

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Efeito do campo elétrico moderado como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de berinjela (*Solanum melongena* L.)

- Dissertação de Mestrado -

Bianca da Cunha Jácome Vêras

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Efeito do campo elétrico moderado como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de berinjela (*Solanum melongena L.*).

Bianca da Cunha Jácome Vêras

Dissertação de Mestrado
apresentada como requisito
parcial à obtenção do título
de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Aline Schilling Cassini

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenadora: Prof. Dr^a. Isabel Cristina Tessaro

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Veras, Bianca da Cunha Jácome
Efeito do campo elétrico moderado como
pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de
berinjela (*Solanum Melongena L.*) / Bianca da Cunha
Jácome Veras. -- 2019.

102 f.

Orientador: Ligia Damasceno Ferreira Marczak.

Coorientador: Aline Schilling Cassini.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. Secagem. 2. MEF. 3. Berinjela. I. Marczak, Ligia
Damasceno Ferreira, orient. II. Cassini, Aline
Schilling, coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Efeito do campo elétrico moderado como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de berinjelas (Solanum melongena L.)*, elaborada por Bianca da Cunha Jácome Vêras, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Débora Jung Luvizetto Faccin

Profa. Dr. Giovana Domeneghini Mercali

Dr.^a Patrícia Benelli

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela disposição em enfrentar toda essa longa jornada e por ter colocado em meu caminho pessoas que levarei comigo pelo resto de minha vida.

Às minhas orientadoras Profa. Ligia Damasceno Ferreira Marczak e Profa. Aline Schilling Cassini pelo apoio, ensino, amizade e compreensão ao longo da elaboração desta dissertação.

Aos colegas e amigos do LATEPA pela amizade, paciência e grande ajuda durante todo o trabalho.

Aos meus queridos amigos do laboratório, Carol, Débora, Cibele, Naira, Ana, Ivanor, Bethania pela amizade, alegrias e incentivo.

As minhas amigas que o PPGEQ me proporcionou a conhecer: Bruna e Karen, muito obrigada pelo apoio, palavras de incentivo, amizade e suporte em todo período em que morei em Porto Alegre.

A profa. Giovana Mercali pelas colaborações e sugestões.

A Ligia pelo carinho, apoio, paciência, dedicação e por ter sido uma verdadeira mãe para mim nesse período em que passei no Sul. Obrigada por tudo que fizeste por mim e minha família.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química e a CAPES pelo auxílio financeiro.

À minha família pelo constante apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu esposo, Moacir, pela paciência, apoio e compreensão em todos os momentos, especialmente na etapa de finalização do trabalho. As minhas filhas Giovanna e Giulia por abdicar do tempo com a mamãe para que eu pudesse concluir este trabalho.

RESUMO

A secagem é uma das técnicas mais antigas e, até hoje, mais utilizadas para a conservação dos alimentos. A aplicação de pré-tratamentos é uma alternativa para reduzir custos, tempo de processamento e, em alguns casos, melhorar a qualidade do produto final. O campo elétrico moderado (MEF, do inglês *Moderate Electric Field*) tem se mostrado eficaz no aumento da taxa de secagem em alimentos quando usado como pré-tratamento ao processo convencional de secagem convectiva. Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar o comportamento das curvas de secagem em fatias de berinjela sob diferentes condições de temperatura de secagem e tensões de MEF, visando aumentar a taxa de secagem e a difusividade mássica da água nas berinjelas. Para o estudo, um planejamento experimental foi realizado, variando-se a temperatura de secagem (40, 60 e 80 °C) e a tensão (0, 50 e 100 V). O MEF foi aplicado durante um período de 10 min sem efeito térmico, ou seja, mantendo a temperatura das fatias inferiores a 35 °C em todas as amostras. Em seguida, as fatias de berinjela, tratadas e não tratadas com MEF, foram desidratadas em um secador convectivo nas temperaturas predefinidas para o estudo. A solução analítica do modelo de difusão transiente da Segunda Lei de Fick aplicado para uma placa plana foi utilizado para determinar a difusividade da água nas fatias de berinjela. Os resultados obtidos mostraram que a secagem das fatias de berinjelas apresenta somente o período de taxa decrescente, onde o processo é controlado apenas pela difusão interna da água no alimento. As maiores reduções de umidade foram registradas na temperatura mais alta e a aplicação de MEF não apresentou diferenças significativas quando comparado à secagem convencional. Para as condições anteriormente mencionadas, a difusividade efetiva da água na berinjela se estabeleceu nas faixas de 7,09 a 7,23 x 10⁻¹⁰ m²s⁻¹, 1,29 a 1,37 x 10⁻⁹ m²s⁻¹ e 1,86 a 2,09 x 10⁻⁹ m²s⁻¹ quando secas nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C, respectivamente. Esses resultados indicam que não houve eletroporação do tipo irreversível (rompimento definitivo do tecido vegetal) durante a aplicação de MEF nas fatias berinjela dentro da faixa dos parâmetros de tensões testadas; porém foi verificada uma possível ocorrência de uma eletroporação do tipo reversível. Para a validação dos dados relativos à cinética de secagem, diferentes modelos matemáticos foram avaliados, sendo o modelo de Wang & Singh (1978) aquele que melhor descreveu a cinética de secagem das fatias de berinjela pre-tratadas com MEF a partir dos dados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Secagem, campo elétrico moderado, eletroporação, difusividade, berinjela.

ABSTRACT

Drying is one of the oldest and most used techniques for food preservation. The application of pre-treatments is an alternative to reduce costs, processing time and, in some cases, improve the quality of the final product. The Moderate Electric Field (MEF) has been shown to be effective in increasing the drying rate in food when used as a pretreatment to the conventional convective drying process. In this context, the present work aims to evaluate the behavior of drying curves in eggplant slices under different drying temperature and MEF voltage conditions, aiming to increase the drying rate and the effective moisture diffusivity in the eggplants. An experimental design was performed by varying the drying temperature (40, 60 and 80 °C) and the voltage (0, 50 and 100 V). The MEF was applied during a period of 10 min with non-thermal effect, that is, keeping the slice temperature below 35 °C in all samples. Then, eggplant slices, treated and not treated with MEF, were submitted to the drying process in a convective drier at the temperatures predefined for the study. The analytical solution of the Fick Second Law transient diffusion model applied to a flat plate was used to determine the effective moisture diffusivity in the eggplant slices. The results showed that eggplant drying presents only the decreasing rate period, where the process is controlled only by the internal diffusion of the moisture in the food. The highest moisture reductions were recorded at the highest temperature and the pretreatment showed no significant differences when compared to conventional drying. For the mentioned conditions, the effective moisture diffusivity in the eggplant was established in the ranges from 7.09 to $7.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, 1.29 to $1.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ and 1.86 to $2.09 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ when dried at temperatures of 40, 60 and 80 °C, respectively. The results indicate there was no irreversible electroporation (plant tissue disruption) during the application of MEF in the eggplant slices within the range of the voltage parameters tested; however, a possible occurrence of electroporation of the reversible type. For the validation of drying kinetics data, different mathematical models were evaluated, Wang & Singh (1978) model being the one that best described the drying kinetics of eggplant slices pretreated with MEF from experimental data.

Keywords: Drying, MEF, electroporation, diffusivity, eggplant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação da berinjela - <i>Solanum melongena L.</i> - de acordo com formato e cor da casca.....	5
Figura 2 - Diagrama do processo de secagem.	8
Figura 3 – Curvas típicas de um processo de secagem.....	11
Figura 4 – Variação da taxa de secagem ($-dx/dt$) em função do teor de umidade em base seca (g água/ g sólido seco).....	19
Figura 5 - Esquema representativo dos fenômenos de eletroporação reversível e irreversível.	23
Figura 6 – Etapas do processo de obtenção de fatias de berinjelas secas utilizando como pré-tratamento o MEF.	27
Figura 7 – Fatias da Berinjela (<i>Solanum melongena L.</i>) com espessura de aproximadamente 4,5 mm e diâmetro de 8 a 10 cm com geometria de placa plana.	27
Figura 8 – Sistema de campo elétrico moderado e seus periféricos utilizado para o tratamento com campo elétrico moderado.....	29
Figura 9 – Célula de MEF para o pré-tratamento.....	30
Figura 10 – Interface do software utilizado para aquisição de dados.....	30
Figura 11 – Equipamento piloto de secagem, onde: (a) entrada de ar, (b) ventilador, (c) controladores, (d) resistências, (e) suporte com amostras, (f) balança semi-analítica, (g) inversor de frequência e (h) saída de ar.	32
Figura 12 – Amostras de berinjela <i>in natura</i> sem imersão na solução de branqueamento (a) e após imersão na solução de branqueamento (b).	38
Figura 13 - Efeito do tratamento de branqueamento químico para redução da atividade enzimática após secagem convencional (a e b) e com pré tratamento de MEF (c), onde: (a) berinjela seca sem tratamento de branqueamento químico, (b) e (c) berinjela seca com tratamento de branqueamento químico.....	39
Figura 14 – Número de Fourier em função do tempo de secagem para condições experimentais de temperatura de 60 °C e campo elétrico moderado de 100 V.	41

Figura 15 – Curvas de secagem para fatias de berinjelas na temperatura de 40, 60 e 80 °C, com tratamento por MEF (0, 50 e 100 V).	45
Figura 16 – Fatias de berinjela após o teste de incorporação do corante azul de metileno através da aplicação de campo elétrico moderado nas tensões de 0, 50 e 100V.	47
Figura 17 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C.	51
Figura 18 - Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C.	53
Figura 19 - Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de cultivares de berinjelas disponíveis no mercado brasileiro.....	5
Tabela 2 – Composição centesimal da berinjela por 100g.	6
Tabela 3 – Valores mínimos de a_w para desenvolvimento de microrganismos.....	9
Tabela 4 – Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados da curva de secagem.....	15
Tabela 5 – Valores estimados para a difusividade mássica efetiva de alguns vegetais.....	17
Tabela 6 – Composição química da solução de branqueamento químico.....	28
Tabela 7 – Temperatura do banho de resfriamento para as diferentes tensões aplicadas no pré-tratamento com MEF.	31
Tabela 8 – Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados da curva de secagem.....	34
Tabela 9 – Condições de tensão e temperatura do ar de secagem.	36
Tabela 10 - Dados de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a 20 °C das amostras de berinjela <i>in natura</i> e submetidas aos processos de congelamento e descongelamento.....	37
Tabela 11 – Conteúdo da umidade no equilíbrio para as diferentes condições experimentais de secagem de fatias de berinjela.	40
Tabela 12 – Difusividade mássica efetiva da água em m^2s^{-1} para as diferentes condições experimentais de secagem das fatias de berinjela	42
Tabela 13 – Parâmetros estatísticos dos modelos avaliados para descrever a cinética de secagem das fatias de berinjelas tratadas e não tratadas com MEF à 40 °C.	49
Tabela 14 - Constantes do modelo de Wang & Singh para secagem de fatias de berinjelas à 40 °C.....	51
Tabela 15 - Parâmetros estatísticos para o modelo de Wang e Singh avaliados para descrever a cinética de secagem das fatias de berinjelas tratadas e não tratadas à 60 e 80 °C.....	52
Tabela 16 - Constantes do modelo de Wang & Singh para secagem de fatias de berinjelas à 60 e 80 °C.....	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MEF	<i>Moderate Electric Field</i> (Campo Elétrico Moderado)
PEF	<i>Pulsed Electric Field</i> (Campo Elétrico Pulsado)
POD	Peroxidase
PPO	Polefenoloxidase
D_{eff}	difusividade efetiva da água
Fo	número de Fourier
HVED	<i>High Voltage Electrical Discharges</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a_w	atividade de água
b.s.	base seca
d	diâmetro (cm)
t	tempo (s, min. e h)
m	massa (g)
R^2	coeficiente de determinação
T	temperatura (°C)
v/v	volume/volume
X	umidade (g de água por g de sólido seco)
X_0	umidade inicial
X_c	umidade crítica
$X_{eq}; X_\infty$	umidade de equilíbrio
dX/dt	variação da quantidade de umidade em função do tempo
L_c	comprimento característico (m)
M_t/M_∞	perda de água adimensional
MR	razão de umidade adimensional
m_i	massa inicial (g)
m_f	massa final (g)
$a, b, n \text{ e } x$	constantes dos modelos matemáticos
k, k_i	constantes cinéticas dos modelos matemáticos (s ⁻¹)
χ^2	chi quadrado
$RQEM$	raiz quadrada do erro médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	Fundamentos teóricos e REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	BERINJELA	4
3.2	SECAGEM.....	7
3.2.1	Atividade de água.....	9
3.2.2	Escurecimento enzimático	10
3.2.3	Curvas de secagem	10
3.2.4	Mecanismos de migração de umidade.....	13
3.2.5	Modelagem matemática da cinética de secagem	14
3.2.6	Difusividade mássica efetiva (D_{eff})	15
3.2.7	Modelos para prever a umidade de equilíbrio (X_{∞})	18
3.3	TECNOLOGIAS EMERGENTES	19
3.3.1	Campo elétrico moderado (MEF).....	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	PREPARO DA AMOSTRA	26
4.2	BRANQUEAMENTO QUÍMICO.....	27
4.3	TEOR DE UMIDADE	28
4.4	APLICAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO MODERADO (MEF)	29
4.5	SECAGEM CONVECTIVA.....	32
4.6	MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM.....	33
4.7	DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (D_{EFF}) E UMIDADE DE EQUILÍBRIO (X_{∞}).....	34
4.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	PREPARO DA AMOSTRA	37
5.2	BRANQUEAMENTO QUÍMICO.....	38
5.3	DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (D_{EFF}) E UMIDADE DE EQUILÍBRIO (X_{∞}).....	39
5.4	APLICAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO MODERADO (MEF) E SECAGEM.....	45
5.5	MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DAS FATIAS DE BERINJELA ..	49
6	CONCLUSÃO	56
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

APÊNDICE A	66
APÊNDICE B.....	70

1 INTRODUÇÃO

A berinjela (*Solanum melongena L.*) é uma fruta pertencente à família das Solanaceas, o qual compreende cerca de 2300 espécies (SEKARA A; CEBULA S; KUNICK E, 2007). Sua planta é originária do sudoeste asiático e apresenta uma boa adaptação para cultivos em regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, há um grande número de cultivares, com plantas que podem atingir de 40 cm a mais de 2 m de altura, e seus frutos podem ter diversos tamanhos, formatos e cores, embora os mais cultivados sejam os frutos de formato oblongo, de coloração roxo-escuro, brilhante e pedúnculo verde (EMBRAPA, 2007).

O fruto da berinjela constitui uma boa fonte de sais minerais e vitaminas; seu valor calórico total pode ser comparado ao do tomate (*Solanum lycopersicum L.*). Sua composição é formada principalmente por água, fibras e carboidratos. Os principais minerais encontrados nas berinjelas são: cobre, enxofre, magnésio, manganês, zinco, potássio, sódio, cálcio, ferro e fósforo. Dentre as vitaminas encontradas estão: retinol (vitamina A), tiamina (vitamina B), riboflavina (vitamina B2), ácido ascórbico (vitamina C) (NEPA, 2011), além de compostos fenólicos e antioxidantes. Por conter alguns biocompostos, a berinjela (*Solanum melongena L.*) tem apresentado efeitos positivos no tratamento de doenças crônicas não transmissíveis, tais como diabetes, obesidade, doenças cardiovasculares, entre outras (CARVALHO; LINO, 2014).

A comercialização da berinjela é normalmente realizada a granel e sem uso de refrigeração, ocasionando a perda da qualidade do produto de forma rápida, o que está relacionado às avarias passíveis de ocorrer durante o transporte e armazenamento, dentre as quais pode-se citar o murchamento e a ausência de brilho, fazendo com que ocorra depreciação do seu valor comercial e nutricional (ERTEKIN; YALDIZ, 2004). Dessa forma, há a necessidade de se estudar novas formas de beneficiamento da matéria-prima, os quais possibilitam minimizar a degradação do produto.

A secagem é definida como um processo de remoção da umidade devido à troca de calor por convecção e transferência de massa. A técnica é uma operação clássica de conservação de alimentos, sendo aplicada com a finalidade de melhorar a conservação das matérias-primas através do aumento do prazo de validade, além da redução do peso para transporte e da redução do espaço necessário para armazenamento, quando comparados a produtos enlatados e congelados.

O conteúdo de água presente no alimento é um dos principais fatores que causam a deterioração por microrganismos e alterações por reações químicas e enzimáticas. Logo, a diminuição desse conteúdo é uma forma de conservar a matriz alimentícia. Em um processo de

secagem de alimentos, o controle desse fator é muito importante para que se obtenha um produto de qualidade e com vida útil elevada.

Algumas alterações podem ocorrer durante o processo, reduzindo, assim, a qualidade do produto desidratado quando comparado ao produto *in natura*. As mudanças mais comuns são observadas quanto à textura, ao sabor e ao odor, além de possíveis mudanças no conteúdo nutricional (MISHRA; GAUTAM; SHARMA, 2012). Essas alterações podem ser minimizadas com melhorias nas condições operacionais dos equipamentos e dos parâmetros utilizados no processo de secagem (ERTEKIN e YALDIZ, 2004).

Novas tecnologias vêm sendo utilizadas para, juntamente com a secagem, fornecer uma melhoria no processamento dos alimentos e das condições operacionais. A utilização de pré-tratamentos, tais como o campo elétrico moderado (MEF, do inglês *Moderate Electric Field*), tem se mostrado eficaz no aumento da taxa de secagem em alimentos pelo aumento da difusividade mássica efetiva da água, diminuindo, conseqüentemente, o tempo da secagem e reduzindo a energia necessária ao processo. A exposição das células do tecido vegetal a um campo elétrico promove o rearranjo das moléculas de fosfolipídeos, o que pode induzir a formação de poros nas membranas celulares tornando-a permeável. Tal fenômeno pode gerar um aumento da transferência de massa de componentes do meio interno para o meio externo, o que pode impactar positivamente no aumento da difusividade mássica efetiva da água nos alimentos. Vale a pena ressaltar que, na literatura, não se encontram muitos dados referentes à secagem de materiais que tiveram um pré-tratamento com aplicação de MEF.

Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar o efeito do MEF como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de berinjela. A presente dissertação está esquematizada da forma apresenta a seguir.

O Capítulo 2 apresenta o objetivo geral os objetivos específicos deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica. O Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos utilizados, abordando as metodologias de preparo da matéria-prima, de branqueamento químico, de determinação do teor de umidade, do sistema de campo elétrico moderado utilizado neste trabalho, do processo de secagem e da modelagem da cinética deste processo.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, as considerações finais e as sugestões para pesquisas posteriores.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da utilização do campo elétrico moderado como tecnologia alternativa ao pré-tratamento da secagem convectiva de fatias de berinjela (*Solanum melongena L.*).

Considerando esse objetivo geral, os objetivos específicos foram os seguintes:

- avaliar as taxas de secagem das fatias de berinjela utilizando secador piloto convectivo, com circulação forçada de ar, em diferentes condições de temperatura do ar de secagem (40, 60 e 80 °C);
- aplicar campo elétrico moderado (MEF) como pré-tratamento nas fatias de berinjelas, identificando as melhores condições de processamento (tensão aplicada);
- avaliar o efeito da tensão durante a aplicação de MEF como pré-tratamento na taxa de secagem e na difusividade mássica efetiva da água;
- realizar a modelagem cinética da secagem para validação dos dados experimentais avaliando diversos modelos empíricos e o modelo da difusão de Fick;
- determinar a difusividade mássica da água nas fatias de berinjela através do uso da solução analítica da Segunda Lei de Fick para a difusão transiente em placa plana;
- avaliar o efeito do MEF na modificação da estrutura do tecido celular da berinjela.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma revisão sobre as principais características da berinjela, abordando aspectos relativos à classificação, composição e cultivo. Na sequência, é apresentada uma revisão sobre secagem de alimentos e uma descrição sobre alguns modelos matemáticos comumente aplicados ao estudo da cinética de secagem. Por fim, é realizada uma descrição sobre tecnologias elétricas e, mais especificamente, de campo elétrico moderado.

3.1 BERINJELA

A berinjela é um fruto botanicamente classificada como *Solanum melongena L.* pertencente à família Solanaceae, assim como o tomate, a pimenta, o pimentão, a batata e o jiló (EMBRAPA, 2007). Originária do sudoeste asiático, essa planta apresenta uma adaptação para o cultivo nas regiões tropicais e subtropicais (SEKARA A; CEBULA S; KUNICK E, 2007). A temperatura diurna ótima para o crescimento e produção de frutos de berinjela encontra-se na faixa de 25 a 35 °C (WEBER et al., 2013). No entanto, essa espécie é menos tolerante a baixas temperaturas quando comparada, por exemplo, ao tomateiro (*Solanum lycopersicum L.*) e não tolera geada.

No Brasil, o maior produtor é o estado de São Paulo, seguido por Minas Gerais, Paraná e Distrito Federal (EMBRAPA, 2007). Não há disponíveis na literatura dados atuais que descrevem valores relativos à produção de berinjela no Brasil. Conforme dados do IBGE, no ano de 2006, a produtividade foi de aproximadamente 78 mil toneladas, das quais 79,23% da produção foi oriunda da região Sudeste (IBGE, 2006). A produção mundial em 2011, por sua vez, esteve em torno de 48 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2012).

Trata-se de uma planta perene que, em alguns casos, somente produz fruto uma única vez devido à morte frequente dessas plantas ainda no primeiro ano, o que é causado, principalmente, por doenças. Quando podadas no primeiro ano de produção, geralmente rebrotam e produzem frutos novamente no segundo ano. A intensa formação de ramos laterais confere à planta o aspecto de arbusto bem copado, sendo a polpa do seu fruto fibrosa, elástica e de sabor amargo (EMBRAPA, 2007).

Diversas variedades de espécies de berinjelas estão catalogadas pelo mundo; entre as mais difundidas estão a *Solanum melongena L.* (berinjela comum) e as espécies *Solanum aethiopicum* (berinjela escarlate) e *Solanum macrocarpo*, sendo, esta última, cultivada na África subsaariana (MORRIS; TAYLOR; JAMES, 2017).

Os cultivares de berinjelas diferem entre si em produtividade, formato, coloração, brilho dos frutos e resistência a doenças. No Brasil, o tipo mais comum é a berinjela de formato

oblongo, de coloração roxo-escuro, brilhante e pedúnculo verde (EMBRAPA, 2007). Na Tabela 1, estão apresentados alguns tipos de berinjelas produzidas no Brasil, bem como suas características.

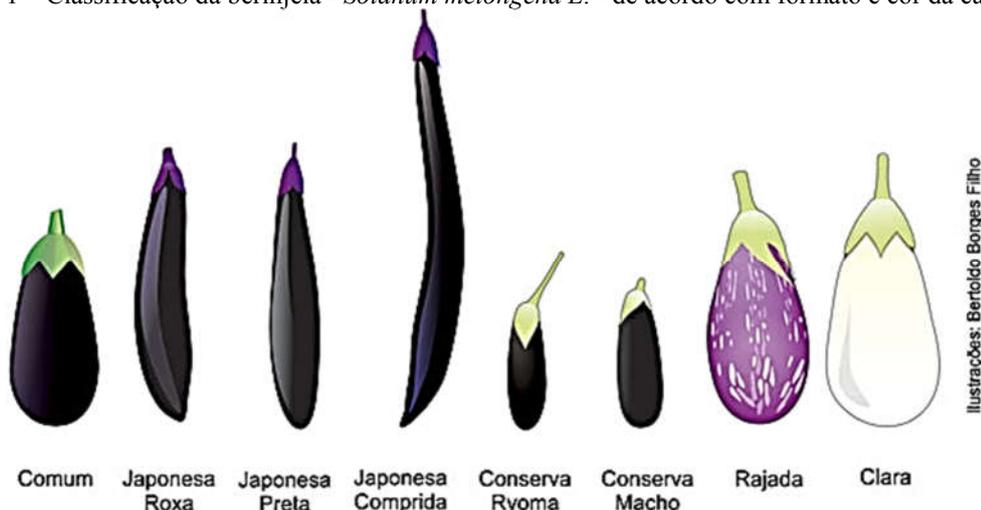
Tabela 1 – Características de cultivares de berinjelas disponíveis no mercado brasileiro.

Cultivares	Início de colheita (dias após a semeadura)	Planta	Cor do fruto	Formato	Peso médio do fruto (g)	Tamanho do fruto (cm)
Embu	110-130	Vigorosa	Vinho- escuro	Ablongo	200-250	-
Flórida Market	100-120	Muito vigorosa	Roxo- escuro	Ablongo	200-250	-
Preta Comprida	100	-	Roxo	Cilíndrico alongado	250	-
Comprida Roxa	100-140	Pouco vigorosa	Roxo	Cilíndrico alongado	250-300	25 x 7
Redonda Roxa	100-140	Porte médio	Roxo	Redondo	250-300	3 a 10
Redonda Rosa		Vigor médio	Rosa- degradê	Redondo	-	-
Ciça	80-90	Muito vigorosa	Roxo- escuro	Ablongo alongado	200-250	-

Fonte: Adaptado de (EMBRAPA, 2007).

Segundo o Programa Horti & Fruti Padrão da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (MOREIRA et al., 2006), a berinjela pode ser classificada comercialmente de acordo com sua cor, comprimento e diâmetro, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação da berinjela - *Solanum melongena* L. - de acordo com formato e cor da casca.



(adaptado de Bertoldo Borges Filho)

A berinjela é um vegetal com baixo teor de proteínas, alta concentração de água, rico em fibras, sais minerais, vitaminas, compostos fenólicos e antioxidantes (CARVALHO e

LINO, 2014; MORRIS; TAYLOR; JAMES, 2017). Entretanto, o valor calórico total do fruto (vide Tabela 2) é baixo, tendo, a cada 100 g de material cozido, somente 1% do valor calórico diário recomendado de uma dieta.

Tabela 2 – Composição centesimal da berinjela por 100g.

Componentes	Berinjela Crua	Berinjela cozida
Umidade (%)	93,8	94,4
Energia (kcal)	20	19
Proteína (g)	1,2	0,7
Lipídeos (g)	0,1	0,1
Carboidrato (g)	4,4	4,5
Fibra alimentar (g)	2,9	2,5
Cinzas (g)	0,4	0,3
Cálcio (mg)	9	11
Magnésio (mg)	13	9
Manganês (mg)	0,1	0,11
Fósforo (mg)	20	15
Ferro (mg)	0,2	0,2
Sódio (mg)	Traço	1
Potássio (mg)	205	105
Cobre (mg)	0,06	0,04
Zinco (mg)	0,1	0,1
Tiamina (mg)	0,04	0,04
Riboflavina (mg)	0,05	Traço
Piridoxina (mg)	Traço	Traço
Niacina (mg)	Traço	Traço
Vitamina C (mg)	3	Traço

Fonte: Taco, 2011.

Por conter biocompostos em sua composição, a berinjela tem sido citada por diversos autores como um dos alimentos classificados como funcionais. A Portaria nº 398 de 30 de abril de 1999 da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde define que: “*alimento funcional é todo aquele alimento ou ingrediente que, além das funções nutricionais básicas, quando consumido na dieta usual, produz efeitos metabólicos e/ou fisiológicos e/ou benéficos à saúde, devendo ser seguro para consumo sem supervisão médica*”. Neste contexto, CARVALHO e LINO (2014) conseguiram demonstrar os efeitos positivos da berinjela para o tratamento de doenças crônicas não transmissíveis (diabetes, obesidade, doenças cardiovasculares, entre outras).

Os compostos funcionais presentes na berinjela são compostos fenólicos, antioxidantes e fibras. A *Solanum melongena L.* possui um alto teor de ácido clorogênico, um composto fenólico com elevado potencial antioxidante, e a cor externa do fruto ocorre devido à presença

de flavonóides do tipo antociânicos, que também apresentam propriedades antioxidantes (CARVALHO e LINO, 2014). A redução do peso corporal associada ao consumo da berinjela ocorre devido ao elevado teor de fibra alimentar encontrada em sua polpa, o que a torna importante também em dietas para emagrecimento, uma vez que proporciona redução da ingestão energética (AFBR, 2009).

GARCÍA-SALAS et al. (2014) encontraram um total de 25 compostos fenólicos em diferentes cultivares de berinjela, sendo que, desse total, 9 foram encontrados pela primeira vez em *Salonaceae*; dentre eles estão o dehidrodímero do ácido cafeoilquínico, ácido cafeoilshiquímico, ácido homovanílico-hexose, campeferol-dihexosídeo, campeferol-3-O-rutinosídeo, amida do dihidrocoumaroil glicosídeo, espermina tris(dihidrocafeoil). Os autores ainda constataram que as variações no teor de polifenóis podem estar diretamente ligadas a fatores climáticos, o que ocorre em particular em regiões de altas temperaturas, as quais podem ocasionar efeitos significativamente negativos sobre o teor de compostos fenólicos na berinjela.

Submeter a berinjela a processos que visam aumentar a sua vida útil é de extrema importância, uma vez que seu fruto possui uma alta atividade de água tornando-a uma matriz facilmente degradável por microrganismos e por outras reações biológicas indesejáveis. A secagem diminui a quantidade de água livre no alimento, aumentando a sua pressão osmótica prevenindo a proliferação de microrganismos e reduzindo a ação de enzimas que podem promover alteração nas condições sensoriais dos alimentos. Assim sendo, o uso de algum tipo de processamento que tenha como objetivo diminuir sua atividade de água é interessante do ponto de vista tecnológico.

3.2 SECAGEM

A secagem é definida como um processo de remoção da umidade devido à transferência simultânea de calor e massa. A técnica é um método clássico de conservação de alimentos, sendo aplicada com a finalidade de melhorar a conservação das matérias-primas através do aumento do prazo de validade, da redução do peso para o transporte e da redução do espaço necessário para armazenamento (FELLOWS, 2006).

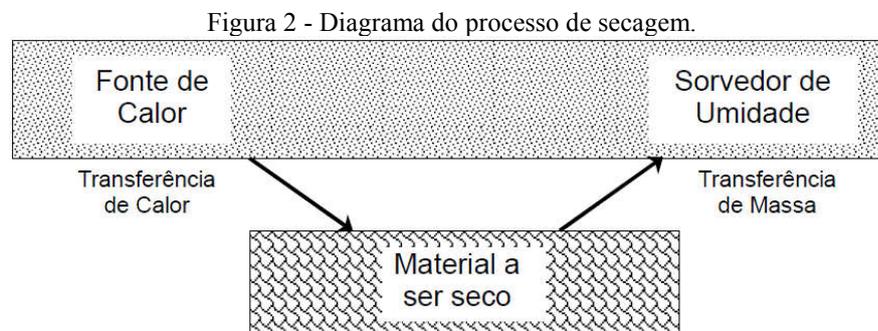
No entanto, além da secagem promover a remoção do conteúdo de água do alimento, ela também causa mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas da matriz alimentícia, tais como alterações da atividade enzimática, além da redução de contaminação microbiana, sabor, textura, aroma e viscosidade dos alimentos (CÁNOVAS BARBOSA e VEGA MERCADO, 1996). Uma das alterações físicas mais importantes que ocorre durante a secagem é a redução de volume. Calor e perda de água podem provocar mudanças na estrutura

celular do alimento, gerando mudanças na sua forma e diminuindo as suas dimensões (MAYOR e SERENO, 2004).

A técnica de secagem é um processo complexo, que engloba o transporte simultâneo de calor, massa e quantidade de movimento. A transferência de calor e massa são os principais fatores que promovem a secagem, sendo que a transferência de quantidade de movimento ocorre em menor escala.

Quando um alimento contendo umidade é submetido à secagem, ocorrem dois processos simultâneos: a transferência de calor através dos mecanismos de condução, convecção e/ou radiação, e a transferência de umidade interna do interior do alimento até a sua superfície. Estes mecanismos dependem do teor de umidade do sólido, tempo de secagem, velocidade do ar de secagem, temperatura do material e natureza física do sólido.

Para que o processo de secagem ocorra é necessário que calor (geralmente ar não saturado) seja fornecido com o objetivo de evaporar a umidade contida no material. Além disso, deve haver um meio de remoção da umidade fornecido pelo vapor de água formado na superfície do material que será seco (PARK, 2008). A Figura 2 apresenta um esquema de como ocorre um processo de secagem, onde uma fonte quente fornece calor para um material úmido promovendo evaporação da água seguida da transferência de massa convectiva que irá arrastar o vapor formado. Dessa forma, ocorre uma transferência de calor do ar para o material a ser seco devido à diferença de temperatura. No mesmo instante, a diferença entre a pressão de vapor de água do ar e da superfície do material, gera uma transferência de massa para o ar através do vapor de água formado (PARK, 2008).



3.2.1 Atividade de água

Segundo MUJUMDAR (1995) e CÁNOVAS BARBOSA e VEGA MERCADO (1996), a umidade de uma matriz alimentícia é a quantidade de moléculas de água que se encontra ligada ou não às diversas partes desse alimento. O conteúdo de água de um alimento é o principal fator que causa a deterioração por microrganismos e alterações devido às reações químicas e enzimáticas (MARIA e CELESTINO, 2010). Nos alimentos, a água se encontra sob as formas de água ligada, água parcialmente ligada e água não ligada.

A água ligada ou combinada está fortemente ligada à estrutura molecular do alimento e por isso não é fácil de ser eliminada. Na superfície de macromoléculas, tais como o amido, a pectina, a celulose e as proteínas, ela se encontra adsorvida por forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio, estando ligada quimicamente às estruturas do tecido do alimento. Esse tipo de água não está disponível para o crescimento de microrganismos e para reações químicas e enzimáticas e, desta forma, dificilmente é determinada pelos métodos convencionais de análise de umidade (GAVA; SILVA; FRIAS, 2009). A porção de água não ligada (ou água livre) está presente entre os espaços intergranulares e entre os poros do alimento. Essa água é facilmente evaporada, é congelável, funciona como solvente e está disponível para o crescimento dos microrganismos.

A atividade de água (a_w) expressa o teor de água livre do alimento e é definida como sendo a razão entre a pressão de vapor de água em equilíbrio no produto e a pressão de vapor da água pura em uma mesma temperatura (FELLOWS, 2006). Essa propriedade é considerada um dos fatores mais importantes no que diz respeito à estabilidade dos alimentos, pois quantifica a água disponível para o desenvolvimento de microrganismos e reações que podem afetar o alimento. Todos os microrganismos têm uma atividade de água mínima para se desenvolver (ver Tabela 3). Para valores de a_w entre 0,20 e 0,40, a água presente está fortemente ligada ao produto, não estando disponível para quaisquer tipos de reações. Muitas bactérias não conseguem se desenvolver em valores de atividade de água menores do que 0,91, e muitos bolores não se multiplicam em valores menores do que 0,80. No geral, considera-se 0,60 como o valor mínimo para que ocorra o desenvolvimento de microrganismos.

Tabela 3 – Valores mínimos de a_w para desenvolvimento de microrganismos.

Grupo de micro-organismos	Valores mínimos de a_w
Maioria das bactérias	0,91
Maioria das leveduras	0,88
Maioria dos bolores	0,8
Bactérias halofílicas	0,75
Fungos xerofílicos	0,65
Leveduras osmofílicas	0,6

Fonte: (VALSECHI, 2006).

A atividade de água (a_w) está diretamente ligada ao teor de umidade do alimento. Nos alimentos que passam pelo processo de secagem, a redução ou inibição da atividade enzimática e do crescimento microbiano, ocorre através da redução da atividade de água (a_w). Desta forma, dentre os fatores que contribuem para as reações enzimáticas e crescimento microbiano nos produtos alimentícios, a atividade de água pode ser considerado um parâmetro importante para auxiliar os processos de secagem.

3.2.2 Escurecimento enzimático

O escurecimento enzimático é um grande problema na pós-colheita de frutas e vegetais. Esse fenômeno é observado na berinjela, sobretudo após o corte, onde ela se torna imediatamente marrom (MISHRA; GAUTAM; SHARMA, 2012). Isso ocorre devido à atividade da enzima polifenoloxidase (PPO) e sua ação sobre os compostos fenólicos livres presentes no tecido celular da berinjela. Os principais fatores que determinam a taxa de escurecimento enzimático em frutas e legumes são as concentrações da PPO livre, teor de compostos fenólicos presente, temperatura e quantidade de oxigênio disponível (MISHRA; GAUTAM; SHARMA, 2012).

Sob o mesmo ponto de vista, o processamento de frutas e vegetais compromete a manutenção da qualidade do alimento afetando negativamente a aparência, promovendo a mudança de cor, bem como causando alterações nas características sensoriais dos produtos (NAYAK; LIU; TANG, 2015). A PPO degrada, na presença de oxigênio, os fenóis presentes no tecido vegetal formando pigmentos castanhos (MISHRA; GAUTAM; SHARMA, 2012).

Alguns métodos vêm sendo estudados para minimizar ou inibir o escurecimento enzimático através da eliminação de um ou mais dos compostos básicos necessários para que ocorra a reação. Com isso, alguns estudos mostraram resultados positivos em relação à utilização de câmaras de redução de pressão para armazenamento (LI et al., 2017), atmosfera modificada, uso de agentes químicos e tratamentos térmicos (DA SILVA; ROSA; BOAS, 2009). Além disto, há estudos envolvendo o uso de ácidos e seus derivados (que competem por substratos naturais) ou a aplicação de ácido ascórbico (que bloqueiam as enzimas PPO por quelatação do íon de cobre) (DOCIMO et al., 2016).

3.2.3 Curvas de secagem

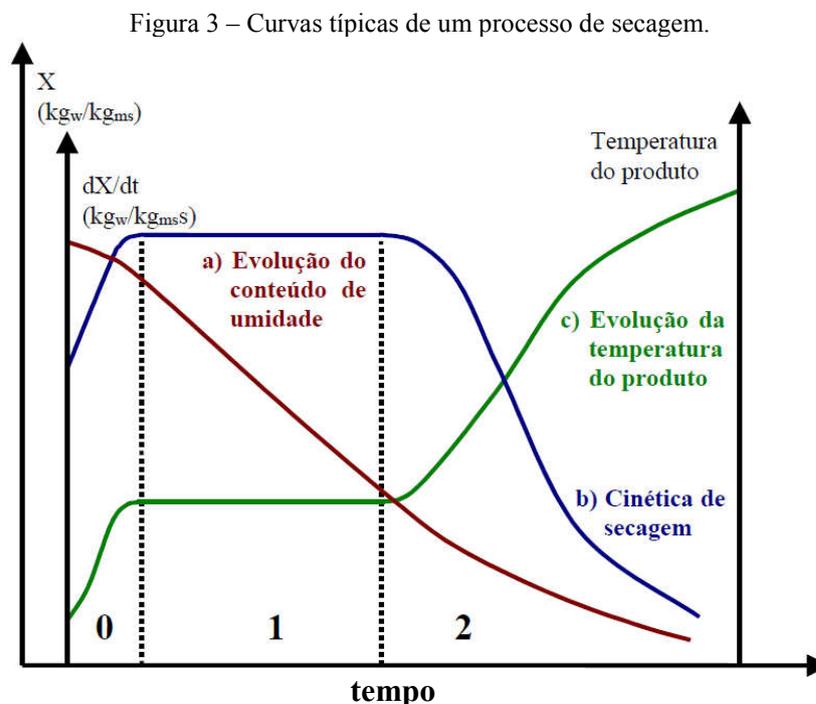
A cinética de secagem é uma informação importante quando se deseja desidratar um alimento e é obtida através das coletas de dados de umidade da amostra em função do tempo de secagem (ORDONEZ, 2005). Os produtos alimentícios possuem características diferentes,

como tamanho, textura e umidade inicial, o que impacta diretamente na taxa de secagem desses materiais.

Os fatores que afetam a secagem estão relacionados com os parâmetros do processo, tais como tipo de secador, temperatura, velocidade, pressão e umidade relativa do ar de secagem, além da natureza do produto, podendo-se citar a área superficial, a orientação dos constituintes, o tipo e a concentração dos solutos.

Conforme comentado anteriormente, na secagem ocorre a transferência de calor devido às diferenças de temperatura existentes entre o ar de secagem e o material a ser seco; ao mesmo tempo, a transferência de massa ocorre devido à diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto úmido. O progresso simultâneo das transferências de calor e massa no decorrer da operação de secagem faz com que o processo seja dividido em três etapas: período de indução, período de taxa constante e período de taxa decrescente.

A Figura 3 apresenta as curvas típicas de um processo de secagem utilizando condições do ar de secagem constante, onde X é a umidade do produto (kg água/kg de matéria seca), T é a temperatura, t é o tempo e dX/dt é a taxa de secagem. A curva (a) representa a evolução de X , a curva (b) representa dX/dt e a curva (c) representa a evolução de T , todos em relação ao tempo de secagem (PARK, 2008).



Fonte: PARK, 2008.

Para a maioria dos produtos alimentícios, a curva de secagem apresenta duas fases distintas: período de taxa constante e o período de taxa decrescente, o qual inicia quando se

atinge uma umidade crítica (X_c). Nessa fase, toda a umidade que cobre o alimento foi removida pela troca de calor convectiva, iniciando-se, assim, a transferência de massa interna. A seguir, são descritos as três etapas que acontecem durante um processo de secagem, conforme apresentado na Figura 3.

Período de indução (período 0)

O período de indução, também conhecido por período de estabilização, no qual as condições de superfícies do sólido equilibram-se com as do ar de secagem. No começo, o produto alimentício é mais frio do que o ar de secagem e, assim, o calor, proveniente de uma fonte quente ocasiona uma elevação de temperatura no interior do produto, ocorrendo um aumento da pressão e da taxa de secagem. Normalmente, essa fase constitui uma proporção insignificante ou inexistente no período total de secagem (PARK, 2008).

Período de taxa constante (período 1)

Essa fase da secagem é conhecida como período de taxa constante. Assim como no período anterior, a quantidade de água disponível no produto ainda é elevada. A água evapora como água livre. A temperatura do produto também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente, fazendo com que a taxa de secagem seja constante. Esse período se mantém enquanto a migração de água do interior do alimento até a superfície do produto for a mesma da evaporação desta para o meio, atingindo o teor de umidade crítico.

Para materiais biológicos, é incomum a existência deste período de secagem, uma vez que as condições operacionais de secagem são tais que as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do produto (PARK, 2008).

Período de taxa decrescente (período 2)

Nesse período não se encontram mais camadas de líquidos na superfície do alimento, onde a temperatura de superfície se encontra maior que a temperatura de bulbo úmido. A transferência de calor na superfície diminui à medida que o gradiente de temperatura reduz, o que se deve à aproximação da temperatura do ar de secagem em relação à temperatura da superfície do produto. Essa fase, onde começa a diminuir a taxa de secagem, dá-se a partir do chamado conteúdo crítico de umidade (X_c). Geralmente, esse valor relaciona-se com a

velocidade do ar de secagem, dimensões do produto, com os mecanismos de movimento da umidade e isotermas de sorção do alimento (ORDONEZ, 2005).

A taxa de secagem nesse período é limitada principalmente devido à velocidade de difusão da umidade dentro do alimento, reduzindo-se os efeitos dos fatores externos, em especial, da velocidade do ar de secagem (ORDONEZ, 2005). Nessa fase, a água está ligada à estrutura do alimento e seu deslocamento através da camada desidratada é muito mais lento. Durante todo esse período, o fator limitante do processo é a migração interna da água. No final deste período, a umidade do produto estará em equilíbrio com a do ar de secagem ($X = X_{eq}$) e a taxa de secagem (dX/dt) será nula.

3.2.4 Mecanismos de migração de umidade

A água movimenta-se no interior do alimento até a superfície através de diferentes mecanismos de migração interna. Dentre esses mecanismos, pode-se citar:

- movimento capilar ou por forças capilares: considerado o primeiro descolamento da água livre; esse mecanismo de migração é característico principalmente de materiais porosos, pois as forças de tensão superficiais podem induzir à migração das moléculas de água na estrutura interna do alimento;
- difusão de líquidos: o gradiente de umidade existente entre a superfície e o interior do produto promove a difusão do líquido; nesse caso, além da água livre, desloca-se também a água ligada e a taxa na qual o líquido se difunde depende da natureza do produto, da temperatura e da diferença de concentração entre a superfície e o meio;
- difusão de vapor: quando o alimento está praticamente desidratado, tanto a água livre como a água ligada podem evaporar sob a superfície e passar esse vapor através dos poros formados. Essa difusão ocorre devido ao gradiente de pressão parcial existente;
- movimento devido à retração do sólido: durante a secagem, os tecidos celulares do alimento sofrem um certo grau de retração, fazendo com que a água migre para a superfície do produto, proporcionando a saída progressiva da água das células;
- escoamento devido ao gradiente de temperatura: a diferença entre a temperatura no interior do alimento e a temperatura na superfície pode influenciar a migração interna da água até a superfície.

Durante a secagem, um ou mais desses mecanismos podem ocorrer. No entanto, em um processo de secagem de alimentos, a difusão é considerada como o principal mecanismo de migração interna de umidade. A difusão pode ocorrer no interior da estrutura sólida e/ou no

interior de capilares, poros e pequenos espaços saturados de vapor ou líquidos, podendo se estabelecer de diferentes maneiras e condições de secagem.

3.2.5 Modelagem matemática da cinética de secagem

A modelagem matemática da cinética de secagem é utilizada como uma ferramenta para prever o comportamento de determinados parâmetros operacionais através do aprimoramento de previsões e estimativas. De acordo com CASTRO; MAYORGA e MORENO (2018), a modelagem matemática da cinética de secagem envolve a solução de equações diferenciais parciais complexas de transferência de massa, calor e de quantidade de movimento, as quais podem ser resolvidas por diversos métodos numéricos ou analíticos. Os dados de umidade obtidos para diferentes temperaturas do ar de secagem e de umidades relativas do ar são convertidos para uma expressão de uma razão adimensional de umidade e, em seguida, cálculos de ajuste da curva com o tempo de secagem são realizados nos modelos propostos por vários pesquisadores (BABU et al., 2018).

Uma vez que a secagem de matrizes alimentícias é utilizada para estabilizar o produto através da redução da umidade (o que, por sua vez, reduz as alterações de ordem física, química e microbiológica, conduzindo ao aumento da vida útil) o estudo da modelagem matemática da cinética de secagem é um método útil na otimização de processos e *design* de secadores (CASTRO; MAYORGA e MORENO, 2018).

MACHADO (2009) considera que, mesmo que muitas suposições sejam feitas para as aplicações dos modelos, as equações de secagem baseadas na teoria da difusão de líquido têm sido muito utilizadas por pesquisadores que trabalham com secagem, principalmente quando o objeto em estudo são alimentos (CASTRO; MAYORGA e MORENO, 2018; CHEN et al., 2016; WIKTOR et al., 2013). As suposições citadas por MACHADO (2009) se referem ao encolhimento do produto como sendo desprezível, o equilíbrio térmico do material com o ar de secagem como sendo instantâneo; a ausência de efeitos de capilaridades e os efeitos de transferência de massa e calor como sendo também desprezíveis.

O desenvolvimento de muitas pesquisas é realizado utilizando modelos semiteóricos, pois estes demonstram ter uma combinação entre a teoria e a facilidade de manuseio. A maioria dos modelos semiteóricos se baseia, em geral, na Lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa, onde é feita a suposição de que as condições de fluxo sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de massa se restrinja apenas à superfície do produto (MACHADO, 2009). Alguns modelos semiteóricos, tais como Henderson e Pabis, Page, Midilli, Dois termos e Weibull, têm sido amplamente utilizados (ARSLAN; ÖZCAN;

MENGEŞ, 2010; CASTRO; MAYORGA e MORENO, 2018; SARIMESELI, 2011; WIKTOR et al., 2013). A Tabela 4 apresenta os modelos matemáticos semiteóricos mais utilizados para descrever a cinética de secagem.

Tabela 4 – Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados da curva de secagem.

Modelos matemáticos	Equação	Referência
Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$	(SARIMESELI, 2011)
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	(CHEN et al., 2016)
Henderson e Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(DEMIR et al., 2004)
Logarítimo	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$	(ERTEKIN; YALDIZ, 2004)
Midilli et al.	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002)
Wang e Singh (1978)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(JUNQUEIRA et al., 2017)
Logístico	$MR = b / (1 + a \cdot \exp(k \cdot t))$	(WIKTOR et al., 2013)
Dois Termos	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_i \cdot t)$	(ARSLAN; ÖZCAN; MENGEŞ, 2010)
Weibull	$MR = \exp[x(t/b)^a]$	(CORZO; BRACHO; ALVAREZ, 2009)
Segunda Lei de Fick	$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot Lc^2}\right)$	(CRANK, 1975)

Nas equações apresentadas na Tabela 5, MR representa a razão de umidade adimensional, “ t ” representa o tempo de secagem em segundos, “ k ” e “ k_i ” são constantes cinéticas de secagem (s^{-1}), “ a , b , n e x ” são constantes do modelo, D_{eff} é a difusividade mássica efetiva em (m^2s^{-1}) e Lc é o comprimento característico da placa (m).

MARTINAZZO et al. (2007) investigaram a cinética de secagem de folhas de capim-limão em camada delgada na faixa de temperatura de 30 a 60 °C utilizando alguns modelos semiteóricos e empíricos, concluindo que o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu as curvas de secagem deste produto, nas condições estudadas. O mesmo resultado de curva de secagem foi obtido por SARIMESELI (2011) no estudo da secagem com folhas de coentro. Por sua vez, CORZO, BRACHO e ALVAREZ (2010), ao avaliarem a secagem de fatias de manga, concluíram que o modelo de Distribuição de Weibull foi o melhor para descrever o processo, enquanto que DEMIR et al., (2004), avaliando a secagem de folhas de louro, verificaram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados obtidos em laboratório.

3.2.6 Difusividade mássica efetiva (D_{eff})

Conforme comentado anteriormente, em produtos alimentícios é incomum a existência do período de indução e do período de taxa constante de secagem, ocorrendo somente o período de taxa decrescente. Como o fenômeno de migração de umidade no interior do material é complexo, optou-se em trabalhar com um coeficiente global que abrangesse todos os efeitos que possam intervir nos mecanismos de difusão interna: a difusividade mássica efetiva de umidade (D_{eff} , em m^2s^{-1}).

Segundo MUJUMDAR (1995), a difusão em sólidos durante a secagem é um processo que pode envolver a difusão molecular, fluxo capilar, fluxo hidrodinâmico ou difusão superficial. Ao se combinar todos esses fenômenos em uma única variável, a difusividade mássica efetiva pode ser definida pela Segunda Lei de Fick, a qual é descrita pela Equação (1).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (1)$$

onde:

X : é o conteúdo de umidade livre, t : é o tempo e D_{eff} : é a difusividade mássica efetiva.

A Segunda Lei de Fick é utilizada para meios isotrópicos, cuja estrutura e propriedades de difusão em qualquer ponto são as mesmas em todas as direções. A difusividade mássica efetiva (D_{eff}) pode ser estimada através do ajuste dos dados experimentais da curva de taxa de secagem em função do tempo à solução da equação diferencial governante da difusão em estado transiente.

CRANK (1975) apresenta várias expressões para soluções analíticas da segunda Lei de Fick para diferentes geometrias (placa plana, cilindro e esfera) e diferentes condições de contorno. Através do ajuste das curvas de equilíbrio com as soluções propostas pelo autor é possível estimar a difusividade mássica efetiva. Para a geometria de placa plana, a solução apresenta por CRANK (1975) está descrita na Equação (2):

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{X_t - X_0}{X_\infty - X_0} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\{-Fo(2n+1)^2 \pi^2 / 4\} \quad (2)$$

onde M_t é a quantidade total de água na placa após um tempo (t) de processo, M_∞ é a quantidade correspondente de água quando o equilíbrio é atingido, X_t é a umidade no tempo t , X_0 é a umidade inicial, X_∞ é a umidade de equilíbrio e Fo é o número de Fourier mássico definido pela Equação (3):

$$Fo = \frac{D_{eff} t}{Lc^2} \quad (3)$$

onde Lc é o comprimento característico que, para a placa plana, equivale à metade da espessura da placa. Vale destacar que este número adimensional para a transferência de massa é equivalente ao número de Fourier para a transferência de calor. No presente texto, a partir de

agora, será feita referência apenas ao número de Fourier e fica entendido que trata-se do número de Fourier mássico.

A difusividade mássica efetiva de água (D_{eff}) pode ser obtida plotando-se em um gráfico o número de Fourier em função do tempo dispendido durante a secagem (dado em segundos). A partir da inclinação da reta obtém-se o valor da D_{eff} . Alguns dados de difusividade mássica efetiva em vegetais estão apresentados na

Tabela 5. A difusividade mássica efetiva em sólidos é uma função tanto da temperatura quanto do teor de umidade. No entanto, a estrutura interna do material (massa específica e porosidade) também desempenha um papel importante na determinação D_{eff} (PARK et al., 2014).

Tabela 5 – Valores estimados para a difusividade mássica efetiva de alguns vegetais.

Vegetais	Temperatura (°C)	$D_{eff} \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$
Batata	40-70	4,55– 12,7
Cebolas		0,251– 0,323
Alho		1,29– 31,68
Cenoura (fatias)	21 -70	5,58 – 23,12
Tomate		3,91 –7,53
Alface		0,603– 0,031
Feijão verde		0,264–0,571
Couve-flor		0,603–0,031
Salsa		453
Pimentão vermelho		0,32–0,112
Cogumelo		3,93–17,8
Aipo		18,6–245,3

Fonte: adaptado (AHMED, 2011).

ORTIZ-GARCÍA-CARRASCO et al., (2015) estudaram a secagem convectiva de tiras de batatas a 50, 60, 70 e 80 °C com uma velocidade do ar de 2 m/s e observaram que a umidade e a temperatura afetaram significativamente a difusividade mássica nas tiras de batata. O tamanho da amostra e a velocidade do ar não influenciaram significativamente na difusividade mássica efetiva da água nos vegetais, o que é esperado em um processo controlado pela difusão interna da água (SRIKIATDEN; ROBERTS, 2006). Na literatura, é reportada uma variação significativa dos valores estimados de difusividade mássica efetiva da água, o que pode ser atribuído aos métodos experimentais, métodos de análises específicos utilizados, bem como à variação na composição e estrutura dos materiais estudados (HASSINI; AZZOUZ; BELGHITH, 2004).

3.2.7 Modelos para prever a umidade de equilíbrio (X_{∞})

Segundo MUJUMDAR (1995), conhecer o estado de equilíbrio termodinâmico entre o ar de secagem e o material sólido a ser seco é um pré-requisito para a tecnologia de secagem, bem como para qualquer situação em que ocorra transferência de massa. A umidade de equilíbrio (X_{∞}) pode ser atingida tanto por adsorção quanto por dessorção, sendo uma função da temperatura do processo e da atividade de água do material. O estudo desse equilíbrio é de extrema importância para que se possa compreender como ocorrem os mecanismos de transferência de massa envolvidos, bem como empregar a Segunda Lei de Fick em sólidos de geometrias distintas, tornando-se possível a estimativa da difusividade mássica efetiva (ANDRADE et al., 2007; MERCALI, 2009).

Em um processo de secagem de um produto, o teor de umidade irá reduzir enquanto a secagem estiver em andamento, assim como a atividade de água (CÁNOVAS BARBOSA e VEGA MERCADO, 1996). A secagem ocorrerá até que o teor de umidade de equilíbrio seja alcançado na atividade de água do material que foi seco; esse ponto de equilíbrio é definido pela temperatura de operação ou através de uma isoterma de sorção.

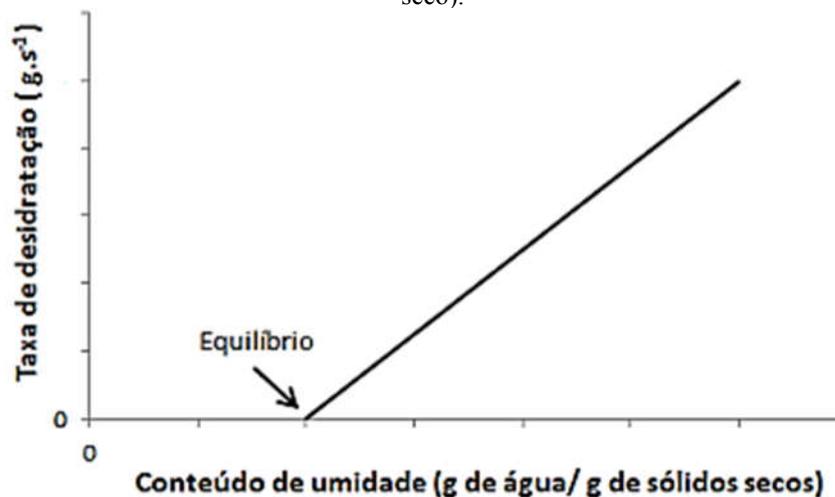
O estudo das condições de equilíbrio em diferentes situações experimentais possui significativa importância para a determinação da difusividade mássica efetiva da água. No entanto, a determinação do teor de umidade de equilíbrio em alimentos muitas vezes é bastante complicada e difícil devido à demora em se remover toda água ligada do material, tornando-se necessário a utilização de modelos matemáticos específicos (SPENCE et al., 2017). Dentre os modelos matemáticos comumente utilizados para prever a umidade de equilíbrio em produtos biológicos, LUCHESE (2013) aplicou o modelo proposto por RASTOGI e RAGHAVARAO (2004) em seu estudo de desidratação osmótica de *Physalis peruviana L.*, enquanto BROCHIER (2013) aplicou o modelo matemático desenvolvido por PELEG (1988), proposto há mais de três décadas, na sua pesquisa sobre desidratação osmótica de *Smallanthus sonchifolius*. Essas informações se uniram para mostrar que os modelos utilizados não sofreram alterações inovadoras, o que demonstra que RASTOGI e RAGHAVARAO (2004) e PELEG (1988) ainda são modelos matemáticos que podem ser aplicados no estudo de tecnologia de alimentos no que tange à secagem de matrizes alimentícias. No presente trabalho, o modelo de Rastogi e Raghavarao (2004) foi utilizado para se prever a umidade de equilíbrio e o mesmo será apresentado com maiores detalhes a seguir.

Modelo de Rastogi e Raghavarao (2004)

RASTOGI e RAGHAVARAO (2004) propuseram um modelo para determinar o teor de umidade de sólidos no equilíbrio através de um método gráfico. Este método pode ser utilizado para determinar o equilíbrio quando o processo de secagem é realizado através da utilização de ar quente.

O método descrito consiste em plotar em um gráfico a taxa de secagem ($-dx/dt$) em função do teor de umidade em base seca, onde “ dx ” equivale à variação do conteúdo de umidade em um determinado intervalo de tempo, “ dt ”. A determinação da umidade de equilíbrio (X_{∞}) é obtida através da leitura dessa grandeza no eixo das abcissas correspondente quando a taxa de secagem for nula ou apresentar uma tendência ao infinito, conforme ilustrado na Figura 4. Esse mesmo método foi utilizado por LUCHESE (2013) que aplicou o modelo proposto para determinar a umidade de equilíbrio (X_{∞}) na desidratação osmótica de *physalis*, obtendo um excelente ajuste para os seus dados experimentais, apresentando coeficiente de determinação superior a 0,9.

Figura 4 – Variação da taxa de secagem ($-dx/dt$) em função do teor de umidade em base seca (g água/ g sólido seco).



Fonte: LUCHESE, 2013.

3.3 TECNOLOGIAS EMERGENTES

Nesta seção, são apresentadas definições e alguns estudos que foram realizados utilizando tecnologias emergentes, dentre elas as do campo elétrico, em processos que envolvem matrizes alimentícias. Vale ressaltar que, neste trabalho, optou-se por apresentar as siglas conforme o nome de cada processo em inglês, uma vez que há poucos estudos abordando essas tecnologias no Brasil.

Na secagem de alimentos, a temperatura do processo é de extrema importância para que ocorra um aumento dos mecanismos de difusão no interior da célula vegetal, aumentando, assim, a eficiência nas operações de secagem. O aumento desses mecanismos de difusão, principalmente da água no interior do tecido vegetal, vem sendo estudado com a finalidade de alcançar uma melhoria nos processos de secagem, visando à diminuição dos custos energéticos através da redução do tempo de secagem (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017).

Algumas tecnologias emergentes vêm sendo estudadas e utilizadas para que, concomitantemente à secagem, seja possível obter produtos alimentícios de qualidade. Tal objetivo é alcançado através da redução das perdas de nutrientes e da melhor preservação da microestrutura de frutas, vegetais e produtos cárneos quando se compara à aplicação da secagem convencional como única forma de tratamento, o que se deve aos tempos mais longos de secagem nesse último caso (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017; PUIG et al., 2012).

FAN; ZHANG; MUJUMDAR (2017) estudaram o efeito da aplicação do ultrassom no ar durante a secagem convectiva de frutas e vegetais. Esses autores constataram que a aplicação da tecnologia citada pode produzir um aumento na difusividade mássica efetiva da umidade e do coeficiente convectivo de transferência de massa. Além disso, o ultrassom também pode melhor preservar a microestrutura de frutas e vegetais em comparação com a secagem convectiva convencional.

ONWUDE et al., (2017) estudaram o uso de métodos de secagem não térmicos em combinação com outras técnicas de secagem convencionais a fim de preservar a estrutura de frutas e vegetais, melhorando a qualidade do produto seco, reduzindo o tempo de secagem e a demanda de energia aumentando, assim, a eficiência da secagem. Foram estudados métodos como: ultrassom combinado com secagem quente, ultravioleta com ar quente de secagem e campo elétrico pulsado (*Pulsed Electric Field* – PEF). Todos os métodos estudados resultaram em um aumento da taxa de secagem e na redução do tempo de secagem, sendo que o ultrassom combinado com a secagem com ar quente gerou um aumento de 205 % da taxa de secagem e uma redução de 80,3 % do tempo de secagem, quando comparado ao método de secagem convencional com ar quente.

Recentemente, as aplicações de tecnologias elétricas têm se mostrado promissoras para melhorar processos de secagem, extração e fermentação. Estudos mostram que a aplicação de campo elétrico pulsado (PEF) pode ser usada para formar poros nos tecidos vegetais, intensificando a extração de compostos intracelulares de interesse. SARKIS et al., (2015) estudaram a aplicação de campo elétrico pulsado (PEF) e descargas elétricas de alta tensão (*High Voltage Electrical Discharges* - HVED) como pré-tratamento à moagem para a extração

do óleo de sementes de gergelim, obtendo como resultado um aumento do rendimento de extração de óleo em 4,9 % no tratamento com PEF e 22,4 % com HVED quando comparadas com as amostras controles (sem aplicação de campos elétricos) .

SOTELO et al., (2017) realizaram, pela primeira vez, o estudo do efeito do PEF de intensidade leve e moderada (pulso constante de 100 Hz, largura de pulso de 20 μ e intensidade de campo elétrico de 0,3 a 2,5 kV/cm) em cerejas para verificar alterações em propriedades físico-químicas, liberação de antocianinas e potencial crescimento de bactérias ácido lácticas após o armazenamento das cerejas por 24 h, mostrando que os tratamentos com PEF têm efeitos positivos nas propriedades físico-químicas e componentes bioativos das frutas. Dessa forma, as cerejas poderiam atender a demanda atual dos consumidores por produtos alimentícios minimamente processados e frescos.

ZHANG et al. (2017) investigaram o efeito do PEF nos pigmentos extraídos do espinafre utilizando diferentes intensidades de campo (0; 3,3; 6,7; 13,3; 20 e 26,7 kV/cm) em diferentes temperaturas (20, 35 e 45 °C); esses autores constataram que as concentrações de clorofila extraídas foram aumentadas pelo tratamento com PEF e que houve um aumento significativo da atividade antioxidante dos pigmentos ao longo de todas as temperaturas avaliadas.

WIKTOR et al. (2013) realizaram um estudo para investigar o efeito do campo elétrico pulsado (PEF) como pré-tratamento na cinética de secagem convectiva de maçãs, utilizando uma intensidade de campo de 5 a 10 kV/cm e número de pulsos entre 10 a 50. As maçãs foram secas posteriormente a 70 °C, com velocidade do ar de 1 m/s. Os autores constataram que, quando o pré-tratamento com PEF foi aplicado nas condições de 10 kV/cm e 50 pulsos, ocorreu uma redução do tempo de secagem em até 12 %.

YU et al. (2016) estudaram o efeito do campo elétrico pulsado (PEF) como pré-tratamento na desidratação osmótica a 40 °C de mirtilos frescos, utilizando uma intensidade de campo de 2 kV/cm. Os resultados mostraram que o pré-tratamento com PEF reduziu significativamente o tempo de desidratação osmótica e aumentou a qualidade microbiológica dos mirtilos sem afetar sua qualidade nutricional.

No item a seguir, a tecnologia de MEF é abordada mais detalhadamente.

3.3.1 Campo elétrico moderado (MEF)

O campo elétrico moderado é um processo de permeabilização controlada, possivelmente reversível, caracterizado pela utilização de campo elétrico de intensidade variando de 1 a 1000 Vcm⁻¹ com forma de onda arbitrável, com ou sem os efeitos de

aquecimento ôhmico associados (SENSOY e SASTRY, 2004). Na maioria das vezes, a aplicação de campo elétrico moderado resulta na geração de calor; esse processo é denominado aquecimento ôhmico, e o fenômeno que ocorre é conhecido como desnaturação térmica. Entretanto, existem alguns efeitos, conhecidos como efeitos não-térmicos, que não estão ligados à geração de calor. Tais efeitos podem aumentar a transferência de massa de alguns componentes intracelulares. Os efeitos descritos estão associados ao fenômeno de permeabilização das células (SENSOY e SASTRY, 2004).

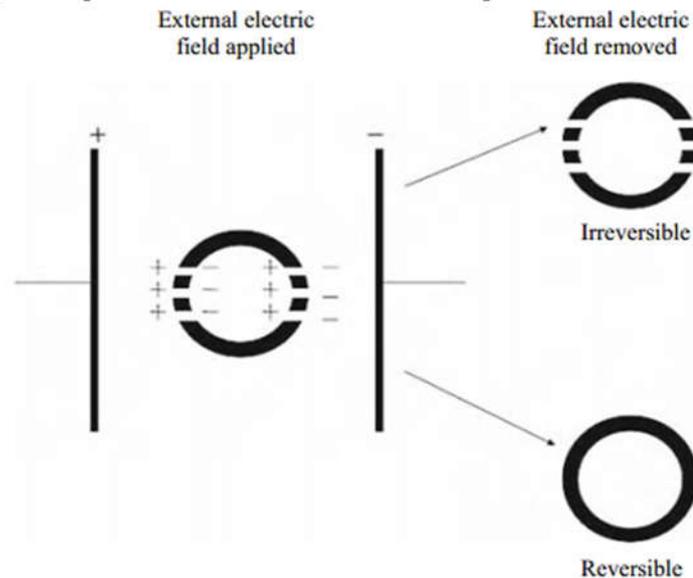
As células vegetais quando expostas a um campo elétrico podem sofrer um acúmulo de cargas elétricas na membrana celular, o que induz a um aumento da diferença de potencial químico. Quando essa diferença de potencial atinge um valor crítico (de 0,5 a 1 V), ocorre um rearranjo das moléculas de fosfolipídeos na membrana celular, permitindo a formação de poros, período também conhecido como potencial de colapso. Assim, a membrana perde sua seletividade e se torna permeável. Esse fenômeno é conhecido como eletroporação ou eletropermeabilização.

Segundo VOROBIEV e LEOVKA (2008), o processo de eletroporação é composto por diferentes fases. A primeira delas é a formação de poros quando a célula é exposta ao acúmulo de cargas elétricas na superfície da membrana, aumentando a diferença de potencial químico, o que pode durar alguns microssegundos. Nessa fase, ocorrem mudanças na permeabilidade da membrana, as quais estão relacionadas à formação de poros transitórios de curta duração e que não contribuem para o transporte molecular. A segunda fase é uma expansão temporária do tamanho do poro que ocorre em um intervalo de tempo de centenas de microssegundos a milissegundos, a qual se manifesta durante a aplicação do campo elétrico. A última fase determina a recuperação da membrana, a qual ocorre após o encerramento da aplicação do pulso elétrico e consiste na recuperação da membrana celular, o que pode ou não, durar vários minutos. O transporte molecular da célula permeabilizada devido à eletroporação ocorre a partir da segunda fase. A difusão através dos poros pode ocorrer em minutos a 35 °C e pode durar até horas se o processo for mantido a 4 °C.

A eletroporação pode acontecer de forma reversível ou irreversível (VOROBIEV e LEOVKA, 2008). Para que a eletroporação ocorra de maneira reversível, é necessário que a diferença de potencial na membrana seja mantida abaixo do potencial de colapso. Neste tipo de eletroporação, os poros são temporariamente formados e são mantidos apenas durante o período de aplicação de campo elétrico. Quando o potencial de colapso é atingido, ocorre a formação permanente de poros (eletroporação irreversível) resultando na desintegração da membrana e

morte celular. Esses fenômenos de eletroporação reversível e irreversível estão exemplificados na Figura 5.

Figura 5 - Esquema representativo dos fenômenos de eletroporação reversível e irreversível.



Fonte: adaptado de VOROBIEV e LEOVKA, 2008.

Alguns parâmetros podem influenciar a eficiência da eletroporação, dentre eles podem ser citados: a intensidade do campo elétrico, a forma, a duração e o número de pulsos elétricos aplicados, bem como a energia específica fornecida (VOROBIEV e LEOVKA, 2008). Esses parâmetros são controlados no processo de PEF, o qual utiliza pulsos elétricos em curto intervalo de tempo (microsegundos ou milissegundos) com intensidade do campo elétrico geralmente acima de 20 kV cm^{-1} (ZHANG et al., 2017).

No processo de MEF são utilizadas correntes elétricas alternadas de maneira contínua. Nas correntes elétricas alternadas, a corrente alterna de um polo para o outro, diminuindo o depósito de materiais no eletrodo e reduzindo as reações de eletrólise. Estudos mostraram que os tratamentos com MEF que utilizam corrente alternada são análogos à sequência de pulsos usadas no tratamento com PEF, com pulsos dados em rápida sucessão (a cada 0,5 s). O número de pulsos por segundo é chamado de frequência e a duração de um pulso equivalente seria o tempo gasto acima da tensão limite e, portanto, é uma função da amplitude, da tensão e da frequência (VOROBIEV e LEOVKA, 2008).

A eletroporação é favorecida pela aplicação de baixas frequências (menores que 1 MHz), normalmente em torno de 50 Hz (SENSOY e SASTRY, 2004; VOROBIEV e LEOVKA, 2008), pois em frequências baixas os polos irão mudar mais lentamente entre os eletrodos. A aplicação de uma tensão elevada, como é o caso do PEF, proporciona eletroporação

irreversível. Este tipo de eletroporação causa a morte celular e normalmente é utilizado em processos de inativação de microrganismos e pasteurização não térmica de alimentos líquidos (OHSHIMA et al., 2016; SENSOY e SASTRY, 2004; TANINO et al., 2015; VOROBIEV e LEOVKA, 2008).

Os estudos têm demonstrado que a aplicação de MEF proporciona eletroporação reversível da camada fosfolipídica. Este tipo de eletroporação tem sido estudada em processos de secagem (ONWUDE et al., 2017; WIKTOR et al., 2013; YU et al., 2016) e extração (DE OLIVEIRA et al., 2015; JAESCHKE, 2015; KULSHRESTHA e SASTRY, 2010). Além disso, a eletroporação reversível é considerada uma forma de processo para o estudo da biologia molecular afim de promover a introdução de moléculas de interesse em células.

Alguns estudos mostraram resultados positivos em relação ao aumento da difusividade mássica efetiva na desidratação de frutas e vegetais pré-tratadas com PEF e outras tecnologias elétricas (WIKTOR et al., 2013; YU et al., 2016). No entanto, estudos mostrando a influência do MEF sem efeitos térmicos como pré-tratamento na secagem de alimentos ainda são escassos. Apesar disso, algumas pesquisas apontam que, em processos nos quais se utiliza MEF, ocorrem vantagens térmicas para um aquecimento ôhmico rápido e uniforme. Entretanto, os efeitos não-térmicos são mais significativos para processos de secagem, extração e fermentação (VOROBIEV e LEOVKA, 2008).

KULSHRESTHA e SASTRY (2010) estudaram as possíveis mudanças na permeabilidade dos tecidos vegetais da beterraba quando os mesmos eram tratados com MEF a baixas frequências e sem efeitos térmicos. Esses pesquisadores verificaram que os tecidos ficaram sujeitos a uma dispersão dielétrica devido à relaxação de cargas na membrana celular do tecido, fenômeno que não ocorre em altas frequências. Ainda, segundo os autores, inicialmente, não houve diferença significativa entre as amostras controles e as amostras com tratamento de MEF. Todavia, após 24 horas de tratamento, as amostras tratadas com MEF tiveram a permeabilidade aumentada. Mesmo com a aplicação de baixas tensões, ocorreu um aumento na difusão, o que sugere que tratamentos com baixa energia podem ser utilizados para aumentar a difusão de compostos do interior de células, podendo ser útil no processo de permeabilização não-térmica dos tecidos celulares, na secagem de frutas e vegetais e em operações de extração.

SIMPSON et al. (2015) estudaram o efeito do MEF nos mecanismos de difusão durante a desidratação osmótica de fatias de maçãs. A desidratação osmótica foi realizada a 40 °C, tanto para o tratamento controle quanto para o tratamento com MEF, sendo que a solução osmótica foi exposta a campos elétricos variando entre 0 e 17 V/cm. Os autores concluíram que a difusão

aumenta com o aumento da aplicação do campo elétrico e que a mesma é altamente influenciada pela aplicação do MEF.

KUSNADI e SASTRY (2012) estudaram o efeito do MEF na difusão de sal nos tecidos vegetais de aipo, cogumelo e castanha d'água. Foram determinados a difusividade mássica do sal nos vegetais em três temperaturas (25, 50 e 80 °C) e em quatro intensidades de campo elétrico (0, 658, 1316 e 1842 V/cm). O coeficiente de difusão do sal foi significativamente aumentado pela temperatura e intensidade do campo elétrico em todos os materiais testados.

KULSHRESTHA e SASTRY (2003) estudaram a difusão de corante de beterraba com tensão variando de 0 a 23,9 V/cm e frequência de 0 a 5000 Hz. Os autores concluíram que a difusão aumenta com o aumento da tensão e com a diminuição da frequência. Ainda, segundo os autores, a transferência de massa foi favorecida quando a matéria-prima apresentava células intactas. Por sua vez, SENSOY e SASTRY (2004) estudaram os efeitos do MEF na permeabilização de células de alimentos. Para tanto, os autores avaliaram os efeitos da tensão e frequência em folhas de chá preto fermentadas, frescas e secas e compararam com o aquecimento convencional (controle). Os pesquisadores concluíram que a aplicação de MEF favoreceu a transferência de massa de soluto a partir das folhas de chá quando comparado ao controle. Contudo, esse comportamento não foi observado quando se utilizou folhas secas. Ainda, foi observado aumento da difusão em baixas frequências.

Tecidos vegetais, quando expostos a baixas frequências, estão sujeitos à dispersão dielétrica devido à relaxação de cargas na membrana celular, fenômeno que não ocorre em altas frequências (KULSHRESTHA e SASTRY, 2010). A aplicação de campo elétrico a baixas frequências proporciona maior tempo para a distribuição de cargas na membrana celular, o que pode vir a facilitar a eletroporação (KULSHRESTHA e SASTRY, 2003).

A aplicação de campo elétrico tem se mostrado uma boa alternativa para otimizar processos de secagem e extração, aumentando assim os mecanismos de difusão da água ou de compostos intracelulares de interesse. Contudo, até onde se sabe, não há estudos que avaliaram a utilização de campo elétrico moderado (MEF) sem efeitos térmicos para o aumento da difusividade mássica efetiva da água na secagem convectiva de berinjelas (*Solanum melongena L.*).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para a realização do presente trabalho. O estudo experimental foi realizado em duas etapas: aplicação do campo elétrico moderado (MEF) como pré-tratamento nas fatias de berinjela (*Solanum melongena L.*) e secagem das fatias, tratadas ou não, com MEF no secador convectivo. Por fim, são apresentados os métodos para quantificação da umidade de equilíbrio, difusividade mássica efetiva (D_{eff}) e modelagem matemática da cinética de secagem.

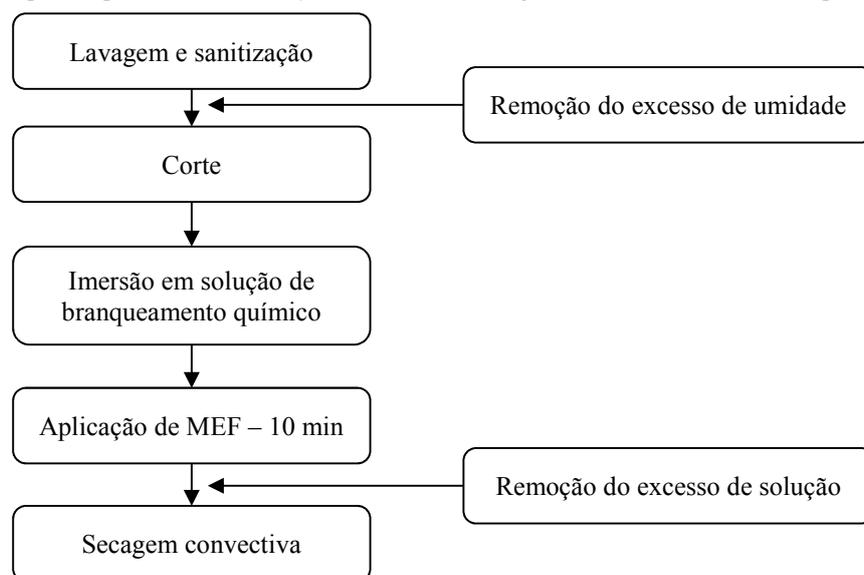
Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos (LATEPA) localizado no Departamento de Engenharia Química da UFRGS.

4.1 PREPARO DA AMOSTRA

Inicialmente, as berinjelas do tipo comum (*Solanum melongena L.*) foram adquiridas em um mercado local na cidade de Porto Alegre, RS. Após a aquisição, foram realizados testes prévios para avaliar a possibilidade de se armazenar um mesmo lote de berinjelas para a realização de todos os experimentos. Foram realizados testes preliminares utilizando o congelamento lento (Freezer comum na $T = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$) e congelamento rápido (nitrogênio líquido na $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tanto no congelamento lento quanto no rápido, as amostras foram previamente lavadas, fatiadas (*Slicer 8INI*) e embaladas em seladora a vácuo (*Sulpack*, Modelo SVC 200 G2, Caxias do Sul, RS, Brasil). Após o descongelamento das amostras (em temperatura ambiente), foi realizada a análise de condutividade elétrica utilizando o condutivímetro (Digimed, modelo DM-3P) de acordo com o método descrito pelo Instituto Adolf Lutz (LUTZ, 2008), a fim de avaliar a possível ruptura do tecido celular.

Os resultados obtidos com os testes preliminares conduziram a aquisição das berinjelas (*Solanum melongena L.*) consoante à demanda de ensaios e respeitando um padrão de qualidade de modo a garantir uma melhor uniformidade da matéria-prima. As etapas da metodologia para este estudo estão explicadas no fluxograma da Figura 6, em que os testes seguiram a mesma sequência em todos os ensaios.

Figura 6 – Etapas do processo de obtenção de fatias de berinjelas secas utilizando como pré-tratamento o MEF.



Foram selecionadas berinjelas com diâmetro entre 8 a 10 cm na parte de maior circunferência. Em seguida, as mesmas foram previamente lavadas e sanitizadas, com água corrente e detergente neutro, até sua completa higienização, sendo, posteriormente, secas com papel absorvente. Nas amostras higienizadas, sem a remoção da casca, foram realizados cortes circulares (fatias em formato de rodela) perpendicular ao eixo de maior comprimento com a espessura de 4,5 mm utilizando um fatiador de legumes *Slicer 8INI*. A Figura 7 detalha o formato das fatias de berinjelas.

Figura 7 – Fatias da Berinjela (*Solanum melongena L.*) com espessura de aproximadamente 4,5 mm e diâmetro de 8 a 10 cm com geometria de placa plana.



4.2 BRANQUEAMENTO QUÍMICO

Para a redução da atividade das enzimas peroxidase (POD) e polifenoloxidase (PPO) nas fatias de berinjelas, a fim de evitar o escurecimento das mesmas, foi realizado um branqueamento químico. Para isso, foi utilizada uma solução de ácido ascórbico, ácido cítrico e metabissulfito de sódio. Na Tabela 4 são apresentadas as concentrações dos solutos utilizados

nessa presente pesquisa, baseado em outras soluções já utilizadas por outros autores (CRUZ, 1998; FERNANDES, 2012; MELO, 2015).

Tabela 4 – Composição química da solução de branqueamento químico

Reagentes	Composição (%)
Ácido ascórbico	0,10
Ácido cítrico	0,20
Metabissulfito de sódio	0,05

Todas as fatias de berinjelas foram imersas na solução redutora de atividade enzimática durante um período de 10 minutos. As amostras que foram direcionadas para a secagem convencional sem a etapa de pré-tratamento (0 V) foram imersas na solução por um período de 10 minutos e, passado esse tempo, foram prensadas manualmente sob um papel absorvente para a remoção da maior quantidade possível da solução de branqueamento químico. Em seguida, as fatias de berinjela foram levadas ao secador para dar início à secagem convectiva.

As amostras que foram direcionadas para o pré-tratamento utilizando o campo elétrico moderado (50 V e 100 V), por sua vez, foram imersas na solução de branqueamento químico e, ao mesmo tempo, foi aplicado o MEF por um período de 10 minutos. Após o término do tempo de aplicação do MEF, as amostras foram prensadas manualmente sob um papel absorvente para a remoção da maior quantidade possível da solução de branqueamento químico, sendo direcionadas imediatamente para a secagem convectiva.

4.3 TEOR DE UMIDADE

A determinação do teor de umidade das fatias de berinjela foi realizada, em triplicata, a partir do método gravimétrico descrito pelo Instituto Adolf Lutz (LUTZ, 2008). Três fatias de amostras foram pesadas em balança analítica (*Marte*, modelo AY220, Filipinas) diretamente em cápsulas de alumínio, previamente taradas na balança. Essas cápsulas foram então distribuídas na estufa (Solab Ltda, modelo SL 102/100), a uma temperatura 105 °C, por um período de 24 h ou até peso constante, conforme as diretrizes do Instituto Adolf Lutz. Após o período de secagem, as cápsulas contendo as amostras foram resfriadas em um dessecador por um período de 30 minutos, sendo pesadas em seguida.

A umidade foi calculada pela diferença de massa antes e após a secagem em estufa, conforme a Equação (4).

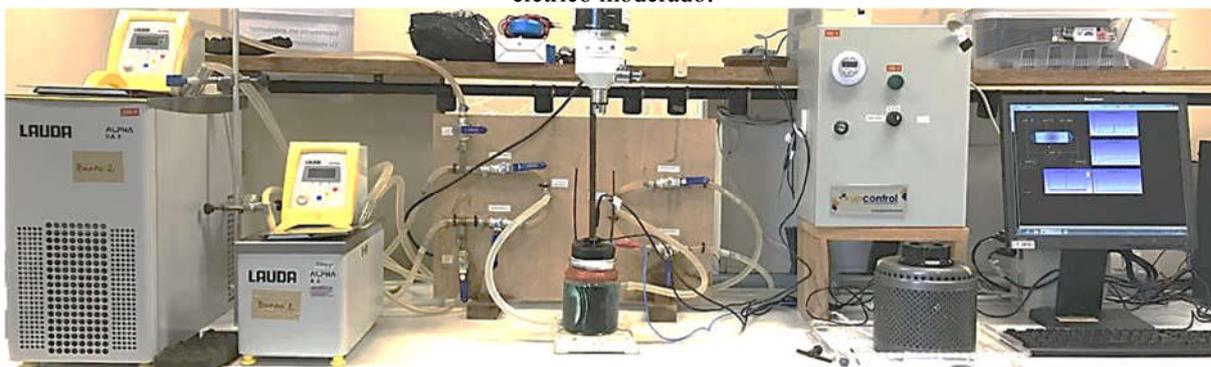
$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} 100\% \quad (4)$$

onde m_i é a massa inicial da amostra úmida, e m_f é a massa final da amostra seca.

4.4 APLICAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO MODERADO (MEF)

O sistema de campo elétrico moderado utilizado para a realização dos experimentos pode ser visualizado na Figura 8. Todo o sistema e seus periféricos foram utilizados na execução do presente trabalho.

Figura 8 – Sistema de campo elétrico moderado e seus periféricos utilizado para o tratamento com campo elétrico moderado.



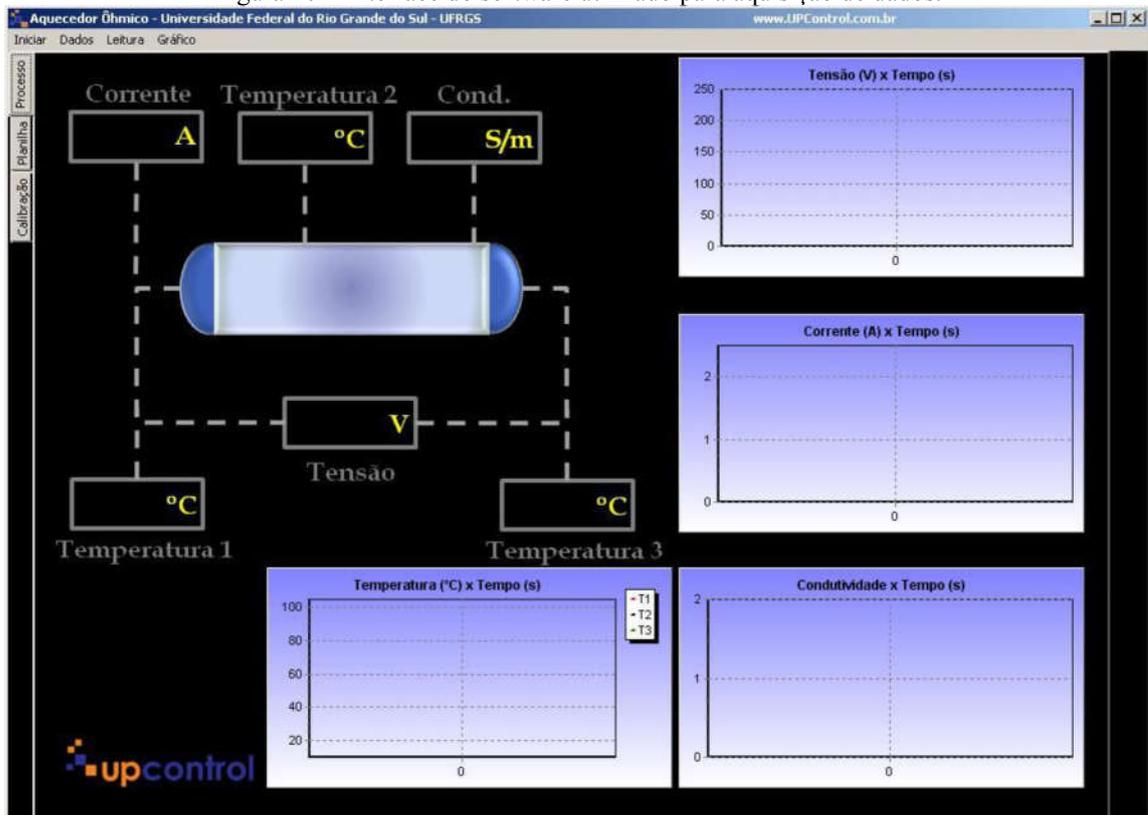
Além da célula de MEF (Figura 9) o aparato experimental possui um sistema de fornecimento de energia, um sistema para aquisição de dados e um banho de resfriamento (*LAUDA*, Modelo *Alpha RA 8*, Alemanha). A água de resfriamento, nas temperaturas pré-definidas para cada ponto experimental, passava pela parte encamisada da célula de eletroporação possibilitando o controle da temperatura da amostra no interior da célula. O sistema para fornecimento de energia é composto por um regulador de tensão manual de 0 a 220V (*Sociedade Técnica Paulista LTDA*, modelo *Varivolt*, Brasil), um estabilizador (*Forceline*, modelo *EV 1000T/2-2*, Brasil) e um disjuntor (*Siemens*, Brasil). Na tampa da célula de eletroporação existiam entradas para a introdução de termopares e eletrodos. Para o controle e monitoramento da temperatura das amostras, foi utilizado um medidor de temperatura do tipo Pt-100 (*Novus*, Brasil) de aço inoxidável.

Figura 9 – Célula de MEF para o pré-tratamento.



A partir do sistema de aquisição de dados, é possível monitorar e registrar os dados gerados com o procedimento experimental. A interface do software utilizado está ilustrada na Figura 10, onde é possível acompanhar os parâmetros de corrente elétrica, condutividade elétrica, tensão e temperatura ao longo do tempo.

Figura 10 – Interface do software utilizado para aquisição de dados.



De início, foi medida a condutividade elétrica da solução de branqueamento químico utilizando o condutivímetro Digimed (modelo DM-3P), pois, para a aplicação do MEF com manutenção da temperatura abaixo de 35°C (sem efeitos térmicos), é necessário que a condutividade elétrica seja baixa o suficiente para evitar taxas elevadas de aquecimento e alta o suficiente para que possa ocorrer a eletroporação. De acordo com GOULLIEUX e PAIN (2005), valores de condutividades elétricas a partir de 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ são considerados adequados para a aplicação de MEF. A solução utilizada para branqueamento químico apresentou uma condutividade elétrica em torno de 1200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, permitindo a aplicação do campo elétrico com a manutenção da temperatura até um máximo de 35 °C.

Em seguida, onze fatias de berinjelas foram pesadas (peso aproximado de 105 gramas no total) e inseridas na célula de eletroporação contendo a solução de branqueamento químico. A célula foi conectada ao banho de resfriamento, previamente mantido à temperatura adequada para cada condição experimental (0, 50 e 100 V), de forma que a temperatura do experimento não ultrapassasse 35 °C. A Tabela 7 apresenta as temperaturas do banho utilizadas em cada condição experimental. Após a amostra atingir a temperatura desejada (temperatura próxima ao do banho), iniciou-se a etapa de pré-tratamento com MEF com a passagem de corrente elétrica na frequência de 60 Hz (tensão fornecida pela rede elétrica), utilizando uma tensão especificada para cada ponto experimental (0, 50 e 100 V). Essas tensões foram selecionadas após testes de limite máximo de campo elétrico aplicado sem a ocorrência de efeitos térmicos nas amostras. Após 10 minutos, a passagem de corrente elétrica foi cessada.

Tabela 5 – Temperatura do banho de resfriamento para as diferentes tensões aplicadas no pré-tratamento com MEF.

Tensão (V)	Temperatura do banho de resfriamento (°C)
0	-
50	18
100	8

Após o procedimento de aplicação do campo elétrico, as amostras foram prensadas manualmente sobre papel absorvente para a máxima remoção do excesso de solução de branqueamento químico. Em seguida, as amostras foram levadas para o secador convectivo para se iniciar o processo de secagem.

Para verificação da ocorrência ou não do fenômeno de Eletroporação, foi realizado um teste com corantes durante o tempo de aplicação do MEF. Neste teste, foi adicionado o corante azul de metileno junto à solução de branqueamento químico usada em todas as condições experimentais.

4.5 SECAGEM CONVECTIVA

O secador convectivo utilizado nos experimentos pode ser visualizado na Figura 11. O aparato experimental é composto por: canais de entrada e saída do ar de secagem, um ventilador centrífugo, controladores de temperatura e da velocidade do ar, resistências elétricas que promovem o aquecimento do ar, controladas por um inversor de frequência, cesto para suporte das amostras e uma balança semi-analítica.

O secador convectivo, que foi fabricado pela Metalúrgica Ralf Winter no Rio Grande do Sul e se encontra nas dependências do LATEPA/UFRGS, possui capacidade de aquecimento do ar até a temperatura de 150 °C e um dispositivo capaz de inverter o sentido do fluxo do ar de secagem, entre ascendente e descendente, para que se tenha uma secagem mais uniforme.

Para a realização dos experimentos, foram selecionadas condições operacionais baseadas em parâmetros normalmente utilizados pelas indústrias de alimentos e nas limitações do equipamento. Sendo assim, optou-se por usar as seguintes condições operacionais: velocidade do ar de secagem (1,5 m/s) e temperatura do ar de secagem (40, 60 e 80 °C). Antes do início de cada experimento, foi feita a seleção de temperatura e velocidade do ar de secagem nos controladores, para posterior inserção das amostras no secador previamente aquecido.

Figura 11 – Equipamento piloto de secagem, onde: (a) entrada de ar, (b) ventilador, (c) controladores, (d) resistências, (e) suporte com amostras, (f) balança semi-analítica, (g) inversor de frequência e (h) saída de ar.



Foram distribuídas cinco fatias de amostras da berinjela (selecionadas de forma aleatória para cada ensaio), de aproximadamente 4,5 mm de espessura e 8 cm de diâmetro, no suporte

do secador que é suspenso por uma balança semi-analítica (Gehaka, modelo GK 6000). O processo de secagem iniciou com fluxo de ar ascendente e, posteriormente, descendente, com inversão de fluxo manual a cada 3 min, na temperatura de 40 °C, e a cada 1,5 min, nas demais temperaturas (60 e 80 °C). A cada intervalo de tempo mencionado, o secador era rapidamente desligado, para a estabilização da balança e registro da massa da amostra, sendo rapidamente novamente acionado. Esse procedimento foi repetido até a amostra atingir massa constante. A mesma metodologia foi adotada tanto para as amostras submetidas à secagem convencional (controle), quanto para a secagem das amostras submetidas ao pré-tratamento com MEF.

4.6 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM

A modelagem matemática da cinética de secagem foi realizada a fim de se obter uma melhor compreensão do comportamento dos dados gerados a partir dos experimentos de secagem. Para o estudo da cinética, curvas de secagem foram plotadas em função da umidade adimensional (MR) durante a secagem. Neste estudo, foram utilizados alguns modelos matemáticos para avaliar a cinética de secagem. O MR foi calculado como sendo a razão da diferença entre a umidade em base seca no tempo (t) e a umidade de equilíbrio (X_∞) e a umidade em base seca no tempo (t_0) e a umidade de equilíbrio (X_∞), conforme a Equação (5).

$$MR = \frac{(X - X_\infty)}{(X_0 - X_\infty)} \quad (5)$$

Diferentes modelos matemáticos foram ajustados aos dados da perda de umidade em função do tempo através de regressão não-linear. Para realização do ajuste, utilizou-se o *software* Estatística, versão 13.2, *Statsoft*, Inc. Tulsa. Foram utilizados 9 modelos matemáticos, apresentados na

Tabela 8, sendo estes os mais comumente empregados em estudos sobre a cinética de secagem em alimentos.

Tabela 8 – Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados da curva de secagem.

Modelos matemáticos	Equação
Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
Henderson e Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
Logarítimo	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$
Midilli	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
Wang e Singh (1978)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
Logístico	$MR = b / (1 + a \cdot \exp(k \cdot t))$
Dois Termos	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_i \cdot t)$
Weibull	$MR = \exp[x(t/b)^a]$

Para selecionar o modelo que melhor descreve os dados experimentais obtidos neste estudo, alguns critérios estatísticos foram considerados. O modelo estatístico avaliado foi considerado satisfatório para o ajuste dos dados experimentais quando se obteve um coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1 e baixos erros estatísticos (χ^2 e $RQEM$ – Raiz Quadrada do Erro Médio). Os valores de χ^2 e $RQEM$ foram calculados de acordo com as Equações (6) e (7), respectivamente.

$$\chi^2 = \frac{\sum(MR_{predito} - MR_{Experimental})^2}{n-p} \quad (6)$$

$$RQEM = \frac{1}{n} \left[\sum(MR_{predito} - MR_{experimental})^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

onde: n é o número de observações e p é o número de parâmetros do modelo avaliado.

O modelo que melhor se adaptar aos dados experimentais pode ser utilizado para prever o tempo de processo suficiente para secar o produto até um determinado teor de umidade.

4.7 DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (D_{EFF}) E UMIDADE DE EQUILÍBRIO (X_∞)

A difusividade mássica efetiva (D_{eff}) foi estimada através do ajuste dos dados experimentais, da curva de taxa de secagem em função do tempo, à solução da equação diferencial governante da difusão em estado transiente baseada na Segunda Lei de Difusão de Fick.

CRANK (1975) apresentou expressões para as soluções analíticas da difusão transiente baseada na Segunda Lei de Difusão de Fick em diferentes geometrias. No presente trabalho, a

solução para a geometria de placa plana, apresentada na seção 3.2.5, foi utilizada e está baseada nas seguintes considerações:

- as fatias de berinjelas são consideradas placas planas, com o diâmetro 10 vezes maior que a sua espessura;
- a concentração inicial de água é uniforme em toda a amostra;
- o processo é isotérmico;
- a casca da berinjela funciona como isolante, fazendo com que a transferência de calor ocorra somente em um sentido;
- o encolhimento das fatias de berinjela é desprezível;
- a resistência externa à transferência de massa é negligenciável.

A umidade de equilíbrio (X_{∞}) foi determinada utilizando uma adaptação do modelo de Rastogi e Raghvarao (2004) através do método gráfico, plotando-se a taxa de secagem ($-dX/dt$) em função do teor de umidade (X) em base seca. No método proposto, a umidade de equilíbrio foi determinada através da leitura do valor correspondente no eixo das abcissas quando a taxa de secagem tende a zero.

O número de Fourier (Fo) foi calculado no programa Excel 2018 utilizando o método *Solver*, bem como as análises de regressão e estimação de parâmetros, conforme o método utilizado por BROCHIER (2013) e MERCALI (2009). Assim, o número de Fourier foi plotado em função do tempo e, a partir da inclinação da reta, foi calculada a difusividade mássica efetiva (D_{eff}), de acordo com a Equação (3).

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a determinação do efeito do campo elétrico moderado (MEF) na secagem das fatias de berinjela, foram avaliados os efeitos da tensão e da temperatura na secagem através dos testes de ANOVA e Tukey, onde levaram-se em consideração todos os tratamentos possíveis e com a ordem de experimentos aleatorizada.

A análise estatística foi realizada nos dados experimentais obtidos variando-se a temperatura de secagem (40, 60 e 80 °C) e a tensão do MEF (0, 50 e 100 V), sendo ambas aplicadas em três níveis diferentes. A sequência aleatorizada dos experimentos foi gerada utilizando o *Software Statistica 7.0*, que forneceu 9 combinações em duplicata, totalizando 18 ensaios, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Condições de tensão e temperatura do ar de secagem.

<u>Tensão (V)</u>	<u>Temperatura (°C)</u>
0	40
0	60
0	80
50	40
50	60
50	80
100	40
100	60
100	80

Os dados foram analisados utilizando os *softwares* Excel (*MapInfo Corporation*, Troy, NY, USA) e *Statística* (7.0, *Statsoft Inc.*, Tulsa, USA). Foram realizados testes de Tukey e ANOVA com um nível de confiança de 95 % para avaliar diferenças estatísticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na execução do presente trabalho. Serão discutidos os resultados alcançados na quantificação da umidade de equilíbrio, da difusividade mássica efetiva (D_{eff}) e da modelagem matemática da cinética de secagem das fatias de berinjela (*Solanum melongena L.*) pré-tratadas, ou não, com MEF e submetidas à secagem no secador convectivo.

5.1 PREPARO DA AMOSTRA

Os testes para armazenamento da matéria-prima foram realizados através do teste de condutividade elétrica conforme as normas analíticas descritas pelo Instituto Adolf Lutz. A partir destas análises, foi possível verificar que, tanto o congelamento lento, quanto o congelamento rápido, afetaram a estrutura do alimento.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos a partir das análises de condutividade elétrica das amostras de berinjela *in natura* e sujeitas ao congelamento e posterior descongelamento. Conforme pode ser observado, as condutividades elétricas das amostras de berinjela submetidas ao congelamento e descongelamento foram consideravelmente superiores em relação às amostras *in natura*. Esse fenômeno é explicado pelo rompimento das células do tecido vegetal devido à formação de cristais de água dentro das células no momento do congelamento, liberando íons que aumentam a condutividade elétrica do meio.

Tabela 6 - Dados de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a 20 °C das amostras de berinjela *in natura* e submetidas aos processos de congelamento e descongelamento.

Amostra	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
<i>In natura</i>	169,0 ^c ± 0,2
Congelamento lento	741,5 ^a ± 11
Congelamento rápido	700 ^b ± 1

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Sendo assim, optou-se pela utilização das amostras de berinjela *in natura*, pois os processos testados não conseguiram manter a integridade do tecido celular vegetal do alimento, o que é de extrema importância para a avaliação do MEF como pré-tratamento.

5.2 BRANQUEAMENTO QUÍMICO

Conforme mencionado anteriormente, o branqueamento químico foi realizado com o intuito de reduzir o escurecimento devido à atividade das enzimas peroxidase (POD) e polifenoloxidase (PPO) nas fatias de berinjelas, apresentado na Figura 12.

A imagem da Figura 12-a representa a fatia de berinjela *in natura*, 10 min após o corte, e sem imersão na solução de branqueamento químico; a imagem da Figura 12-b, mostra o efeito da solução de branqueamento químico após 10 min de imersão das fatias berinjelas.

Figura 12 – Amostras de berinjela *in natura* sem imersão na solução de branqueamento (a) e após imersão na solução de branqueamento (b).



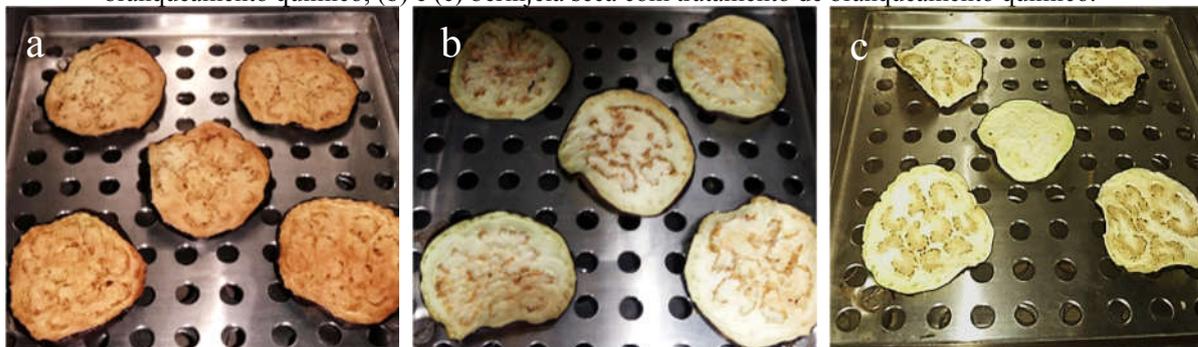
Quando comparadas visualmente, é possível verificar a diferença de coloração entre as amostras. A amostra que não sofreu processo de branqueamento, a Figura 12-a, apresenta uma cor amarronzada, demonstrando que ocorreu oxidação enzimática no produto. Na segunda imagem, Figura 12-b, a berinjela foi imersa por 10 min em solução de branqueamento imediatamente após o corte e, como resultado, é possível verificar visualmente a manutenção da qualidade no que diz respeito ao escurecimento devido à ação das enzimas. Não foi realizado teste instrumental de análise de cor pois as amostras são totalmente heterogêneas e o resultado não seria fidedigno ao conjunto de amostras.

MELO (2015) estudou a aplicação de métodos de inativação e inibição enzimática em frutas e hortaliças fazendo uma análise visual e instrumental de cor. Os autores obtiveram um excelente resultado utilizando o método de adição de substâncias químicas através do uso de reagentes ácidos, que diminuem o pH, e sulfitos, que interagem diretamente com compostos intermediários formados durante a ação enzimática e, dessa forma, impedem a reação de formação de pigmentos escuros.

As imagens das Figura 13-a e 13-b mostram o efeito do branqueamento químico após a secagem convencional das fatias de berinjela, sendo, a primeira, sem o tratamento de branqueamento químico e, a segunda, após o tratamento. A imagem da Figura 13-c apresenta o efeito do branqueamento após a secagem das fatias de berinjela pré-tratadas com MEF. A

análise visual aponta que houve uma diminuição da formação de pigmentos escuros nas amostras, o que, por sua vez, pode ser um indicativo da redução da atividade enzimática.

Figura 13 - Efeito do tratamento de branqueamento químico para redução da atividade enzimática após secagem convencional (a e b) e com pré tratamento de MEF (c), onde: (a) berinjela seca sem tratamento de branqueamento químico, (b) e (c) berinjela seca com tratamento de branqueamento químico.



Neste trabalho, não foram realizados os ensaios instrumentais de análise de cor e determinação de porcentagem de inativação das enzimas peroxidase (POD) e polifenoloxidase (PPO), uma vez que essas avaliações estavam além do escopo da presente pesquisa.

5.3 DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (D_{eff}) E UMIDADE DE EQUILÍBRIO (X_{∞})

Conforme comentado anteriormente, para a determinação da difusividade mássica efetiva da água (D_{eff}) fez-se necessário, inicialmente, encontrar o conteúdo de umidade no equilíbrio. Para tanto, foi utilizada uma adaptação da metodologia descrita por RASTOGI e RAGHAVARAO (2004), pois este foi o método que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem. Os valores da D_{eff} foram determinados no ponto onde a taxa de secagem tende a ser nula, ou seja, quando a taxa apresentou uma tendência a zero. Na Tabela 11 estão apresentados os valores do conteúdo de umidade no equilíbrio (g água/ g de sólidos secos) para todas as condições experimentais. Os valores da umidade de equilíbrio encontrados para uma mesma condição de temperatura e tensão (duplicatas) foram bastante díspares (por exemplo, os tratamentos 16 e 18 têm as mesmas condições e forneceram valores de 0,5384 e 0,0885). No entanto, conforme será discutido mais adiante, o impacto desta diferença nos resultados de D_{eff} foi bastante pequeno.

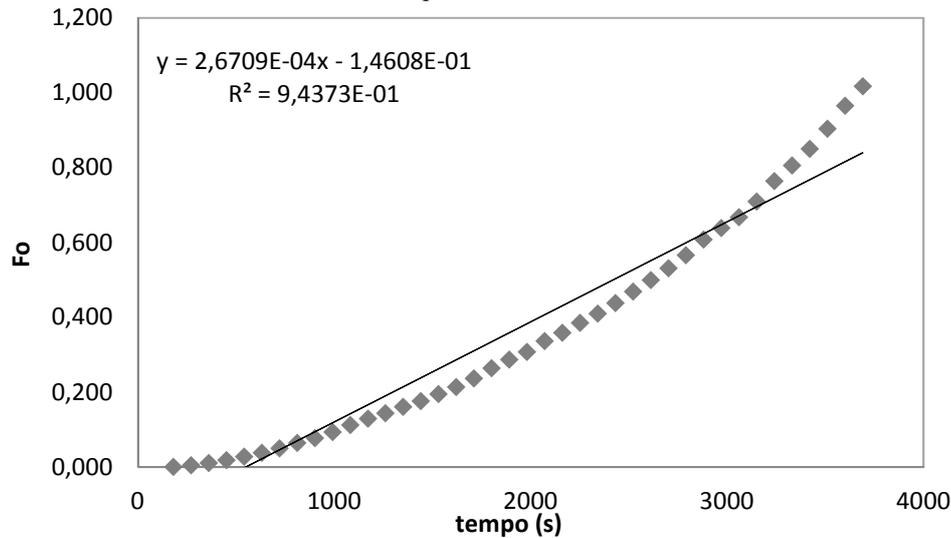
Tabela 7 – Conteúdo da umidade no equilíbrio para as diferentes condições experimentais de secagem de fatias de berinjela.

Tratamento	T (°C)	Tensão (V)	X_{∞} (g água/ g de sólidos secos)
13	40	0	0,0513
7	40	50	0,2667
12	40	100	0,3118
15	40	0	0,1588
5	40	50	0,1373
8	40	100	0,0563
16	60	0	0,5384
6	60	50	0,0674
10	60	100	0,2590
18	60	0	0,0885
9	60	50	0,0779
3	60	100	0,1887
17	80	0	0,0344
11	80	50	0,1614
2	80	100	0,2274
14	80	0	0,0631
1	80	50	0,0262
4	80	100	0,0551

A difusividade mássica efetiva da água foi determinada utilizando a solução da Segunda Lei de Fick da difusão para a geometria de placa plana, levando em consideração os quatros primeiros termos do somatório, conforme apresentado na Seção 3.2.5. Vários autores utilizaram essa metodologia para a determinação da difusividade mássica efetiva, podendo-se citar os trabalhos de MERCALI (2009), com bananas, de BROCHIER (2013), com batatas yacon e LUCHESE (2013) que estudou a desidratação osmótica de *pysalis*.

A equação (2) foi aplicada com auxílio do Solver em Excel e obteve-se o número de Fourier para cada condição experimental estudada. Em seguida, foi plotado o número de Fourier em função do tempo de secagem, determinando-se, assim, a difusividade efetiva para a água através da inclinação da reta. A Figura 14 apresenta o gráfico do número de Fourier plotado em função do tempo de secagem, para a condição de temperatura de 60 °C, com pré-tratamento com MEF com tensão de 100 V. Os demais experimentos apresentaram comportamento semelhante nas demais condições de secagem e pré- tratamentos com MEF e, por esta razão, não serão mostrados.

Figura 14 – Número de Fourier em função do tempo de secagem para condições experimentais de temperatura de 60 °C e campo elétrico moderado de 100 V.



A difusividade mássica efetiva da água (D_{eff}) foi calculada a partir do coeficiente angular das curvas do número de Fourier em função do tempo de secagem, multiplicado pelo comprimento característico ao quadrado de acordo com a Equação (3). Os dados experimentais apresentaram um bom ajuste à equação linear, exibindo coeficientes de determinação superiores a 0,88.

Conforme já comentado, como os valores de umidade de equilíbrio encontrados foram muito diferentes considerando as duplicatas dos experimentos, foram realizados testes de sensibilidade para o cálculo de D_{eff} . Para tanto, a difusividade foi calculada considerando dois valores de umidades de equilíbrio bem diferentes para a mesma condição experimental. Por exemplo, para o tratamento 16 (60 °C/0 V; $X_{\infty} = 0,5384$), que forneceu um valor de D_{eff} igual a $1,27 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, utilizando um novo valor de X_{∞} igual a 0,08, o valor de difusividade encontrado foi de $1,23 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, ou seja, um erro de 3,15%. Este procedimento foi repetido para as demais condições e os erros percentuais foram menores do que 4%. Desta forma, é possível concluir que o valor da umidade de equilíbrio tem um impacto bastante pequeno no valor da difusividade mássica efetiva. A Tabela 12 apresenta os dados de difusividade mássica efetiva da água obtidos a partir das curvas de secagem para as três temperaturas estudadas.

Tabela 82 – Difusividade mássica efetiva da água em m^2s^{-1} para as diferentes condições experimentais de secagem das fatias de berinjela

Temperatura (°C)					
40		60		80	
MEF	$D_{\text{eff}} \times 10^{-09} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	MEF	$D_{\text{eff}} \times 10^{-09} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	MEF	$D_{\text{eff}} \times 10^{-09} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$
0 V	0,71 ^{c,D**} ± 0,027	0 V	1,29 ^{b,C**} ± 0,016	0 V	2,09 ^{a,A**} ± 0,093
50 V	0,72 ^{c,D**} ± 0,012	50 V	1,37 ^{b,C**} ± 0,11	50 V	1,86 ^{a,A**} ± 0,035
100 V	0,70 ^{c,D**} ± 0,0024	100 V	1,34 ^{b,C**} ± 0,08	100 V	2,02 ^{a,A**} ± 0,12

a, b, c: letras minúsculas diferentes nas linhas indicam diferença estatística entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

A, B, C: letras maiúsculas iguais nas colunas não indicam diferença estatística entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

** Média ± desvio padrão relativa à realização de 2 experimentos.

Através da análise desta tabela, é possível verificar que os valores de D_{eff} , em todas as condições investigadas, não diferiram estatisticamente ($p > 0,05$) quando comparada a mesma temperatura estudada. Ou seja, estes resultados indicam que o pré-tratamento com MEF não causou um efeito significativo na difusividade mássica efetiva da água, nas condições estudadas. Era esperado que a aplicação do MEF atuasse no rompimento do tecido celular da berinjela através do mecanismo de eletroporação promovendo o aumento da difusividade da água.

Na maioria dos estudos de secagem, o material celular que teve membranas destruídas devido a ciclos de congelamento, descongelamento e aquecimento acima de 60 °C, não têm o mesmo aumento de eficiência do processo de MEF durante as operações com utilização de alimentos (VOROBIEV e LEBOVKA, 2008).

Neste entendimento, quando avaliado a aplicação do MEF em diferentes níveis de temperatura do ar de secagem, mas com a mesma tensão de campo elétrico, os valores de D_{eff} aumentam com o aumento da temperatura do ar de secagem. CATELAM et. al (2014), obtiveram resultado similar em seu estudo sobre a cinética de secagem e difusividade de pimentas malaguetas. A secagem foi realizada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C por um período de 5 horas e com velocidade do ar de 1,6 m/s. A conclusão foi que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, houve um aumento da taxa de secagem e da difusividade mássica efetiva da água.

A análise realizada através do Teste de Tukey ($p > 0,05$) comprova que a utilização do MEF como forma de pré-tratamento nas fatias de berinjelas teve efeito negligenciável no aumento da difusividade mássica efetiva da água e não houve redução do tempo de secagem dos frutos. Conforme já mencionado, isso pode ser atribuído ao fato de que a intensidade do campo elétrico aplicada no estudo não foi suficiente para induzir alteração efetiva na estrutura celular das fatias de berinjela. O uso de campos elétricos mais intensos iria provocar um

aumento de temperatura do sistema, o que impactaria nas taxas de secagem e na difusividade mássica da água. Neste caso, ter-se-ia um efeito térmico indesejável para os objetivos do presente trabalho que era identificar os efeitos elétricos sobre a secagem. Acredita-se que essa limitação experimental gerou, como consequências, limites máximos de tensão, altos o suficiente para promover a eletroporação ou eletropermeabilização, mas não altos o suficiente para que ocorresse uma eletroporação irreversível.

Outra limitação operacional foi o valor da frequência utilizada, uma vez que o equipamento utilizado não permite a variação da mesma, sendo possível, somente, a utilização da frequência fornecida pela rede elétrica de 60 Hz. De acordo com LIMA e SASTRY (1999), uma maior eletropermeabilização é observada quando o aquecimento por MEF é realizado em baixas frequências, pois, em frequências muito altas, a eletroporação pode ser prejudicada devido a redução das reações de eletrólise, uma vez que os polos mudam rapidamente entre os eletrodos. Nos estudos conduzidos pelos autores, foi verificado que as taxas de secagem de inhame e maçã pré-tratados à 4 Hz foram significativamente superior durante a maior parte do processo de secagem em relação aos experimentos conduzidos na frequência de 60 Hz.

Não foram encontrados na literatura trabalhos sobre secagem de fatias de berinjelas com pré-tratamento de MEF para fins de comparação com os dados encontrados no presente trabalho. Entretanto, foram encontrados dois estudos que abordam estudos sobre difusividade mássica efetiva da água em fatias de berinjela.

ARAÚJO et al. (2016) pesquisaram sobre a cinética de secagem de fatias de berinjela em leito fixo nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Os autores utilizaram o modelo de Fick para placa plana a fim de determinar a difusividade mássica efetiva da água. Foi verificado que a difusividade efetiva da água na berinjela aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando valores de $6,61 \times 10^{-10}$, $8,97 \times 10^{-10}$ e $16,38 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para temperaturas de 40, 50°C e 60°C, respectivamente.

Na temperatura de secagem de 40 °C, os valores de D_{eff} se assemelham com o encontrado na presente pesquisa. Porém, para as temperaturas de 50 e 60 °C, os valores de difusividade obtidos são maiores do que os valores encontrados no presente trabalho. Especula-se que essa diferença possa ser decorrente da utilização, pelo autor, da solução analítica para uma geometria de placa plana, mesmo que as fatias de berinjelas tivessem um formato de paralelepípedo medindo 20 x 10 x 10 mm. Com estas dimensões, a transferência de massa é, na verdade, tridimensional.

JUNQUEIRA et al. (2017) avaliaram a desidratação osmótica de fatias de berinjela utilizando pulso à vácuo. A difusividade mássica efetiva da água foi calculada através da

solução da Segunda Lei de Fick da difusão para sistemas de placa plana, utilizando somente o primeiro termo da solução de Fick. Os valores de difusividade efetiva da água encontrados variaram entre $4,11 \times 10^{-10}$ e $5,46 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

SOUZA e OCÁCIA (2009) estudaram a cinética de secagem de maçã em secador convectivo e determinaram a difusividade mássica efetiva da água para as fatias da fruta, cuja geometria foi considerada como placa plana infinita. Foram utilizadas temperaturas do ar secagem de 55, 60 e 100 °C, com velocidades do ar de secagem de 0,5 e 1,0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Os valores de D_{eff} obtidos para tais parâmetros variaram entre $1,006 \times 10^{-09}$ e $9,561 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

LEBOVKA; SHYNKARYK e VOROBIEV (2007) avaliaram a secagem de batatas pré-tratadas com campo elétrico pulsado (PEF). As batatas foram cortadas em discos, congeladas e descongeladas, pré-tratadas e secas nas temperaturas de 30 e 50 °C e velocidade de 6 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; a difusividade mássica efetiva da água foi calculada levando em consideração os primeiros cinco termos da série da solução da Segunda Lei de Fick para a difusão. Os valores médios de difusividade encontrados neste estudo variaram entre $10,1 \times 10^{-09}$ e $3,5 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

SILVA et al. (2009) estudaram a cinética de secagem em leito fixo da banana maçã, fatiadas em rodela de espessuras de 5 a 10 mm e com temperaturas do ar de secagem de 50 a 70 °C. Os valores médios de difusividade mássica efetiva, para as temperaturas estudadas foram calculados considerando os três primeiros termos da solução da equação de Fick e variaram de $3,307 \times 10^{-10}$ a $1,254 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

FIGUEIRA (2014) pesquisou sobre a secagem de pequi (*Caryocar brasiliensis Camb.*) precedida de desidratação osmótica, conduzida nas temperaturas de 40 e 60 °C. O autor utilizou o modelo difusional da equação Fick para calcular a difusividade mássica efetiva da água, chegando aos valores de $1,84 \times 10^{-10}$ e $1,70 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para as temperaturas de 40 e 60 °C, respectivamente.

PINEDO e MURR (2007) avaliaram a influência de pré-tratamentos de congelamento e branqueamento na cinética de secagem à vácuo de cenoura e abóbora nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e nas pressões de 5, 15 e 25 kPa. Foi verificado que os pré-tratamentos anteriores a secagem contribuíram para o aumento da difusividade mássica efetiva da água. Os valores encontrados de D_{eff} na cenoura variaram entre $1,469 \times 10^{-09}$ e $2,740 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para as amostras sem pré-tratamento, e $2,173 \times 10^{-09}$ e $3,536 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para as amostras pré-tratadas com branqueamento; para as amostras de cenouras pré-tratadas com congelamento, os valores médios foram entre $1,654 \times 10^{-09}$ e $4,844 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Para as amostras de abóbora, os valores de D_{eff} variaram entre $2,08 \times 10^{-09}$ e $4,03 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $2,03 \times 10^{-09}$ e $4,94 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $2,01 \times$

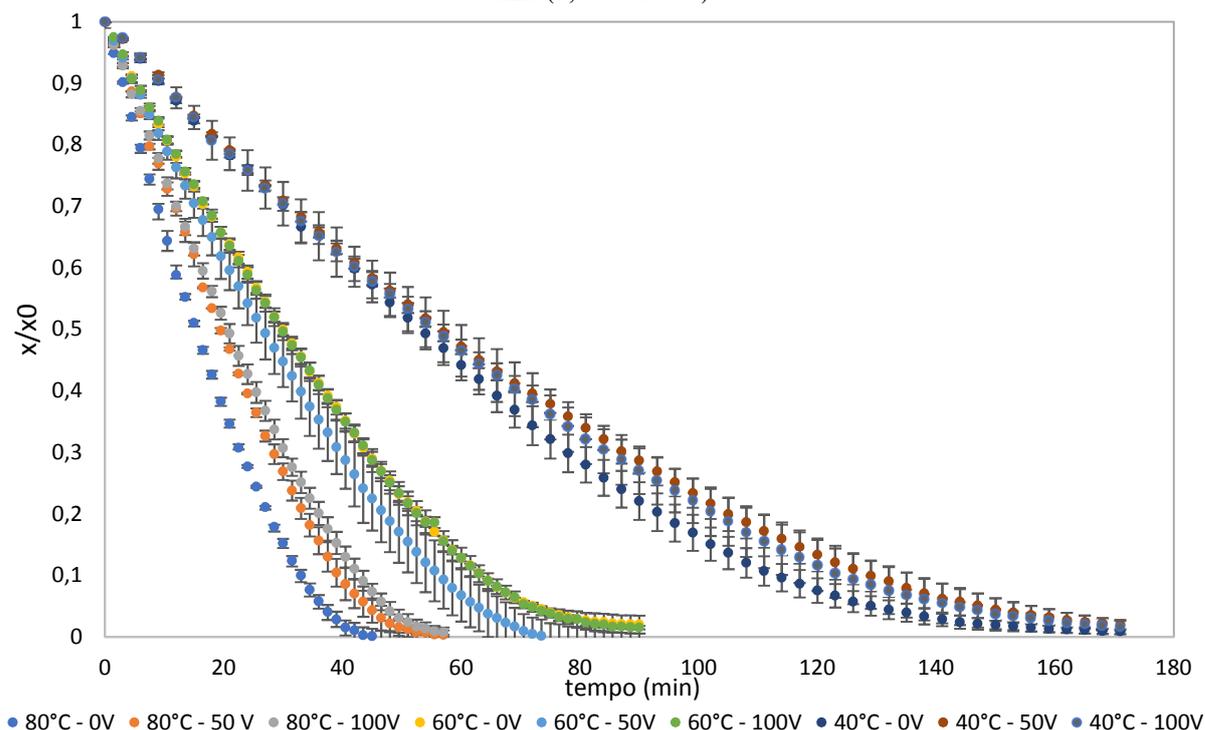
10^{-09} e $5,70 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, nas amostras sem pré-tratamento, pré-tratadas com branqueamento e com congelamento, respectivamente.

As diferenças existentes entre os resultados encontrados para a difusividade mássica efetiva da água podem ser justificadas pelo uso de diversos tipos de frutas e vegetais, com diferentes graus de maturação e diferentes formas estruturais, bem como pelas diferentes condições e parâmetros experimentais utilizadas nos trabalhos. Ainda assim, quando o alimento estudado é o mesmo, a heterogeneidade das amostras, como, por exemplo, o grau de maturação e as variedades de tamanho, podem conduzir a diferentes valores de difusividade mássica efetiva da água.

5.4 APLICAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO MODERADO (MEF) E SECAGEM

Para a avaliação dos efeitos provocados pela utilização do MEF no pré-tratamento à secagem das fatias de berinjelas, foram analisados os gráficos de secagem e os dados de difusividade mássica efetiva para a água. A Figura 15 apresenta os dados da secagem obtidos experimentalmente para as fatias de berinjelas nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C e diferentes tensões aplicadas. Nesta figura, os pontos representam os dados experimentais obtidos durante a secagem das fatias de berinjela para cada condição experimental de aplicação de MEF (0, 50 e 100 V).

Figura 15 – Curvas de secagem para fatias de berinjelas na temperatura de 40, 60 e 80 °C, com tratamento por MEF (0, 50 e 100 V).



Conforme pode ser observado, para os experimentos conduzidos a 40, 60 e 80 °C, independente da tensão aplicada no MEF (0, 50 e 100 V), não houve diferenças entre os dados obtidos nas condições de MEF testadas quando se compara os dados de secagem para a mesma temperatura. Entretanto, na curva de secagem com temperatura do ar de 80 °C e MEF de 0 V, houve um pequeno deslocamento da curva de secagem, sugerindo uma possível redução do tempo de secagem quando comparado ao tratamento com aplicação de MEF. Esse resultado não era esperado, uma vez que, teoricamente, a aplicação do tratamento por MEF provocaria um aumento na transferência de massa causado por aumentos na permeabilidade da membrana celular promovidos pelo campo elétrico. Acredita-se que os valores de intensidade de voltagem utilizados não tenham sido suficientes para causar a eletroporação esperada.

O comportamento verificado nas curvas de secagem conduzidas a 80 °C pode ser atribuído à heterogeneidade entre as amostras de berinjelas, uma vez que não foi possível uma homogeneização dos lotes antes dos experimentos. Cabe salientar que as fatias foram utilizadas de forma inteira, respeitando a anatomia de cada fruto. Além disso, houve variações no interior dos frutos (sementes, maturação, polpa, espessura da casca). Em todos os níveis de tensões estudados, percebe-se a inexistência do período de taxa constante de secagem, revelando, assim, que o controle do processo da transferência de massa é regido pela difusão de massa interna.

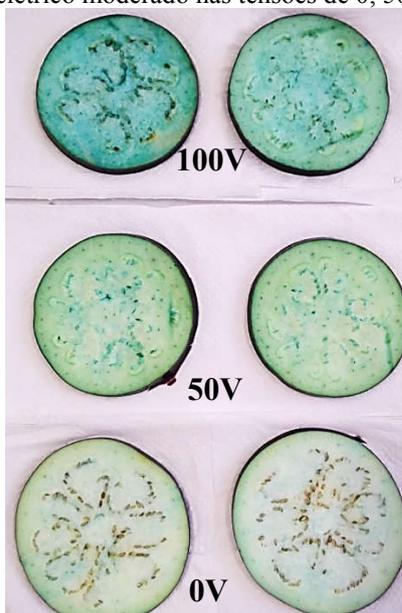
WANG e SASTRY (2000) e SALENGKE e SASTRY (2005) pesquisaram o efeito do MEF na secagem de vegetais (cenoura, batata e inhame) e da uva, respectivamente, porém, ambos autores submeteram as amostras durante a aplicação do MEF a efeitos térmicos. WANG e SASTRY (2000) aqueceram os vegetais até uma temperatura média de 50 a 80 °C e, após atingida essa temperatura, foi aplicado um MEF de campo 40 V/cm a 60 Hz. SALENGKE e SASTRY (2005) aqueceram as amostras de uvas em um meio contendo ácido cítrico (2%) até 60 °C e, em seguida, foi aplicado um MEF de campo igual 15 V/cm nas frequências de 30 Hz, 60 Hz e 7,5 kHz. Os resultados obtidos mostraram uma queda do tempo de secagem e aumento da taxa de secagem em ambas pesquisas, à exceção do experimento com campo de 15 V/cm e 7,5 kHz realizado por SALENGKE e SASTRY (2005) onde esse tratamento não produziu estatisticamente um aumento significativo na taxa de secagem.

ZHONG e LIMA (2003) avaliaram o efeito do MEF na secagem à vácuo de cubos de batata doce. Uma fonte de alimentação de 120 V e 60 Hz foi utilizada para aquecer as amostras previamente. O valor da temperatura final, no entanto, não foi fornecida pelos autores. Em seguida, os cubos de batata doce foram submetidos a campos de 50, 70 e 90 V/cm e secas nas

temperaturas de 45, 60 e 80 °C. Como resultado, a utilização do MEF reduziu entre 22-24 % o tempo de secagem.

Na Figura 16, são apresentadas imagens do teste realizado para a verificação qualitativa da ocorrência, ou não, de eletroporação nas amostras de berinjelas durante o período de aplicação do MEF. Conforme pode ser observado na Figura 16, após o tempo de aplicação do MEF por 10 minutos, tempo de aplicação do campo em todas as condições experimentais executadas neste trabalho, foi verificado visualmente que houve a introdução de moléculas do corante azul dentro dos poros do tecido celular vegetal.

Figura 16 – Fatias de berinjela após o teste de incorporação do corante azul de metileno através da aplicação de campo elétrico moderado nas tensões de 0, 50 e 100V.



A análise qualitativa revela que, com o aumento da tensão do campo elétrico aplicado, houve também um aumento na quantidade de moléculas de corante absorvidas pelas células do tecido vegetal da berinjela, uma vez que a baixa intensidade do tratamento por MEF permite uma perturbação reversível na membrana do tecido vegetal, fazendo com que se torne possível introduzir moléculas em suas células. Isso ocorre pois o choque de voltagem perturba, temporariamente, áreas da membrana celular, podendo a membrana ser selada rapidamente após cessada a aplicação do campo, deixando a célula intacta (VOROBIEV e LEBOVKA, 2008). Acredita-se que, durante o tempo de aplicação da tensão do MEF, ocorreu uma eletroporação reversível; neste tipo de eletroporação, os poros são temporariamente formados e mantidos durante a aplicação do campo elétrico, voltando a se fechar após finalizada a aplicação do campo.

Conforme mencionado anteriormente, não foram encontrados na literatura trabalhos sobre secagem de berinjelas pré-tratadas com campo elétrico moderado (MEF) sem efeitos térmicos, nos quais a utilização do pré-tratamento não tenha influenciado na secagem para fins de comparação com os dados encontrados no presente trabalho. Contudo, foram encontrados alguns trabalhos nos quais foram utilizadas eletrotecnologias como pré-tratamento na secagem de frutas e vegetais, onde o efeito do pré-tratamento foi reduzido ou não existiu. Tais trabalhos serão descritos a seguir.

WIKTOR et al. (2013) avaliaram a cinética de secagem do tecido da maçã pré-tratada com campo elétrico pulsado (PEF). As amostras foram secas a uma temperatura de 70 °C e pré-tratadas com campo elétrico de 0, 5 e 10 kV a 0, 10 e 50 pulsos. As amostras tratadas com 0 e 5 kV a 0, 10 e 50 pulsos não apresentaram diferenças significativas entre os valores de difusividade mássica efetiva da água ($1,044 \times 10^{-9}$ a $1,100 \times 10^{-9} \pm 0,03$ (m^2s^{-1})), bem como não apresentaram diferenças no tempo de secagem. Essa verificação muito se assemelha aos dados gerados no presente trabalho, uma vez que a avaliação das curvas de secagem apresenta o mesmo comportamento quanto à perda de água em função do tempo nas amostras com e sem tratamentos. Entretanto, os autores observaram um aumento em 3% no valor da difusividade mássica efetiva da água nas amostras tratadas com 10 kV e 10 pulsos ($1,076 \times 10^{-9} \pm 0,05$ (m^2/s)) e um aumento de 20% nas amostras tratadas com 10 kV e 50 pulsos ($1,252 \times 10^{-9} \pm 0,04$ (m^2/s)), quando comparadas com as amostras sem tratamento (0 kV e 0 pulso).

SINGH et al. (2013) pesquisaram sobre a secagem de fatias de batatas em micro-ondas e por ar quente a 50 °C e 1,4 m/s, pré-tratadas com campo elétrico estático conduzido na tensão de 4 kV/cm. As análises de D_{eff} revelaram que as fatias de batatas submetidas à secagem com e sem pré-tratamento não apresentaram diferenças significativas quando comparadas entre si. Os valores de difusividade mássica efetiva da água para as amostras secas com ar quente foram equivalentes a $1,376 \times 10^{-9} \pm 0,12$ e $1,286 \times 10^{-9} \pm 0,09$ m^2s^{-1} para as amostras pré-tratadas. As amostras secas sem micro-ondas, por sua vez, apresentaram valores de difusividade na ordem de $5,115 \times 10^{-9} \pm 0,07$ e $5,063 \times 10^{-9} \pm 0,02$ m^2s^{-1} , valores estes referentes a amostra sem e com pré-tratamento, respectivamente.

TRAFFANO-SCHIFFO et al. (2017) conduziram um estudo sobre a desidratação osmótica de kiwis orgânicos pré-tratados por campos elétricos pulsados; os pré-tratamentos com PEF foram realizados utilizando três tensões diferentes (100, 250 e 400 V/cm) e 60 pulsos. A desidratação osmótica foi realizada em 61,5 % da solução de sacarose por um período de 0

a 120 min. O tratamento com PEF foi considerado negligenciável quando comparado com as amostras sem tratamento.

5.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DAS FATIAS DE BERINJELA

A modelagem da cinética de secagem foi realizada com a finalidade de entender melhor o estudo do processo e permitir uma melhor comparação entre as amostras não tratadas e as amostras tratadas com MEF. Foram testados 9 modelos matemáticos comumente utilizados para avaliar a cinética de secagem em produtos alimentícios. Na Tabela 13, estão apresentados os resultados da avaliação estatística dos modelos estudados para amostras de fatias de berinjelas secas nas temperaturas de 40 °C não tratadas e tratadas com MEF nas tensões de 0, 50 e 100 V.

Tabela 93 – Parâmetros estatísticos dos modelos avaliados para descrever a cinética de secagem das fatias de berinjelas tratadas e não tratadas com MEF à 40 °C.

Modelos matemáticos	Equação	RQEM	χ^2	R ²
		[0; 50; 100V]	[0; 50; 100V]	[0; 50; 100V]
Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$	[0,032; 0,0239; 0,024]	[0,00435; 0,00324; 0,00327]	[0,978; 0,966; 0,966]
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	[0,0505; 0,00488; 0,013]	[0,00687; 0,000664; 0,00177]	[0,932; 0,993; 0,981]
Henderson e Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	[0,0228; 0,0176; 0,0184]	[0,00310; 0,00239; 0,00251]	[0,970; 0,975; 0,974]
Logarítimo	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$	[0,00428; 0,000974; 0,00160]	[0,000582; 0,000132; 0,000218]	[0,997; 0,997; 0,998]
Midilli et al.	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	[0,00191; 0,000621; 0,00101]	[0,00026; 0,0000845; 0,000138]	[0,998; 0,999; 0,998]
Wang e Singh (1978)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	[0,00148; 0,000168; 0,000272]	[0,000201; 0,0000229; 0,0000370]	[0,998; 0,999; 0,999]
Logístico	$MR = b / (1 + a \cdot \exp(k \cdot t))$	[0,00203; 0,003; 0,00302]	[0,000276; 0,000409; 0,000411]	[0,997; 0,995; 0,995]
Dois Termos	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_i \cdot t)$	[0,00534; 0,00515; 0,00546]	[0,000726; 0,0007; 0,000742]	[0,992; 0,992; 0,992]
Weibull	$MR = \exp[x(t/b)^a]$	[0,00429; 0,00525; 0,00541]	[0,000583; 0,000714; 0,000735]	[0,994; 0,992; 0,992]

De acordo com os resultados apresentados, os modelos cinéticos de Newton, Page e Henderson e Pabis apresentaram valores mais baixos de R² e valores mais altos de χ^2 e RQEM, quando comparados todos os experimentos realizados na temperatura de 40 °C, tanto nas fatias com tratamento quanto nas fatias sem tratamento prévio com MEF. O modelo de Page e Henderson & Pabis são uma pequena modificação de um modelo semi-empírico de Lewis, onde foi adicionado um termo exponencial (n) na variável tempo para Page e um parâmetro ajustável

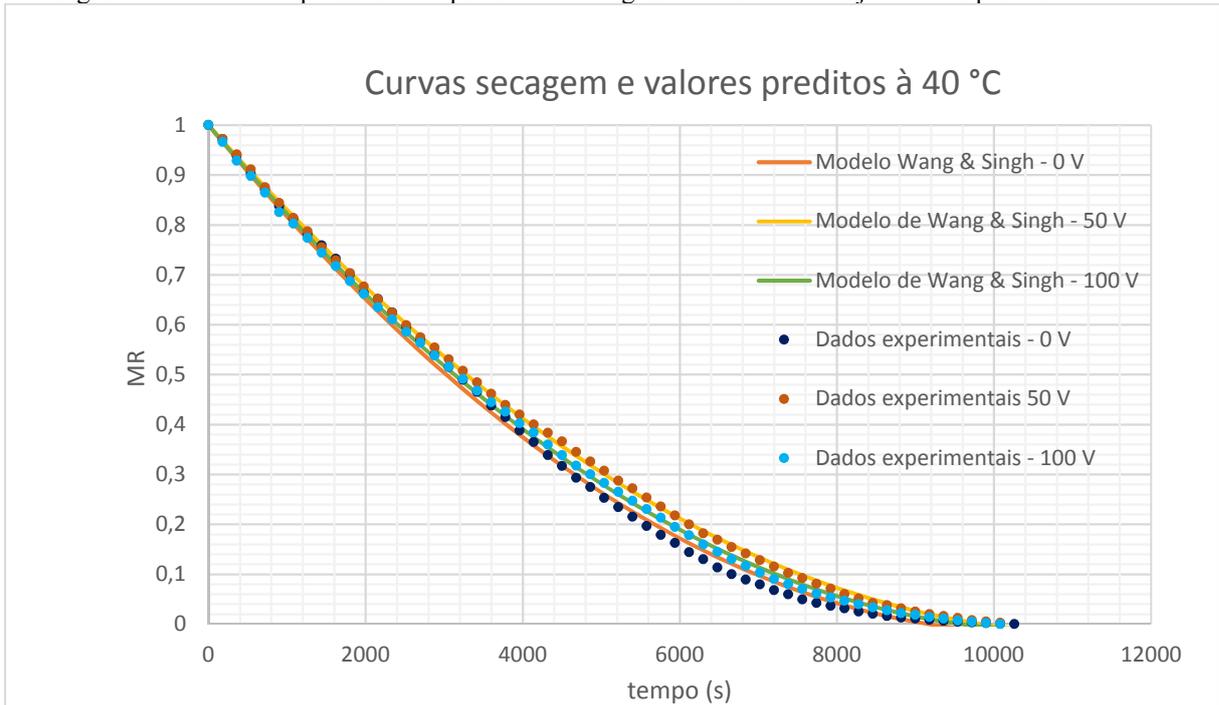
(a) para Henderson e Pabis (SILVA, 2013). Esses modelos consideram que a resistência à transferência de massa ocorre em uma camada delgada da superfície do sólido.

Ainda, a análise da Tabela 93, indica que os modelos Logaritmo, Logística, Dois termos e Distribuição de Weibull apresentaram resultados satisfatórios em relação aos critérios estatísticos avaliados. Todos esses modelos não podem ser totalmente desconsiderados, uma vez que os valores de R^2 se encontram acima de 0,93 e os valores de χ^2 e $RQEM$ são considerados baixos, na ordem de 10^{-4} e 10^{-3} , respectivamente. Valores similares foram encontrados por alguns autores durante o estudo da secagem de fatias de batata (SINGH et al. 2013) e fatias de maçã (WIKTOR et al., 2013). Entretanto, a modelagem realizada com os modelos de Midilli e Wang & Singh (1978) exibiram os melhores resultados quando analisados os critérios estatísticos juntamente com a avaliação dos ajustes dos dados experimentais ao modelo testado, sendo que ambos os modelos poderiam ser aplicados para descrever a cinética de secagem das fatias de berinjelas na temperatura de 40 °C tratadas e não tratadas com MEF. De fato, essas equações já foram utilizadas no ajuste da cinética de secagem em outros trabalhos (ARSLAN et al., 2010; JUNQUEIRA et al., 2017; MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002; SARIMESELI, 2011).

De acordo com SCHOKKER e BOEKEL (1997), a seleção de um modelo matemático depende do objetivo do estudo. Quando o propósito é a modelagem preditiva, é recomendável escolher o modelo no qual os menores números de parâmetros são estimados, uma vez que se trata de uma equação mais fácil de ser aplicada. Além disso, um modelo com um número menor de parâmetros possui um maior número de graus de liberdade, o que pode ser importante quando o número de medições for pequeno. Conforme apresentado na Tabela 93, o modelo que melhor satisfaz essa orientação é o de Wang & Singh (1978), sendo este o escolhido para o ajuste da cinética de secagem das fatias de berinjelas realizadas na temperatura de 40 °C com e sem tratamento de MEF.

Na Figura 177 está apresentado os valores experimentais de MR em função do tempo das fatias de berinjelas realizadas na temperatura de 40 °C para a amostra controle e com MEF de 50 e 100 V, respectivamente. A linha sólida corresponde aos valores preditos pelo modelo de Wang & Singh (1978).

Figura 17 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40 °C.



A análise desta figura indica que o modelo de Wang & Singh (1978) descreve satisfatoriamente a cinética de secagem das fatias de berinjela na temperatura de 40 °C tratadas ou não com MEF, além de apresentar os menores valores de χ^2 e $RQEM$ e altos valores de R^2 ($>0,998$).

O modelo de Wang & Singh (1978) foi discutido por JUNQUEIRA et al., (2017) para descrever a cinética de secagem de groselhas. A equação desse modelo representou bem o comportamento de secagem de jaca pré-tratada osmoticamente (KAUSHAL e SHARMA, 2014) e a secagem de fatias de banana (KHAWAS et al., 2015).

O modelo de Wang & Singh (1978) é composto por duas constantes, “ a e b ”, sendo que as constantes desse modelo estão expressas em forma não linear em função da razão de umidade adimensional MR em função tempo de secagem. Os valores estimados desses parâmetros para a secagem de fatias de berinjelas a 40 °C com e sem tratamento com MEF podem ser verificados na Tabela 14.

Tabela 104 - Constantes do modelo de Wang & Singh para secagem de fatias de berinjelas à 40 °C.

Parâmetro	0 V	50 V	100 V
a	$-1,93 \times 10^{-04}$	$-1,78 \times 10^{-04}$	$-1,87 \times 10^{-04}$
b	$9,138 \times 10^{-09}$	$7,75 \times 10^{-09}$	$8,58 \times 10^{-09}$

A modelagem matemática das curvas de secagem nas temperaturas de 60 e 80 °C foram realizadas de forma análoga à modelagem das curvas a 40 °C. Novamente, o modelo de Wang e Singh forneceram os melhores valores dos parâmetros de ajuste. A Tabela 15 mostra os parâmetros estatísticos deste modelo para as temperaturas de 60 e 80 °C, nos quais o comportamento foi semelhante ao que ocorreu na modelagem da secagem de fatias de berinjelas à 40 °C.

Tabela 115 - Parâmetros estatísticos para o modelo de Wang e Singh avaliados para descrever a cinética de secagem das fatias de berinjelas tratadas e não tratadas à 60 e 80 °C.

Modelos matemáticos	Equação	RQEM [0; 50; 100V]	χ^2 [0; 50; 100V]	R ² [0; 50; 100V]
Wang & Singh (T = 60 °C)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	[0,00156; 0,00145; 0,00139]	[0,000206; 0,000193; 0,000184]	[0,998; 0,998; 0,998]
Wang & Singh (T = 80 °C)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	[0,000718; 0,00222; 0,00102]	[0,000095; 0,000294; 0,000135]	[0,998; 0,996; 0,998]

A Figura 18 apresentam os valores experimentais de MR em função do tempo para as fatias de berinjela na temperatura de 60 °C para o controle e com MEF de 50 e 100 V, respectivamente; a Figura 19 apresenta os valores experimentais de MR em função do tempo para as fatias de berinjela na temperatura de 80 °C para o controle e com MEF de 50 e 100 V, respectivamente. As linhas sólidas representam os valores preditos pelo modelo de Wang & Singh (1978).

Figura 1818 - Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C.

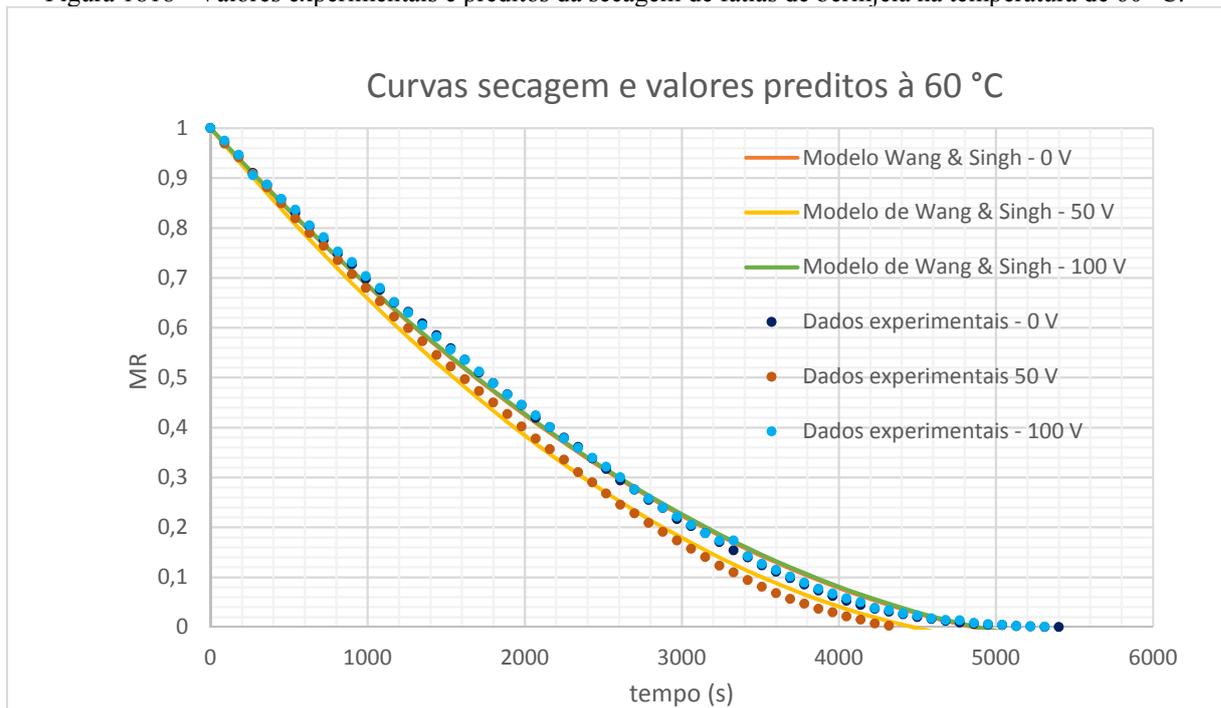
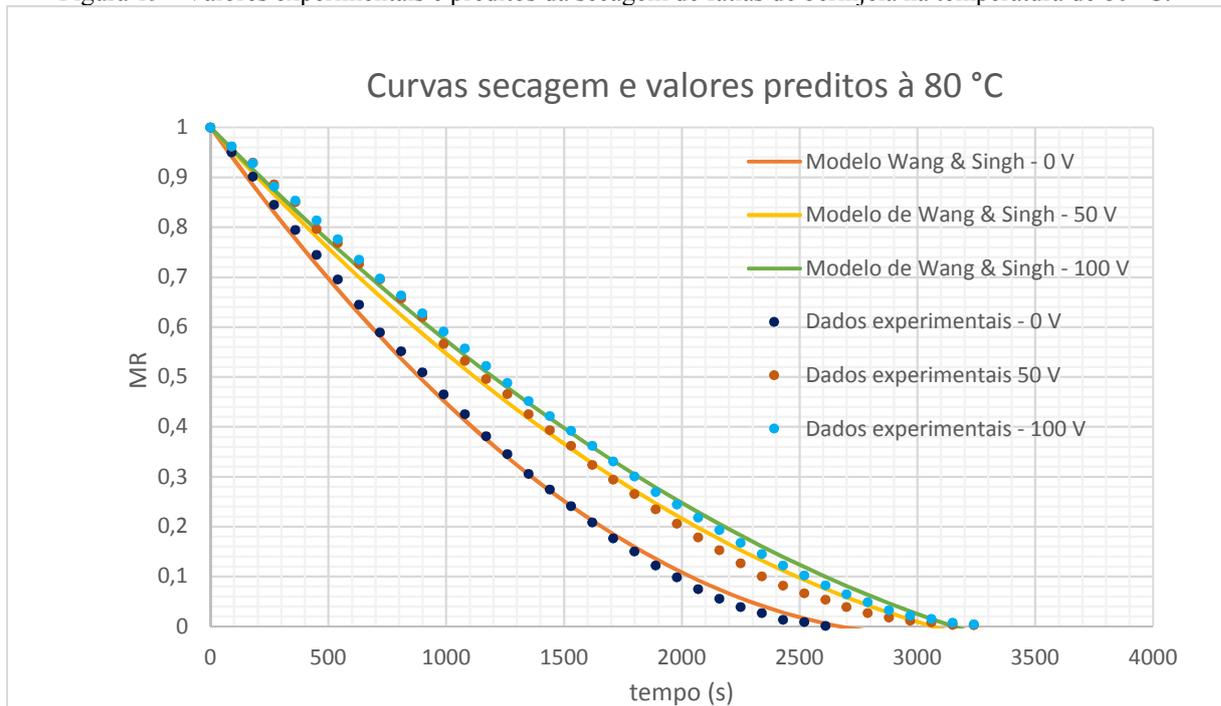


Figura 19 - Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C.



A análise destas figuras mostra o excelente ajuste do modelo de Wang & Singh (1978) aos dados experimentais. Na Tabela 16 estão apresentados os valores estimados das constantes “ a e b ” presentes na equação do modelo de Wang & Singh (1978) para as temperaturas de 60 e 80 °C.

Tabela 126 - Constantes do modelo de Wang & Singh para secagem de fatias de berinjelas à 60 e 80 °C.

Temperatura (°C)	Parâmetro	0 V	50 V	100 V
60	<i>a</i>	$-3,44 \times 10^{-04}$	$-3,76 \times 10^{-04}$	$-3,43 \times 10^{-04}$
	<i>b</i>	$2,85 \times 10^{-08}$	$3,40 \times 10^{-08}$	$2,82 \times 10^{-08}$
80	<i>a</i>	$-6,59 \times 10^{-04}$	$-5,15 \times 10^{-04}$	$-4,79 \times 10^{-04}$
	<i>b</i>	$1,06 \times 10^{-07}$	$6,16 \times 10^{-08}$	$5,12 \times 10^{-08}$

De acordo com as Tabelas 14 e 16, pode-se observar que as constantes “*a* e *b*” do modelo de Wang & Singh (1978), aumentam com o aumento da temperatura do ar secagem. Comportamento semelhante foi observado por outros autores; Moscon (2015) estudou a cinética de secagem de quinoa e amaranto, onde diversos modelos matemáticos foram testados para prever o fenômeno da secagem de seus produtos. Dentre os modelos testados, o modelo de Wang & Singh (1978) foi o que melhor se ajustou às curvas de secagem de grãos de amaranto e as constantes do modelo “*a* e *b*” também aumentaram com o aumento da temperatura do ar secagem.

Valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho utilizando o modelo de Wang & Singh (1978) foram relatados por diversos autores. JUNQUEIRA et al. (2017) estudaram o efeito de pré-tratamentos sobre os parâmetros de qualidade e cinética da secagem convectiva de frutos de groselhas. A secagem dos frutos da groselha ocorreu na temperatura de 60 °C com velocidade do ar de secagem de 2 m/s. Foram avaliadas cinco equações de camada delgada para prever a cinética de secagem. Entre os modelos testados, o modelo Wang & Singh (1978) representou bem a cinética de secagem de groselhas com altos valores de R^2 ($> 0,998$) e baixos valores de $RQEM$ ($< 0,010$). Os valores das constantes “*a* e *b*” se mantiverem na faixa entre -4,18 a $-6,79 \times 10^{-05}$ e 1,22 a $5,87 \times 10^{-10}$, respectivamente.

KAUSHAL e SHARMA (2014) pesquisaram sobre a cinética de desidratação osmótica-convectiva da jaca. Primeiramente, foi realizada a desidratação osmótica por meio de uma solução salina. Em seguida, as amostras de jaca osmoticamente pré-tratadas foram desidratadas por convecção em um secador de bandejas perfuradas com temperatura do ar de secagem de 50, 60 e 70 °C e velocidade constante de 1,5 m/s. Para a modelagem matemática, foram testados sete modelos de secagem. O modelo de Wang & Singh (1978) apresentou valores de χ^2 na ordem de 10^{-04} , $RQEM$ ($< 0,050$) e R^2 ($> 0,998$). As constantes, “*a* e *b*”, se mantiverem na faixa entre $-4,30 \times 10^{-03}$ a $-6,87 \times 10^{-04}$ e -1 a 1×10^{-6} , respectivamente. Wang & Singh (1978) foi considerado o melhor modelo que descreveu o comportamento de secagem de jaca.

KHAWAS et al. (2015) reportaram resultados semelhantes ao estudar a secagem de fatias de banana. Nesse estudo, os processos de secagem foram realizados nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e os autores verificaram que o modelo de Wang & Singh (1978) foi o que

melhor se ajustou aos dados experimentais. O modelo apresentou constantes “ a e b ” com valores médios entre $-1,70$ e $8,70 \times 10^{-3}$ e $1,921 \times 10^{-5}$ a $7,731 \times 10^{-7}$, respectivamente.

A escolha do modelo de Wang & Singh (1978) para representar a cinética de secagem no presente trabalho é justificada por se tratar de um modelo simples, com poucos parâmetros, atendendo aos critérios de análise estatísticos, tendo se ajustado de maneira satisfatória aos dados experimentais. Os resultados obtidos com a modelagem dos nove modelos testados para a modelagem matemática da cinética de secagem das fatias de berinjelas, tratadas e não tratadas com MEF, estão disponíveis no Apêndice A e B deste trabalho.

Embora não se encontre na literatura trabalhos sobre modelagem matemática da cinética de secagem de fatias de berinjelas pré-tratadas com MEF, observa-se que o comportamento experimental da perda de umidade em função do tempo de secagem e da temperatura apresentados nesta pesquisa podem ser considerados satisfatórios quanto ao ajuste do modelo semi-empírico testado, uma vez que, para todas as condições experimentais executadas, o modelo de Wang & Singh (1978) apresentou o maiores valores de R^2 e menores valores de χ^2 e $RQEM$, e ainda houve um excelente ajuste entre as curva de secagem dos dados experimentais e a curva prevista pelo modelo. Desta forma, o modelo pode ser assumido como o melhor para descrever a curva de secagem das fatias de berinjelas pré-tratadas com MEF nas condições estudadas.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo sobre o efeito da utilização de campo elétrico moderado (MEF) como tecnologia alternativa ao pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de berinjela (*Solanum melongena L.*). O processo de secagem foi realizado nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C e a aplicação de campo elétrico foi realizada nas tensões de 0, 50 e 100 V.

O modelo da Segunda Lei de Fick para a Difusão mostrou ser adequado para determinar a difusividade mássica efetiva da água nas fatias de berinjela. Essa propriedade aumentou com o aumento da temperatura, porém não houve aumento significativo com a aplicação do MEF. Os valores de D_{eff} , após o tempo de secagem das fatias com e sem tratamento com MEF, encontraram-se na faixa de $0,68 \times 10^{-09}$ e $1,25 \times 10^{-09} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, os quais foram considerados satisfatórios, uma vez que se encontram dentro da faixa prevista para produtos alimentícios.

A utilização da tecnologia de campo elétrico moderado (MEF), sem efeitos térmicos, como forma de pré-tratamento teve um efeito considerado negligenciável quando avaliado o aumento da D_{eff} . Esse resultado foi atribuído, principalmente, à tensão aplicada (limitada pela condição de não permitir efeitos térmicos sobre as amostras), à frequência utilizada (limitação do equipamento em utilizar somente a frequência da rede), a estrutura do tecido celular da berinjela e devido ao número de fatias utilizadas (11 fatias), uma vez que a célula de MEF era grande e isso possivelmente gerou uma baixa densidade de energia.

Acredita-se que ocorreu eletroporação do tipo reversível, resultado esse demonstrado com testes posteriores utilizando corantes durante a aplicação do MEF. Atualmente na literatura não se encontram trabalhos publicados com estudos sobre a eletroporação do tipo reversível uma vez que esse tipo de avaliação é muito difícil de se fazer, principalmente por ela ocorrer na estrutura celular do alimento dificultando assim a possibilidade de quantificar quanto tempo dura reversibilidade da formação desses poros.

Para tanto, mais estudos sobre o fenômenos de eletroporação do tipo reversível provocados pela utilização de MEF é importante para o meio científico uma vez que, entender o aumento da permeabilidade e condutividade elétrica da membrana celular sem provocar danos irreversíveis na estrutura celular do alimento (membrana plasmática e organelas intracelulares), restaurando a vitalidade e atividade metabólica das células, agregaria para a produção de alimentos com alta qualidade e com alta concentração de constituintes funcionais.

No estudo da validação da cinética de secagem das fatias de berinjelas, diferentes modelos aplicáveis para descrever a cinética de secagem foram avaliados, sendo o modelo de Wang & Singh (1978) o que melhor se ajustou aos dados em todas as condições experimentais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste estudo, é possível recomendar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- estudar o efeito do campo elétrico moderado (MEF) na secagem de fatias de berinjelas em diferentes condições de tensão, frequência, tipo de onda e tempo de aplicação do campo elétrico;
- avaliar os efeitos térmicos juntamente com o MEF sobre a cinética de secagem das fatias de berinjelas;
- testar outros métodos de secagem da berinjela utilizando o MEF como pré-tratamento, como por exemplo, realizar a desidratação osmótica em solução salina e, posteriormente, avaliar o comportamento da difusividade mássica efetiva da água e dos sólidos.
- estudar o efeito do tratamento MEF na cinética de secagem em outros vegetais com estruturas celulares semelhantes às da berinjela;
- aplicar corante nas amostras, em diferentes tempos, após aplicação do MEF;
- realizar MEV nas amostras tratadas com MEF;
- realizar uma análise sensorial dos *chips* obtidos durante a secagem das fatias de berinjela, a fim de avaliar o efeito da secagem sobre o sabor e a aceitabilidade do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFBR - ALIMENTOS FUNCIONAIS DO BRASIL. **Berinjela – Auxilia na redução do colesterol.** 2009. Disponível em: <<https://alimentosfuncionais.wordpress.com/2009/05/07/berinjela---auxilia-na-reducao-do-colesterol/#comments>>.
- AHMED, Jasim. Drying of vegetables: Principles and dryer design. In: **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing: Second Edition.** United States. p. 279–298.
- ANDRADE, Samara Alvachian Cardoso et al. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of jenipapo (*Genipa americana* L.). **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 78, n. 2, p. 551–555, 2007.
- ARAÚJO, Rafaela Duarte Almeida et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de berinjela. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS 2016, **Anais...** [s.l.: s.n.] Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011001000014&lng=pt&tlng=pt>
- ARÉVALO-PINEDO, Aroldo; XIDIEH MURR, Fernanda E. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 80, n. 1, p. 152–156, 2007.
- ARSLAN, Derya; ÖZCAN, M. Musa; MENGEŞ, Hakan Okyay. Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 51, n. 12, p. 2769–2775, 2010.
- ARUN S. MUJUMDAR. **Handbook of Industrial Drying.** London.
- BABU, A. K. et al. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 90, p. 536–556, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.002>>
- BROCHIER, Bethania. **ESTUDO DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE YACON (*Smallanthus sonchifolius*) USANDO SOLUTOS ALTERNATIVOS À SACAROSE.** 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013.
- CÁNOVAS BARBOSA; G.V; VEGA MERCADO, H. **Dehydration of Foods.** 1. ed. [s.l.] : Springer US, 1996.
- CARVALHO, MARIA MARTHA SOUZA DE; LINO, LILIAN LESSA ANDRADE.

- Avaliação dos fatores que caracterizam a berinjela (*Solanum melongena* L .) como um alimento funcional. **Sociedade Brasileira de Alimentos e Nutrição.**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 130–143, 2014.
- CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 223, p. 152–167, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>>
- CATELAM, K. T.; NAKAMURA, M. M. N.; TELIS-ROMERO, J. Cinética de secagem e coeficiente de difusividade de pimentas malaguetas desidratadas em secador de leito fixo. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA 2014, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis/SC
- CHEN, Qinqin et al. Comparative study on drying characteristic, moisture diffusivity, and some physical and nutritional attributes of blanched carrot slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 41, n. 5, 2016.
- CORZO, Otoniel; BRACHO, Nelson; ALVAREZ, Carlos. SLICES AT DIFFERENT MATURITY STAGES. [s. l.], v. 34, n. 2010, p. 993–1008, 2009.
- CORZO, Otoniel; BRACHO, Nelson; ALVAREZ, Carlos. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 993–1008, 2010.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Second Edition. London.
- CRUZ, Alfredo Garcia de La. **Desidratação Osmótica e Secagem de Berinjela**. 1998. UNICAMP, [s. l.], 1998.
- DA SILVA, Marcos Vieira; ROSA, Cassia Inês Lourenzi Franco; BOAS, Eduardo Valério de Barros Vilas. Conceitos e métodos de controle do escurecimento enzimático no processamento mínimo de frutas e hortaliças. **Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 83–96, 2009.
- DE JESUS JUNQUEIRA, João Renato et al. Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 41, p. 10–18, 2017.
- DE OLIVEIRA, Cibele Freitas et al. Extraction of pectin from passion fruit peel using moderate electric field and conventional heating extraction methods. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 29, p. 201–208, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2015.02.005>>
- DEMIR, V. et al. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 88, n. 3, p. 325–335, 2004.
- DOCIMO, Teresa et al. Insights in the fruit flesh browning mechanisms in *Solanum melongena*

genetic lines with opposite post-cut behavior. [s. l.], 2016.

EMBRAPA. **Embrapa Hortaliças**. 2007. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Beringela/Beringela_Solanum_melongena_L/index.html>.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 349–359, 2004.

FAN, Kai; ZHANG, Min; MUJUMDAR, Arun S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 39, p. 47–57, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.001>>

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division**. 2012. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/E>>.

FELLOWS, J. P. **Tecnologia dos Processos de Alimentos: princípios e práticas**. 2º Ed ed. Porto Alegre.

FERNANDES, MARISTELA ALVES. **OBTENÇÃO DE “CHIPS” DE BERINJELA (Solanum melongena L.) MEDIANTE PROCESSO COMBINADO DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA EM SOLUÇÃO TERNÁRIA E SECAGEM CONVECTIVA**. 2012. Universidade Federal da Paraíba, [s. l.], 2012. Disponível em: <http://www.dt.co.kr/contents.html?article_no=2012071302010531749001>

FIGUEIRA, FABIANO VICENTE. **SECAGEM DE PEQUI (Caryocar brasiliensis Camb.) PRECEDIDA DE DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA**. 2014. Universidade federal de Lavras, [s. l.], 2014.

GARCÍA-SALAS, Patricia et al. Identification and quantification of phenolic compounds in diverse cultivars of eggplant grown in different seasons by high-performance liquid chromatography coupled to diode array detector and electrospray-quadrupole-time of flight-mass spectrometry. **Food Research International**, [s. l.], v. 57, p. 114–122, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.032>>

GAVA, Altanir Jaime; SILVA, Carlos Alberto Bento Da; FRIAS, Jenifer Ribeiro Gava. **Tecnologia de alimentos**. [s.l: s.n.].

GOULLIEUX, Adeline; PAIN, Jean-Pierre. Ohmic Heating. In: PRESS, Academic (Ed.). **emerging technologies for food processing**. London. p. 469–505.

HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; BELGHITH, A. Estimation of the Moisture Diffusion Coefficient of Potato During Hot-Air Drying. In: 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM 2004, **Anais...** [s.l: s.n.]

IBGE. **CENSO Agropecuário 2006 - Brasil, Grandes Unidades da Federação**. Rio de

- Janeiro. Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro_2006.pdf>
- JAESCHKE, Débora Pez. **Estudo da utilização de campo elétrico moderado na extração de lipídeos e carotenoides a partir da microalga *Chlorella sp.*** 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2015.
- JUNQUEIRA, João Renato de Jesus et al. Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 82, p. 404–410, 2017.
- KAUSHAL, Pragati; SHARMA, H. K. Osmo-convective dehydration kinetics of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*). **JOURNAL OF THE SAUDI SOCIETY OF AGRICULTURAL SCIENCES**, [s. l.], 2014.
- KHAWAS, Prerna et al. Drying characteristics and assessment of physicochemical and microstructural properties of dried culinary banana slices. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 667–678, 2015.
- KULSHRESTHA, Suzanne A.; SASTRY, Sudhir K. Changes in permeability of moderate electric field (MEF) treated vegetable tissue over time. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 78–83, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2009.10.001>>
- KULSHRESTHA, Suzanne; SASTRY, Sudhir. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 189–194, 2003.
- KUSNADI, Chitra; SASTRY, Sudhir K. Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 110, n. 3, p. 329–336, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.004>>
- LEBOVKA, N. I.; SHYNKARYK, M. V.; VOROBIEV, Eugene. Drying of potato tissue pretreated by ohmic heating. **Drying Technology**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 601–608, 2007.
- LI, Jian et al. Hypobaric storage reduced core browning of Yali pear fruits. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 225, p. 547–552, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.031>>
- LIMA, Marybeth; SASTRY, Sudhir K. Effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 115–119, 1999.
- LUCHESE, Cláudia Leite. **Avaliação da Influência da Temperatura e da Concentração da Solução de Sacarose na Desidratação Osmótica de *Physalis* (*Physalis peruviana L.*)**. 2013. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013.

- LUTZ, Instituto Adolfo. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4º Ed ed. São Paulo.
- MACHADO, Antônio Vitor. **Estudo Da Secagem Do Pedúnculo Do Caju Em Sistemas Convencional E Solar : Modelagem E Simulação Do Processo**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2009.
- MADAMBA, Ponciano S. Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. **Drying Technology**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 1759–1780, 2003.
- MARIA, Sonia; CELESTINO, Costa. **Princípios de Secagem de Alimentos**. [s. l.], 2010.
- MARTINAZZO, Ana P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 301–306, 2007.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 373–386, 2004.
- MELO, MAYRA ALBUQUERQUE DE. **APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INATIVAÇÃO E INIBIÇÃO ENZIMÁTICA EM FRUTAS E HORTALIÇA**. 2015. Univerdidade Federal da Paraíba, [s. l.], 2015.
- MERCALI, Giovana Domeneghini. **Estudo da Transferência de Massa na Desidratação Osmótica de Banana (Musa sapientum , shum .)**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2009.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING. **Drying Technology**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.
- MISHRA, Bibhuti B.; GAUTAM, Satyendra; SHARMA, Arun. Browning of fresh-cut eggplant: Impact of cutting and storage. **Postharvest Biology and Technology**, [s. l.], v. 67, p. 44–51, 2012.
- MOREIRA, Silvia Rocha et al. **Berinjela**. Campinas/SP.
- MORRIS, W. L.; TAYLOR, M. A.; JAMES, The. **The Solanaceous Vegetable Crops : Potato , Tomato , Pepper , and Eggplant**. Second Edi ed. [s.l.] : Elsevier, 2017. v. 3
- MOSCON, Eder Stolben. **Cinética de secagem e propriedades físicas de quinoa e amaranto e qualidade de sementes de quinoa**. 2015. Universidade de Brasília, [s. l.], 2015.
- NAYAK, Balunkeswar; LIU, Rui Hai; TANG, Juming. Effect of Processing on Phenolic Antioxidants of Fruits, Vegetables, and Grains—A Review. **Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 55, n. 7, p. 887–919, 2015.
- NEPA. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos - TACO**. 4º ed. Campinas.
- OHSHIMA, Takayuki et al. Engineering of operation condition in milk pasteurization with PEF

- treatment. **Food Control**, [s. l.], v. 68, p. 297–302, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.03.047>>
- ONWUDE, Daniel I. et al. Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 43, p. 223–238, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.010>>
- ORDONEZ, J. .. **Tecnologia de Alimentos: componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre.
- ORTIZ-GARCÍA-CARRASCO, B. et al. Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 144, p. 138–147, 2015.
- PARK, Kil Jin Brandini et al. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 93–126, 2014.
- PARK, KIL JIN BRANDINI. **CONSTRUÇÃO DE UM SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA PROCESSOS DE SECAGEM**. 2008. UNICAMP, [s. l.], 2008.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Foods Science**, [s. l.], v. 53, n. 4, p. 1216–1219, 1988.
- PUIG, A. et al. Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying. **Food and Bioprocess Processing**, [s. l.], v. 90, n. 4, p. 624–632, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2012.07.001>>
- RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: Considering Fickian diffusion in cubical configuration. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 43–47, 2004.
- SALENGKE, S.; SASTRY, S. K. Effect of ohmic pretreatment on the drying rate of grapes and adsorption isotherm of raisins. **Drying technology**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 551–564, 2005.
- SARIMESELI, Ayse. Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 1449–1453, 2011.
- SARKIS, Júlia Ribeiro et al. Application of pulsed electric fields and high voltage electrical discharges for oil extraction from sesame seeds. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 153, p. 20–27, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.12.003>>
- SCHOKKER, E. P.; VAN BOEKEL, M. A. J. S. Kinetic modeling of enzyme inactivation: kinetics of heat inactivation at 90-110 C of extracellular proteinase from *Pseudomonas fluorescens* 22F. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 45, n. 12, p. 4740–

4747, 1997.

SEKARA A; CEBULA S; KUNICK E. Cultivated eggplants – origin, breeding objectives and genetic resources, a review. **Folia Horticulturae**, [s. l.], n. 19, p. 97–114, 2007.

SENSOY, I.; SASTRY, S. K. Extraction Using Moderate Electric Fields. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 69, n. 1, p. 7–13, 2004.

SILVA, Adriano Sant’Ana et al. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 107–115, 2009.

SILVA, BRUNO GUZZO DA. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA (Schinus terebinthifolius Raddi)**. 2013. UNICAMP, [s. l.], 2013.

SIMPSON, R. et al. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 166, p. 204–211, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>>

SINGH, Ashutosh et al. Effect of Static High Electric Field Pre-Treatment on Microwave-Assisted Drying of Potato Slices. **Drying Technology**, [s. l.], v. 31, n. 16, p. 1960–1968, 2013.

SOTELO, Kristine A. G. et al. Red cherries (*Prunus avium* var. Stella) processed by pulsed electric field – Physical, chemical and microbiological analyses. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 240, p. 926–934, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.017>>

SOUZA, Vanderlei Constantino De; OCÁCIA, Gilnei Carvalho. Cinética Da Secagem Da Maça Em Secador Convectivo. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA 2009, Uberlândia/MG. **Anais...** Uberlândia/MG

SPENCE, Jennifer et al. Investigation into thin layer drying rates and equilibrium moisture content of abattoir paunch waste. **Renewable Energy**, [s. l.], p. 1–8, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.082>>

SRIKIATDEN, Jaruk; ROBERTS, John S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 74, p. 143–152, 2006.

TANINO, Takanori et al. Inactivation of *Escherichia coli* phages by PEF treatment and analysis of inactivation mechanism. **Journal of Electrostatics**, [s. l.], v. 73, p. 151–155, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2014.11.004>>

TRAFFANO-SCHIFFO, Maria Victoria et al. Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 236, p. 87–93, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.046>>

VALSECHI, OCTÁVIO ANTÔNIO. **MICROBIOLOGIA DOS ALIMENTOS**. São Carlos/SP.

VOROBIEV, Eugene; LEBOVKA, Nikolai. **Electrotechnologies for Extraction from Food Plants and Biomaterials**. 1. ed. [s.l: s.n.].

WANG, Wei Chi; SASTRY, Sudhir K. Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 299–319, 2000.

WEBER, Luana C. et al. Produção e qualidade de sementes híbridas de berinjela em função do número de frutos por planta. [s. l.], p. 461–466, 2013.

WIKTOR, Artur et al. Drying Kinetics of Apple Tissue Treated by Pulsed Electric Field. **Drying Technology**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 112–119, 2013.

YU, Yuanshan et al. Osmotic Dehydration of Blueberries Pretreated with Pulsed Electric Fields : Effects on Dehydration Kinetics , and Microbiological and Nutritional Qualities. [s. l.], v. 3937, n. March 2017, 2016.

ZHANG, Zhi Hong et al. Effect of pulsed electric fields (PEFs) on the pigments extracted from spinach (*Spinacia oleracea* L.). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 43, p. 26–34, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.014>>

ZHONG, Tuoxiu; LIMA, Marybeth. The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 87, n. 3, p. 215–220, 2003.

APÊNDICE A

Dados complementares – Constantes dos Modelos Matemáticos Testados.

A seguir, são apresentados os resultados das constantes geradas a partir modelagem matemática da cinética de secagem das fatias de berinjelas pré-tratadas com campo elétrico moderado (MEF), afim de ajuste dos dados experimentais. Todos os modelos foram testados para todos os níveis de temperatura (40, 60 e 80 °C) e níveis de tensão de aplicação do MEF (0, 50 e 100 V).

Tabela A.1 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 40 °C e MEF = 0 V.

40°C - 0V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00435	0,03198	0,9785	0,000263	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00058	0,00428	0,9971	0,000185	1,284762	-0,241220	-	-	-
Midilli	0,00026	0,00191	0,9987267	0,000028	0,994706	-0,000008	1,250665	-	-
Page	0,00687	0,05048	0,9327079	0,000322	-	-	0,962994	-	-
Henderson	0,00310	0,02276	0,9696605	0,000297	1,109970	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00020	0,00148	0,9980275	-	-0,000193	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00028	0,00203	0,997291	0,000561	0,237085	1,189509	-	-	-
Two factor	0,00073	0,00534	0,9928863	0,000523	16,35257	-15,4024	-	0,000555	-
Weibull	0,00058	0,00429	0,9942822	-	1,432675	13,52891	-	-	-0,000298

Tabela A.2 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 40 °C e MEF = 50 V.

40°C - 50V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00324	0,02385	0,9660	0,000247	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00013	0,00097	0,9986	0,000154	1,322026	-0,303807	-	-	-
Midilli	0,00008	0,00062	0,999114	0,000040	0,984970	-0,000011	1,189633	-	-
Page	0,00066	0,00488	0,99304	0,000013	-	-	1,348393	-	-
Henderson	0,00239	0,01755	0,974979	0,000269	1,089421	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00002	0,00017	0,99976	-	-0,000178	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00041	0,00300	0,995717	0,000467	0,340717	1,295363	-	-	-
Two factor	0,00070	0,00515	0,992664	0,000458	13,82230	-12,8600	-	0,000488	-
Weibull	0,00071	0,00525	0,992513	-	1,296479	4,127421	-	-	1,296479306

Tabela A.3 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 40 °C e MEF = 100 V.

40°C - 100V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00327	0,02402	0,9660	0,000260	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00022	0,00160	0,9977	0,000173	1,268819	-0,248653	-	-	-
Midilli	0,00014	0,00101	0,998565	0,000053	0,986546	-0,000011	1,163458	-	-
Page	0,00177	0,01299	0,981596	0,000099	-	-	1,115739	-	-
Henderson	0,00251	0,01842	0,973905	0,000282	1,086416	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00004	0,00027	0,999615	-	-0,000187	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00041	0,00302	0,99572	0,000496	0,316361	1,259848	-	-	-
Two factor	0,00074	0,00546	0,992267	0,000485	18,90095	-17,9478	-	0,000508	-
Weibull	0,00074	0,00541	0,992342	-	1,347106	13,00106	-	-	-0,000444031

Tabela A.4 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 60 °C e MEF = 0 V.

60°C - 0V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00471	0,03554	0,9538	0,000485	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00048	0,00360	0,995312	0,000298	1,358398	-0,326329	-	-	-
Midilli	0,00021	0,00160	0,997923	0,000038	0,979900	-0,000018	1,302197	-	-
Page	0,00078	0,00588	0,9923	0,000014	-	-	1,452325	-	-
Henderson	0,00346	0,02616	0,965982	0,000535	1,109008	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00021	0,00156	0,997976	-	-0,000344	0,000000	-	-	-
Logistic	0,09454	0,71418	0,071125	-0,991973	-0,658956	0,341044	-	-	-
Two factor	0,00322	0,02433	0,968354	0,000545	1,130996	-0,130995	-	0,364735	-
Weibull	0,00078	0,00588	0,992349	-	1,450216	-0,000594	-	-	-0,000594

Tabela A.5 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 60 °C e MEF = 50 V.

60°C - 50V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00522	0,03945	0,9507	0,000535	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00059	0,00445	0,9944	0,000351	1,312221	-0,269243	-	-	-
Midilli	0,00021	0,00157	0,998042	0,000032	0,977605	-0,000016	1,341606	-	-
Page	0,00093	0,00703	0,991216	0,000020	-	-	1,424292	-	-
Henderson	0,00384	0,02901	0,96377	0,000593	1,118840	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00019	0,00145	0,998183	-	-0,000376	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00057	0,00429	0,994638	0,001151	0,205406	1,153445	-	-	-
Two factor	0,00114	0,00861	0,989241	0,001060	27,29704	-26,3509	-	0,001101	-
Weibull	0,00088	0,00667	0,991667	-	1,479176	12,58276	-	-	-0,000560

Tabela A.6 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 60 °C e MEF = 100 V.

60°C - 100V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00459	0,03466	0,9548	0,000482	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00043	0,00324	0,9958	0,000297	1,357222	-0,323984	-	-	-
Midilli	0,00018	0,00134	0,998247	0,000040	0,982213	-0,000018	1,295792	-	-
Page	0,00072	0,00543	0,992911	0,000018	-	-	1,422044	-	-
Henderson	0,00333	0,02514	0,967198	0,000532	1,109418	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00018	0,00139	0,99819	-	-0,000343	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00038	0,00289	0,996224	0,001016	0,231006	1,182081	-	-	-
Two factor	0,00308	0,02330	0,969602	0,000542	1,131641	-0,131640	-	0,448941	-
Weibull	0,00071	0,00536	0,993005	-	1,447025	11,17502	-	-	-0,000487

Tabela A.7 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 80 °C e MEF = 0 V.

80°C - 0V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00282	0,02128	0,958536	0,000933	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00052	0,00390	0,992395	0,000701	1,228264	-0,174108	-	-	-
Midilli	0,00014	0,00107	0,997916	0,000043	0,973960	-0,000014	1,412081	-	-
Page	0,00039	0,00297	0,994218	0,000034	-	-	1,459579	-	-
Henderson	0,00205	0,01549	0,969829	0,001027	1,112111	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00010	0,00072	0,998601	-	-0,000659	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00027	0,00203	0,996044	0,001912	0,245734	1,207551	-	-	-
Two factor	0,00053	0,00401	0,992183	0,001824	37,11141	-36,1493	-	0,001873	-
Weibull	0,00039	0,00297	0,994218	-	1,457553	7,591535	-	-	-0,000670

Tabela A.8 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na T = 80 °C e MEF = 50 V.

80°C - 50V									
Modelos	X ²	SEM	R ²	k (s ⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00381	0,02881	0,944847	0,000734	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00040	0,00301	0,994229	0,000426	1,438842	-0,393720	-	-	-
Midilli	0,00012	0,00091	0,998264	0,000037	0,985285	-0,000027	1,381549	-	-
Page	0,00046	0,00349	0,993316	0,000021	-	-	1,482375	-	-
Henderson	0,00271	0,02050	0,960767	0,000820	1,123531	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00029	0,00222	0,995745	-	-0,000515	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00025	0,00192	0,996317	0,001669	0,186493	1,148557	-	-	-
Two factor	0,00271	0,02050	0,960767	0,000820	1,021737	0,101793	-	0,000820	-
Weibull	0,00044	0,00329	0,993703	-	1,531311	8,102965	-	-	-0,000363

Tabela A.9 – Valores estatísticos e parâmetros da equação estimados para diferentes modelos de secagem testados na $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\text{MEF} = 100\text{ V}$.

80°C - 100V									
Modelos	X²	SEM	R²	k (s⁻¹)	a	b	n	ki	x
Newton	0,00351	0,02648	0,947259	0,000687	-	-	-	-	-
Logaritmo	0,00019	0,00145	0,997117	0,000351	1,539021	-0,511170	-	-	-
Midilli	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Page	0,00050	0,00381	0,992414	0,000019	-	-	1,485611	-	-
Henderson	0,00254	0,01920	0,961763	0,000764	1,113210	-	-	-	-
Wang e Singh	0,00013	0,00102	0,997971	-	-0,000479	0,000000	-	-	-
Logistic	0,00030	0,00228	0,995468	0,001526	0,206152	1,165272	-	-	-
Two factor	0,00254	0,01920	0,961763	0,000764	0,556713	0,556497	-	0,000764	-
Weibull	0,00050	0,00379	0,992444	-	1,497296	9,790059	-	-	-0,000528

APÊNDICE B

Dados complementares – Ajustes Dos Dados Experimentais Aos Preditos Pelos Modelos Testados.

A seguir, são apresentados os resultados de alguns ajustes de dados experimentais às curvas dos modelos testados a partir modelagem matemática da cinética de secagem das fatias de berinjelas pré-tratadas com campo elétrico moderado (MEF). Todas as curvas foram geradas para todos os níveis de temperatura (40, 60 e 80 °C) e níveis de tensão de aplicação do MEF (0, 50 e 100 V).

Figura B.1 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 0 V para o modelo de Page.

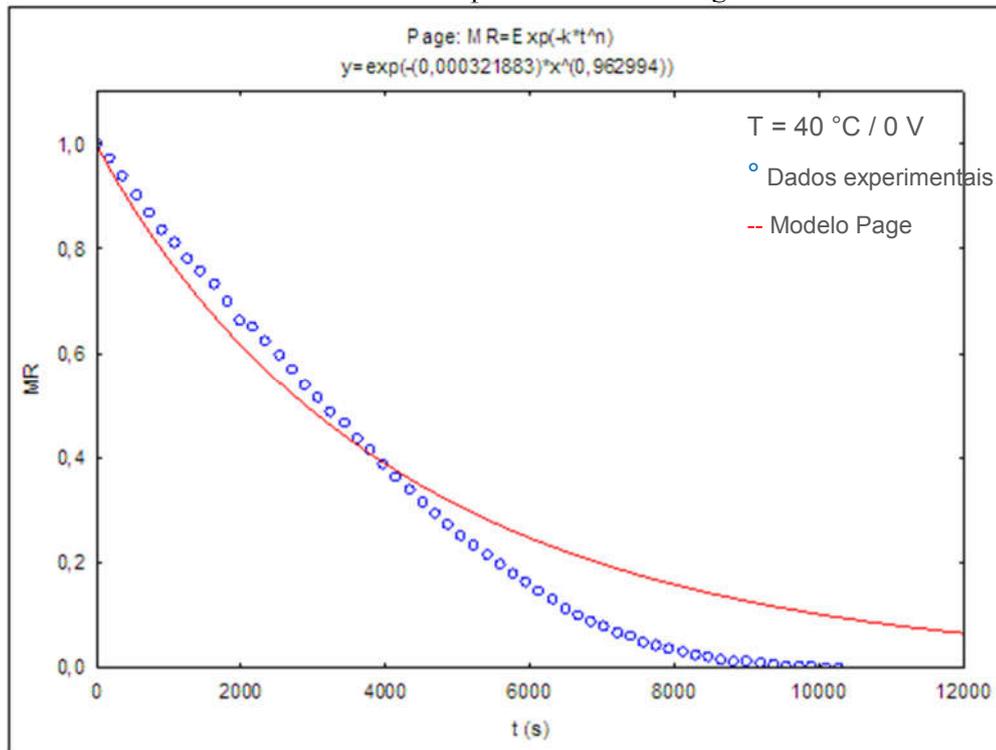


Figura B.2 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 0 V para o modelo de Henderson e Pabis.

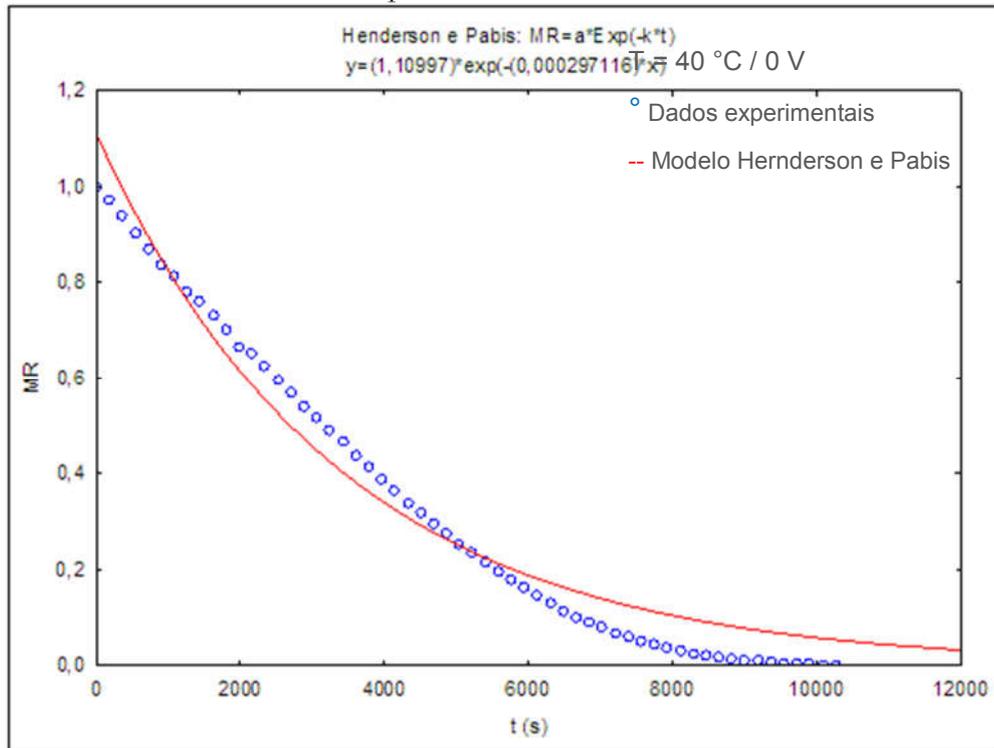


Figura B.3 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 0 V para o modelo Logístico.

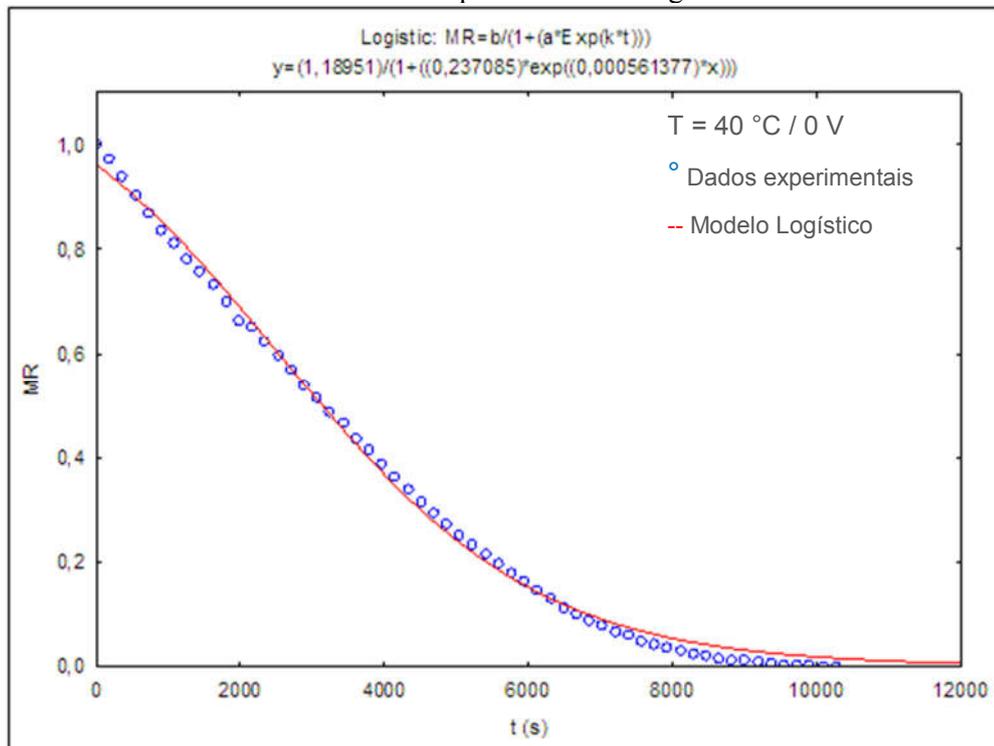


Figura B.4 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 50 V para o modelo Logarítimo.

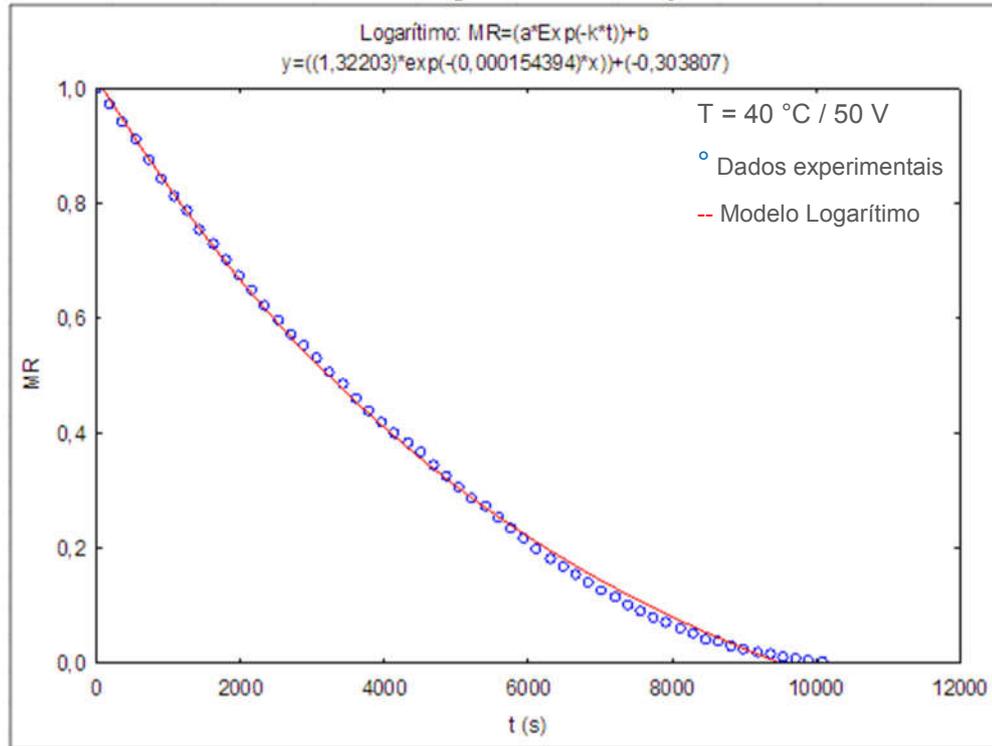


Figura B.5 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 50 V para o modelo Midilli.

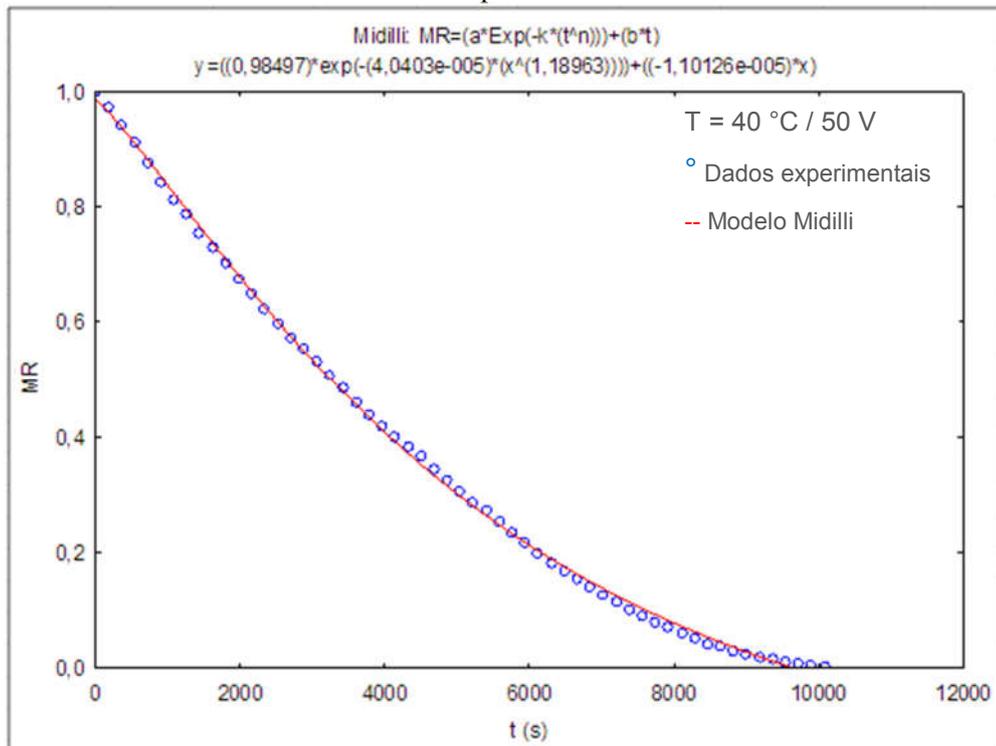


Figura B.6 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 50 V para o modelo Logístico.

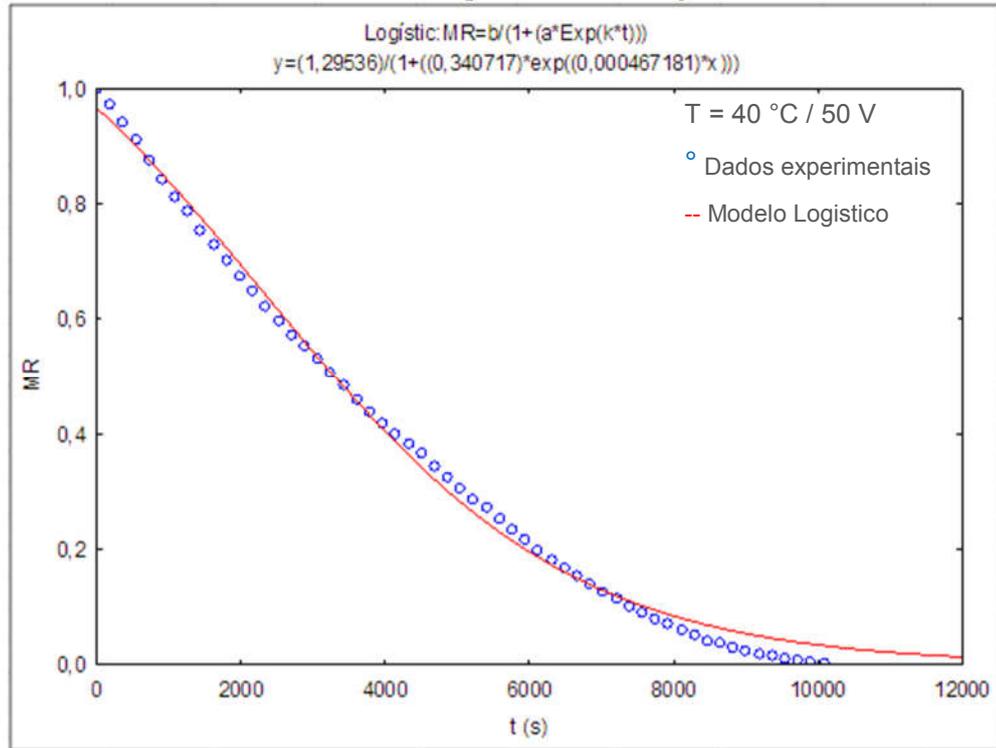


Figura B.7 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 100 V para o modelo Logarítimo.

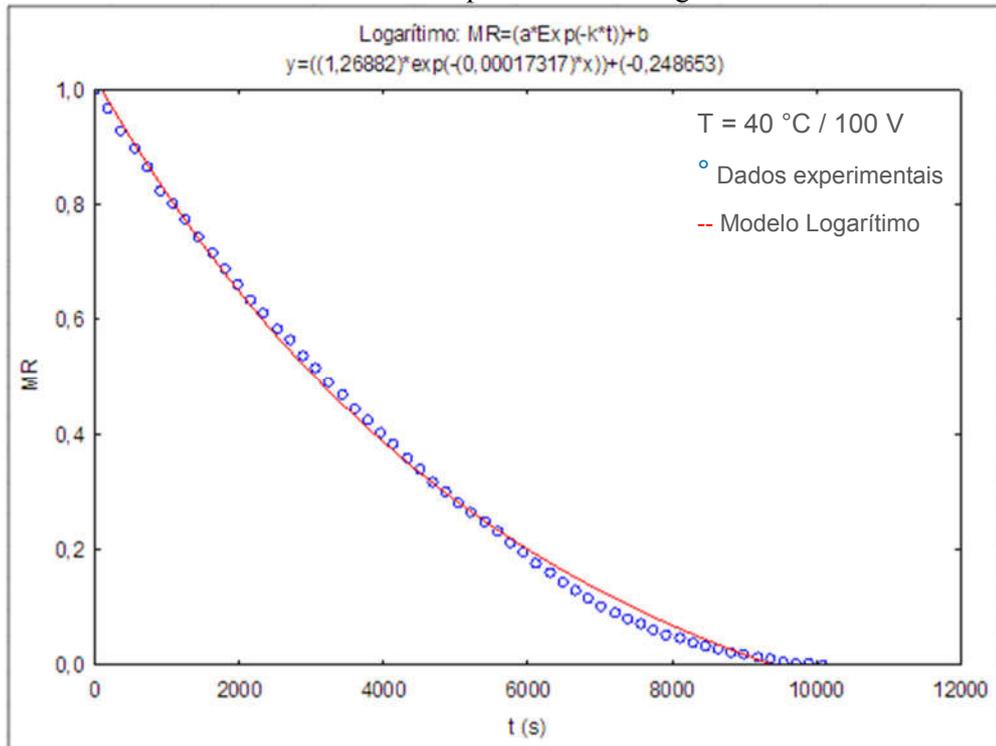


Figura B.8 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 100 V para o modelo de Midilli.

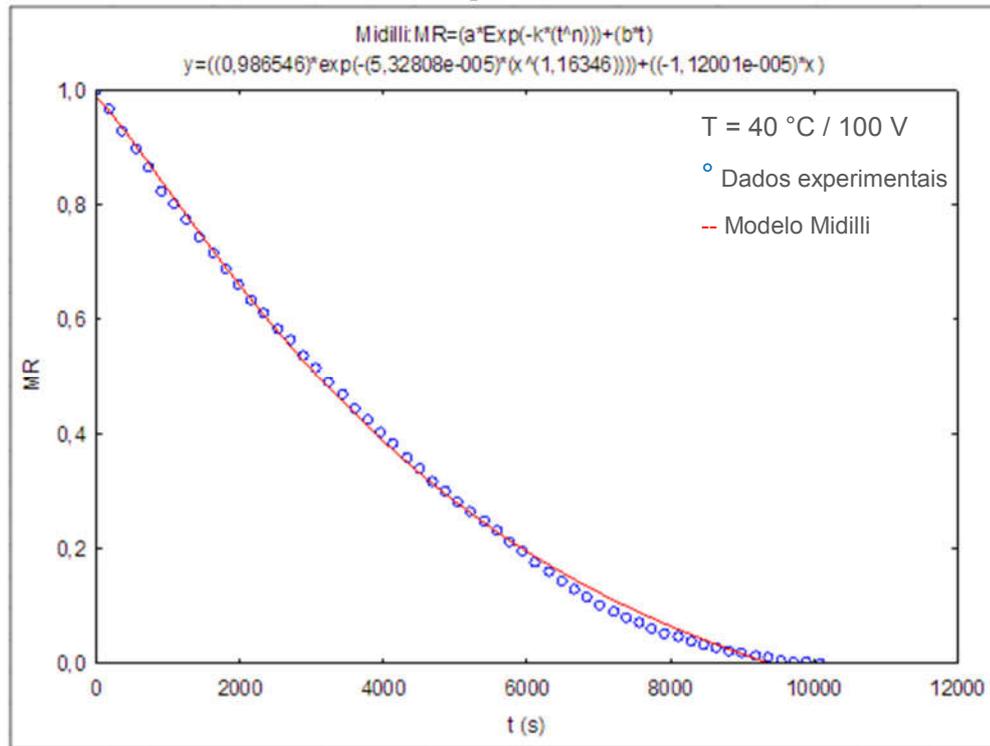


Figura B.9 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 40° C e MEF de 100 V para o modelo Logístico.

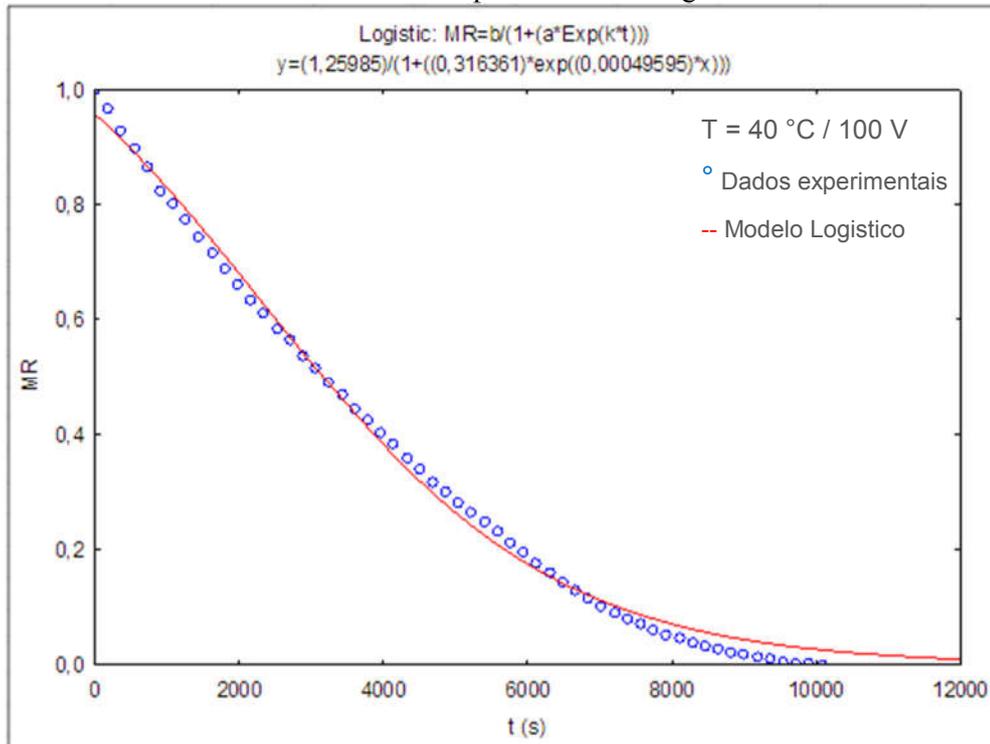


Figura B.10 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 0 V para o modelo Logarítimo.

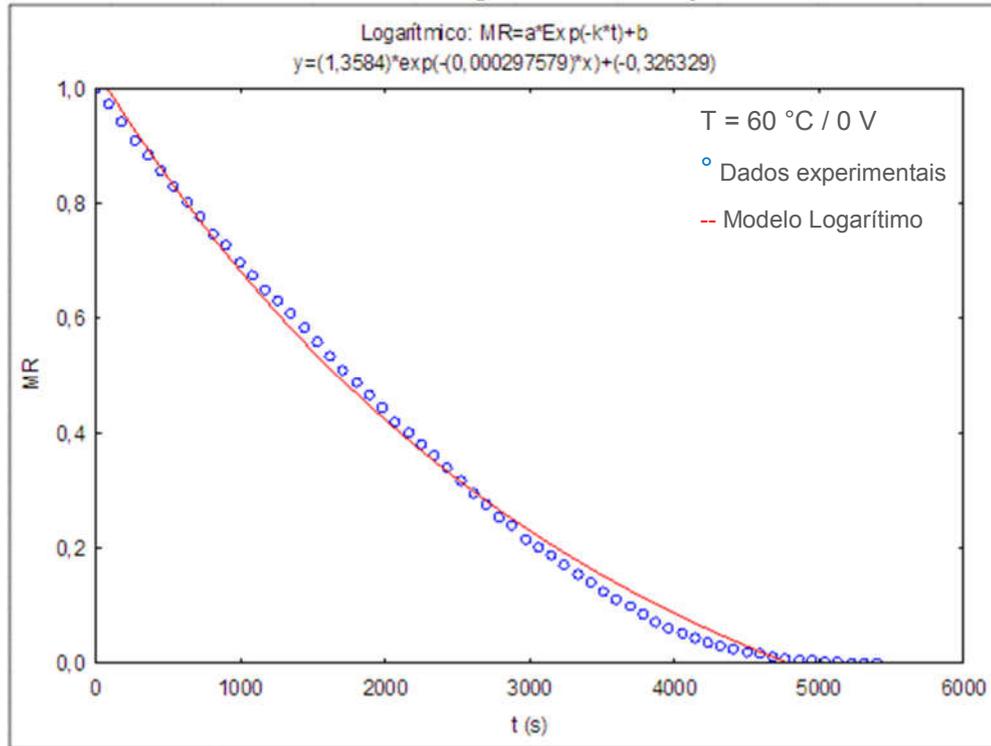


Figura B.11 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 0 V para o modelo de Midilli.

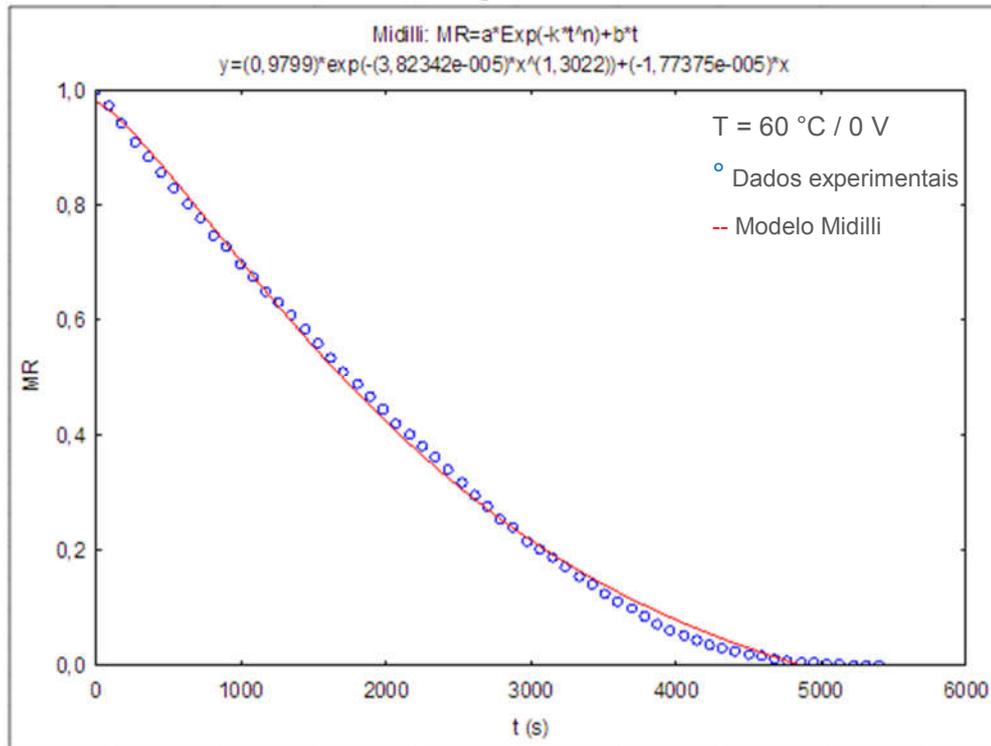


Figura B.12 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 0 V para o modelo de Page.

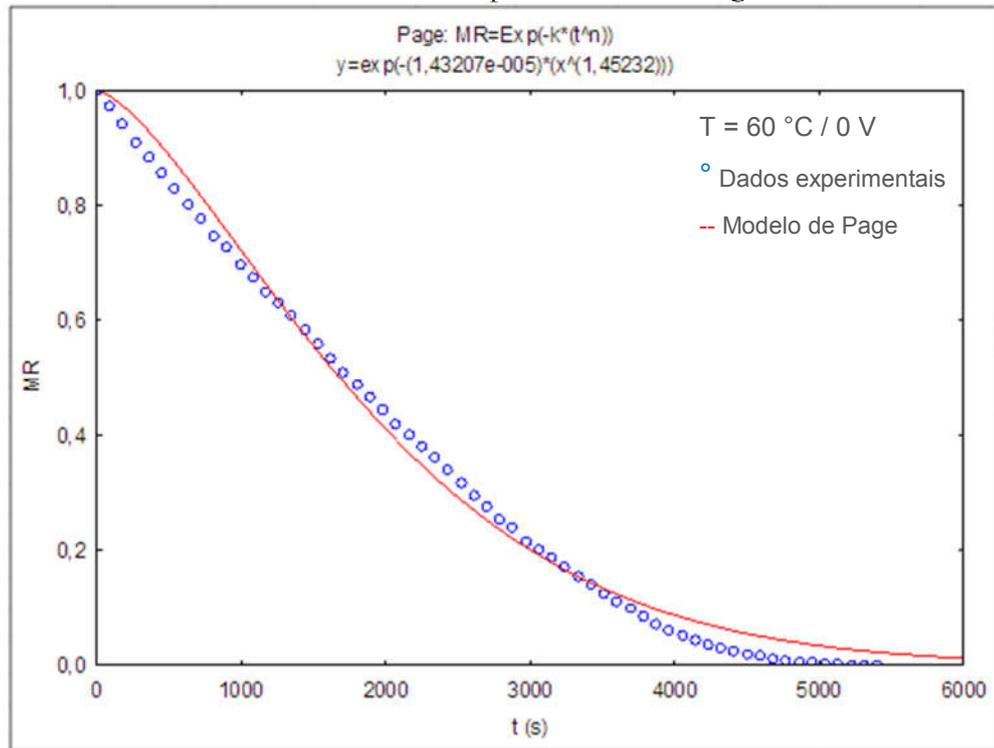


Figura B.13 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 50 V para o modelo Logarítimo.

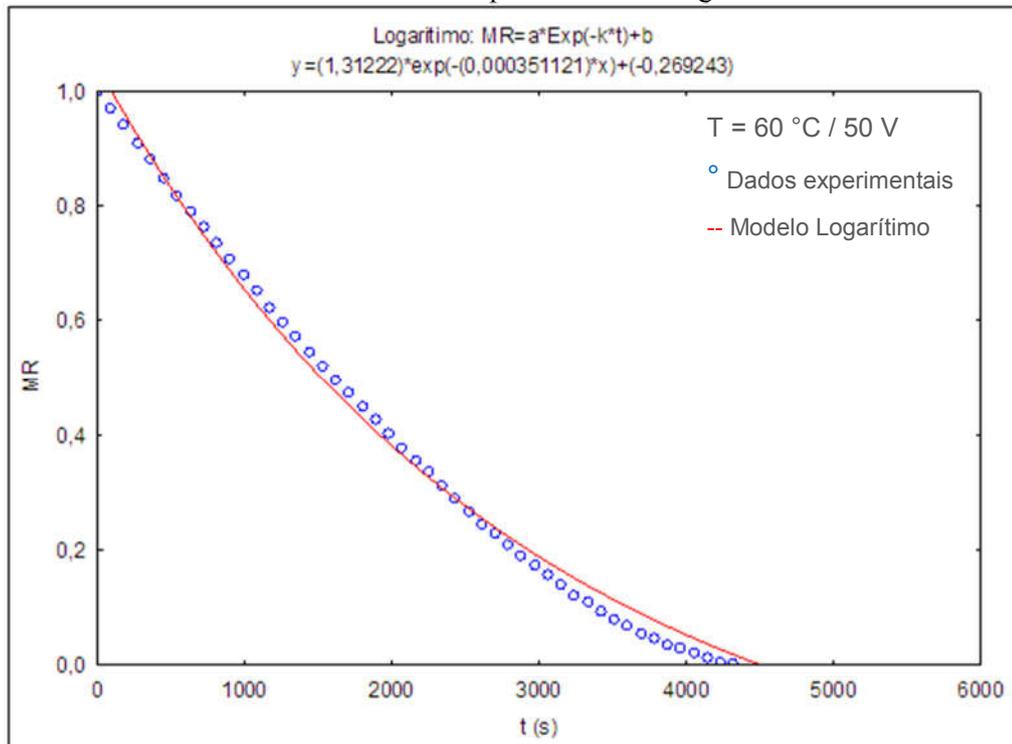


Figura B.14 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 50 V para o modelo de Midilli.

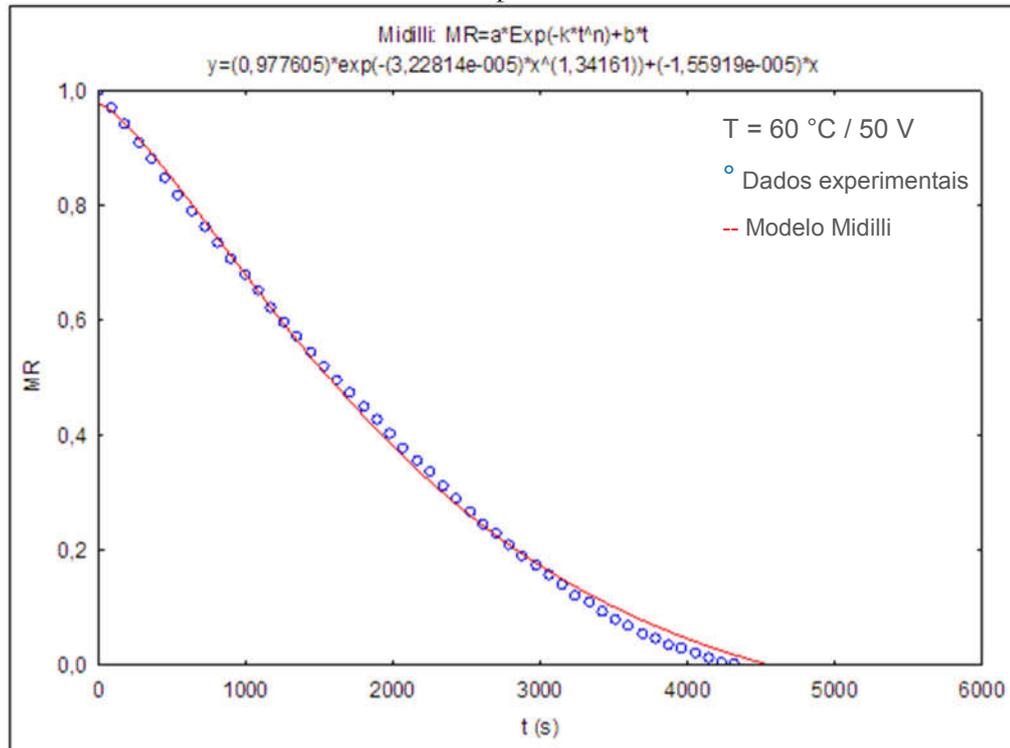


Figura B.15 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 50 V para o modelo Logístico.

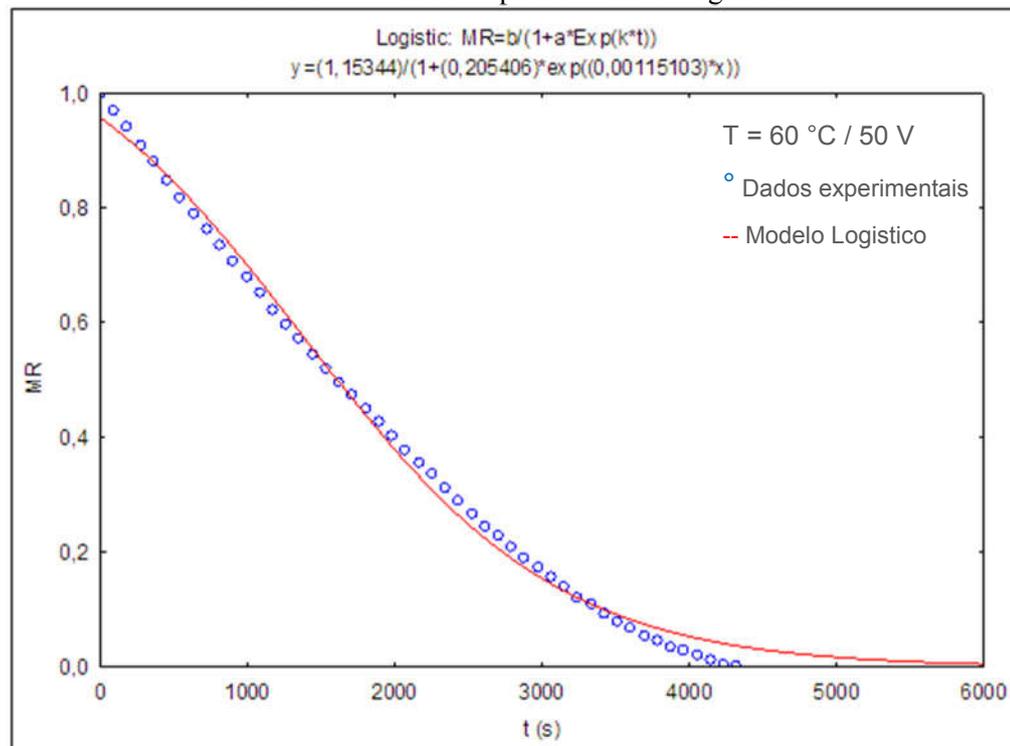


Figura B.16 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 100 V para o modelo Logaritmo.

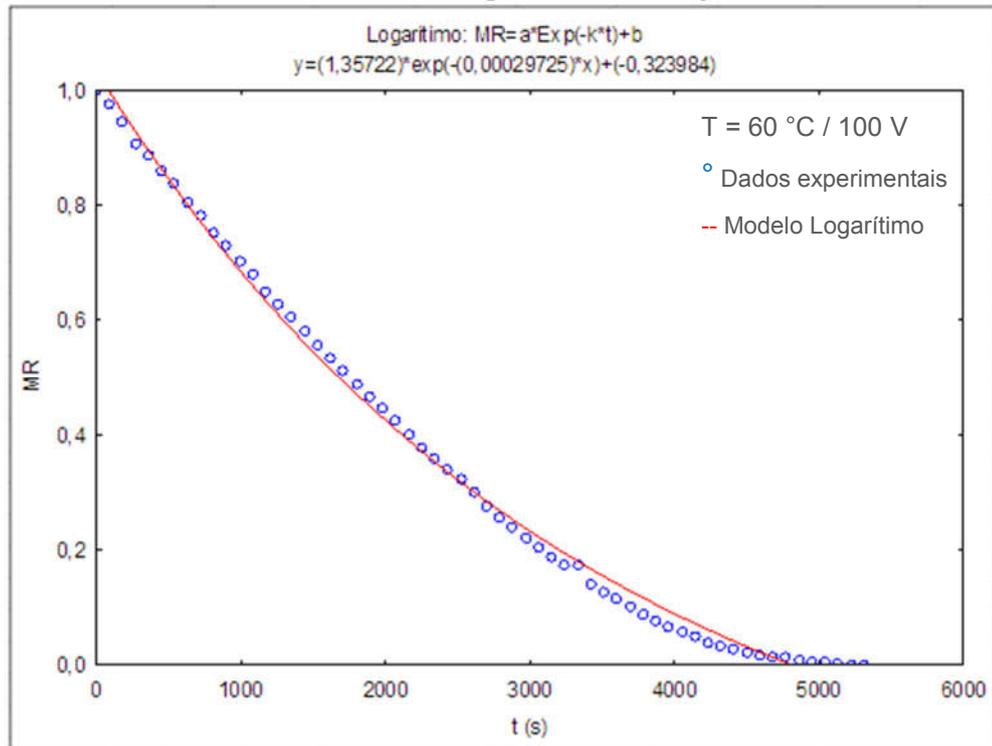


Figura B.17 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 100 V para o modelo de Midilli.

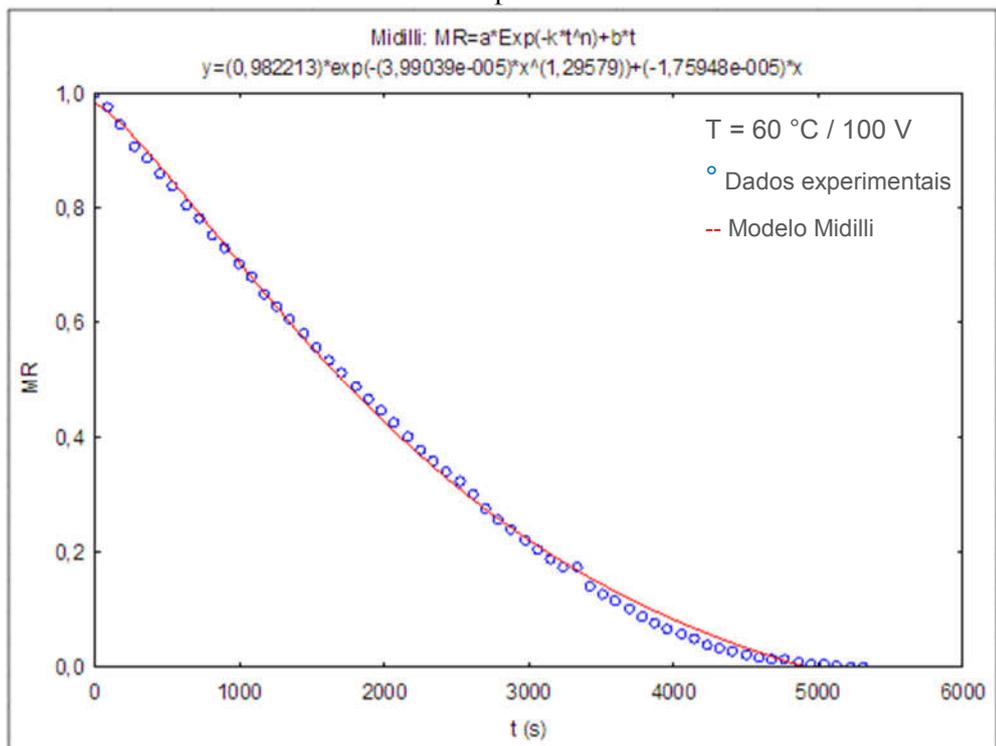


Figura B.18 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 60° C e MEF de 100 V para o modelo Logístico.

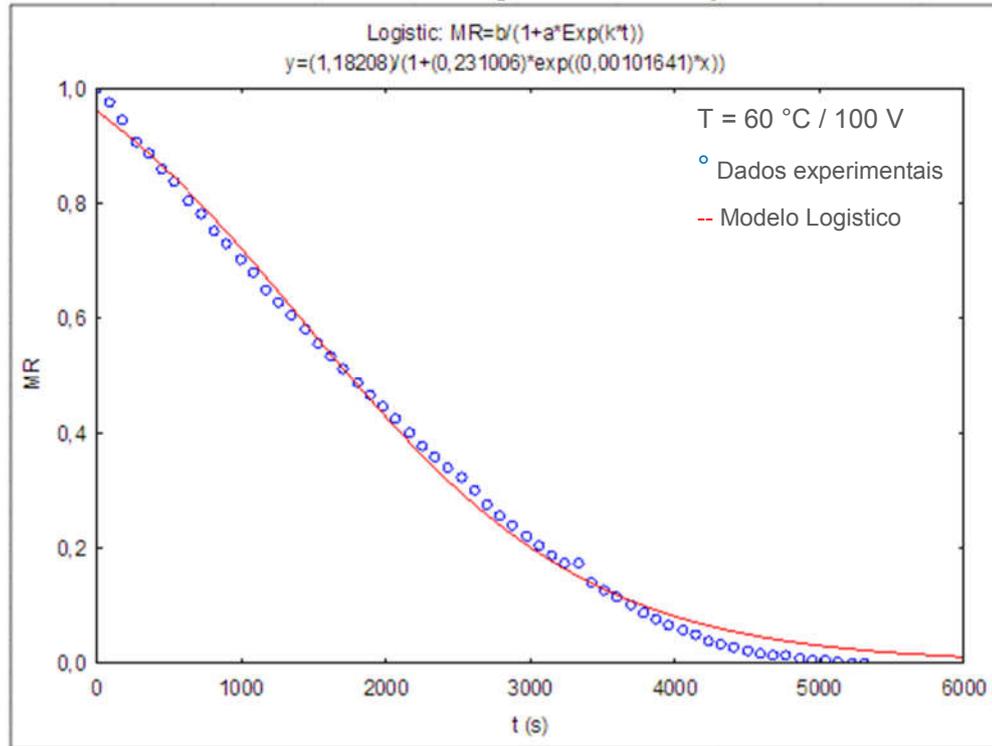


Figura B.19 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 0 V para o modelo Logarítimo.

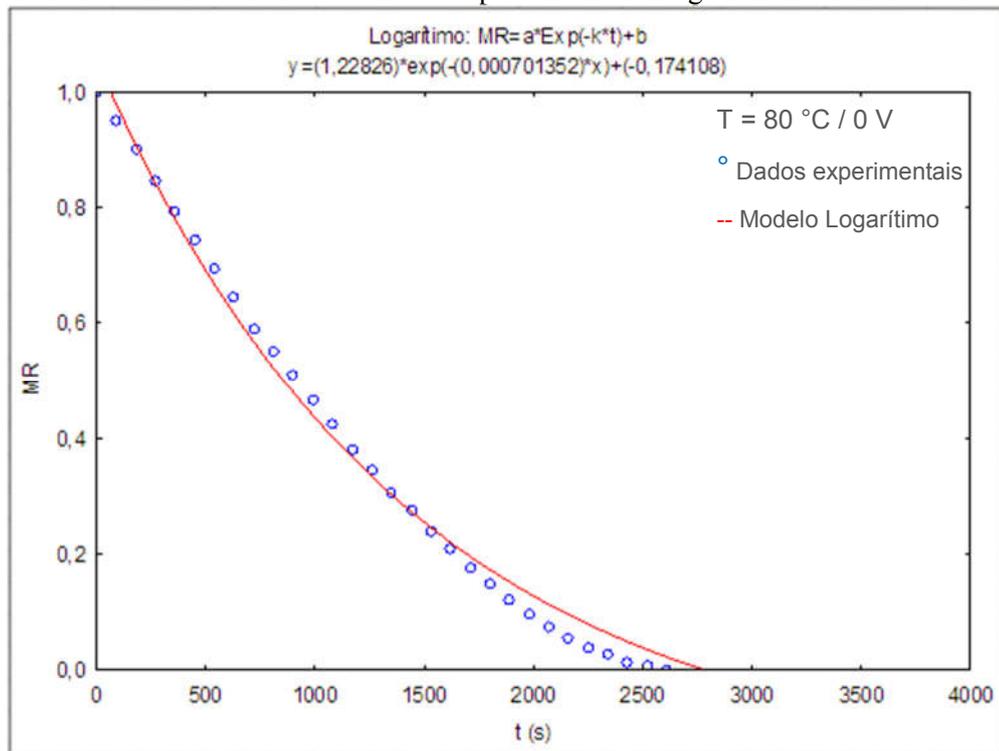


Figura B.20 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 0 V para o modelo de Midilli.

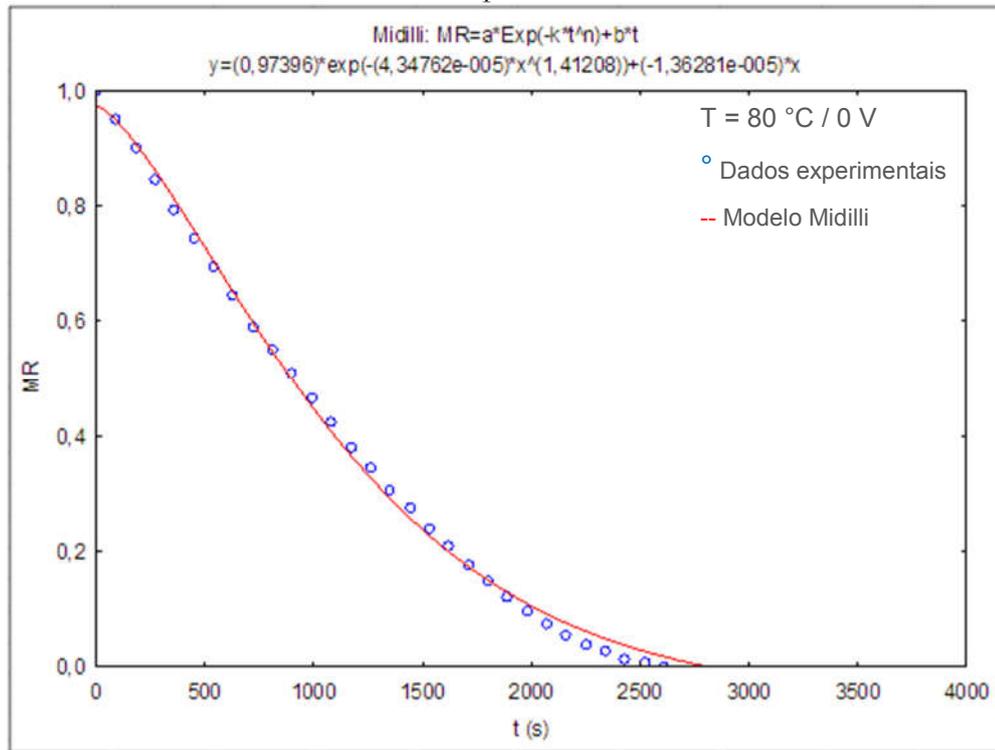


Figura B.21 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 0 V para o modelo Logístico.

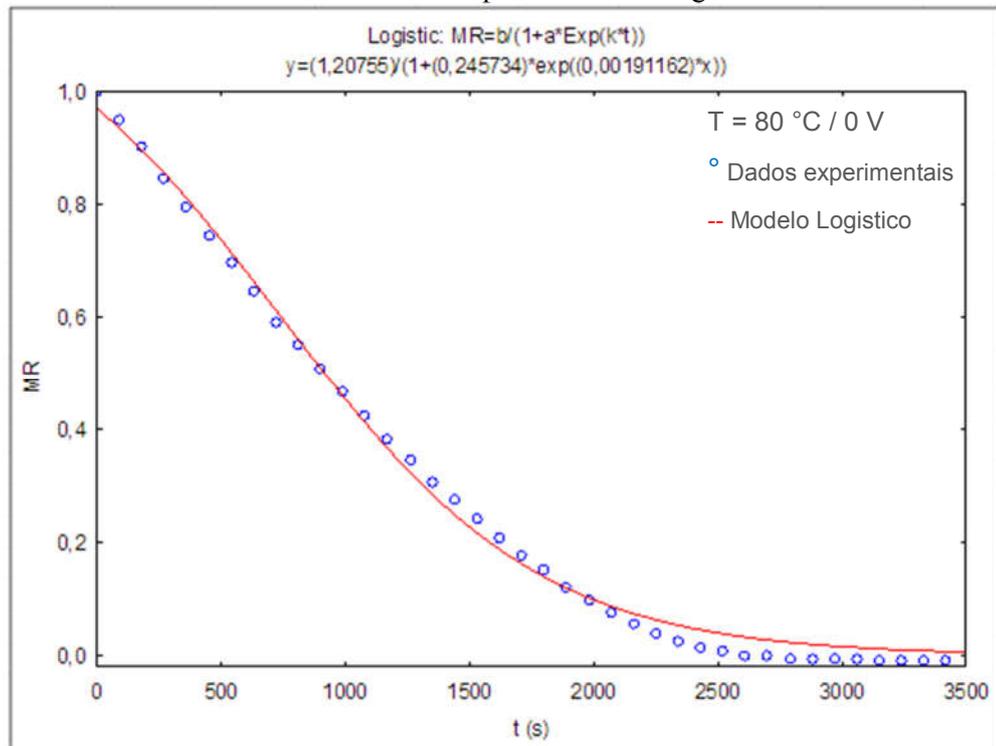


Figura B.22 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 50 V para o modelo Logaritmo.

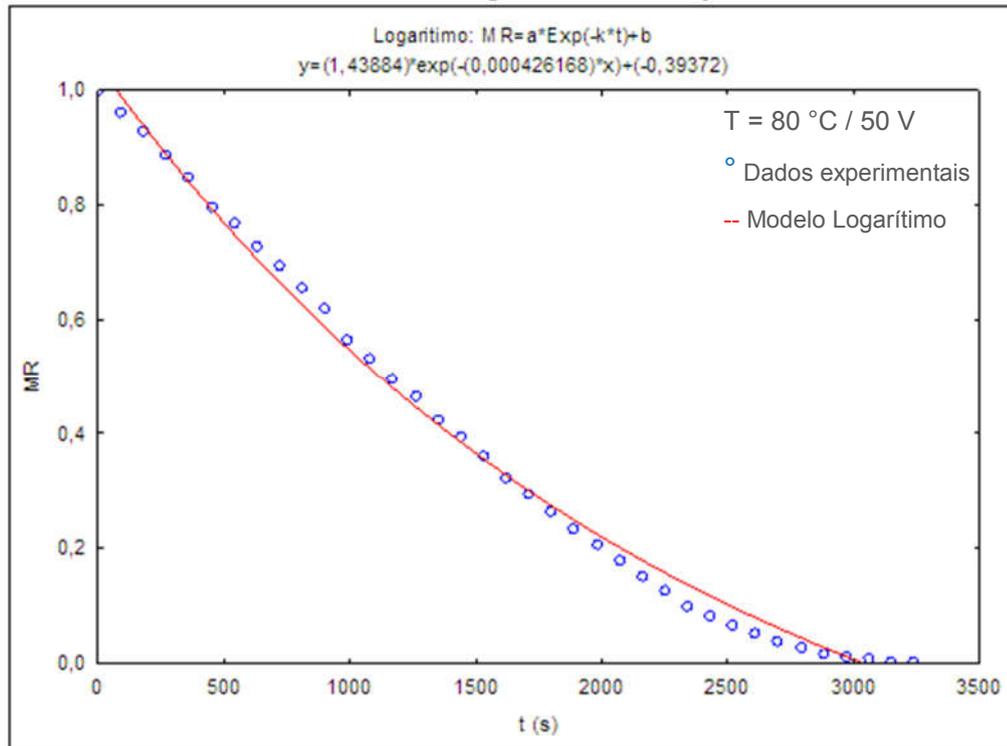


Figura B.23 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 50 V para o modelo de Midilli.

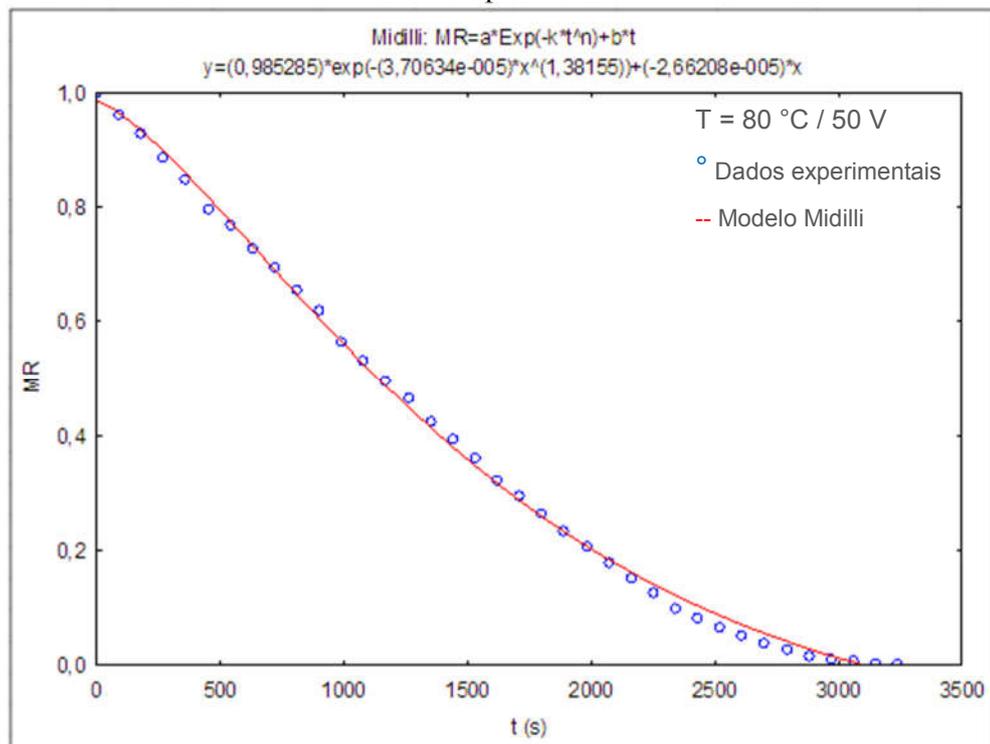


Figura B.24 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 50 V para o modelo Logístico.

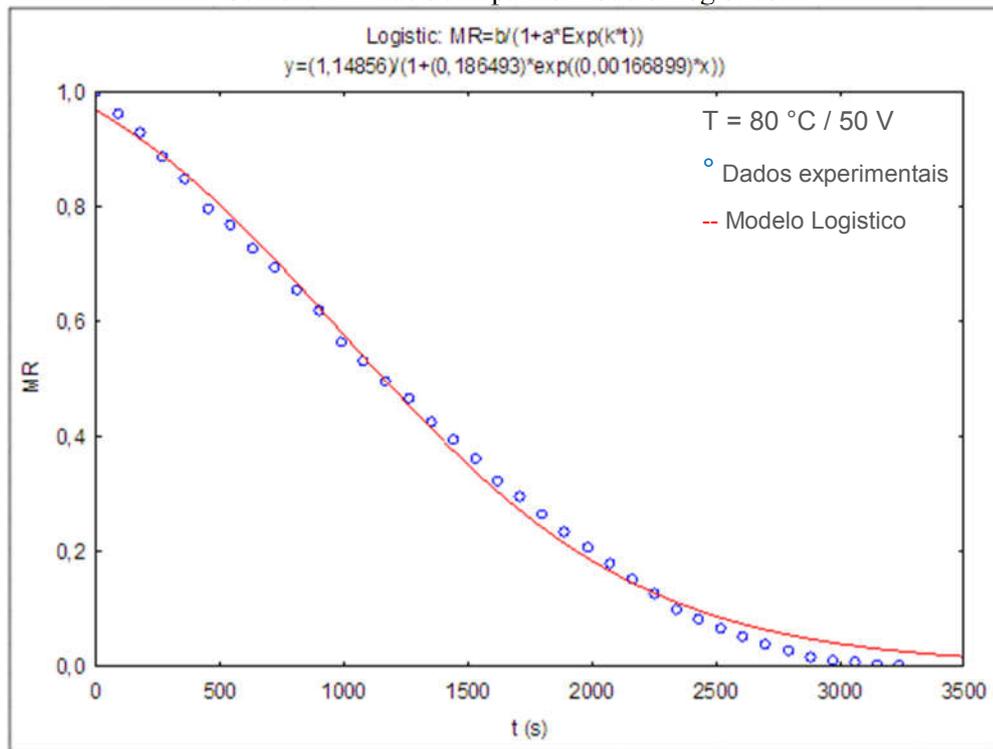


Figura B.25 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 100 V para o modelo Logaritmo.

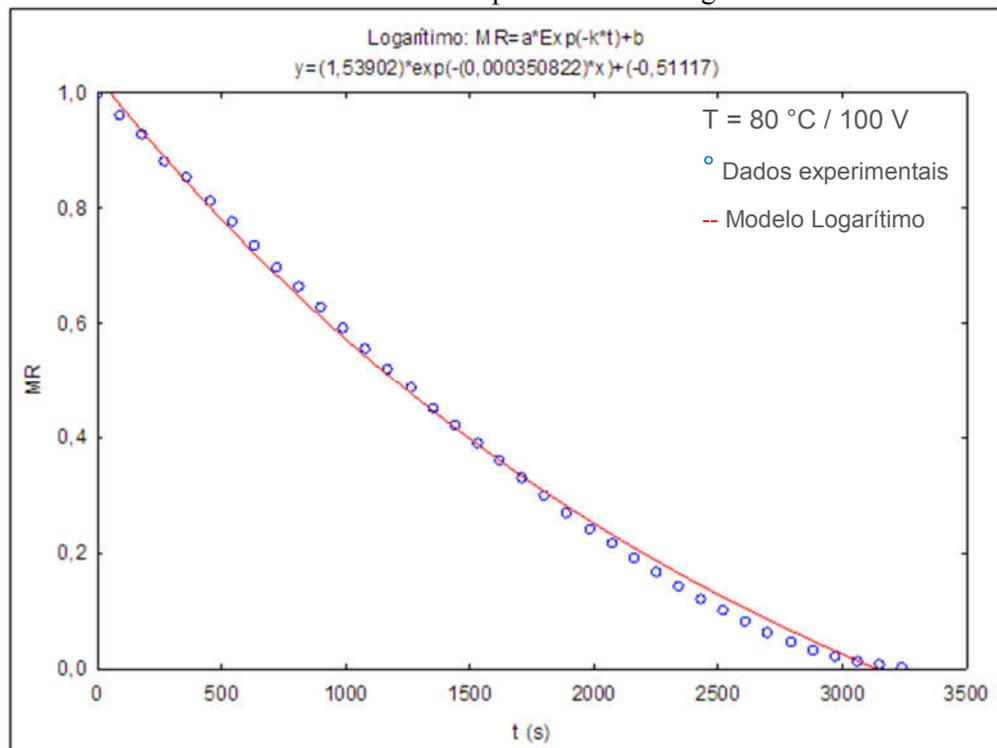


Figura B.26 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 100 V para o modelo Logístico.

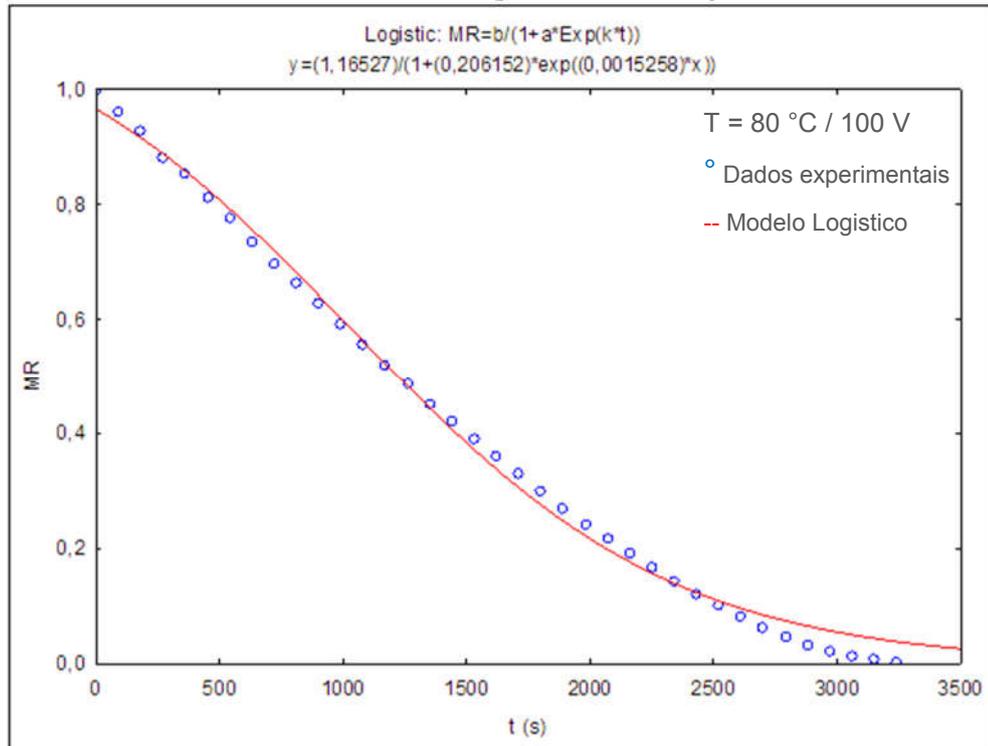


Figura B.27 – Valores experimentais e preditos da secagem de fatias de berinjela na temperatura de 80° C e MEF de 100 V para o modelo de Page.

