	$1.074373 \times 10^{-2}$	0.997395
$F_3$	$1.105879 \times 10^{-3}$	$1.627148 \times 10^{-4}$	$1.108316 \times 10^{-5}$	$1.075525 \times 10^{-2}$	0.997393
$F_1$	0	$8.852595 \times 10^{-5}$	$1.108452 \times 10^{-5}$	$1.075669 \times 10^{-2}$	0.997393
$F_4$	$1.051156 \times 10^{-4}$	$1.069975 \times 10^{-6}$	$1.115623 \times 10^{-5}$	$1.099093 \times 10^{-2}$	0.997338

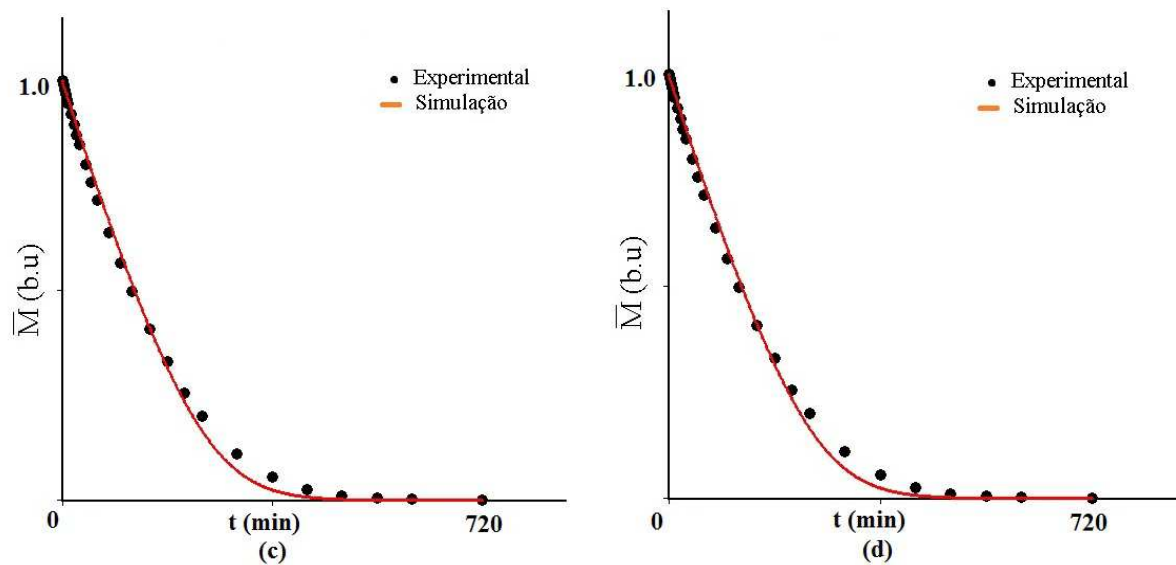
**Fonte:** Própria autoria

Observando os valores dos indicadores estatísticos da Tabela (18) pode-se dizer que a melhor função que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ), no entanto, há alguns dados experimentais fora da curva simulada pelo *software* acoplado a solução numérica.

Apresenta-se na Figura (23) a seguir as cinéticas das curvas para a temperatura de 50 °C utilizando o *software infinite Slab Numerical* considerando a espessura variável para a cenoura.

Figura 23 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a)  $F_2$ ; (b)  $F_3$ ; (c)  $F_1$ ; (d)  $F_4$ .





Fonte: Própria autoria

Resultados para o experimento da cenoura com espessura variável para a temperatura de 60 °C

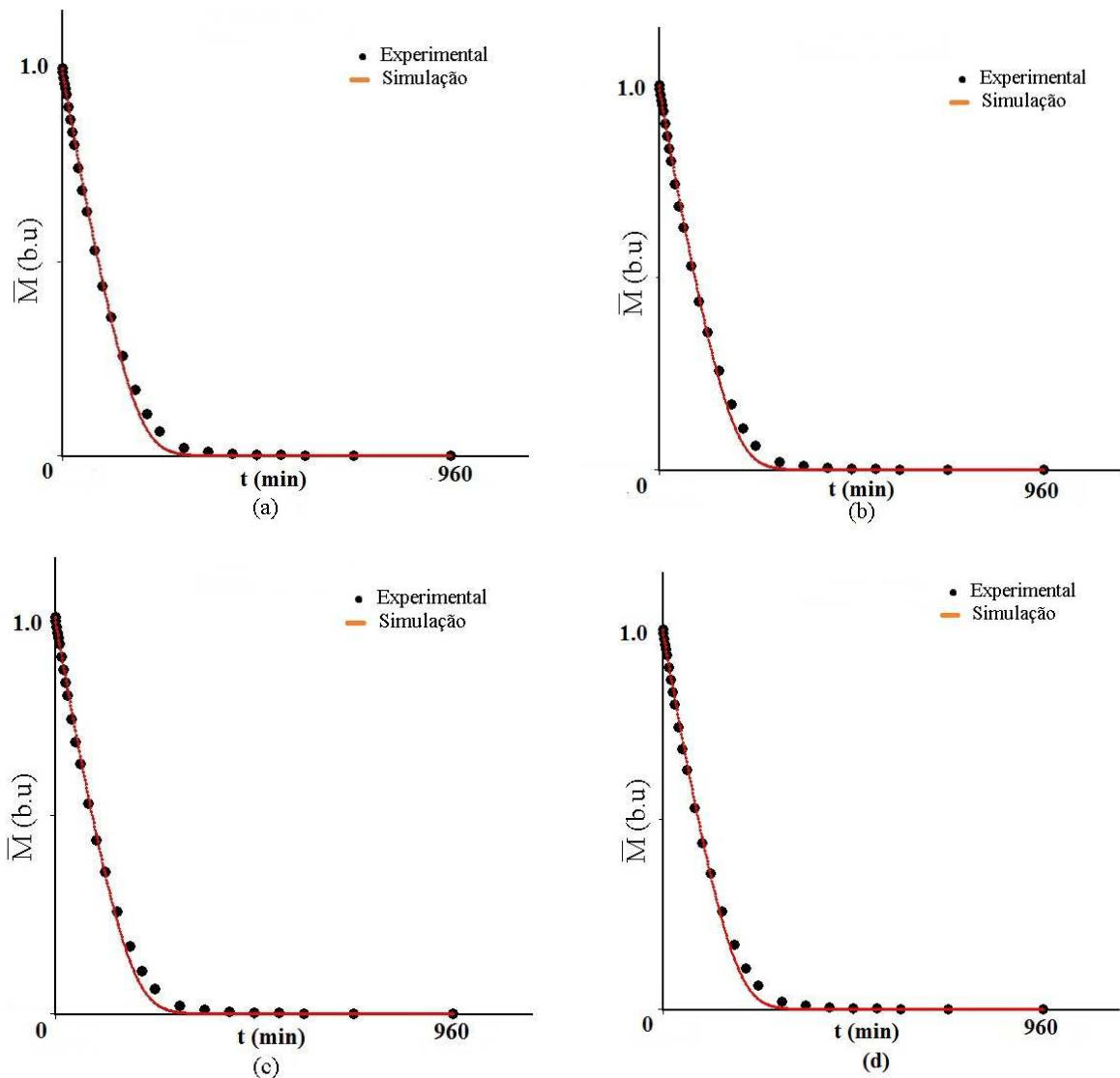
Tabela 19 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 60 °C e espessura variável.

função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	$9.685498 \times 10^{-4}$	$1.143423 \times 10^{-8}$	$1.330673 \times 10^{-5}$	$9.385011 \times 10^{-3}$	0.997980
$F_3$	$1.261073 \times 10^{-4}$	$1.449117 \times 10^{-4}$	$1.330835 \times 10^{-5}$	$9.400844 \times 10^{-3}$	0.997977
$F_4$	$1.027805 \times 10^{-3}$	$1.273053 \times 10^{-4}$	$1.331326 \times 10^{-5}$	$9.401447 \times 10^{-3}$	0.997977
$F_1$	0	$7.600427 \times 10^{-5}$	$1.330774 \times 10^{-5}$	$9.402542 \times 10^{-3}$	0.997976

Fonte: Própria autoria

Observando os dados da Tabela (19) pode-se dizer que a melhor função que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ), no entanto as demais funções conseguem descrever a curva de secagem em relação aos dados experimentais quase sobrepondo todos eles.

Apresenta-se na Figura (24) a seguir as cinéticas das curvas para a temperatura de 60 °C utilizando o software infinite Slab Numerical.

Figura 24 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a)  $F_2$ ; (b)  $F_3$ ; (c)  $F_4$ ; (d)  $F_1$ 

Fonte: Própria autoria

Resultados para o experimento da cenoura com espessura variável para a temperatura de 70 °C

A seguir encontra-se a Tabela (20) com os dados obtidos a partir dos dados experimentais para a temperatura de 70 °C, considerando a espessura variável para a cenoura.

Tabela 20 – Valores dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos para a secagem de cenoura com temperatura de 70 °C e espessura variável.

função	$a$	$b$	$h(ms^{-1})$	$\chi^2$	$R^2$
$F_2$	$8.260202 \times 10^{-8}$	$4.919603 \times 10^{-9}$	$2.255314 \times 10^{-5}$	$3.020563 \times 10^{-4}$	0.999924
$F_1$	0	$1.219835 \times 10^{-4}$	$1.623192 \times 10^{-5}$	$1.127261 \times 10^{-2}$	0.997327
$F_4$	$1.0005 \times 10^{-3}$	$1.500750 \times 10^{-6}$	$1.631630 \times 10^{-5}$	$1.150665 \times 10^{-2}$	0.997273
$F_3$	$1.291953 \times 10^{-5}$	$1.129426 \times 10^{-6}$	$1.634964 \times 10^{-5}$	$1.158351 \times 10^{-2}$	0.997255

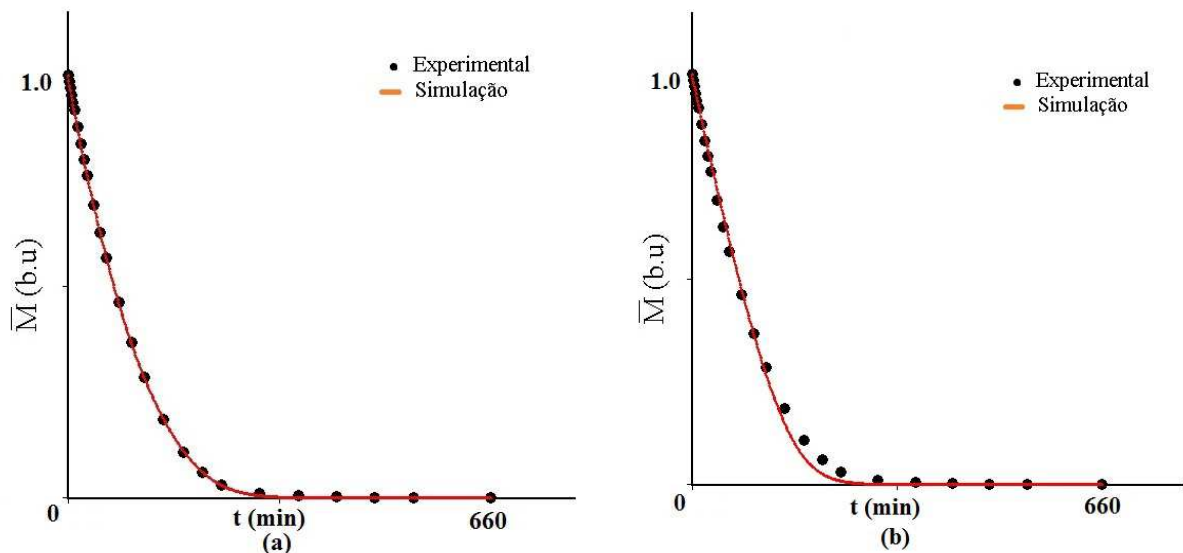
**Fonte:** Própria autoria

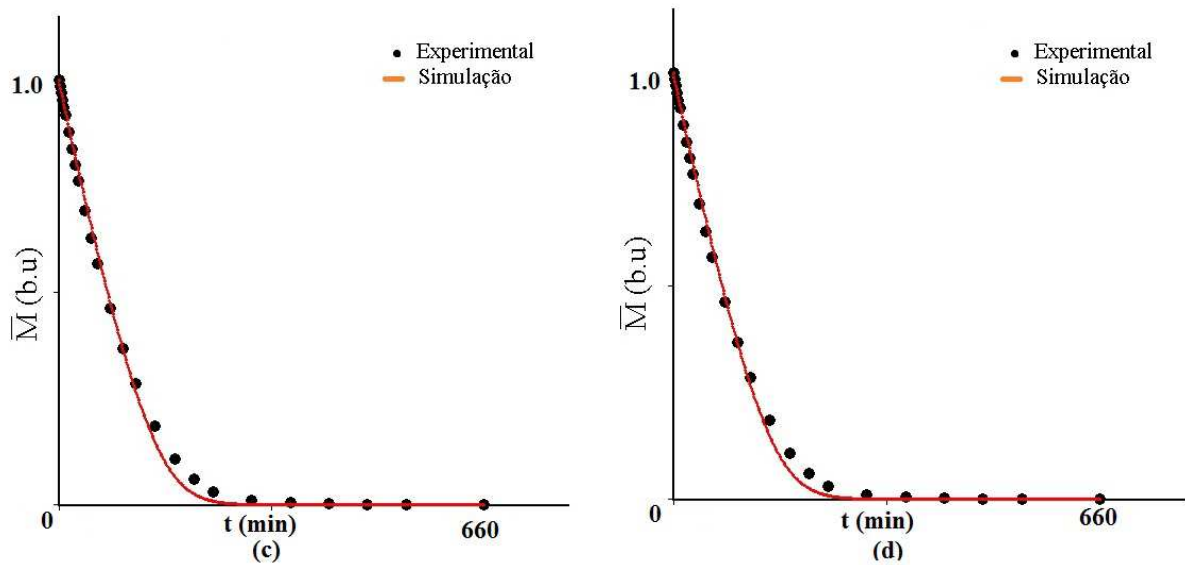
Observando os valores dos indicadores estatísticos da Tabela (20) pode-se concluir que a melhor equação que descreve os dados experimentais foi a ( $F_2$ ). No entanto, existem alguns dados experimentais que não foram sobrepostos pela curva de cinética de secagem feita pelo software Infinite Slab Numerical.

As demais funções descrevem de forma satisfatória a cinética de secagem para a temperatura de 70 °C.

Na Figura (25) a seguir está apresentada a cinética das curvas para a temperatura de 70 °C considerando a espessura variável da cenoura, feitas com o auxílio do *software Infite Slab Numerical*, destacando as curvas simuladas e os dados coletados experimentalmente no processo de secagem para a cenoura.

Figura 25 – Simulação da cinética de secagem considerando a difusividade variável para o experimento e espessura variável para a cenoura: (a)  $F_2$ ; (b)  $F_1$ ; (c)  $F_4$ ; (d)  $F_3$





Fonte: Própria autoria

De modo geral, pode-se dizer com base nos indicadores estatísticos do *Software Infinite Slab Numerical* que a melhor função que descreveu os dados do processo de secagem para às quatro (4) temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C, foi a  $F_2$  ( $D = aM^2 + b$ ), onde as simulações da curva de cinética para cada temperatura descreve a maioria dos pontos obtidos experimentalmente, quase sobrepondo os dados obtidos experimentalmente no processo de secagem.

Nota-se com a utilização da espessura variável para a cenoura, os resultados para os indicadores estatísticos melhoram, e isso acarreta que a cinética das curvas de secagens melhoram quase sobrepondo em todas as temperaturas trabalhadas os dados obtidos experimentalmente, e isto nos leva a grandiosa importância de utilizar o encolhimento da cenoura durante o processo de secagem que geralmente é desconsiderado.

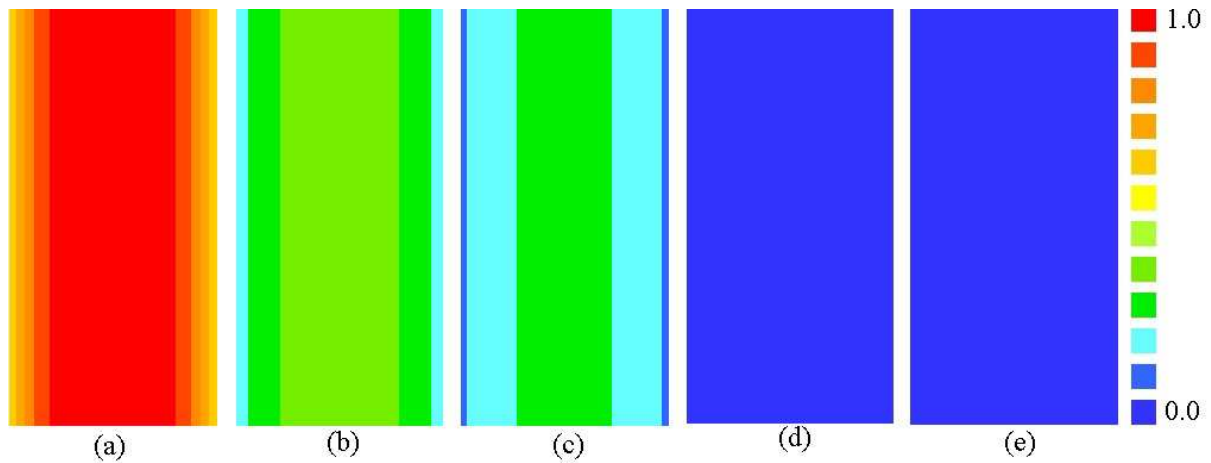
### 4.3 Gráficos de contorno

Para obtenção dos gráficos de contorno, é preciso realizar a simulação da cinética de secagem utilizando o *software Infinite Slab Numerical*. Para isso, deve-se ir no menu “*simul*” e inserir os instantes para quais o usuário pretender ver os gráficos de contorno.

Neste trabalho os instantes para a temperatura de 40 °C foram: 25,20 min ; 252 min; 315 min; 630 min e 1260 min. As únicas funções que pôde-se ver os gradientes para a temperatura de 40 °C foram a  $F_1$  e  $F_4$ .

A Figura (26) mostra os gráficos de contorno do experimento para a temperatura de 40 °C com os instantes mencionados anteriormente para a função  $F_1$ .

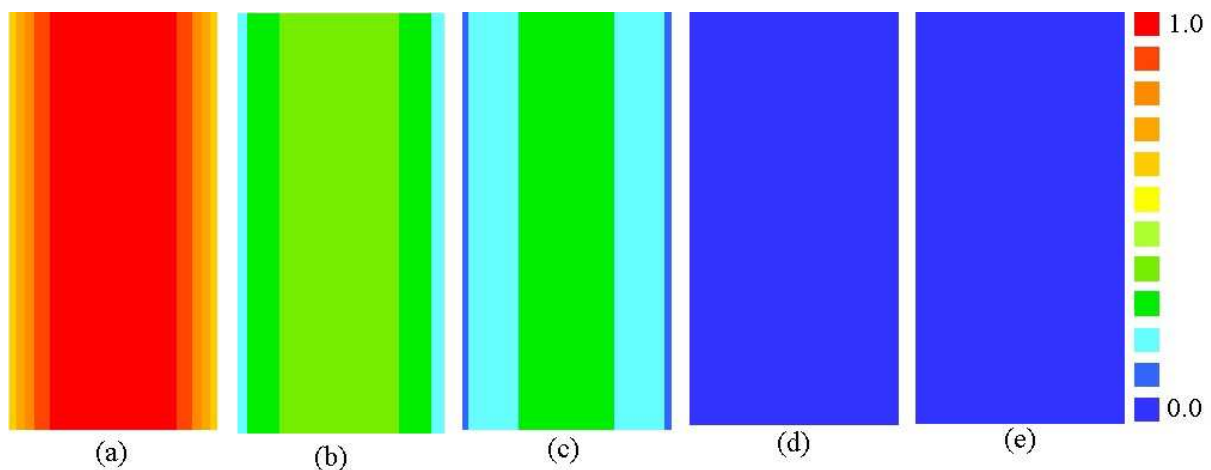
Figura 26 – Gráficos de contorno usando a equação  $F_1$  do experimento para a temperatura de 40 °C nos instantes: (a) 25,2 min; (b) 252 min; (c) 315 min; (d) 630 min; (e) 1260 min.



**Fonte:** Própria autoria

A Figura (27) mostra os gráficos de contorno do experimento para a temperatura de 40 °C com os instantes mencionados anteriormente para a função  $F_4$ .

Figura 27 – Gráficos de contorno usando a equação  $F_4$  do experimento para a temperatura de 40 °C nos instantes: (a) 25,2 min; (b) 252 min; (c) 315 min; (d) 630 min; (e) 1260 min.



**Fonte:** Própria autoria

As demais funções analisadas para a temperatura de 40 °C não apresentaram gráficos de contorno para os instantes mencionados anteriormente.

Para a temperatura de 50°C foram escolhidos os seguintes instantes de tempo 14.40 min; 90 min; 180 min; 360 min; 720 min.

Para a temperatura de 60°C foram escolhidos os seguintes instantes de tempo 19.20 min;



120 min; 240 min; 480 min; 960 min.

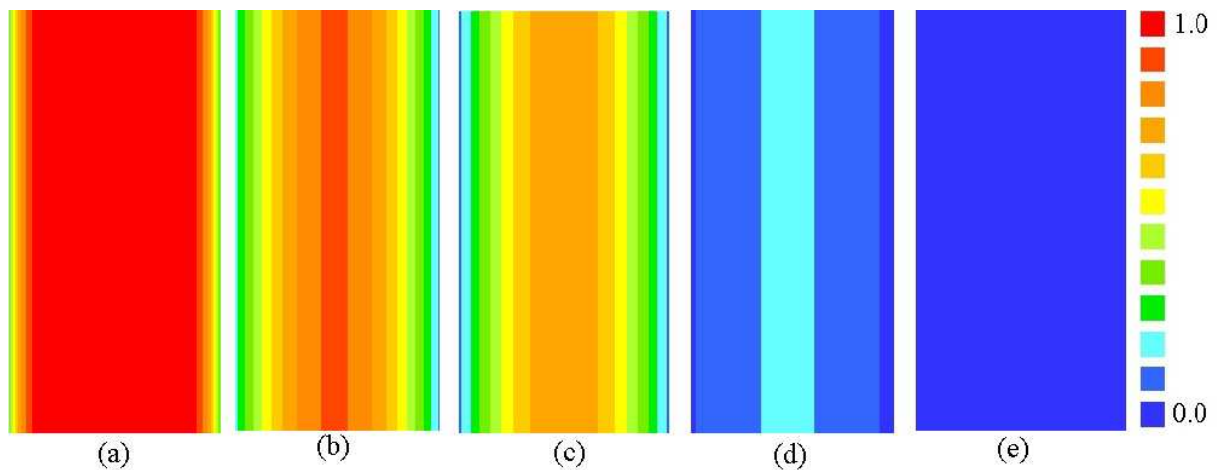
Portanto, não houve gráficos de contorno para a temperatura de 50 °C nem para a temperatura de 60 °C para nenhuma das funções analisadas neste trabalho.

Já para a temperatura de 70 °C foram escolhidos os seguintes instantes de tempo: 13.20 min; 132 min; 165 min; 330 min; 660 min.

A única função para a difusividade que pôde-se ver os gráficos de contorno para a temperatura de 70 °C foi à  $F_2$ .

A Figura (28) mostra os gráficos de contorno do experimento para a temperatura de 70 °C com os instantes mencionados anteriormente para a função  $F_2$ .

Figura 28 – Gráficos de contorno usando a equação  $F_2$  do experimento para a temperatura de 70 °C nos instantes: (a) 13.20 min; (b) 132 min; (c) 165 min; (d) 330 min; (e) 660 min.



**Fonte:** Própria autoria

Uma análise destes gráficos de contorno permitem visualizar que para os mesmos instantes, quanto maior a temperatura de secagem, mais seco (teor de umidade distribuído em menor concentração) está o corpo de prova. Em outras palavras, quanto maior a temperatura, mais rápido é o processo de secagem.

O fato de todas as funções analisadas não apresentarem gráficos de contorno, pode ter sido ocasionado pelo uso de estufa sem circulação forçada de ar, uma vez que o produto estudado apresenta alto teor de umidade em sua composição.

## 4.4 Análise físico-químicas

Os resultados obtidos para as propriedades físico- químicas da cenoura em *in natura* como ao longo das secagens, foram analisados estatisticamente através do *software* STATISTICA, versão 7.0.61.0, sendo realizado o teste de análise de variância.

As comparações das diferenças significativas das médias para todos os parâmetros foram testados pelo teste de *Tukey HSD (Honestly Significant Difference)*, sendo o nível de significância de 5 % (  $p < 0,05$ ).

A seguir apresenta-se a Tabela 21 contendo os resultados das análises físico-químicas para a cenoura *in natura*, assim, como para as temperaturas de secagens estabelecidas:

Tabela 21 – Resultados das análises físico-químicas para a cenoura *in natura* e para as temperaturas de secagens estabelecidas.

Amostra	<i>in natura</i>	Secagem 40° C	Secagem 50 °C	Secagem 60 °C	Secagem 70° C
Umidade	88.01 <sup>a</sup> ± 0.13	76.11 <sup>b</sup> ± 0.36	66.91 <sup>c</sup> ± 1.68	75.16 <sup>c</sup> ± 0.88	68.70 <sup>c</sup> ± 1.41
$W_a$	0.99 <sup>a</sup> ± 0.00	0.97 <sup>b</sup> ± 0.00	0.96 <sup>c</sup> ± 0.00	0.97 <sup>b</sup> ± 0.00	0.96 <sup>bc</sup> ± 0.00
pH	6.65 <sup>a</sup> ± 0.14	6.10 <sup>c</sup> ± 0.12	6.28 <sup>bc</sup> ± 0.06	6.44 <sup>ab</sup> ± 0.12	6.08 <sup>c</sup> ± 0.08
Acidez	1.02 <sup>b</sup> ± 0.06	5.19 <sup>a</sup> ± 0.06	4.99 <sup>a</sup> ± 0.40	4.73 <sup>a</sup> ± 0.26	5.25 <sup>a</sup> ± 0.41
Cinzas	0.83 <sup>d</sup> ± 0.02	3.10 <sup>b</sup> ± 0.03	3.27 <sup>a</sup> ± 0.11	3.12 <sup>ab</sup> ± 0.01	2.89 <sup>c</sup> ± 0.08
Proteínas	1.15 <sup>c</sup> ± 0.01	3.04 <sup>b</sup> ± 0.18	3.53 <sup>a</sup> ± 0.14	3.51 <sup>a</sup> ± 0.16	3.13 <sup>b</sup> ± 0.02
Lipídeos	0.00 <sup>b</sup> ± 0.00	0.56 <sup>a</sup> ± 0.08	0.69 <sup>a</sup> ± 0.23	0.45 <sup>a</sup> ± 0.17	0.42 <sup>a</sup> ± 0.15
Carboidratos	10.01 <sup>c</sup> ± 0.15	17.19 <sup>b</sup> ± 0.46	25.59 <sup>a</sup> ± 1.60	17.76 <sup>b</sup> ± 0.87	24.85 <sup>a</sup> ± 1.29

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa (  $p < 0.05$  ) pelo teste de Tukey.

A cenoura apresenta em sua composição alto teor de umidade, sendo encontrado no estudo feito o valor médio em *in natura* de 88.01%, sendo este valor muito semelhante aos encontrados por Araújo (2010) que foi de 90.56% e por Akubor e John Ike (2012) de 91% e Andrade et al., (2007), obteve um teor de umidade de 88.33%. Essa variação dos valores de umidade pode ser explicada devido à existência de diversas variedades de cenouras e de cultivo. Contudo, esses valores demonstram que a cenoura possui um teor de umidade elevado.

Já para o estudo feito em relação à umidade pós-secagem foi constatados os seguintes valores: 76.11, 66.91, 75.16 e 68.7 para as respectivas temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C. É notório que os valores encontrados encontram-se muito acima do recomendado pelo conselho para a obtenção de farinha, este fato foi ocasionado pelo fato da cinética do processo de secagem ter sido realizado em uma estufa e as secagens para as análises físico-químicas terem sido realizadas em outra estufa, isto ocorreu por causa de defeitos encontrados na estufa que foi realizada a cinética.

Em relação a proteínas nota-se o valor de 1.15% na cenoura *in natura*, enquanto os valores para as temperaturas analisados pós-secagem foram respectivamente os seguintes: 3.04; 3.53; 3.51 e 3.13, o aumento que ocorreu foi em relação que durante o processo de secagem, ocorre uma concentração de proteínas com a retirada de água com o processo de secagem.

Já em relação às análises de cinzas, o valor adquirido para a média foi de 0.83, muito semelhante ao valor encontrado por Sra et al., (2010) para a cenoura da mesma variedade estudada, cerca de 0.88 g/100g b.h, também Gopalan et al (1991) apresenta um valor semelhante, no entanto um pouco mais elevado, de 1.1.

Quanto aos resultados obtidos no final de cada secagem, verificou-se que são semelhantes,

sendo de 3.10, 3.27, 3.12 e 2.89 para as temperaturas de 40, 50,60 e 70 °C, respectivamente. Verificou-se que não houve alterações significativas no teor de cinzas uma vez que os valores finais de cada secagem são semelhantes ao valor da amostra em fresco, ou seja, durante a secagem não ocorre alterações do teor de cinzas.

Analisando pH e acidez, pode-se notar que os valores encontrados para pH obtido para a cenoura crua, encontra-se dentro da faixa de valores encontrados por Araújo (2010) e Rocheti (2014), que foram 5.20 e 5.83 respectivamente. Ainda pode notar que Em relação à Acidez o valor obtido se aproxima do valor determinado por Rocheti (2014), que foi de 1.60.

O método utilizado para analisar lipídeos *in natura* não foi possível obter êxito para a cenoura na sua forma fresca.

Por fim, as análises de carboidratos se deu por diferença e em relação à atividade de água, os resultados são considerados muito desagregáveis, visto que de acordo com Oliveira et al., (2005), microrganismos podem crescer em alimentos desidratados, quando a atividade de água está acima de 0.6. Contudo, abaixo desses valores verificam-se ainda reações químicas e enzimáticas durante o processo de armazenagem. Dessa forma o conhecimento dos valores de atividade de água em função do teor de água dos alimentos desidratados é de extrema importância para se determinar o tempo de estocagem e evitar o crescimento microbiano.

# CONCLUSÃO

Neste trabalho pôde-se estudar um pouco mais sobre o processo de secagem utilizando como produto a cenoura (*Daucus carota L.*) e buscar na literatura alguns modelos empíricos e difusivos que descrevessem bem os dados obtidos experimentalmente para as quatro temperaturas 40, 50, 60 e 70 °C.

Foi observado que para maiores temperaturas de secagem, ocorreu uma diminuição no tempo de secagem, além disso, os discos de cenoura atingiram um teor de umidade de equilíbrio menor.

Entre todos os modelos empíricos utilizados para descrever as cinéticas de secagem da cenoura, os que apresentaram os melhores indicadores estatísticos foram os modelos M1 (Page) e M2 (Silva et alii). Para cada modelo, nota-se que existe uma diferença entre as curvas de secagem com o aumento da temperatura. Infere-se que esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos discos de cenoura e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

Por outro lado, foram utilizados modelos difusivos a fim de estudar a distribuição interna de massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem, levando em consideração as resistências aos fluxos de massa externa e interna da cenoura.

Através destes modelos difusivos, conseguiu-se melhores resultados do que para modelos empíricos, melhorando os valores dos indicadores estatísticos e desta forma, obteve-se curvas de cinéticas pelo Software Infinite Slab Numerical que se adequaram significativamente em relação aos dados obtidos experimentalmente.

Pôde-se perceber que a função  $F_2 (D = aM^2 + b)$  foi a melhor entre as analisadas para a difusividade efetiva de massa, onde a mesma mostrou-se adequada, visto que os indicadores estatísticos apresentaram valores melhores em relação aos apresentados para os modelos empíricos. Além disso, os parâmetros do processo foram semelhantes aos outros trabalhos presentes na literatura para as mesmas condições de secagem como o encontrado por Silva Junior et al., (2019).

Desta forma, o modelo matemático utilizado para a obtenção da solução da equação de difusão unidimensional com condição de contorno convectiva, considerando a difusividade de massa variável e o encolhimento do produto, é adequado para descrever processos difusivos em corpos com forma geométrica que possa ser aproximada para uma parede infinita.

Em relação às análises físico-químicas, pôde-se dizer que com o processo de secagem

não foram detectadas perdas significativas das propriedades nutricionais estudadas para a cenoura e com isso conclui-se que esse procedimento de conservação utilizado é muito vantajoso, pois reduzem gastos como transporte, armazenamento desse produto, bem como aumentar o seu tempo de prateleira.

# REFERÊNCIAS

- AKUBOR, P. I.; EZE, J. I. **Quality evaluation and cake making potential of sun and oven dried carrot fruit.** International Journal of Biosciences, v. 2, n. 10, p. 19-27, 2012.
- 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, Juliana Alvarenga et al. **Qualidade de produto minimamente processado à base de abóbora, cenoura, chuchu e mandioquinha-salsa.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 30, n. 3, p. 625-634, 2010.
- ANDRADE, E. C. B.; TEODORO, A. J.; TAKASE, I. **Determinação dos teores de zinco em diferentes extratos de hortaliças dos tipos A e B.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 25, p. 265-270, 2017.
- ANDREOLA, Kaciane et al. **Secagem de cenoura (Daucus carota L.) assistida por micro-ondas .** 2013.
- AOAC. **Official methods of analysis.** Washington, USA, Association of Official Analytical Chemists, 17<sup>a</sup> ed. 2000.
- ARAÚJO, Paulyanna Medeiros de. **Estudo da desidratação osmótica da cenoura (Daucus carota) em fatias .** 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ARAÚJO, J. C. R. de. Graduação em licenciatura em física, **Transferência de calor durante o processamento térmico em polpa de fruta armazenada em recipientes de forma cilíndrica .** 2016.
- ARAÚJO, L. F. de. **Solução numérica e implementação computacional da equação de difusão usando coordenadas generalizadas tridimensionais: aplicação na secagem de telhas ornamentais .** 260 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2018.
- ATAÍDE, J. S. P. de. **Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpas de frutas armazenadas em recipientes obtidos por revolução de áreas planas.** 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- BALBACH, A.; BOARIM, D. S. F. **As hortaliças na medicina natural.** Edições vida plena, 1993.

- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley e Sons, Inc., 2 ed. 912 p. 2001.
- BORGES, Fabrício Batista et al. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. 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.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd. ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1992. 414 p. ISSN 03064549. ISBN 0198534116.
- DA SILVA, Wilton Pereira et al. **Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions**. Agricultural Sciences, v. 3, n. 04, p. 545, 2012.
- DANTAS, Luis Antonio; MATA, M. E. R.; DUARTE, Maria Elita Martins. **Programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes de milho**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 13, n. 3, p. 309-318, 2011.
- DELMIRO, T. M. **Secagem da cenoura (*Daucus carota* L.) pelo método foammat**. Dissertação (B.S. thesis) | Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- DIAMANTE, Lemuel M. et al. **A new mathematical model for thin layer drying of fruits**. International journal of food science & technology, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.
- EMBRAPA, Cenouras. **Resumo informativos - DDT**, 1984.
- EVANGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**: Livraria Atheneu Editora, 1992.
- FARIAS, V. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 265 p. 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. **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, ROMEU. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, v. 229, 2004.

- GOPALAN, C. Rama Sastri BV, Balasubramanian SC. **Nutritive value of Indian foods**. National institute of Nutrition, ICMR, Hyderabad, 1991.
- GOUVEIA, D. S. et al. **Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja**. HOLOS, v. 1, p. 38-48, 2011.
- HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. **Principles of process engineering.: Kenya Agricultural Research Institute (KARI)**, 1997.
- Hiranvarachat . B, Suvarnakuta .P, Devahastin, S. **Isomerisation kinetics and antioxidant activities of B-carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions**. Food Chemistry, v.107, p. 1538-1546. 2008.
- HORTIBRASIL, P. B. p. a. M. d. **Normas de Classificação - Cenoura**. 2019.
- INCROPERA. Frank Incropera e David DeWitt - **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa et.al**. 6th. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008. 586 p. ISBN 978-85-216-1584-2.
- KALETA, Agnieszka; GÓRNICKI, Krzysztof. **Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer**. International journal of food science & technology, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.
- KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. **Rehydration kinetics of dehydrated products**. Journal of Food Engineering, v. 57, n. 1, p. 1-7, 2003.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,P. 453, 2012.
- MATA, M.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. **Programa computacional para simulação de secagem de grãos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p.453, 2012.
- MERCALI, G. D. et al. **Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, L.)**. International journal of food science & technology, Wiley Online Library, v. 45, n. 11, p. 2281-2289, 2010.
- Neto C.J.F, Figueiredo R.M.F; Queiroz, A.J.M. **Sensory evaluation and water activity of the seasoned cassava flour**. Lavras, 29(4), p.795-802, 2005.
- OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. **Isotermas desorção do resíduo agroindustrial da casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.4, p.565-569, 2005.
- 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, 2001.

REIS FILGUEIRA, Fernando Antonio. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2008.

RESENDE, J. M. et al. **Modificações sensoriais em cenoura minimamente processada e armazenada sob refrigeração**. Horticultura Brasileira, SciELO Brasil, 2004.

ROCHETI, E. F.S. **Estudo do processo de secagem em leito de espuma de cenoura, tomate, beterraba e morango**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014.

ROSA, J. G. **Secagem de cenoura (daucus carota l.) em micro-ondas**. Universidade Federal de São Carlos, 2010.

Sacilik K. **Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.)**. Universidade Federal de São Carlos, 2010.

SILVA, J. S.; AFONSO, A.D.L **Secagem e secadores: secagem e armazenamento d produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. p.107-138.

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 JÚNIOR, A. F.; FARIAS, V. S. O. ; ATAIDE, J. S. P. ; FRANCO, C. M. R. ; SILVA, W. P. ; SILVA, C. M. D. P. S. . **Description of convective drying of carrot circular slices including shrinkage and variation of effective diffusivity**. Sylwan, v. 163, p. 243-269, 2019.

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

SILVA, Wilton P.; SILVA, CMDPS. **LAB Fit curve fitting software. Nonlinear regression and treatment of data program**, v. 7, p. 33, 2011.

SILVA, W. P. D. et al. **Difusion 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.

SRA, Sarabjeet Kaur; SANDHU, Kulwant Singh; AHLUWALIA, Preeti **Effect of processing parameters on physico-chemical and culinary quality of dried carrot slices.** Journal of food science and technology, v. 48, n. 2, p. 159-166, 2010.

TEIXEIRA, L. j. Q. **Campos elétricos pulsados de alta intensidade no processamento de suco de Cenoura.** 2008.f.149. Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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.