



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL DE CATALÃO  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



THAÍS ALVES BARBOSA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA GUAPEVA (*Pouteria gardneriana* Radlk):  
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E PÓS-  
PROCESSAMENTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:     Dissertação     Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Thaís Alves Barbosa

Título do trabalho: Uma contribuição ao estudo da guapeva (*Pouteria gardneriana radlk*): procedimento experimental, modelagem matemática e pós-processamento.

3. Informações de acesso ao documento:

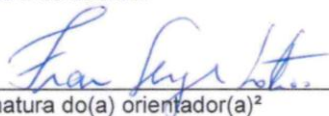
Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 26 / 08 / 19

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

THAÍS ALVES BARBOSA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA GUAPEVA (*Pouteria gardneriana* Radlk):  
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, MODELAGEM MATEMÁTICA E PÓS-  
PROCESSAMENTO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:  
Fran Sérgio Lobato

Coorientador:  
Edu Barbosa Arruda

CATALÃO – GO

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Barbosa, Thaís Alves  
UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA GUAPEVA (Pouteria  
gardneriana Radlk): PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL,  
MODELAGEM MATEMÁTICA E PÓS-PROCESSAMENTO [manuscrito]  
/ Thaís Alves Barbosa. - 2019.  
81 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato; co-orientador Dr. Edu  
Barbosa Arruda.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade  
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2019.  
Bibliografia. Anexos. Apêndice.  
Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Guapeva. 2. Secador do Tipo Túnel. 3. Cinética de Secagem.  
4. Problema Inverso. 5. Evolução Diferencial. I. Lobato, Fran Sérgio,  
orient. II. Título.

CDU 517



Defesa Nº \_\_\_\_\_

### Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 12 dias do mês de agosto do ano de 2019, às 08h, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores doutores Fran Sérgio Lobato (presidente e Orientador), Edu Barbosa Arruda (Coorientador), Fábio de Oliveira Arouca, Romes Antônio Borges e Ana Paula Silva Siqueira para, em sessão pública realizada no Laboratório de Controle Operacional (J-03), da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "Uma Contribuição ao Estudo da Guapeva (*Pouteria Gardneriana* Radlk): Procedimento Experimental, Modelagem Matemática e Pós-Processamento", em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Thaís Alves Barbosa, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (  ) **Aprovado** ou (  ) **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 10 h: 30 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Fran Sérgio Lobato, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 12 de agosto de 2019.

Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, Universidade Federal de Goiás, Regional  
Catalão (Presidente da Banca)

Prof. Dr. Edu Barbosa Arruda  
Departamento de Engenharia Química, Universidade  
Federal do Triângulo Mineiro

Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca  
Faculdade de Engenharia Química, Universidade  
Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Romes Antônio Borges  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, Universidade Federal de Goiás, Regional  
Catalão

Prof. Dr. Ana Paula Silva Siqueira  
Departamento de Tecnologia de Alimentos, Instituto  
Federal Goiano – Campus Urutaí

Thaís Alves Barbosa  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, Universidade Federal de Goiás, Regional  
Catalão (Discente)

---

# AGRADECIMENTOS

---

A Deus, por minha vida, saúde e força para superar dificuldades e alcançar objetivos.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio e compreensão ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Ao meu marido, pelo companheirismo e incentivo.

À Universidade Federal de Goiás, Regional de Catalão, todo o corpo docente e administrativo do Programa de Pós-graduação em Modelagem e Otimização, pela valiosa oportunidade.

Agradecimento especial aos meus orientadores, Fran Sérgio Lobato e Edu Barbosa Arruda, pela confiança, paciência e apoio dedicados a mim, por todo o aprendizado e novas experiências.

Aos membros da banca, Ana Paula Silva Siqueira, Fábio de Oliveira Arouca e Romes Antônio Borges pelas contribuições com o presente trabalho.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Morrinhos, por todo apoio oferecido para possibilitar maior aproveitamento e conclusão deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás, pelo fomento a essa pesquisa.  
E a todos que contribuíram para minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

## RESUMO

BARBOSA, T. A. *Uma contribuição ao estudo da guapeva (Pouteria Gardneriana Radlk): procedimento experimental, modelagem matemática e pós-processamento*. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

O cerrado configura-se como um dos biomas de maior representatividade e diversidade no território brasileiro. Neste pode ser encontrada uma grande variedade de frutas com grande aplicabilidade, dentre as quais pode-se ser destacado o seu consumo *in natura*, em produtos diversos, e nos campos da agricultura e medicina. Dentre essa variedade de frutas, a guapeva se consolida como um dos que apresentam maior potencial econômico, devido ao sabor adocicado, a sua carga nutricional e bioativa, e as aplicações no campo da medicina. Apesar destas características, poucos estudos sobre esta fruta podem ser encontrados na literatura. Diante do que foi apresentado, este trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da guapeva no que tange as etapas de secagem e da caracterização da farinha produzida com a casca deste fruto. Para essa finalidade, utilizou-se um secador do tipo túnel onde são realizados os experimentos para o levantamento dos parâmetros nas equações que representam a cinética de secagem da guapeva e dos parâmetros que caracterizam o modelo fenomenológico, a saber, a difusividade efetiva e a condutividade térmica. Em ambas as situações foram propostos e resolvidos problemas inversos considerando o algoritmo de Evolução Diferencial. A partir dos resultados obtidos foi possível observar uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados. Em termos da análise físico-química da farinha obtida, foi possível constatar uma boa qualidade nutricional em comparação com outras farinhas de frutas comerciais. Neste cenário, considera-se que o produto resultante do processo de secagem configura-se como uma boa alternativa, do ponto de vista nutricional, aos tradicionais produtos existentes no mercado.

**Palavras-chave:** Guapeva, Secador do Tipo Túnel, Cinética de Secagem, Problema Inverso, Evolução Diferencial, Análise Físico-Química, Farinha de guapeva.

## ABSTRACT

BARBOSA, T. A. *A contribution to study of guapeva (Pouteria Gardneriana Radlk): experimental procedure, mathematical modeling and post-processing*. 2019. 81 f. Master Thesis In Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

The cerrado is configured with one of largest biomes in terms of representativeness and diversity in Brazilian territory. A wide variety of fruits and that presents applicability in different areas, as agriculture and medicine, can be found. Among these, the guapeva presents a large potential due to sweet taste, nutritional and bioactive, and applications in medicine field. Despite these characteristics, few studies considering this fruit can be found in the literature. In this contribution, this work aims to contribute in study of guapeva in terms of drying operation and characterization of produced flour with the bark of this fruit. For this purpose, a tunnel type dryer, in which experiments are performed to determine the parameters associated with the guapeva drying kinetic and parameters associated with the phenomenological model (effective moisture diffusivity and effective thermal conductivity). In this case, two inverse problems were proposed and solved by using the Differential Evolution algorithm. From the results obtained it was possible to observe a good concordance between the experimental and predicted results. In relation to physical-chemical analysis of the flour produced, it was possible to observe a good nutritional quality in comparison with other commercial flours. In this context, the product resulting from the drying process is configured as an alternative, from the nutritional point of view, to traditional products found in market.

**Keywords:** Guapeva, Tunnel Type Dryer, Drying Kinetic, Inverse Problem, Differential Evolution, Physical-Chemical Analysis, Guapeva flour.

---

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 - Árvore de guapeva.....	11
Figura 2.2 – Guapeva. ....	12
Figura 2.3 - Camadas da guapeva.....	12
Figura 2.4 - Secador tipo túnel industrial.....	16
Figura 2.5 - Curva de secagem.....	19
Figura 2.6 - Problemas diretos e inversos.....	26
Figura 2.7 - Classificação dos métodos de otimização.....	29
Figura 3.1 - Amostras de guapeva consideradas no processo de secagem.....	34
Figura 3.2 - Amostras de casca de guapeva prontas para a secagem.....	35
Figura 3.3 - Secador do tipo túnel utilizado no procedimento experimental.....	36
Figura 3.4 - Cascas de guapeva para secagem.....	37
Figura 3.5 - Representação esquemática das camadas da guapeva.....	40
Figura 4.1 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 40°C.....	44
Figura 4.2 - Modelo de predição de Page considerando a temperatura de 40°C.....	44
Figura 4.3 - Modelo de predição de Singh <i>et al</i> considerando a temperatura de 40°C.....	45
Figura 4.4 - Modelo de predição de Overhultz <i>et al</i> para a temperatura de 40°C.....	46
Figura 4.5 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 40°C.....	46
Figura 4.6 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 52°C.....	47
Figura 4.7 - Modelo de predição de Page considerando a temperatura de 52°C.....	48
Figura 4.8 - Modelo de predição de Singh <i>et al</i> considerando a temperatura de 52°C.....	48
Figura 4.9 - Modelo de predição de Overhultz <i>et al</i> a temperatura de 52°C.....	49
Figura 4.10 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 52°C.....	50
Figura 4.11 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 65°C.....	50
Figura 4.12 - Modelo de predição de Page considerando a temperatura de 65°C.....	51
Figura 4.13 - Modelo de predição de Singh <i>et al</i> considerando a temperatura de 65°C.....	52
Figura 4.14 - Modelo de predição de Overhultz <i>et al</i> para a temperatura de 65°C.....	52
Figura 4.15 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 65°C.....	53
Figura 4.16 - Influência da temperatura no processo de secagem da guapeva.....	57

Figura 4.17 - Teor de umidade experimental e simulada da guapeva considerando diferentes posições radiais.....	58
Figura 4.18 - Temperatura experimental e simulada da guapeva considerando diferentes posições radiais.....	58
Figura 4.19 - Farinha de casca de guapeva.....	59

---

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Caracterização química e capacidade antioxidante da guapeva.....	13
Tabela 2.2 - Representação dos mecanismos de mutação no algoritmo de evolução diferencial.....	32
Tabela 3.3 - Planejamento de experimentos para a secagem da guapeva .....	37
Tabela 4.1 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 40°C .....	56
Tabela 4.2 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 52°C .....	56
Tabela 4.3 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 65°C .....	56
Tabela 4.4 - Dados experimentais adimensionais da guapeva .....	57
Tabela 4.5 - Resultados obtidos utilizando Evolução Diferencial .....	58
Tabela 4.6 - Composição da farinha de casca de guapeva .....	60

---

# SUMÁRIO

---

INTRODUÇÃO.....	8
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1    Guapeva ( <i>Pouteria gardneriana</i> Radlk).....	11
2.2    Secagem e Desidratação de Frutas e Hortaliças.....	14
2.3    Farinhas de Frutas.....	17
2.4    Cinética de Secagem.....	18
2.5    Problemas Diretos e Inversos.....	26
2.6    O Problema de Otimização.....	27
2.7    Algoritmo de Evolução Diferencial.....	30
MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1    Preparação das Frutas.....	34
3.2    Procedimento Experimental.....	36
3.3    Obtenção e Caracterização da Farinha de Casca de Guapeva.....	37
3.4    Cinética de Secagem.....	38
3.5    Modelo Fenomenológico.....	40
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1    Cinética de Secagem.....	43
4.2    Modelagem Fenomenológica.....	57
4.3    Caracterização da Farinha da Casca da Guapeva.....	59
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	63
REFERÊNCIAS.....	65
RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	71
RESULTADOS LABORATORIAIS.....	75

## Capítulo 1

---

# INTRODUÇÃO

---

O cerrado configura-se como um dos biomas mais abrangentes encontrados no Brasil, ocupando cerca de, aproximadamente, 24% do território nacional. Neste, pode ser encontrada uma grande diversidade de frutas com grande potencial agrícola e medicinal, bem como uma fonte de alimentos que podem ser consumidos *in natura* ou após processamento (SILVA *et al.*, 2008; PERFEITO *et al.*, 2017). O interesse por frutas do cerrado se deve ao sabor peculiar, ao elevado teor de açúcar, as proteínas, aos sais minerais e ácidos graxos que estas possuem em sua constituição. Além disso, também ressalta-se as propriedades funcionais atribuídas à presença de substâncias bioativas que apresentam ação antioxidante (SILVA *et al.*, 2008; LIMA *et al.*, 2004; PERFEITO *et al.*, 2017; MELO *et al.*, 2008).

Dentre as diversas variedades de frutos nativos do cerrado, muitos estudos já foram realizados visando avaliar o potencial econômico e o interesse social, como por exemplo, o baru, a gabioba, murici e a mangaba (SIQUEIRA *et al.*, 2015; MORZELLE *et al.*, 2015; PERFEITO *et al.*, 2017). Todavia, apesar desse interesse, poucas informações sobre aspectos relacionados à modelagem matemática dos perfis de umidade e temperatura, do levantamento da cinética de secagem e do pós processamento podem ser encontrados na literatura especializada para uma ampla variedade de frutos do cerrado.

Dentre estes frutos do Cerrado destaca-se a guapeva (*Pouteria gardneriana* Radlk). Isto se deve ao fato desta apresentar um sabor adocicado, com elevada carga nutricional e por ser bioativa, isto é; apresenta ação antioxidante no organismo humano (SIQUEIRA *et al.*, 2017). Geralmente, a guapeva é consumida *in natura* ou na forma de doces utilizando-se a sua polpa, sendo, nestes casos, a casca da fruta descartada.

Apesar do aumento no consumo das frutas observado nos últimos anos, diversos fatores conduzem a um grande desperdício. Isto se deve, entre outros fatores, ao fato das frutas possuírem alto teor de umidade, em torno de 80%, o que as tornam altamente perecíveis (ROCHA, 2011). Neste cenário, vários mecanismos para aumentar o tempo de prateleira das frutas têm sido estudados. Um dos mais eficientes é a utilização da operação unitária de secagem. Em linhas gerais, o processo de secagem permite reduzir o teor de umidade no alimento, gerando um ambiente impróprio para o crescimento de

microrganismos e atividade de enzimas, já que estes necessitam de água para realizar suas atividades. Assim, com o processo de secagem tem-se a redução de água do produto e, conseqüentemente, o desenvolvimento de microrganismos e a velocidade de reações químicas são minimizados (SIQUEIRA *et al.*, 2017). Além disso, ressalta-se que, ao se reduzir a quantidade de água em um alimento ou produto de interesse, o seu peso e as dimensões do produto também são reduzidas, o que facilita o seu armazenamento e o seu transporte (BONTEMPO *et al.*, 2016).

Do ponto de vista físico, o processo de secagem envolve trocas simultâneas de calor, massa e momento, fazendo com que este seja um fenômeno altamente complexo do ponto de vista matemático. Dentre os principais fatores que influenciam a secagem destaca-se a dependência deste processo com relação à estrutura do sólido e com a umidade relativa, visto que, para um mesmo lote de produto, pode-se observar variações (ARRUDA, 2008). Matematicamente, este processo consiste de modelos diferenciais que representam os balanços de massa, energia e movimento, associados a equações algébricas empíricas para descrever cinética de secagem e coeficientes de transferência de calor (KEEY, 1975). Nestes modelos, as variáveis dependentes, independentes e os parâmetros relacionam-se através de informações fundamentadas em modelos fenomenológicos ou em relações puramente matemáticas, de forma que o processo possa ser simulado.

O processo de secagem pode ser classificado como natural ou artificial. A primeira consiste na exposição do produto à radiação solar que, sob determinadas condições (geralmente baixa umidade do ar, altas temperaturas e ventos moderados), irá promover a redução de umidade do produto. Por outro lado, na secagem artificial é avaliado o processo de redução do peso do produto via controle da umidade relativa, da temperatura e da velocidade do ar (EVANGELISTA, 2005; OETTERER, 2006).

Uma das aplicações diretas do processo de secagem é a produção de farinhas de frutas. A importância deste tipo de produto pode ser justificada pelo fato de que estas farinhas podem ser facilmente inseridas na alimentação humana em substituição parcial ou total às farinhas que, tradicionalmente, são utilizadas na fabricação de bolos, pães, barras de cereais e outros produtos alimentícios (BONTEMPO *et al.*, 2016). O processo de secagem aplicado às frutas permite agregar valor e prolongar a vida útil dos mesmos, visto que as frutas possuem alto teor de umidade e elevada taxa de amadurecimento, gerando grandes perdas da produção durante armazenamento e transporte (BARBOSA, 2016).

Devido à alta umidade presente nas frutas, o processo de secagem das frutas deve ser realizado em condições de temperatura controlada para evitar a degradação de nutrientes importantes para o consumidor. Este processo é dispendioso e caro, principalmente pela quantidade de energia gasta no aquecimento do ar (BONTEMPO *et al.*, 2016). Otimizar o processo de secagem de frutas é fundamental para economia energética e, conseqüentemente financeira, na produção de frutas secas.

Diante do que foi apresentado, a presente proposta tem como objetivo principal contribuir com o estudo da guapeva (*Pouteria gardneriana* Radlk) no que tange a determinação da cinética de secagem e do modelo fenomenológico, bem como a avaliação nutricional da sua farinha, visto a pouca quantidade de trabalhos relacionados a essa fruta. Neste caso, serão avaliados aspectos relacionados ao procedimento experimental realizado em um secador do tipo túnel para fins da determinação dos parâmetros associados aos modelos cinético e fenomenológico, respectivamente. Em ambos os casos considera-se a formulação e a resolução de problemas inversos via aplicação do algoritmo de Evolução Diferencial (ED) (STORN e PRICE, 1995).

Este trabalho está estruturado como segue. No capítulo 2 são apresentados aspectos gerais sobre a guapeva, as operações de secagem e desidratação, a caracterização de farinhas de frutas, a modelagem cinética e fenomenológica relacionado à secagem, e uma breve descrição dos métodos de otimização, com destaque para o algoritmo de ED. Já no capítulo 3 são descritos os passos para a realização do procedimento experimental, a obtenção e caracterização da farinha de casca da guapeva e a formulação do problema inverso para a determinação dos modelos cinéticos e fenomenológico. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No último capítulo é apresentado um consolidado das conclusões preliminares deste trabalho, bem como as proposta de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

---

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Guapeva (*Pouteria gardneriana* Radlk)

Como destacado anteriormente, dentre as frutas encontradas no cerrado brasileiro, a guapeva apresenta grande potencial agrícola, medicinal, bem como na utilização em produtos para o consumo *in natura* ou processados (SILVA *et al.*, 2008; PERFEITO *et al.*, 2017). A guapeva é uma fruta produzida por uma árvore de grande porte, sendo capaz de atingir até 30 metros de altura e, encontrada em locais com abundância de água, tais como lagos, rios e igarapés. A árvore que produz a guapeva, mostrada na Figura 2.1, possui folhas simples alternas e espiraladas, que medem entre 8-20 cm de comprimento por 5-12 cm de largura (MALTA, 2011; CABRAL, 2013).

Figura 2.1 - Árvore de guapeva.



Fonte: o autor.

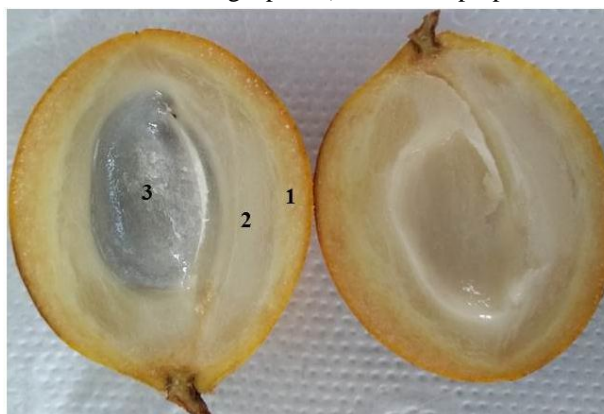
O fruto apresenta um sabor adocicado e sua polpa tem cor levemente amarelada e textura macia, conforme as Figuras 2.2 e 2.3.

Figura 2.2 – Guapeva.



Fonte: o autor.

Figura 2.3 - Camadas da guapeva (1: casca, 2: polpa, 3: semente).



Fonte: o autor.

Na cultura popular, as sementes são utilizadas como anti-inflamatório e, o azeite que se obtém das sementes pode ser empregado contra o reumatismo, impigens, e erisipela (COSTA, 2014). A guapeva tem composição média de 65% umidade, 1% de minerais, além do teor expressivo de compostos fenólicos (220 gAG/100 g) e, conseqüentemente, atividade antioxidante (SIQUEIRA *et al.*, 2017). Das folhas obtém-se um suco que se usa contra mordeduras de cobras e que, além disso, é excelente carrapaticida (MALTA, 2011; CABRAL, 2013; COSTA, 2014; SIQUEIRA *et al.*, 2017). Além disso, a guapeva pode ser ingerida *in natura* em sucos, geleias, compotas, doces, mousses e sorvetes (MALTA, 2011; CABRAL, 2013).

Na literatura especializada, poucos estudos acerca desta fruta podem ser encontrados, sendo os mesmos divididos em dois grandes grupos, a saber, os que avaliam os frutos e os que avaliam a casca da árvore e folhas. No primeiro grupo pode-se citar o trabalho de Malta

(2011), que estudou a atividade biológica via identificação e quantificação dos compostos fenólicos de frutas do cerrado, dentre as quais a guapeva. Além dos compostos fenólicos, também foram investigadas as atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, anti-mutagências, anti-genotóxicas, anti-proliferativas e citotóxicas da guapeva. Cabral (2013) avaliou o efeito da secagem, armazenamento e tratamento com inseticidas na qualidade fisiológica de sementes de guapeva. Mais recentemente, Siqueira *et al.* (2017) caracterizaram quimicamente e bioativamente a guapeva, como pode ser observado a Tabela 2.1. Em termos da avaliação da casca da árvore de guapeva, Costa (2014) avaliou os teores de fenóis e flavonoides totais, além de analisar as atividades antirradicalar e mutagênica dos extratos hidroalcoólicos das folhas.

Tabela 2.1 - Caracterização química e capacidade antioxidante da guapeva.

	Composição da polpa	Composição da casca
Umidade (%)	78,32	73,34
Cinzas (%)	0,47	1,46
Proteínas (%)	1,88	2,99
Lipídeos (%)	7,1	5,63
Carboidratos (%)	12,23	16,58
Valor energético total (Kcal)	120,34	128,95
Fenólicos Totais (mg AG/100g)	79	474,1
Capacidade Antioxidante ( $\mu\text{mol/eq Trolox}$ )	399,31	452,61

Fonte: Adaptado de Siqueira *et al.* (2017).

Nos trabalhos citados, apenas pontos relacionadas com a análise química da fruta ou da árvore guapeva foram analisados. Neste caso, inúmeras são as questões em aberto no que tange o processo de secagem em termos de procedimentos experimentais, bem como a modelagem matemática (empírica e fenomenológica) e o pós-processamento desta fruta. Para este último ponto enfatiza-se que o aproveitamento de resíduos e o desenvolvimento de novos produtos no que tange o seu potencial de reutilização, a segurança alimentar e a identificação de compostos e nutrientes presentes em partes não convencionais (cascas, bagaços e sementes), é pouco explorado pela indústria alimentícia. Por suas características nutricionais relevantes, também podem ser avaliados o uso da guapeva para a alimentação humana, bem como o seu uso como ingrediente para enriquecimento nutricional em novos

produtos. Vale ressaltar o alto teor de fibras e compostos bioativos encontrados em resíduos da produção de alimentos (STORCK *et al.*, 2015; ARANHA *et al.*, 2017).

Neste contexto, vislumbra-se um importante nicho para explorar o potencial da guapeva, de forma a inseri-la no mercado, bem como no seu uso em medicina para fins de prevenção e tratamento de doenças.

## **2.2 Secagem e Desidratação de Frutas e Hortaliças**

A estabilidade, qualidade e composição de um alimento estão diretamente relacionadas ao seu teor de umidade, que é fator indispensável a desenvolvimento microbiológico. Para produtos deterioráveis, a secagem é o processo mais simples e eficaz para sua conservação e, conseqüentemente, o aumento da vida de prateleira. Isto se deve ao fato da redução do teor de água das frutas minimiza as reações químicas e biológicas que acontecem (MACHADO, 2009). Assim, reduzir a quantidade de água em uma fruta implica no aumento da sua vida útil. Além desta vantagem, também é possível citar a praticidade no transporte do sólido seco (carregamento, descarregamento, transporte pneumático); na estocagem; na redução dos custos associados ao transporte de matérias-primas e ao cumprimento de especificações de mercado (EIK, 2008). Cabe ressaltar que, durante a secagem é comum ocorrer mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos produtos. Com isso, faz-se necessário o conhecimento desses efeitos visto que influenciam na transferência de massa e energia (LIMA, 2003).

A secagem é uma das operações unitárias mais comuns, pois a maioria dos produtos industriais necessitam desta operação unitária em alguma etapa de seu processamento. Do ponto de vista físico, o processo de secagem é afetado por vários parâmetros, muitos deles relacionados à estrutura do sólido e as condições em que a operação se realiza (LOBATO *et al.*, 2008, ARRUDA *et al.*, 2009). A secagem é um assunto extenso e complexo, pois envolve trocas simultâneas de calor, massa e momento. Sua modelagem matemática é descrita por um sistema de equações diferenciais que representam os balanços de massa, energia e quantidade de movimento. Associado a estes modelos fenomenológicos, uma série de equações empíricas devem ser empregadas para que esse fenômeno possa ser representado, destacando-se as expressões para umidade de equilíbrio e para a cinética de secagem como as mais importantes (ARRUDA *et al.*, 2009; BARBOSA; LOBATO, 2016).

Historicamente, o sol e vento foram os primeiros mecanismos de secagem já empregados pelo homem. Estes ainda são utilizados em alguns casos isolados, porém com os avanços tecnológicos, novos equipamentos para a secagem foram desenvolvidos, processo chamado de secagem artificial, como os secadores por radiação eletromagnética, micro-ondas e infravermelho, mas os utilizados com maior frequência se baseiam na troca de calor (ARRUDA, 2008).

Equipamentos para secagem artificial, ou desidratação, geram grande consumo energético, seja de energia elétrica ou até mesmo gases para combustão, sendo necessária a otimização deste processo a fim de reduzir custos ao mesmo tempo em que se mantém a qualidade final do produto. Apesar de mais cara, a secagem artificial apresenta vantagens em relação à natural, como por exemplo, a independência das condições climáticas, além de reduzir o risco de deterioração do produto em função do tempo de secagem, visto que a secagem artificial é realizada em menos tempo (ARRUDA, 2008; MACHADO, 2009).

Apesar do custo elevado da secagem artificial de alimentos, estes produtos agregam melhor qualidade, se comparados a produtos obtidos por secagem natural, portanto, do ponto de vista econômico, a melhoria da qualidade do produto compensa o maior custo, visto o aumento do valor comercial do mesmo. Além disso, na secagem artificial há menor perda dos teores de açúcar das frutas, favorecendo a qualidade sensorial dos produtos (EVANGELISTA, 2005).

Os secadores podem ser classificados de acordo com o nível de contato entre o gás de secagem e o produto. Secadores de contato direto são aqueles em que o gás de secagem tem contato direto com o produto, enquanto secadores de contato indireto promovem o contato entre o gás e o produto por meio de uma superfície aquecida indiretamente. Também podem ser classificados pelo tipo de transmissão de calor utilizado, seja ela por condução, convecção, radiação, liofilização, secagem dielétrica, entre outras (ARRUDA, 2008; MACHADO, 2009).

O método de secagem por convecção é um dos mais comuns, nele o calor sensível é transferido para o produto por convecção, tendo como agente de secagem o ar pré-aquecido que passa sobre ou através do produto. Já a secagem por condução é aquela em que a transferência de calor é feita pelo contato físico. Na secagem por radiação, a energia térmica é suprida por várias fontes eletromagnéticas, tendo como a mais utilizada a radiação infravermelha (MACHADO, 2009).

Pouco utilizada nos processos industriais devido ao alto custo, a secagem dielétrica consiste basicamente na exposição do produto a um campo eletromagnético de frequência muito alta, como em região de radiofrequência ou micro-ondas, que varia sua direção rapidamente, o que causa mudança na orientação dos dipolos de líquidos gerando energia devido à fricção molecular (MACHADO, 2009).

Embora seu custo também seja elevado, a secagem por liofilização é muito utilizada pela indústria alimentícia, pois permite secar produtos que não podem ser aquecidos. É o método de secagem que menos agride o produto e obtém melhor qualidade dentro os métodos citados. Este processo baseia-se na sublimação da água congelada do produto, que é inserido em uma câmara de secagem de baixa pressão, o que o torna um método caro, pois a taxa de secagem é baixa e utiliza-se vácuo. Ainda assim, é possível encontrar vários produtos secos por liofilização, como sopas, café, algumas frutas e produtos do mar, entre outros (MACHADO, 2009).

O processo de secagem também é influenciado pelo modelo de secador a ser utilizado. Os secadores do tipo túnel (Figura 2.4) são muito comuns nas indústrias de alimentos para desidratar frutas de forma contínua e com alta capacidade de produção. Nestes a corrente de ar pode ser natural ou forçada e o fluxo de ar paralelo caracteriza-se por promover temperatura mais alta em contato com o produto (MACHADO, 2009).

Figura 2.4 - Secador tipo túnel industrial.



Fonte: Diário de ciências aplicadas, 2018.

Com o desenvolvimento de novas estratégias/equipamentos para a operação de secagem, a sua aplicabilidade no ramo alimentício tem atraído a atenção de pesquisadores. Neste cenário, as frutas secas e desidratadas se destacam no mercado devido ao aumento

significativo no tempo de prateleira em relação à fruta *in natura*, a redução do seu peso e, consequente redução do custo de transporte e armazenamento, bem como a capacidade deste tipo de produto em conservar as características físicas e nutritivas (BARBOSA; LOBATO, 2016; MACHADO, 2009). As frutas secas e desidratadas diferenciam-se pelo teor de umidade final no produto. São consideradas frutas secas aquelas obtidas pela remoção parcial da água da fruta, com umidade entre 15 e 25%, enquanto as frutas desidratadas são resultantes do processo de remoção quase total de água, até atingir teor de umidade de 3% (OETTERER, 2006).

O aumento no consumo e produção de alimentos secos e se deve a vários aspectos, dentre os quais pode-se citar (MACHADO, 2009): *i*) à procura por alimentação saudável; *ii*) a alta demanda da sociedade por alimentos prontos e semi-prontos, isto é, que apresentam preparo mais rápido; *iii*) a questões financeiras como por exemplo, o transporte, o manuseio e a estocagem de produtos secos.

## 2.3 Farinhas de Frutas

A farinha é um dos produtos oriundos da secagem de frutas, legumes, plantas, grãos, entre outros. Conforme resolução da diretoria colegiada (RDC) nº 263, de 22 de setembro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), farinhas são produtos obtidos de partes comestíveis de uma ou mais espécies frutos, sementes, tubérculos de rizomas por moagem e outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos.

No caso específico das frutas, as farinhas podem ser inseridas na alimentação humana; como substituinte das tradicionais farinhas empregadas para a fabricação de outros produtos; para a complementação nutricional, visto o seu elevado teor de vitaminas e compostos bioativos e para o reaproveitamento destas frutas de modo a minimizar o seu desperdício (BONTEMPO *et al.*, 2016). Neste caso, também podem ser utilizados os resíduos de alimentos, tais como cascas, sementes, bagaços e caroços das frutas. Estes são fontes de proteínas, enzimas, carboidratos, lipídios, compostos bioativos, minerais e outras substâncias importantes para a alimentação humana (ARANHA *et al.*, 2017; STORCK *et al.*, 2015).

As informações nutricionais complementares são regulamentadas pela RDC nº 54, de 12 de novembro de 2012, que orienta sobre como e quando determinado componente deve ser apresentado no rótulo dos alimentos. Vale destacar que esta resolução considera um

alimento com alto conteúdo de fibras, aqueles que possuem mínimo de 6 gramas de fibra por 100g ou 100 ml em pratos preparados ou mínimo de 5 g de fibra por porção (BRASIL, 2012).

Na literatura especializada podem ser encontrados vários estudos sobre a produção e utilização de farinhas de frutas, dentre as quais pode-se a de: *i*) banana verde (OLIVEIRA *et al.*, 2015; FASOLIN *et al.*, 2007; JUAREZ-GARCIA *et al.*, 2006); *ii*) casca de jabuticaba (MICHELETTI *et al.*, 2018); *iii*) resíduos de frutas (ARANHA *et al.*, 2017); *iv*) seriguela (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016); *v*) resíduos da produção de sucos (STORCK *et al.*, 2015); *vi*) sementes de acerola (AGUIAR *et al.*, 2010); *vii*) bagaço de maçã (COELHO e WOSICKI, 2010); *viii*) casca de maracujá (SOUZA *et al.*, 2008); entre outras.

## 2.4 Cinética de Secagem

Para produtos com alto teor de umidade, como as frutas, a secagem pode ocorrer em dois ou mais períodos distintos. Iniciando por um período onde a taxa de secagem é constante, seguido de um ou mais períodos de taxa de secagem decrescente continuamente. A umidade crítica é o teor de umidade que separa a taxa constante e a decrescente de secagem (ARRUDA, 2008).

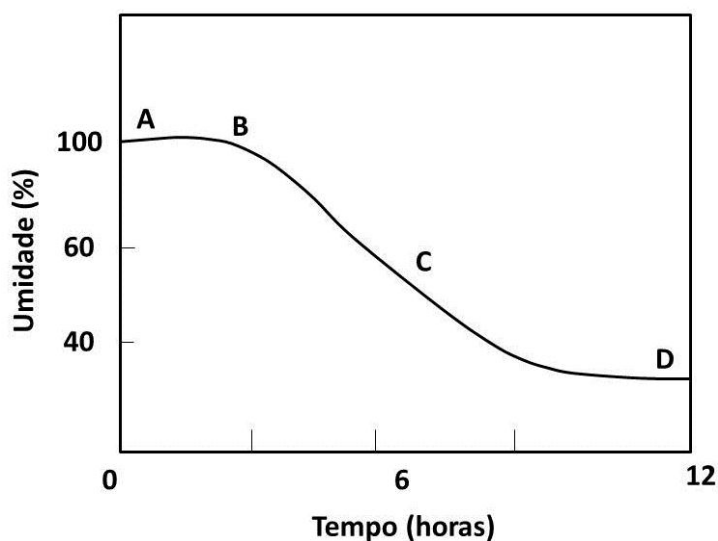
Conforme discutido por Oetterer (2006), quando o ar aquecido entra em contato com a superfície do alimento, o calor latente de vaporização provoca a retirada de umidade do seu interior. O vapor de água difunde-se uma película delimitante do ar sendo carregado por este movimento. A partir disso é gerada uma região de menor pressão de vapor de água na superfície do alimento e um gradiente de pressão deste é estabelecido do seu interior úmido para o ar seco provendo força motriz para a remoção da água do alimento.

O movimento da água para a superfície se dá pela difusão dos líquidos, que é causada por diferença de concentração de soluto no alimento e também pela difusão do vapor de água em espaços de ar no alimento causados pela pressão de vapor (OETTERER, 2006).

No início do processo de secagem, ocorre o período de acomodação ou período de velocidade constante de evaporação, em que a superfície do alimento é aquecida até a temperatura do ar no secador (intervalo AB, conforme a Figura 2.5). Durante este período a velocidade de movimento da água do interior do alimento é a mesma velocidade de evaporação da água na superfície. Ao fim deste período, se atinge a umidade crítica e dá-se

início ao período de velocidade constante (intervalo BC, conforme a Figura 2.5) em que parte da água é evaporada e outra parte se movimenta do interior do alimento para a superfície e em seguida para o ar de secagem. Por fim, o trecho final é denominado período de velocidade decrescente (intervalo CD, conforme a Figura 2.5), onde a água é eliminada somente por difusão do interior do alimento para a superfície e em seguida para o ar de secagem (OETTERER, 2006).

Figura 2.5 - Curva de secagem.



Fonte: Oetterer (2006).

O estudo da secagem de materiais particulados é uma das operações mais importantes em engenharia química devido à quantidade de aplicações que podem ser encontradas. Basicamente, esta operação unitária estuda os mecanismos de condução, convecção e/ou radiação relacionados com a transferência de energia de uma fonte de calor para o material particulado a ser seco. Essa fonte de calor pode ser um gás quente ou até mesmo uma superfície metálica. Tradicionalmente, os secadores podem ser de três tipos básicos: a correia transportadora, o leito fluidizado e o secador rotativo. Todos esses tipos são amplamente utilizados na indústria química em operações de desidratação de materiais que vão de alimentos a minerais inorgânicos (KIRANOUDIS *et al.*, 1997; ARRUDA, 2008).

Para o estudo da secagem dos produtos, faz-se necessário a determinação da cinética de secagem, de modo que os modelos fenomenológicos possam ser simulados. Na literatura especializada, uma série de estudos envolvendo modelos cinéticos podem ser encontrados. Dentre estes, pode-se citar o estudo da cinética de secagem de: *i*) grãos de soja (OVERHULTS *et al.*, 1973); *ii*) frutas tropicais (SHAHARI, 2012); *iii*) fertilizantes

(LOBATO *et al.*, 2008, ARRUDA *et al.*, 2009); *iv*) sementes de crambe (FARIA *et al.*, 2012); *v*) bananas (MONTEIRO *et al.*, 2016; BARBOSA; LOBATO, 2016); *vi*) maçãs (ZLATANOVIC *et al.*, 2013; SINGH *et al.*, 2014); *vii*) mamão (UDOMKUN *et al.*, 2015); *viii*) batatas (SINGH *et al.*, 2014) e *ix*) abacaxi (BARBOSA; LOBATO, 2016).

Matematicamente, várias equações semi-empíricas e empregadas para a representação da cinética de secagem podem ser encontradas. A maioria destes é derivado do modelo difusivo ou de analogias com outros fenômenos encontrados na literatura (ARRUDA, 2008). Ao longo do tempo, essas equações foram sendo adaptadas por outros autores a fim de obter melhores resultados. A seguir são apresentadas as mais utilizadas na literatura.

- Modelo de Lewis (1921):

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.1)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right) \quad (2.2)$$

- Modelo de Page (1949):

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.3)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right) \quad (2.4)$$

- Modelo de Henderson e Henderson (1968)

$$MR = n \left( \exp(-kt) + \frac{1}{9} \exp(-9kt) \right) \quad (2.5)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right) \quad (2.6)$$

- Modelo de Overhultz *et al.* (1973):

$$MR = \exp(-(kt)^n) \quad (2.7)$$

$$k = \exp\left(\frac{A+B}{T_f}\right) \quad (2.8)$$

- Modelo de Brooker *et al.* (1974):

$$MR = C \exp(-kt) \quad (2.9)$$

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right) \quad (2.10)$$

- Modelo de Page Modificado (DIAMANTE E MUNRO, 1993):

$$MR = \exp\left(-k\left(\frac{t}{l^2}\right)^n\right) \quad (2.11)$$

- Modelo de Singh *et al.* (2014):

$$MR = \exp(-kt) - nt \quad (2.12)$$

em que  $MR$  é a umidade adimensional – *Moisture Ratio*,  $k$  é a constante de secagem ( $\text{h}^{-1}$ ),  $t$  é o tempo de secagem (s),  $l$  e  $n$  são parâmetros adimensionais, ( $\text{h}^{-1}$ ),  $T_f$  é a temperatura do fluido,  $A$ ,  $B$  e  $C$  são parâmetros das equações de secagem e que possuem unidades de modo a corrigir as unidades do modelo.

Os modelos cinéticos apresentados são empregados para representar a cinética de secagem do processo em análise. Já para a predição dos perfis de umidade e temperatura faz-se necessário empregar, preferencialmente, modelos fenomenológicos. A seguir são apresentados alguns destes modelos, aplicados em diferentes campos da ciência.

Para fins do estudo da secagem de fertilizantes em secador rotativo, Arruda (2008) propôs o seguinte modelo para previsão dos perfis de umidade e temperatura do sólido e do ar de secagem no interior do secador operando em contracorrente ( $0 \leq z \leq 1$ ):

$$\frac{dW}{dz} = -\frac{R_w H}{G_f} \quad W(1) = W_0 \quad (2.13)$$

$$\frac{dM}{dz} = -\frac{R_w H}{G_s} \quad M(0) = M_0 \quad (2.14)$$

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{[U_\alpha V(T_f - T_s) + R_w H(\lambda + Cp_v T_f) + U_p \pi DL(T_f - T_{amb})]}{G_f(Cp_f + WCp_v)} \quad (2.15)$$

$$T_f(1) = T_{f0}$$

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{[U_\alpha V(T_f - T_s) + R_w H Cp_l T_s - R_w H(\lambda + Cp_v(T_f - T_s))]}{G_s(Cp_s + MCp_l)} \quad (2.16)$$

$$T_s(0) = T_{s0}$$

em que  $C_p$  é o calor específico (kJ/kg°C),  $D$  é o diâmetro interno do tambor (m),  $G$  a vazão mássica (kg/s),  $h$  é a entalpia (kJ/kg),  $H$  é a carga total do secador (kg),  $L$  é o comprimento total do tambor (m),  $M$  é a umidade do sólido (kg/kg),  $R_w$  é a taxa de secagem ( $s^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura (°C),  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente (°C),  $U_a$  é o coeficiente de transferência volumétrico (kJ/sm<sup>3</sup>°C),  $V$  é o volume do tambor (m<sup>3</sup>),  $W$  é a umidade absoluta do ar (kg/kg),  $z$  é a coordenada cartesiana adimensional ( $x/L$ ),  $t$  o tempo de residência (s),  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg) e os subscritos são:  $f$  para o fluido,  $s$  para o sólido,  $l$  para o líquido,  $v$  para o vapor e  $o$  para a condição de contorno (operação contracorrente).

Neste modelo, a taxa de secagem local é dada por:

$$-R_w = \frac{(MR - 1)(M_0 - M_{eq})}{t} \quad (2.17)$$

sendo a umidade adimensional ( $MR$ ) estimada pela equação de Page (PAGE, 1949):

$$MR = \exp\left(-C_1 \exp\left(\frac{-C_2}{T_f}\right) t^{C_3}\right) \quad (2.18)$$

Nesta equação,  $C_i$  ( $i=1,2$  e  $3$ ) são constantes que dependem do processo estudado. A umidade de equilíbrio ( $M_{eq}$ ) é dada pela equação de Halsey modificada (OSBORN *et al.*, 1989), com parâmetros ( $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) obtidos a partir dos dados experimentais para o material particulado utilizado, onde  $UR$  é a umidade relativa.

$$M_{eq} = \left(\frac{-\exp(-A_1 T_s + A_2)}{\ln(UR)}\right)^{A_3} \quad (2.19)$$

Já os coeficientes de transferência volumétricos e de perda de calor são dados pelas seguintes equações (ARRUDA, 2008):

$$U_a = B_1 (G_f)^{B_2} (G_s)^{B_3} \quad (2.20)$$

$$U_p = B_4 (G_f)^{B_5} \quad (2.21)$$

$$G_f = \frac{v_{ar} A P M M_{ar}}{R(T_{f0} + 273,15)(1 + W_0)} \quad (2.22)$$

$$G_s = \frac{G_{SU}}{(1 + M_0)} \quad (2.23)$$

Nas equações (2.20) e (2.21),  $B_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$  e  $5$ ) são constantes do processo estudado,  $v_{ar}$  é a velocidade do fluido,  $A$  é área da seção transversal do secador,  $P$  é a pressão do processo,  $MM_{ar}$  é a massa molecular do ar,  $R$  é a constante dos gases ideais e  $G_{SU}$  é a vazão de sólidos úmido.

A carga total do secador é dada por:

$$H = \frac{G_s TRZ}{1 + M_0} \quad (2.24)$$

O calor latente é dado por uma aproximação polinomial (ARRUDA, 2008):

$$\lambda = D_1 + D_2 T_S + D_3 T_S^2 + D_4 T_S^3 \quad (2.25)$$

em que  $D_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) são parâmetros que devem ser determinados a partir de pontos experimentais para o material estudado. Já o calor perdido é dado pela seguinte correlação (DOUGLAS *et al.*, 1993):

$$Q_p = U_p \pi D L (T_f - T_{amb}) \quad (2.26)$$

Gili *et al.* (2018) propuseram a modelagem matemática da transferência de calor e massa a partir de um estudo experimental de secagem de germe de trigo por fluidização, no qual foi o coeficiente de transferência de calor. Para o balanço de massa foi considerado o seguinte modelo:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 W_l}{\partial l^2} \right) \quad (2.27)$$

em que  $D_{eff}$  é o coeficiente de difusão da água em relação a matéria seca,  $W_l$  é o teor de umidade local do componente de difusão (kg água/ kg matéria seca),  $t$  é o tempo (s) e  $l$  é a coordenada espacial.

Para resolver a equação diferencial (Eq. 2.27) foram adotadas as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$t = 0 \quad W_l = W_0 \quad 0 \leq l \leq L_0 \quad (2.28)$$

$$l = 0 \quad \frac{\partial W_l}{\partial l} = 0 \quad t > 0 \quad (2.29)$$

$$-\rho_{s0} D_{eff} \frac{\partial W_l}{\partial l} = k_p (p_{vs} - p_{va}) \quad (2.30)$$

em que  $L_0$  é a metade da espessura da partícula,  $W_0$  é o teor de umidade inicial,  $\rho_{s0}$  é a densidade inicial de matéria seca ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $p_{vs}$  é pressão de vapor de água na superfície e  $p_{va}$  é a pressão parcial de vapor no ar, ambas dadas em Pascal. Quando o controle interno da transferência de massa é dominante, a Equação 2.30 pode ser reduzida à:

$$l = L_0 \quad W_s = W_e \quad t > 0 \quad (2.31)$$

Para esta condição, o modelo pode ser integrado e a solução analítica para descrever o teor médio de umidade em função do tempo é dada por:

$$MR = \frac{W_m - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} \left( \frac{D_{eff} t}{L_0^2} \right) \right] \quad (2.32)$$

O balanço energético para o processo em questão é descrito pela seguinte equação diferencial:

$$\rho_s C_p \frac{dT}{dt} = h_T A_v (T_a - T) - \rho_s \left( -\frac{dW_m}{dt} \right) L_g \quad (2.33)$$

em que  $A_v$  é a superfície da partícula,  $T_a$  é a temperatura do ar de secagem e  $(-dW_m/dt)$  é a taxa de secagem baseada no teor médio de umidade.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor efetivo, foi proposto um problema inverso que consistia da minimização do funcional  $SSR$  e que relaciona as temperaturas experimental e predita, conforme a seguinte relação:

$$SSR = \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_i)^2 \quad (2.34)$$

Com isso, Gili *et al.* (2018) concluíram que a aproximação da solução analítica em curtos intervalos de tempo foi inadequada para a descrição do processo de secagem em altas temperaturas, mas foi considerada adequada para descrever os perfis de temperaturas do ar. Além disso, os coeficientes de difusão estimados estavam dentro da faixa esperada para difusão da água em sólidos, bem como os valores para a energia de ativação estavam em concordância com os esperados no que tange a secagem de alimentos.

Musielak (2018) propôs um novo modelo matemático para descrever o transporte de massa e calor durante o processo de secagem de grãos que encolhem em um equipamento de ultrassom de leito fixo. Este modelo era composto por uma relação para a análise do

encolhimento de volume linear dos grãos, da porosidade do leito, da incompressibilidade do ar e de pequenas condições de troca de calor entre os grãos e o ar, dados, respectivamente como segue:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = G \quad (2.35)$$

$$y^T = [X, Y, T_s, T_a] \quad (2.36)$$

$$F^T = [0, vY, 0, vT_a] \quad (2.37)$$

$$G = \left[ \begin{array}{c} -\frac{a}{(1-\varepsilon)\rho_s}j \\ \frac{a}{\varepsilon\rho_a} \\ \frac{a}{(1-\varepsilon)}q - (l + c_m T_s) \frac{a}{(1-\varepsilon)}j + Q \\ \frac{\rho_s(c_s + Xc_m)}{aq} \\ \frac{a}{\varepsilon\rho_a(c_{pa} + Yc_{pv})} \end{array} \right] \quad (2.38)$$

onde  $a$  é a área superficial do material,  $\varepsilon$  é a porosidade do leito,  $\rho_s$  a densidade parcial do sólido,  $\rho_a$  densidade do ar de secagem,  $j$  é o fluxo de massa entre os grãos e o vapor,  $q$  é o fluxo de calor convectivo, que descreve a troca de calor entre o ar e os grãos,  $c_s$  é o calor específico do sólido e  $c_m$  o calor específicos da umidade, respectivamente,  $c_{pa}$  é o calor específico do ar e  $c_{pv}$  do vapor,  $T_s$  é a temperatura da fração de sólidos,  $l$  é o calor latente de evaporação e  $Q$  é o calor volumétrico.

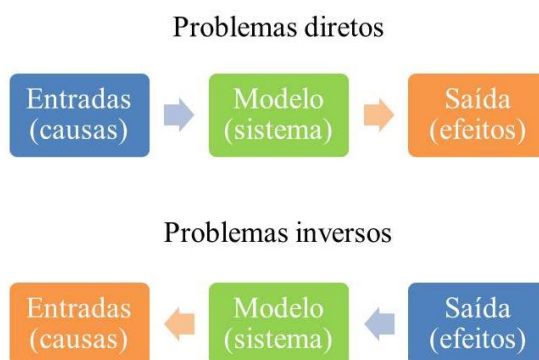
Com este modelo, foram realizadas simulações numéricas da secagem em leito fixo, sendo que os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, tendo em vista sua proximidade com os reportados pela literatura. Estes indicaram a influência do aumento da temperatura da secagem na taxa de secagem, além de evidenciar o pequeno efeito da absorção de energia por ultrassom nos perfis obtidos. A partir da análise do encolhimento do grão foi possível constatar a influência deste efeito na taxa de secagem, conforme também observado por Musielak (2018).

Para a determinação dos parâmetros que caracterizam estes modelos, comumente utiliza-se a formulação e a resolução de um problema inverso (problema específico de otimização que consiste na obtenção dos melhores parâmetros (de um modelo proposto) que minimizam o somatório dos desvios quadráticos referentes aos valores calculados pelo modelo de predição e os pontos experimentais).

## 2.5 Problemas Diretos e Inversos

Em linhas gerais, os problemas formulados nas diferentes áreas da ciência podem ser classificados em dois grandes grupos, a saber, os diretos e os inversos. A distinção entre o que seja um problema direto ou inverso está ligada à interpretação das entradas e saídas do sistema em estudo, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Problemas diretos e inversos.



Fonte: Adaptado de Silva-Neto e Moura-Neto (2005).

Os problemas diretos são aqueles que, conhecido uma determinada entrada, o seu efeito (saída) é obtido a partir da resolução do modelo que o representa. Como exemplo, conhecendo-se o modelo e os parâmetros de um secador, pode-se obter os perfis de umidade e temperatura. Já no problema inverso deseja-se determinar características do modelo e/ou os parâmetros do sistema, uma vez conhecidas a entrada e a saída do processo em análise. Como exemplo pode-se citar a determinação dos parâmetros das equações constitutivas no processo de secagem considerando os dados experimentais obtidos.

A caracterização dos problemas inversos é de grande importância, visto que só é possível simular um determinado modelo considerando diferentes condições de operação, se forem conhecidos o conjunto de parâmetros que representam a processo físico em análise. No contexto do ajuste de curvas, o problema inverso consiste na determinação dos parâmetros dos modelos de predição (empíricos ou fenomenológicos) via da minimização de um funcional definido pelo somatório das diferenças quadráticas entre os valores calculados usando estes modelos e os pontos experimentais. Cabe ressaltar que o problema inverso também pode ser formulado para a determinação de condições de contorno, geometrias, identificação de termos fonte, entre outras aplicações.

## 2.6 O Problema de Otimização

Um problema inverso é um caso particular de um problema de otimização. Assim, após a formulação de um problema inverso faz-se necessário a aplicação de ferramentas específicas para a resolução do mesmo. Para essa finalidade, nesta seção primeiramente será apresentado o problema geral (algébrico) de otimização e em seguida serão descrito as principais abordagens para a resolução do mesmo, com destaque para o algoritmo de ED.

Conceitualmente, otimizar significa empregar um conjunto de ferramentas matemáticas para melhorar algo que já existe, mas sem ter que testar todas as possibilidades existentes (SARAMAGO, 2003). Do ponto de vista matemático, o problema de otimização apresenta uma função objetivo, o vetor de variáveis de projeto ou de busca ou de decisão (variáveis independentes que devem ser determinadas para obter o melhor valor da função objetivo), os limites laterais (domínio do problema de interesse), e restrições (relações entre as variáveis e que definem o espaço de projeto). O problema de otimização algébrico pode ser definido matematicamente como (VANDERPLAATS, 1999; SARAMAGO, 2003):

$$\min (\text{ou } \max) FO(x), \quad X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2.39)$$

sujeito à:

$$p_L(x) = 0, \quad L = 1, 2, \dots, k \quad (2.40)$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2.41)$$

$$x_i^L \leq x \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.42)$$

em que  $FO$  representa a função objetivo (em que deseja-se maximizar ou minimizar),  $g$  e  $p$  são vetores que representam as restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente, e  $X^L$  e  $X^U$  os limites inferior e superior do vetor de variáveis de projeto  $X$ . Cabe enfatizar que tanto a função objetivo quanto as restrições podem ser funções lineares ou não lineares, implícitas ou explícitas, e as variáveis de projeto podem ser contínuas e/ou inteiras e/ou binárias e/ou discretas.

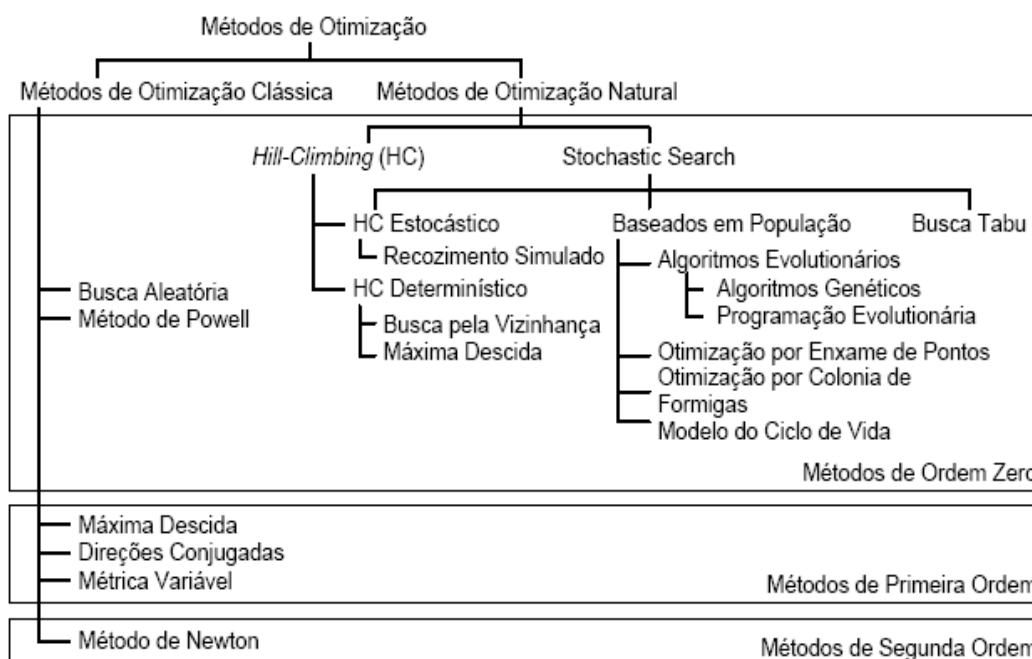
Conforme destacado por Saramago (2003), dentre as vantagens de se otimizar enfatiza-se: *i*) a possibilidade de se trabalhar com um problema com grande quantidade de variáveis e restrições; *ii*) a possibilidade da redução de custos do projeto em análise e *iii*) a diminuição no tempo investido no projeto. Por outro lado, como desvantagens pode-se citar

(SARAMAGO, 2003): *i*) a dificuldade de obter a solução para problemas com variáveis mistas (contínuas, inteiras, discretas e binárias); *ii*) quanto maior a dimensão do problema, maior a dificuldade associada; *iii*) no contexto clássico, a função objetivo e as restrições devem ser contínuas; e *iv*) possibilidade de obtenção de ótimos locais.

Em linhas gerais, os métodos propostos para a resolução dos problemas de otimização podem ser classificados em duas classes: a Determinística (ou Clássica) e a Não-Determinística (Técnicas Inspiradas na Natureza ou Heurística ou Evolutiva ou Natural), conforme observado na Figura 2.7.

Os Métodos Clássicos são fundamentados em princípios do Cálculo Diferencial e Integral, isto é; fazem uso de informações sobre o gradiente da função objetivo e das restrições para a determinação da direção de busca do ótimo. De forma geral, pode-se dizer que estes possuem como grande vantagem, rápida taxa de convergência quando uma “boa” estimativa inicial para o projeto for fornecida, o que implica em um pequeno número de avaliações da função objetivo. Contudo, estes métodos têm uma inabilidade intrínseca em lidar com mínimos locais. Como tais métodos investem todo esforço em um único ponto do espaço de projeto, ao se depararem com mínimos locais não conseguem avançar, convergindo prematuramente para um mínimo local (VANDERPLAATS, 1999). Além disso, estes métodos podem apresentar dificuldades numéricas em decorrência da falta de continuidade das funções, funções não convexas, multimodalidade, existência de ótimos locais, entre outros (SARAMAGO, 2003).

Figura 2.7 - Classificação dos métodos de otimização.



Fonte: Reproduzido de Arruda (2008).

Já as técnicas inspiradas na natureza são aquelas inspiradas em fenômenos naturais, físicos, químicos, biológicos ou em abordagens puramente estruturais (DEB, 2001; LOBATO, 2008). Nessa metodologia, a função objetivo é avaliada várias vezes, sendo possível trabalhar com vários pontos do espaço de projeto ao mesmo tempo (população de pontos candidatos à solução do problema de otimização) em uma iteração (geração), o que naturalmente eleva o custo computacional destes métodos (DEB, 2001; LOBATO, 2008). Entretanto, esta dificuldade é compensada pela menor probabilidade que estes métodos têm de se deixarem prender em mínimos locais, isto é, são reconhecidamente métodos de busca global (DEB, 2001).

Segundo Deb (2001), este tipo de algoritmo pode ser estruturado como segue: *i*) definição dos parâmetros de entrada; *ii*) inicialização, de forma aleatória, da população de soluções; *iii*) avaliação da função objetivo; *iv*) seleção dos indivíduos mais aptos de acordo com uma estratégia proposta para essa finalidade; *v*) aplicação de operadores para recombinação e mutação (geração de novos candidatos em potencial a solução do problema de otimização); *vi*) repetição dos passos *iii* a *v* até que um determinado critério de parada seja satisfeita.

A seguir será apresentada metodologia considerada neste trabalho como ferramenta de otimização, a saber, o algoritmo de ED.

## 2.7 Algoritmo de Evolução Diferencial

O algoritmo de ED é uma estratégia de otimização baseada em população proposta por Storn e Price (1995) para resolver problemas de otimização nono-objetivos. Essa estratégia foi originalmente desenvolvida para a determinação dos parâmetros do Polinômio de Chebychev, visto a lenta convergência e dificuldade encontradas por outros métodos de otimização. Aliado a isso, também ressalta-se o interesse dos seus idealizadores em desenvolver uma abordagem que fosse capaz de lidar com problemas reais, e que fosse conceitualmente simples e eficiente (LOBATO *et al.*, 2009; COELHO, 2003).

Conforme descrito por Storn e Price (1995), o algoritmo de ED possui a capacidade de escapar de ótimos locais (característica bem atrativa em termos de problemas de otimização), é fácil de implementar e possui habilidade no tratamento de problemas com diferentes tipos de variáveis (LOBATO *et al.*, 2008; LOBATO *et al.*, 2011; BARBOSA *et al.*, 2018).

Devido ao sucesso obtido pelo algoritmo de ED na determinação dos parâmetros do Polinômio de Chebychev, vários pesquisadores começaram a empregar essa estratégia em outras aplicações.

Atualmente encontramos aplicações da técnica de evolução diferencial nas mais diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, estudos de cinética de secagem de alimentos (BARBOSA *et al.*, 2018; LOBATO *et al.*, 2017), determinação de equações de chuvas intensas (GOMES e VARGAS JÚNIOR, 2018), identificação de danos estruturais (RANGEL *et al.*, 2016), problemas inversos em transferência radiativa (LOBATO *et al.*, 2011; LOBATO *et al.*, 2009), estimação de parâmetros cinéticos em um secador rotatório (LOBATO *et al.*, 2008), estimação de parâmetros de um filtro adaptativo utilizado como ferramenta para controle de qualidade em linhas de montagem de câmbios automotivos (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2008) entre várias outras aplicações encontradas na literatura.

De forma geral, o algoritmo de ED realiza a atualização de cada indivíduo via aplicação de operações vetoriais, em que a diferença ponderada entre dois indivíduos da população é adicionada a um terceiro indivíduo (da mesma população). Após a geração deste indivíduo, este é avaliado conforme a função objetivo, podendo substituir indivíduos mal sucedidos nas próximas gerações.

A inicialização da população neste algoritmo é feita pela geração de indivíduos de forma aleatória, assim como acontece em outros métodos evolutivos, utilizando-se da

definição do tamanho da população e do domínio de cada variável de projeto. Em seguida, números aleatórios são gerados e aplicados a este intervalo, obtendo-se assim um vetor de indivíduos da população, conforme a equação 2.43 (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011):

$$x_{i,j} = x_{i,L} + rand(x_{i,U} - x_{i,L}) \quad (2.43)$$

em que  $x_{i,L}$  e  $x_{i,U}$  são, respectivamente, os limites inferiores e superiores das  $j$ -ésimas variáveis de projeto e  $rand$  é um gerador de números aleatórios entre 0 e 1.

Após a inicialização, o algoritmo de ED realiza as operações de mutação e recombinação para gerar uma nova população com  $NP$  indivíduos. O operador de mutação adiciona um vetor de referência, a um vetor diferença obtido a partir de outros dois vetores, todos os vetores escolhidos de forma aleatória na população. Esta combinação para geração de um novo vetor é conforme equação abaixo (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011), onde  $F$  representa um escalar, que controla a magnitude do vetor diferença obtido em cada operação, chamado taxa de perturbação.

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.44)$$

Os vetores  $x_{r0,g}$ ,  $x_{r1,g}$  e  $x_{r2,g}$  são comumente escolhidos de forma aleatória na população, porém outras estratégias para a representação do mecanismo de mutação podem ser utilizadas (Tabela 2.2).

Nesta tabela é utilizada a convenção  $DE/X/Y/Z$ , em que  $X$  representa o vetor que será perturbado (*best* ou *rand*). Optando-se por *rand*, o vetor a ser perturbado será escolhido de forma aleatória dentro da população.  $Y$  indica o número de pares de vetores que são considerados durante a perturbação e  $Z$  é o tipo de cruzamento usado para a geração do candidato, *bin* quando binomial e *exp* quando exponencial. Além destes,  $x_{best}$  é o melhor indivíduo da população e  $x_{old}$  é um indivíduo escolhido aleatoriamente na população, ambos na geração anterior (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011).

Em complemento à operação de mutação, este algoritmo utiliza o operador de cruzamento. Nesta operação, o vetor  $v_{i,g}$  gerado anteriormente pode ou não ser aceito na próxima geração seguindo a condição descrita pela Equação 2.45 em que  $CR$  é a probabilidade de cruzamento. Este parâmetro, que deve ser definido inicialmente pelo usuário, controla as informações dos pais que serão transmitidas aos filhos. Para determinar qual a contribuição de um determinado vetor gerado, o cruzamento compara  $CR$  com o gerador de números aleatórios  $rand$ . Se o número randômico gerado é menor ou igual a  $CR$ ,

o vetor  $v_{i,g}$  (com posição  $j_{rand}$ ) é aceito, caso contrário, o vetor  $x_{i,g}$  é mantido na população atual (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011).

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_{i,g} & \text{se } rand \leq CR \text{ ou } j = j_{rand} \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.45)$$

Tabela 2.2 - Representação dos mecanismos de mutação no algoritmo de evolução diferencial

Estratégia	Representação	Mecanismo de Mutação
1	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / best / 1 / exp
2	$x^{j+1} = x_{k_3}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / rand / 1 / exp
3	$x^{j+1} = x_{old}^j + F(x_{best}^j - x_{old}^j) + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / rand-to-best / 2 / exp
4	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j) + F(x_{k_3}^j - x_{k_4}^j)$	DE / best / 2 / exp
5	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j) + F(x_{k_3}^j - x_{k_4}^j)$	DE / rand / 2 / exp
6	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / best / 1 / bin
7	$x^{j+1} = x_3^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / rand / 1 / bin
8	$x^{j+1} = x_{old}^j + F(x_{best}^j - x_{old}^j) + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j)$	DE / rand-to-best / 2 / bin
9	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j) + F(x_{k_3}^j - x_{k_4}^j)$	DE / best / 2 / bin
10	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{k_1}^j - x_{k_2}^j) + F(x_{k_3}^j - x_{k_4}^j)$	DE / rand / 2 / bin

Fonte: Adaptado de LOBATO *et al.* (2011).

O operador de seleção procede ao processo de atualização da população até que um critério de parada determinado pelo usuário seja atingido. Se o vetor  $u_{i,g}$  tem melhor valor de função objetivo  $f$  em relação ao vetor  $x_{i,g}$ , ele o substitui na próxima geração. Caso contrário,  $x_{i,g}$  permanece na população por mais uma geração, como mostrado a seguir, sendo esse processo repetido até que se satisfaça o critério de parada (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011).

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{se } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.46)$$

Com relação à escolha dos parâmetros deste algoritmo, Storn e Price (1995) aconselham o uso dos seguintes valores: número de indivíduos da população como sendo um valor entre 5 e 10 vezes o número de variáveis de projeto, taxa de perturbação  $F$  entre

0,2 e 2,0 e probabilidade de cruzamento *CR* entre 0,1 e 1,0. Já o número de gerações deve ser avaliado para cada estudo de caso. O critério de parada tem busca a convergência do algoritmo, de forma a reduzir o esforço computacional. Normalmente, o critério de parada em abordagens evolutivas é o número máximo de gerações, porém, podem também ser utilizadas outras informações como o tempo de processamento, número de avaliações da função objetivo, monitoramento do usuário ou até mesmo o uso de um valor de referência (LOBATO *et al.*, 2009; LOBATO *et al.*, 2011).

No presente capítulo foi realizado uma breve revisão sobre o estado da arte no que tange as características da fruta de interesse, do processo de secagem, sobre a produção de farinha de frutas, a cinética de secagem e a modelagem fenomenológica, bem como a distinção entre problemas diretos e inversos, a concepção conceitual do problema de otimização e o algoritmo de ED. No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o levantamento dos pontos experimentais para a cinética de secagem e a modelagem fenomenológica, bem como para a caracterização da farinha da casca da guapeva.

### Capítulo 3

---

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

Este capítulo tem por objetivo descrever os procedimentos adotados para a obtenção dos pontos experimentais considerados para a formulação do problema inverso proposto para a determinação dos parâmetros de alguns modelos cinéticos para a guapeva e para a determinação dos parâmetros que caracterizam o modelo fenomenológico, a saber, a difusividade efetiva e a condutividade térmica. Para essa finalidade considera-se um secador do tipo túnel para a realização dos experimentos. Além disso, também apresenta-se as características básicas dos procedimentos considerados para a caracterização da farinha da casca da guapeva em um secador do tipo estufa.

### 3.1 Preparação das Frutas

A matéria prima utilizada foi obtida no município de Morrinhos – GO, localizado na latitude 17°43' 52" Sul e longitude 49° 05' 58" oeste, altitude: 771 m, clima tropical, do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen-Geiger; caracterizado por uma estação chuvosa, de outubro a abril, e uma estação seca, de maio a setembro, sendo a temperatura média anual entre 23 e 25°C. As frutas utilizadas foram colhidas em ponto ótimo de maturação, para uma melhor qualidade do produto final. Para a realização dos experimentos e posterior produção da farinha de casca de guapeva optou-se por utilizar apenas frutas frescas, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 - Amostras de guapeva consideradas no processo de secagem.



Fonte: o autor.

A composição das guapevas utilizadas foi de aproximadamente, em massa, 64% de casca, 24% de polpa e 12% de semente, evidenciando que a maior parte do fruto é descartada, sendo a farinha, portanto, uma boa alternativa ao desperdício e aproveitamento do potencial nutricional deste resíduo.

Em seguida foi realizada a seleção das mesmas com o objetivo de retirar aquelas com injúrias, com visível contaminação microbiana e deformações físicas. Posteriormente, os frutos foram submetidos à lavagem com detergente neutro para eliminação de sujidades físicas e sanitização com solução de hipoclorito de sódio com concentração de  $100 \text{ mg/L}^{-1}$  durante 10 minutos para inativação microbiana.

Após a sanitização os frutos inteiros foram branqueados em vapor fluente por 5 minutos. O processo de branqueamento é uma operação complementar para preparo de frutas para secagem, auxiliando na melhoria da qualidade do produto final, pois fixa a cor, textura e valor nutricional do mesmo, além da inativação de enzimas e remoção de gases (OETTERER, 2006).

A preparação das amostras para o processo de secagem consistiu em dividir a guapeva ao meio e retirar as sementes e a polpa, visto que o objetivo inicial é utilizar o resíduo do consumo *in natura* da fruta ou do processamento da polpa. Portanto, as cascas foram fatiadas para aumentar a superfície de contato com o ar de secagem, conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Amostras de casca de guapeva prontas para a secagem.

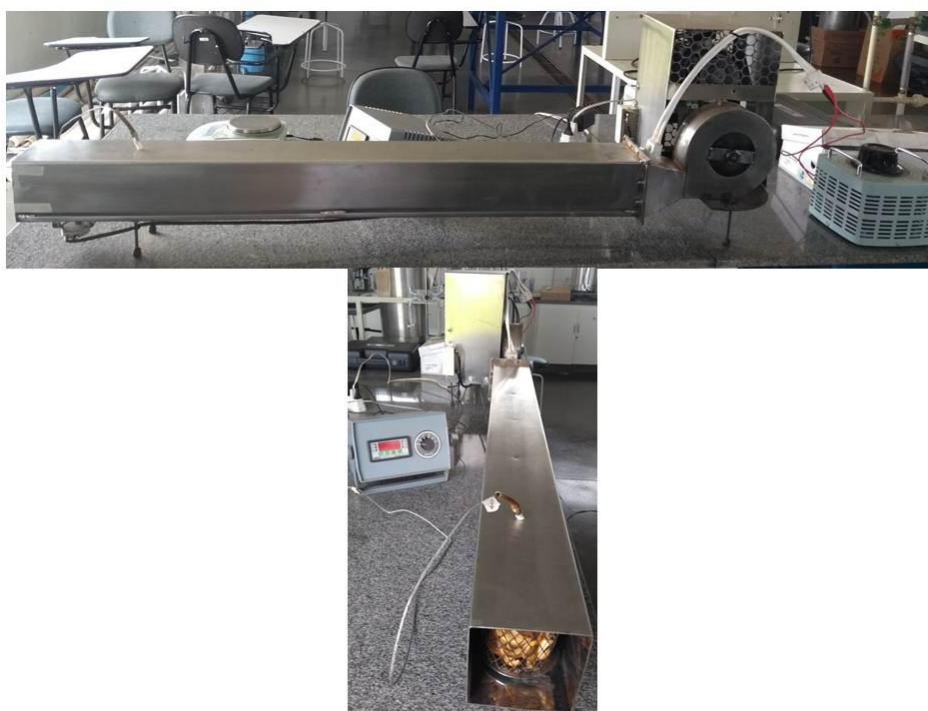


Fonte: o autor.

## 3.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, em Uberaba – MG. A secagem foi realizada em secador túnel, apresentado na Figura 3.3. Este equipamento é composto por um soprador do tipo ventilador radial e um aquecedor elétrico equipado com variador de voltagem.

Figura 3.3 - Secador do tipo túnel utilizado no procedimento experimental.



Fonte: o autor.

Para a realização dos experimentos foi elaborado um planejamento do tipo  $3^k$  (Box *et al.*, 1978), de modo que foram estudadas secagens em que a temperatura do ar foi ajustada em 40, 52 e 65°C e a velocidade do ar, ajustada com o auxílio de um anemômetro de fio quente em 2; 3,5 e 5 m/s. As temperaturas foram definidas de forma a manter uma faixa de temperatura de segurança que previna a degradação de nutrientes e características sensoriais da fruta. Durante o processo de secagem, que durou 200 minutos, foram realizadas pesagens periódicas para acompanhamento da variação do peso da amostra. Ao final, a análise de umidade do produto seco foi realizada em estufa a 105°C. Neste caso, a partir da variação de cada uma das condições de entrada, a distribuição de umidade em função do tempo foi obtida. A Tabela 3.3 apresenta os experimentos realizados com o planejamento proposto.

Tabela 3.3 - Planejamento de experimentos para a secagem da guapeva.

Experimento	Velocidade do ar (m/s)	Temperatura do ar (°C)
1	2,0	40
2	3,5	40
3	5,0	40
4	2,0	52
5	3,5	52
6	5,0	52
7	2,0	65
8	3,5	65
9	5,0	65

Fonte: o autor.

### 3.3 Obtenção e Caracterização da Farinha de Casca de Guapeva

Para a produção da farinha de casca de guapeva o preparo da matéria prima foi análogo ao procedimento descrito no item 3.1. As fatias de casca de guapeva foram dispostas em bandejas teladas (Figura 3.4) em secador do tipo estufa a 65°C por 12 horas. Ao fim do processo de secagem, as cascas secas e em temperatura ambiente foram trituradas em liquidificador e peneiradas em um equipamento com abertura de 0,6 mm (30 de *mesh*).

Figura 3.4 - Cascas de guapeva para secagem.



Fonte: o autor.

As análises físico-químicas de umidade, cinzas, lipídeos e proteína foram realizadas respectivamente por secagem em estufa, incineração, extração etérea e *micro-kjeldahl*, conforme Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2005), tendo resultados expressos em g/100g. Para quantificação de fibra alimentar utilizou-se o método enzimático gravimétrico, descrito por *Association Official Analytical Chemists* (AOAC, 1995), com resultados expressos em g/100g. O teor de carboidratos foi obtido por diferença, utilizando a Equação 3.1.

$$\% \text{carboidratos} = 100 - (\% \text{umidade} + \% \text{proteínas} + \% \text{lipídeos} + \% \text{cinzas} + \% \text{fibras}) \quad (3.1)$$

Conforme Merrill e Watt (1973), foi estimado o valor calórico total por fatores de conversão, sendo 4 kcal para proteínas, 4 kcal para carboidratos e 9 kcal para lipídeos. Para análise de compostos fenólicos e atividade antioxidante foi utilizado extrato etanólico da amostra. Os compostos fenólicos foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu (ZIELINSKI e KOZLOWSKA, 2000), lido em espectrofotômetro a 700 nm, empregando curva padrão de Ácido Gálico (AG) e resultado expresso em mg de AG/100g de amostra.

As análises de umidade e compostos fenólicos foram realizadas no Laboratório de Análises de Alimentos do Instituto Federal Goiano Campus Morrinhos – GO, já a determinação de fibras alimentares foi feita pelo Laboratório Amazile Biagioni Maia, em Belo Horizonte – MG, as demais foram realizadas no laboratório de controle de qualidade da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia – GO.

### 3.4 Cinética de Secagem

Para a determinação da cinética de secagem da guapeva foi formulado e resolvido um problema inverso considerando o algoritmo de ED. Este problema consiste na determinação do vetor de incógnitas (variáveis de projeto) que minimize o funcional  $FO$  (função objetivo) que representa o somatório quadrático da diferença entre o modelo de predição e os dados experimentais, conforme a seguinte relação:

$$FO \equiv \sum_{i=1}^m \left( M^{\text{exp}}(t_i) - M^{\text{pred}}(t_i) \right)^2 \quad (3.2)$$

em que  $M^{\text{exp}}$  e  $M^{\text{pred}}$  representam o valor da variável dependente (umidade) experimental e predito pelo modelo, respectivamente,  $t$  é o tempo, e  $m$  é o número de pontos experimentais

conhecidos em  $t$ . O número de variáveis de projeto dependem do modelo de predição considerado na análise.

Para mensurar a qualidade do ajuste obtido com cada modelo, será utilizado o coeficiente de determinação ( $\tau^2$ ), definido como (CHAPRA, 2013):

$$\tau^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i^{exp} - y_i^{cal})^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - y_i^{cal})^2} \quad (3.3)$$

em que  $y^{exp}$  e  $y^{cal}$  representam os valores experimentais e calculados e  $\bar{y}$  é a média em relação a variável experimental. Em termos práticos, quanto mais próximo  $\tau^2$  for da unidade, melhor é o ajuste proposto. Este valor representa o percentual dos dados experimentais que pode ser explicado pelo modelo matemático proposto (CHAPRA, 2013).

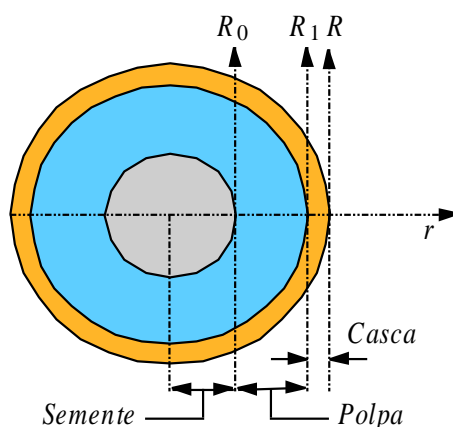
Para a resolução deste problema inverso considera-se:

- O Modelo de Lewis (Equação 2.1); o Modelo de Page (Equação 2.3); o Modelo de Singh (Equação 2.12); o Modelo de Overhults (Equação 2.7) e o Modelo de Henderson (Equação 2.5);
- Foram consideradas três temperaturas ([40 52 65] °C) e três velocidades ( $v$ ) ([2 3,5 5] m/s) para a determinação da cinética de secagem;
- Os parâmetros utilizados no algoritmo de ED foram: população com 25 indivíduos, número de gerações igual a 250, probabilidade de cruzamento e taxa de perturbação iguais a 0,8; respectivamente. Para esse conjunto de parâmetros, são necessárias  $25+25 \times 250$  avaliações da função objetivo em cada execução do algoritmo;
- Foi considerado o seguinte espaço de projeto:  $[-100] \leq [k] \leq [100]$  (para o modelo com um único parâmetro) e  $[-100 -100] \leq [k n] \leq [100 100]$  (para o modelo com dois parâmetros);
- Cada estudo de caso foi simulado vinte vezes considerando diferentes sementes para inicializar o gerador de números aleatórios utilizados no algoritmo. O critério de parada adotado neste trabalho foi o número máximo de gerações, isto é, o procedimento evolutivo é finalizado se esse valor é alcançado.

### 3.5 Modelo Fenomenológico

Para a simulação dos perfis de umidade e temperatura da guapeva, foram consideradas as seguintes hipóteses: *i*) a fruta é perfeitamente esférica (ver a Figura 3.5); *ii*) o calor é predominantemente transferido da casca para a semente; *iii*) a transferência de calor no interior do fruto se dá por condução; *iv*) a transferência de massa e energia ocorre apenas na direção radial e *v*) as propriedades térmicas foram consideradas uniformes ao longo do raio e todo o intervalo de tempo, com exceção da difusividade efetiva e da condutividade térmica.

Figura 3.5 - Representação esquemática das camadas da guapeva.



Fonte: o autor.

Na Figura 3.5, a região da semente é descrita como sendo aquela delimitada entre  $0 \leq r \leq R_0$ . Já as regiões da polpa e da casca referem-se à  $R_0 < r \leq R_1$  e  $R_1 < r \leq R$ , respectivamente.

Matematicamente, o modelo adimensional que representa os balanços de massa e energia sujeito as hipóteses apresentadas para a região da casca da guapeva ( $R_1 < r \leq R$ ) é dado por (SITOMPUL e WIDIASA, 2001):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{D_{eff} t_f}{R^2} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\lambda_{eff} t_f}{\rho C R^2} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.5)$$

em que  $X$  é o teor de umidade,  $T$  é a temperatura,  $t$  é o tempo,  $t_f$  é o tempo total do processo e  $r$  é o raio, todos não-dimensionais,  $R$  é o raio de referência,  $\rho$  é a densidade,  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva da umidade,  $C$  é o calor específico da fruta e  $\lambda_{eff}$  é a condutividade

térmica efetiva. Baseando-se nos experimentos realizados foram definidas as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$X(t = 0, \forall r > 0) = X_0, X(\forall t > 0, r = R_1) = X_l, X(\forall t > 0, r = R) = X_r \quad (3.6)$$

$$T(t = 0, \forall r > 0) = T_0, T(\forall t > 0, r = R_1) = T_l, T(\forall t > 0, r = R) = T_r \quad (3.7)$$

em que  $X_0$  e  $T_0$  representam a umidade e a temperatura iniciais da fruta, respectivamente.  $X_l$  e  $T_l$  são as condições de contorno para a umidade e a temperatura em  $r=R_1$ , respectivamente, e  $X_r$  e  $T_r$  representam as condições de contorno para a umidade e a temperatura em  $r=R$ , respectivamente. Os valores de  $X_l$ ,  $T_l$ ,  $X_r$  e  $T_r$  foram obtidos a partir dos experimentos realizados em  $r=R_1$  e em  $r=R$  e, respectivamente. Para essa finalidade foram considerados polinômios cúbicos e do quinto grau para representar, respectivamente, a umidade e a temperatura nestas posições. Cabe ressaltar que estes modelos foram definidos a partir de testes preliminares, sendo o coeficiente de determinação o critério empregado para esta seleção.

Como observado no modelo apresentado, para que os perfis de umidade e temperatura possam ser obtidos, faz-se necessário a estimação de  $D_{eff}$  e de  $\lambda_{eff}$ , bem como do conhecimento de todas as outras informações. Para essa finalidade, considerou-se o Experimento 10 (ver o Apêndice A). Tal experimento consistiu na inserção de dois termopares posicionados, estrategicamente, na entrecasca (lado direito da camada que delimita a polpa), isto é; para  $r=R_1$  e na casca (lado direito da camada que delimita a casca), isto é; para  $r=R$ , e que objetivou a avaliação da variação de temperatura em função do tempo nestes pontos. Em três intervalos de tempo foi avaliada a variação no teor de umidade tanto da casca, quanto da entrecasca. Considerou-se os raios médios da semente, polpa e casca da guapeva, respectivamente iguais a 3,5 cm, 5,3 cm e 6,3 cm (que na forma adimensional são iguais a 0,5556; 0,8413 e 1, respectivamente). Procedeu-se a secagem da fruta, em secador do tipo túnel, a uma temperatura de 65°C e velocidade do ar de 5,0 m/s<sup>2</sup>. Os resultados obtidos foram considerados para a formulação e resolução do problema inverso usando o algoritmo de Evolução Diferencial (DE).

Matematicamente, o referido problema consiste na determinação das propriedades termofísicas ( $D_{eff} t_f R^{-2}$ ) e ( $\lambda_{eff} t_f (\rho C)^{-1} R^{-2}$ ) de forma a minimizar a diferença entre os valores experimentais e calculados conforme Equação 3.8, em que  $f$  é a função objetivo e  $sim$  e  $exp$  representam os valores simulados e experimentais para a umidade  $X$  e a temperatura  $T$ .

$$f = \frac{1}{\max(X^{exp})^2} \sum_{i=1}^n (X_i^{sim} - X_i^{exp})^2 + \frac{1}{\max(T^{exp})^2} \sum_{j=1}^n (T_j^{sim} - T_j^{exp})^2 \quad (3.8)$$

Para fins de ajuste, foram considerados modelos polinomiais de primeira ordem com interação entre as variáveis independentes para representar os termos que contem a difusividade efetiva e a condutividade térmica efetiva, isto é:

$$\frac{D_{eff}t_f}{R^2} \equiv \beta_1 X + \beta_2 T + \beta_{11} XT + \beta_0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\lambda_{eff}t_f}{\rho C R^2} \equiv \theta_1 X + \theta_2 T + \theta_{11} XT + \theta_0 \quad (3.10)$$

em que  $\beta_i$  ( $i=0, 1, 2$  e  $11$ ) e  $\theta_j$  ( $j=0, 1, 2$  e  $11$ ) são os coeficientes associados a cada um dos termos propostos para representar as propriedades termo-físicas consideradas.

Durante a otimização do processo faz-se necessário a integração do modelo diferencial parcial. Para essa finalidade considera-se o método de Colocação Normal (NC) (VILLADSEN e MICHELSEN, 1978). Tal método é baseado na definição de uma função de aproximação, em geral funções polinomiais, em que a solução numérica é avaliada considerando um número de pontos finitos dentro do domínio de interesse.

Para a resolução deste problema inverso, os seguintes parâmetros no algoritmo DE foram considerados: 15 indivíduos na população, 50 gerações, taxa de perturbação e probabilidade de crossover, ambos iguais a 0,8, e estratégia DE / rand / 1 / bin (Storn e Price, 1995). O algoritmo foi executado 10 vezes para obtenção dos melhores resultados. Vale ressaltar que  $15+15 \times 50$  (765) avaliações da função objetivo foram requeridas. Na solução do problema direto, foram utilizados 10 pontos de colocação. Os dados experimentais considerados para formular o problema inverso usam informações em  $r = (0,8413+1)/2$ , obtidos por simples média aritmética considerando os valores experimentais da umidade e da temperatura em  $r = 0,8413$  e  $r = 1$ , respectivamente.

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 4.1 Cinética de Secagem

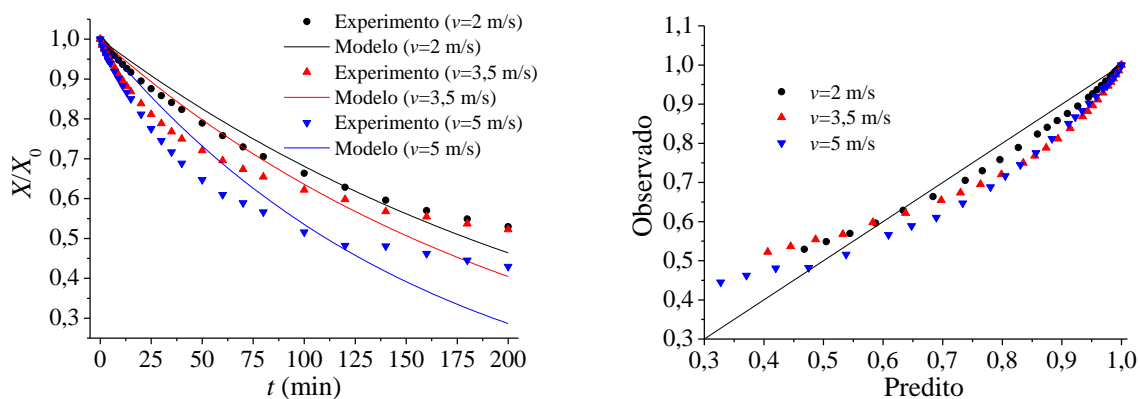
Com base nos resultados experimentais de umidade da guapeva ( $X$ ) em função do tempo ( $t$ ), obtidos de acordo com o planejamento da Tabela 3.3, foram estimados, usando o algoritmo de ED, os parâmetros dos modelos de Lewis (Equação 2.1), Page (Equação 2.3), Singh (Equação 2.12), Overhults (Equação 2.7) e Henderson (Equação 2.5). Esses resultados são apresentados no Apêndice A.

Nas Figuras 4.1 – 4.5 (a) são apresentados os perfis de umidade normalizados em relação ao maior valor experimental observado (umidade inicial  $X_0$ ) em função do tempo para cada modelo de predição. Em linhas gerais, para cada temperatura, observa-se, como esperado, que o aumento da velocidade do ar no processo de secagem implica na redução do tempo necessário para a obtenção da umidade final.

Já nas Figuras 4.1 – 4.15 (b) e (c) são apresentados gráficos auxiliares para uma compreensão da qualidade do ajuste de cada modelo de predição, em complemento à avaliação realizada a partir do coeficiente de determinação ( $\tau^2$ ). Nos gráficos (b) são apresentados os valores observados (obtidos com a realização do procedimento experimental) em comparação aos valores preditos (obtidos com o modelo proposto). Já os gráficos (c) apresentam os valores residuais em comparação aos valores preditos pelos modelos. Os resíduos representam a diferença entre os valores experimentais e os valores preditos pelos modelos considerados.

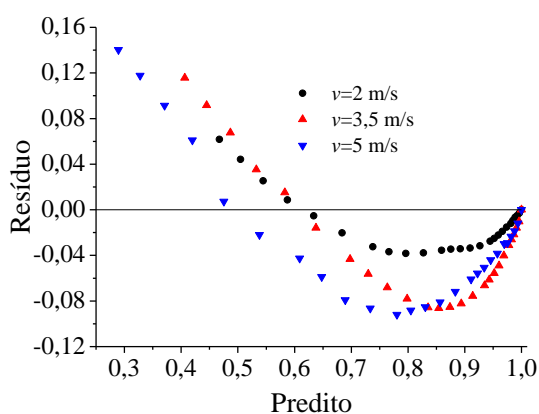
Nos gráficos de observados versus preditos, a reta contínua representa um ajuste eficiente dos dados experimentais em relação ao modelo proposto, isto é; quanto mais próximo os valores estão desta reta, melhor a qualidade do ajuste obtido. Para os gráficos de análise residual, a reta contínua indica resíduo igual a zero, o que seria considerado ideal para os ajustes em questão. Portanto, quanto mais próximos os dados estiverem desta reta, menores são os valores residuais e, conseqüentemente, melhor o ajuste dos dados experimentais aos obtidos com os modelos de predição considerados.

Figura 4.1 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 40°C.



(a) Modelo de Lewis.

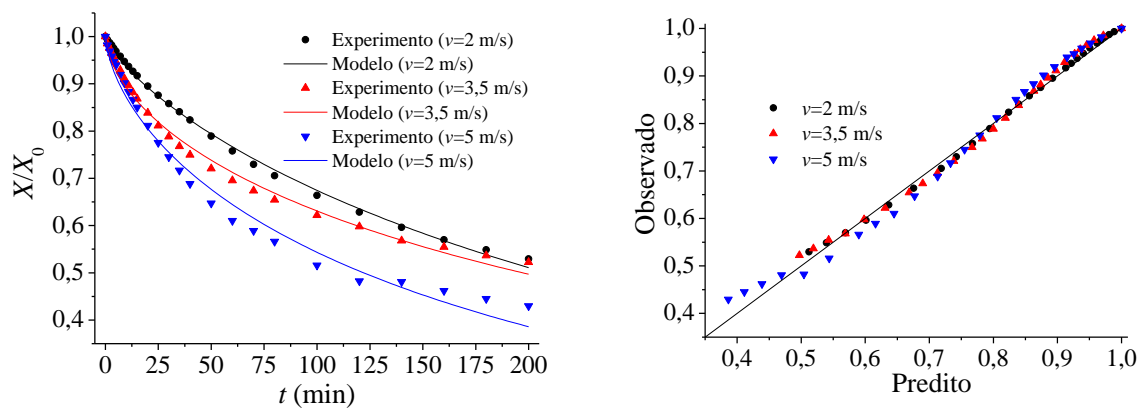
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

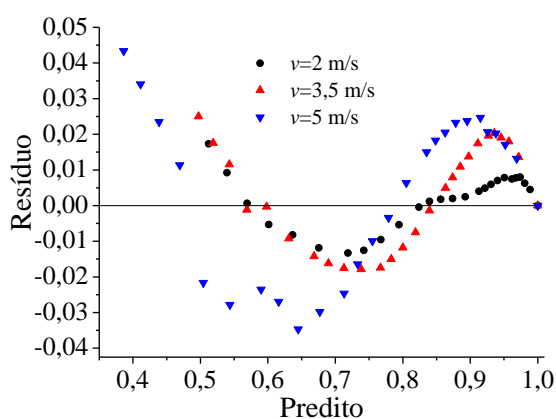
Fonte: O Autor.

Figura 4.2 - Modelo de predição de Page considerando a temperatura de 40°C.



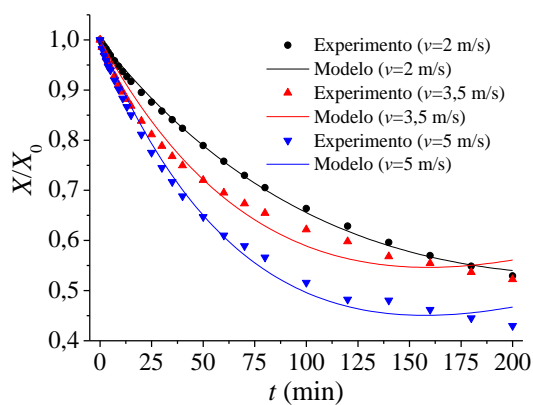
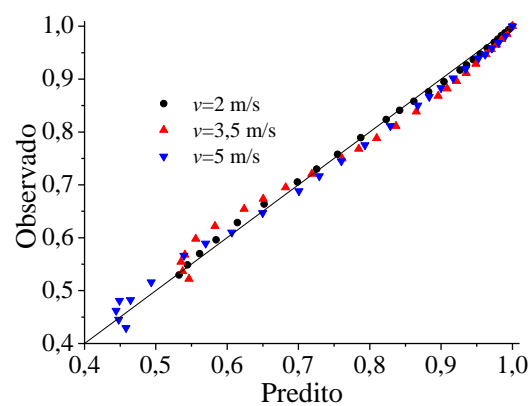
(a) Modelo de Page.

(b) Valores Observados versus Preditos.

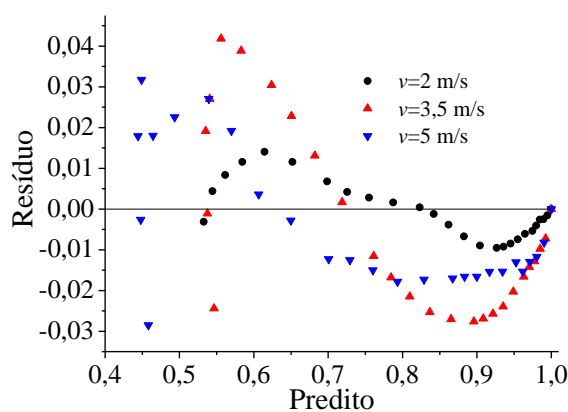


(c) Valores Residuais versus Preditos.

Fonte: O Autor.

Figura 4.3 - Modelo de predição de Singh *et al* considerando a temperatura de 40°C.(a) Modelo de Singh *et al*.

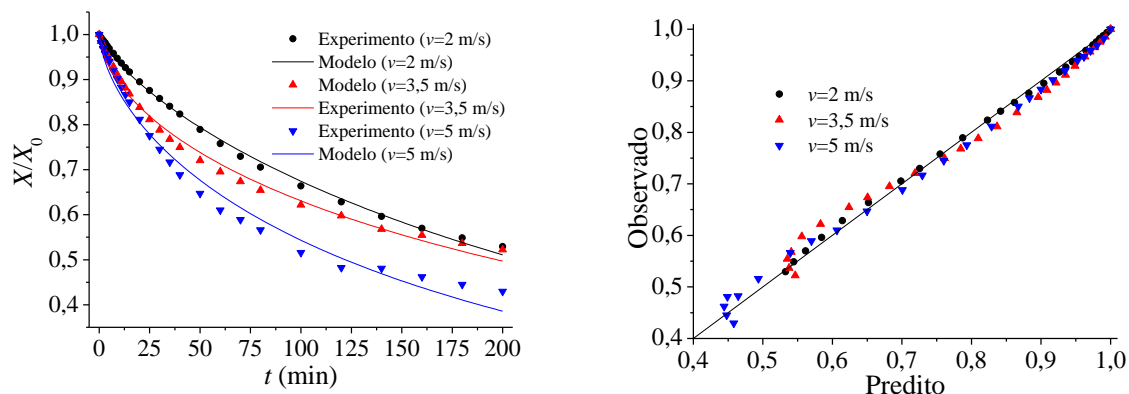
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

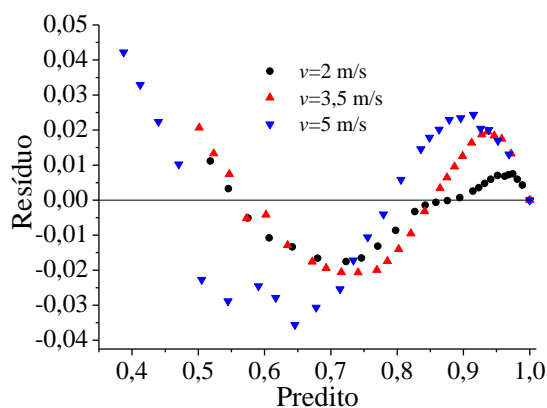
Fonte: O Autor.

Figura 4.4 - Modelo de predição de Overhultz *et al* considerando a temperatura de 40°C.



(a) Modelo de Overhultz *et al*.

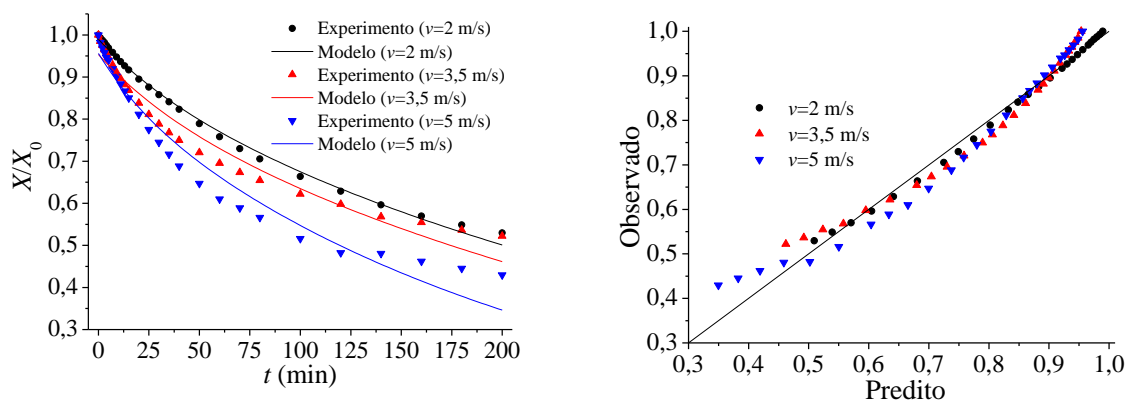
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

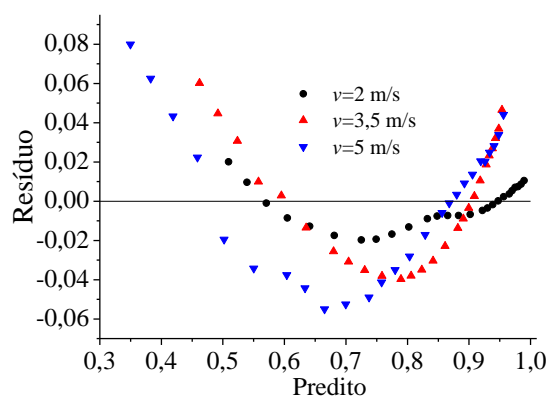
Fonte: O Autor.

Figura 4.5 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 40°C.



(a) Modelo de Henderson e Henderson.

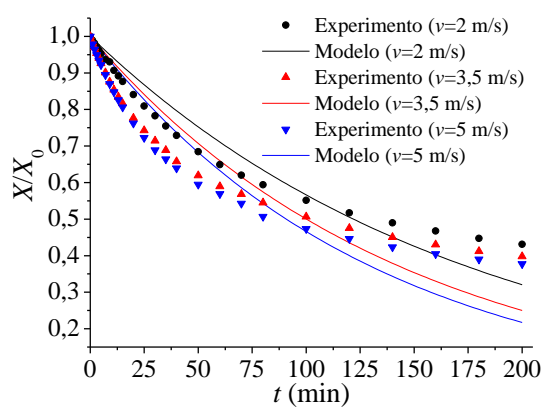
(b) Valores Observados versus Preditos.



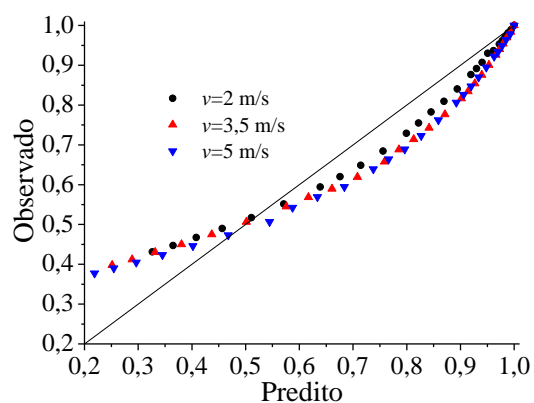
(c) Valores Residuais versus Preditos.

Fonte: O Autor.

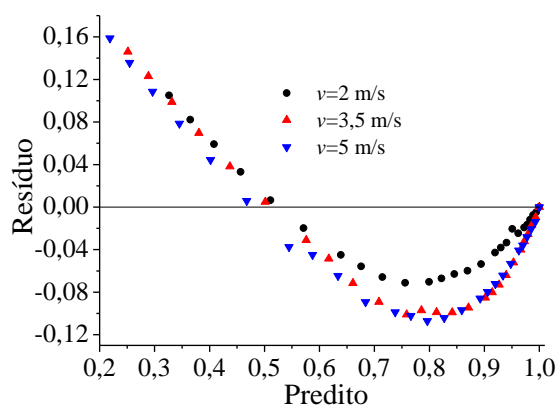
Figura 4.6 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 52°C.



(a) Modelo de Lewis.



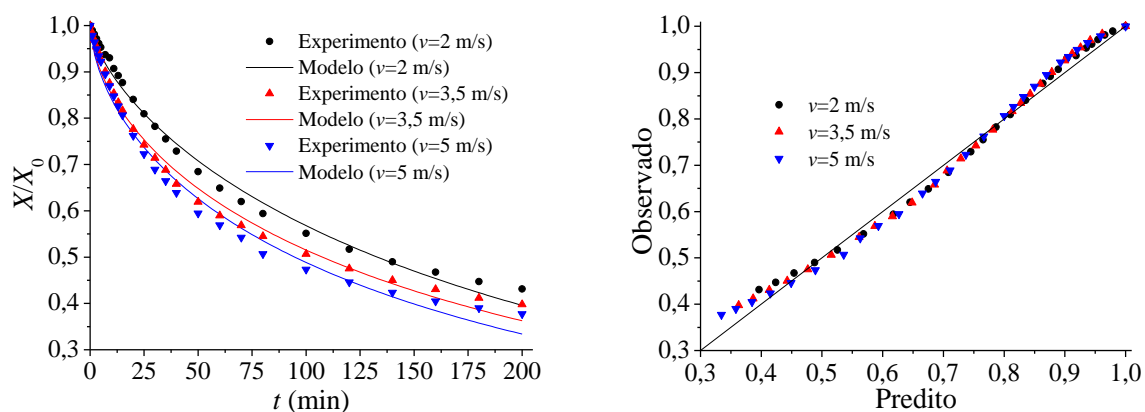
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

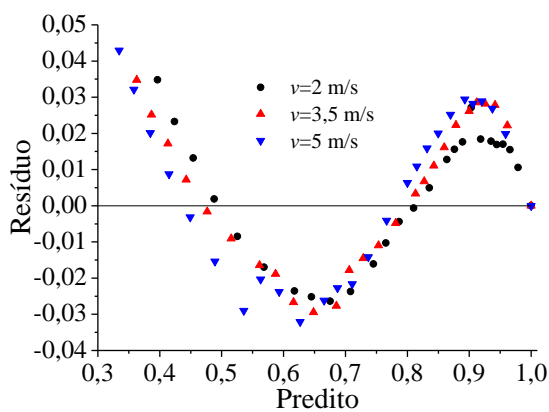
Fonte: O Autor.

Figura 4.7 - Modelo de predição de Page considerando a temperatura de 52°C.



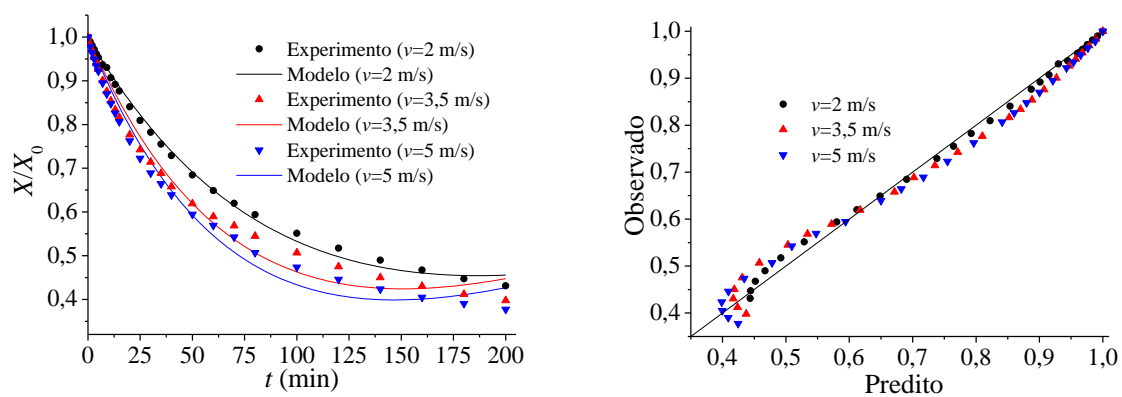
(a) Modelo de Page.

(b) Valores Observados versus Preditos.

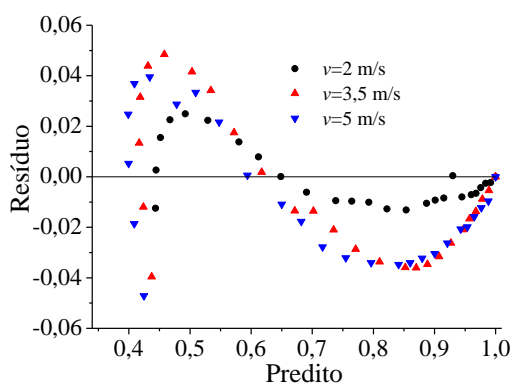


(c) Valores Residuais versus Preditos.

Fonte: O Autor.

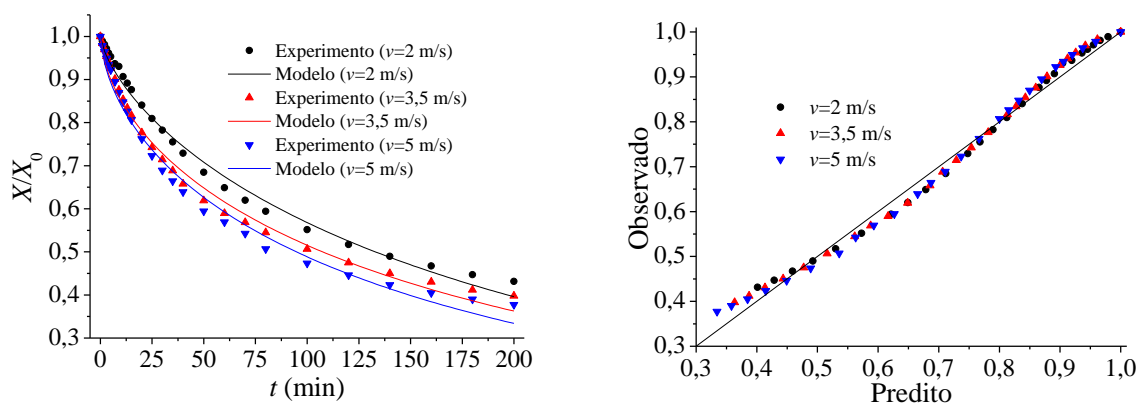
Figura 4.8 - Modelo de predição de Singh *et al* considerando a temperatura de 52°C.(a) Modelo de Singh *et al*.

(b) Valores Observados versus Preditos.



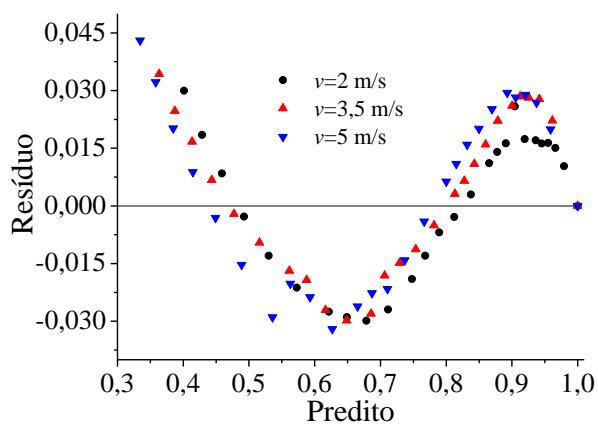
(c) Valores Residuais versus Preditos.  
Fonte: O Autor.

Figura 4.9 - Modelo de predição de Overhultz *et al* a temperatura de 52°C.



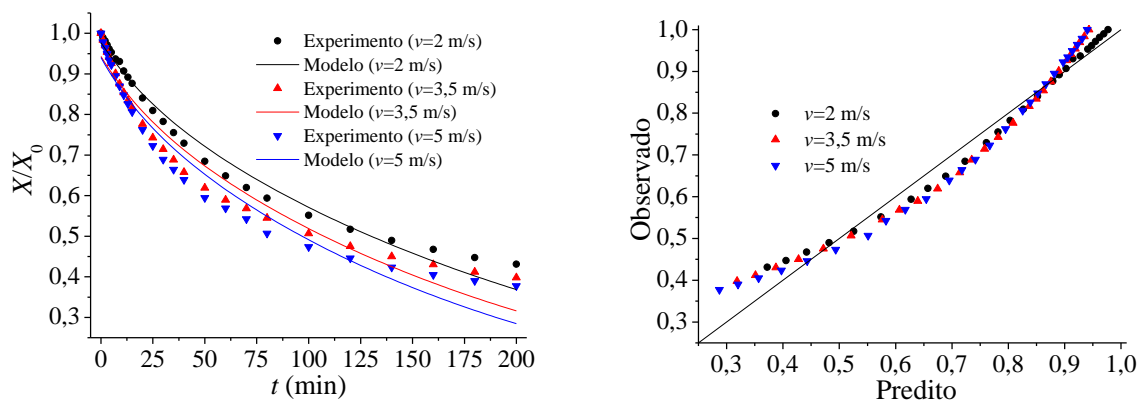
(a) Modelo de Overhultz *et al*.

(b) Valores Observados versus Preditos.



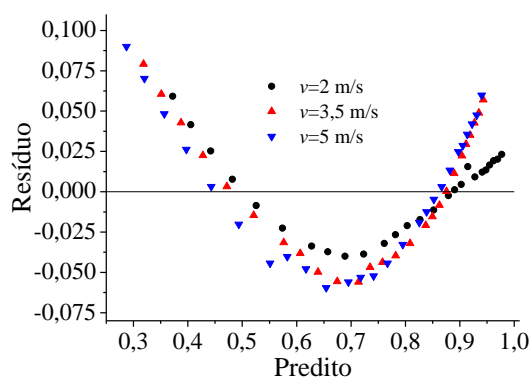
(c) Valores Residuais versus Preditos.  
Fonte: O Autor.

Figura 4.10 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 52°C.



(a) Modelo de Henderson e Henderson.

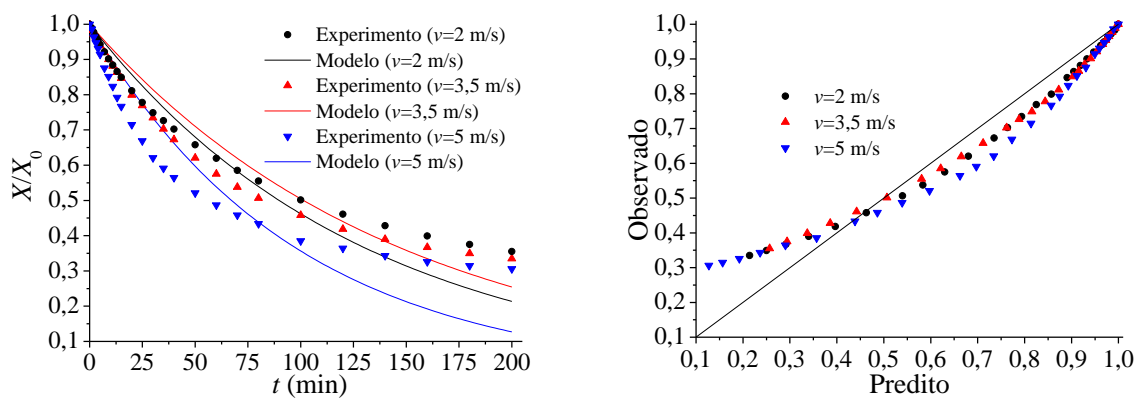
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

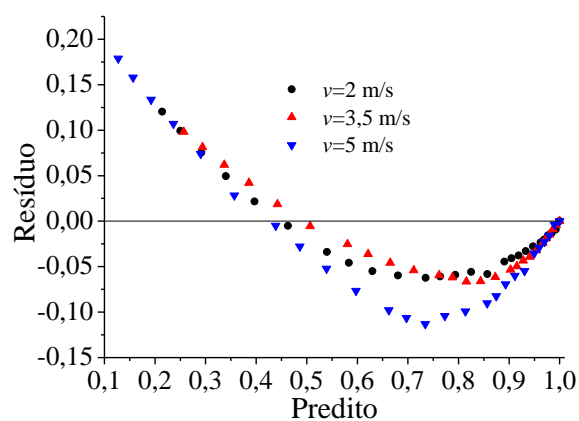
Fonte: O Autor.

Figura 4.11 - Modelo de predição de Lewis considerando a temperatura de 65°C.



(a) Modelo de Lewis.

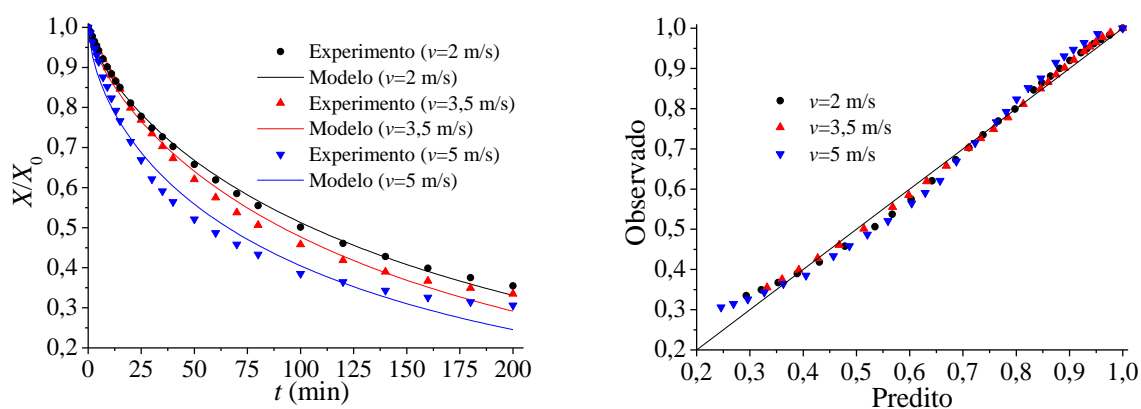
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

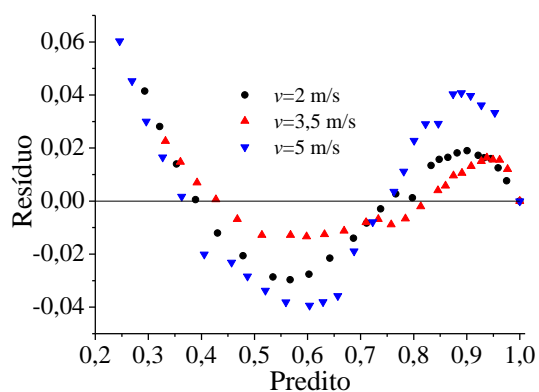
Fonte: O Autor.

Figura 4.12 - Modelo de previsão de Page considerando a temperatura de 65°C.



(a) Modelo de Page.

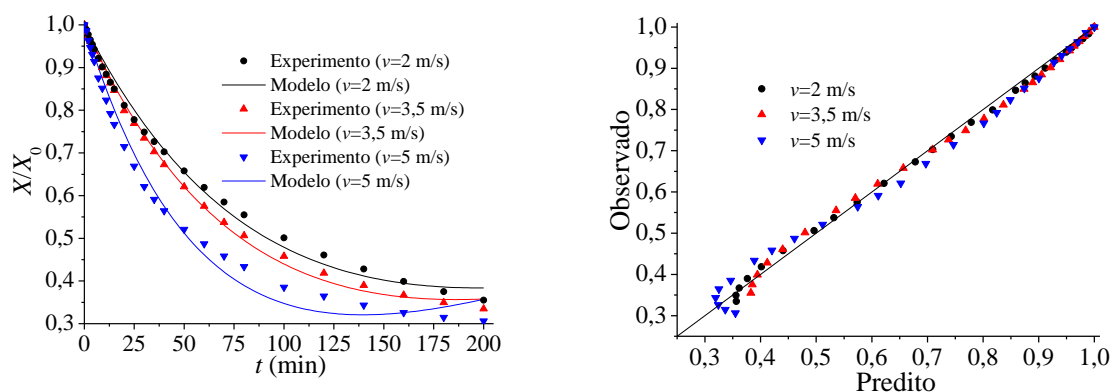
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

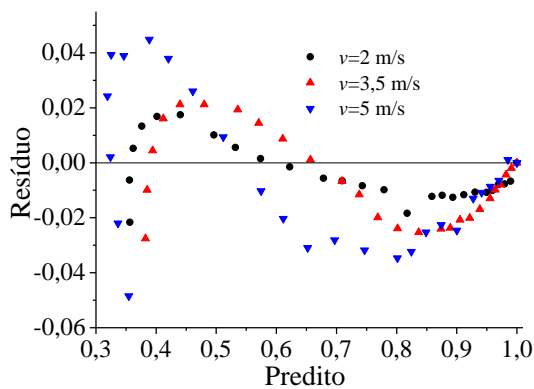
Fonte: O Autor.

Figura 4.13 - Modelo de predição de Singh *et al* considerando a temperatura de 65°C.



(a) Modelo de Singh *et al*.

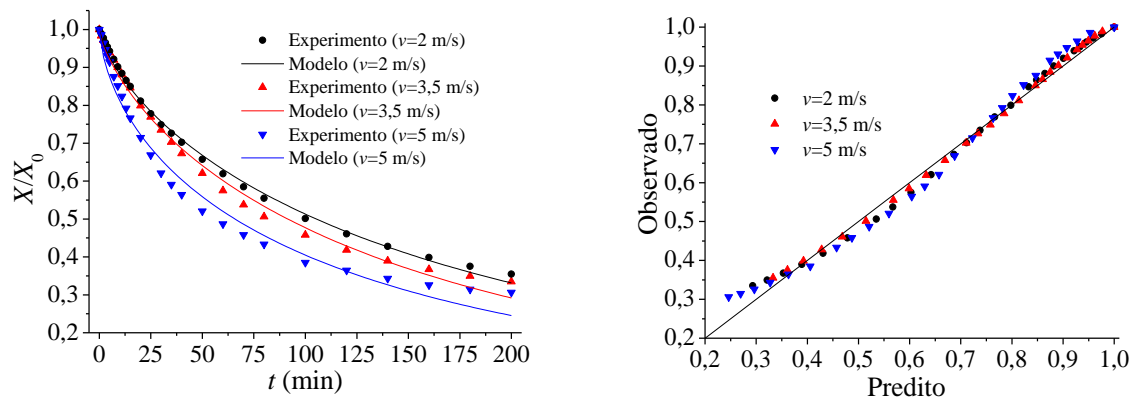
(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

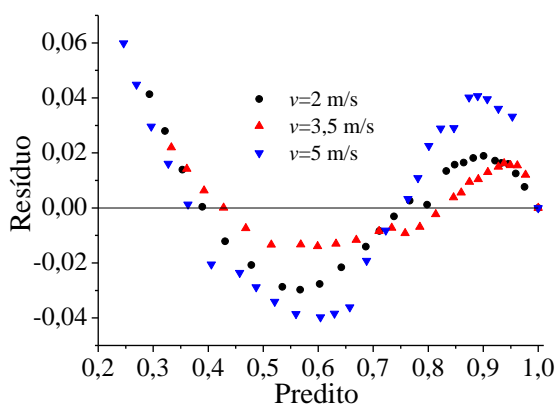
Fonte: O Autor.

Figura 4.14 - Modelo de predição de Overhultz *et al* considerando a temperatura de 65°C.



(a) Modelo de Overhultz *et al*.

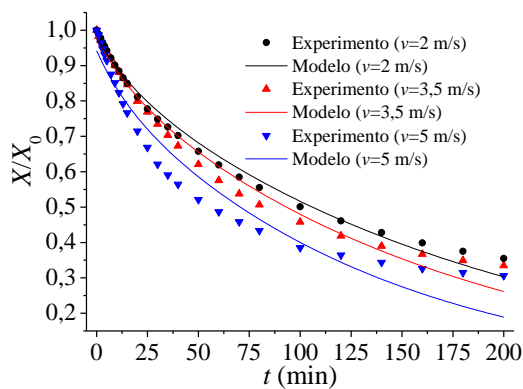
(b) Valores Observados versus Preditos.



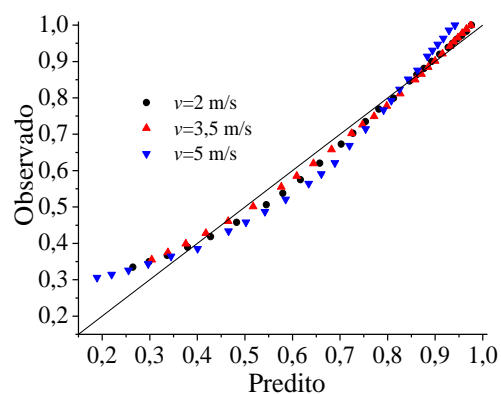
(c) Valores Residuais versus Preditos.

Fonte: O Autor.

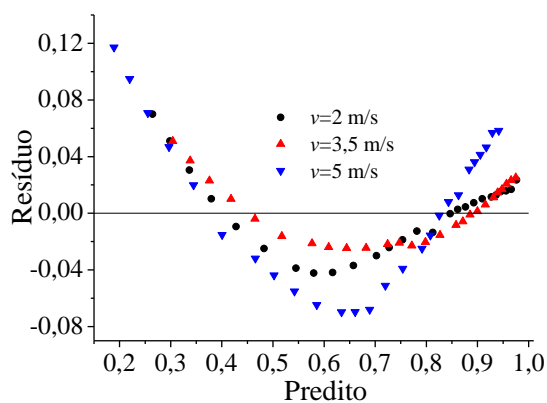
Figura 4.15 - Modelo de predição de Henderson e Henderson considerando a temperatura de 65°C.



(a) Modelo de Henderson e Henderson.



(b) Valores Observados versus Preditos.



(c) Valores Residuais versus Preditos.

Fonte: O Autor.

De forma geral, observa-se nestas figuras uma boa concordância entre os pontos experimentais e os preditos para os modelos que apresentam mais parâmetros. Do ponto de vista matemático, esse resultado já era esperado visto que o aumento do número de variáveis de projeto (parâmetros) na formulação do problema inverso aumenta o número de graus de liberdade, favorecendo desta forma um melhor ajuste. Quanto à análise de resíduos, comumente são esperados pontos aleatórios em torno de zero, porém, para esses modelos cinéticos, foi possível observar tendências diferentes para cada um.

O formato dos gráficos de resíduos está de acordo com a literatura para os referidos modelos ajustados (ARRUDA, 2008). Esses formatos se devem ao fato do modelo tentar descrever ao mesmo tempo as etapas de aquecimento do material úmido, seguido da secagem da umidade superficial, na qual a convecção é predominante, e a etapa de transporte de umidade do interior do material para a sua superfície, sendo esta etapa mais lenta governada pelo processo difusivo.

As Tabelas 4.1 a 4.3 apresentam os parâmetros cinéticos estimados pelo algoritmo de ED para os modelos considerados (Lewis, Page, Singh *et al.*, Overhultz *et al.* e Henderson e Henderson) para o planejamento experimental da Tabela 3.3. Analisando estas tabelas é possível observar que com o algoritmo de ED foi capaz de estimar os parâmetros dos modelos considerados, visto os valores do desvio padrão observados para a função objetivo, as variáveis de projeto (parâmetros do modelo de predição) e o coeficiente de determinação ( $\tau^2$ ). Como os valores dos desvios padrão sempre foram próximos a zero para cada execução, implica que o algoritmo de ED sempre convergiu, independentemente da corrida, para a mesma solução.

A qualidade do ajuste obtido também pode ser mensurado pelo valor de  $\tau^2$ . Os Modelos de Page e de Singh *et al.* foram os que conseguiram os melhores valores para esse parâmetro (sempre acima de 98%). Isto se deve ao fato desses modelos possuírem um grau de liberdade a mais com relação ao Modelo de Lewis, que apresenta apenas uma incógnita. Nesse cenário, a análise das tabelas abaixo demonstrou que os modelos de Page e de Singh *et al.* explicam 98% da variabilidade dos dados pelas referidas equações.

Tabela 4.1 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 40°C.

Equação (2.1)				
<i>Valor médio/ desvio padrão</i>				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	-	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0038/10 <sup>-9</sup>	-	0,0206/10 <sup>-9</sup>	0,9655/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0045/10 <sup>-9</sup>	-	0,0962/10 <sup>-9</sup>	0,8435/10 <sup>-9</sup>
5	0,0062/10 <sup>-9</sup>	-	0,1158/10 <sup>-9</sup>	0,8777/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.3)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0113/10 <sup>-9</sup>	0,7703/10 <sup>-9</sup>	0,0015/10 <sup>-9</sup>	0,9974/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0288/10 <sup>-9</sup>	0,6019/10 <sup>-9</sup>	0,0053/10 <sup>-9</sup>	0,9913/10 <sup>-9</sup>
5	0,0316/10 <sup>-9</sup>	0,6425/10 <sup>-9</sup>	0,0133/10 <sup>-9</sup>	0,9859/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.12)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (h <sup>-1</sup> )	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0065/10 <sup>-9</sup>	-0,0013/10 <sup>-9</sup>	0,0009/10 <sup>-9</sup>	0,9984/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0096/10 <sup>-9</sup>	-0,0020/10 <sup>-9</sup>	0,0119/10 <sup>-9</sup>	0,9804/10 <sup>-9</sup>
5	0,0116/10 <sup>-9</sup>	-0,0018/10 <sup>-9</sup>	0,0071/10 <sup>-9</sup>	0,9925/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.7)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0029/10 <sup>-9</sup>	0,7703/10 <sup>-9</sup>	0,0015/10 <sup>-9</sup>	0,9974/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0027/10 <sup>-9</sup>	0,6019/10 <sup>-9</sup>	0,0053/10 <sup>-9</sup>	0,9913/10 <sup>-9</sup>
5	0,0046/10 <sup>-9</sup>	0,6425/10 <sup>-9</sup>	0,0133/10 <sup>-9</sup>	0,9859/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.5)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0028/10 <sup>-9</sup>	0,8906/10 <sup>-9</sup>	0,0024/10 <sup>-9</sup>	0,9959/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0031/10 <sup>-9</sup>	0,8582/10 <sup>-9</sup>	0,0234/10 <sup>-9</sup>	0,9619/10 <sup>-9</sup>
5	0,0045/10 <sup>-9</sup>	0,8603/10 <sup>-9</sup>	0,0350/10 <sup>-9</sup>	0,9627/10 <sup>-9</sup>

Fonte: o autor.

Tabela 4.2 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 52°C.

Equação (2.1)				
<i>Valor médio/ desvio padrão</i>				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	-	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	*0,0056/10 <sup>-9**</sup>	-	0,0632/10 <sup>-9</sup>	0,9325/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0069/10 <sup>-9</sup>	-	0,1466/10 <sup>-9</sup>	0,8538/10 <sup>-9</sup>
5	0,0076/10 <sup>-9</sup>	-	0,1610/10 <sup>-9</sup>	0,8533/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.3)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0213/10 <sup>-9</sup>	0,7118/10 <sup>-9</sup>	0,0081/10 <sup>-9</sup>	0,9912/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0393/10 <sup>-9</sup>	0,6134/10 <sup>-9</sup>	0,0104/10 <sup>-9</sup>	0,9896/10 <sup>-9</sup>
5	0,0422/10 <sup>-9</sup>	0,6146/10 <sup>-9</sup>	0,0134/10 <sup>-9</sup>	0,9877/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.12)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (h <sup>-1</sup> )	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0097/10 <sup>-9</sup>	-0,0015/10 <sup>-9</sup>	0,0029/10 <sup>-9</sup>	0,9968/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0128/10 <sup>-9</sup>	-0,0018/10 <sup>-9</sup>	0,0191/10 <sup>-9</sup>	0,9808/10 <sup>-9</sup>
5	0,0137/10 <sup>-9</sup>	-0,0018/10 <sup>-9</sup>	0,0182/10 <sup>-9</sup>	0,9834/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.7)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0044/10 <sup>-9</sup>	0,7118/10 <sup>-9</sup>	0,0081/10 <sup>-9</sup>	0,9912/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0051/10 <sup>-9</sup>	0,6134/10 <sup>-9</sup>	0,0104/10 <sup>-9</sup>	0,9896/10 <sup>-9</sup>
5	0,0058/10 <sup>-9</sup>	0,6146/10 <sup>-9</sup>	0,0134/10 <sup>-9</sup>	0,9877/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.5)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0043/10 <sup>-9</sup>	0,8792/10 <sup>-9</sup>	0,0168/10 <sup>-9</sup>	0,9819/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0049/10 <sup>-9</sup>	0,8487/10 <sup>-9</sup>	0,0412/10 <sup>-9</sup>	0,9589/10 <sup>-9</sup>
5	0,0054/10 <sup>-9</sup>	0,8461/10 <sup>-9</sup>	0,0485/10 <sup>-9</sup>	0,9557/10 <sup>-9</sup>

Fonte: o autor

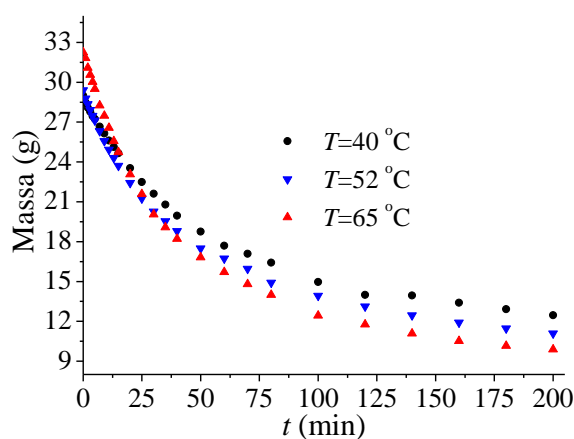
Tabela 4.3 - Parâmetros estimados pelo algoritmo de ED para cada modelo de predição considerando a temperatura de 65°C.

Equação (2.1)				
<i>Valor médio/ desvio padrão</i>				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	-	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0077/10 <sup>-9</sup>	-	0,0687/10 <sup>-9</sup>	0,9472/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0068/10 <sup>-9</sup>	-	0,0601/10 <sup>-9</sup>	0,9475/10 <sup>-9</sup>
5	0,0103/10 <sup>-9</sup>	-	0,1853/10 <sup>-9</sup>	0,8722/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.3)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0250/10 <sup>-9</sup>	0,7348/10 <sup>-9</sup>	0,0088/10 <sup>-9</sup>	0,9931/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0234/10 <sup>-9</sup>	0,7270/10 <sup>-9</sup>	0,0033/10 <sup>-9</sup>	0,9970/10 <sup>-9</sup>
5	0,0484/10 <sup>-9</sup>	0,6354/10 <sup>-9</sup>	0,0255/10 <sup>-9</sup>	0,9823/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.12)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (h <sup>-1</sup> )	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0117/10 <sup>-9</sup>	-0,0013/10 <sup>-9</sup>	0,0030/10 <sup>-9</sup>	0,9976/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0105/10 <sup>-9</sup>	-0,0013/10 <sup>-9</sup>	0,0070/10 <sup>-9</sup>	0,9938/10 <sup>-9</sup>
5	0,0168/10 <sup>-9</sup>	-0,0016/10 <sup>-9</sup>	0,0183/10 <sup>-9</sup>	0,9873/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.7)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0066/10 <sup>-9</sup>	0,7348/10 <sup>-9</sup>	0,0088/10 <sup>-9</sup>	0,9931/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0057/10 <sup>-9</sup>	0,7270/10 <sup>-9</sup>	0,0033/10 <sup>-9</sup>	0,9970/10 <sup>-9</sup>
5	0,0085/10 <sup>-9</sup>	0,6354/10 <sup>-9</sup>	0,0255/10 <sup>-9</sup>	0,9823/10 <sup>-9</sup>
Equação (2.5)				
$v$ (m/s)	$k$ (h <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$FO$ (-)	$\tau^2$
2	0,0060/10 <sup>-9</sup>	0,8788/10 <sup>-9</sup>	0,0195/10 <sup>-9</sup>	0,9850/10 <sup>-9</sup>
3,5	0,0053/10 <sup>-9</sup>	0,8774/10 <sup>-9</sup>	0,0115/10 <sup>-9</sup>	0,9899/10 <sup>-9</sup>
5	0,0075/10 <sup>-9</sup>	0,8475/10 <sup>-9</sup>	0,0731/10 <sup>-9</sup>	0,9496/10 <sup>-9</sup>

Fonte: o autor.

Para enfatizar a influência da temperatura no processo de secagem, na Figura 4.21 são apresentados os perfis de massa em função do tempo para diferentes temperaturas e para a velocidade de 5 m/s. Nesta figura observa-se que quanto maior a temperatura de operação, maior é a quantidade de umidade retirada do fruto. Isto pode ser ressaltado para as temperaturas de 40 °C e 52 °C que, apesar de apresentarem massas iniciais próximas, a saber, 28,99 g e 29,41 g, possuem diferentes gradientes de temperatura, o que favorece a que possui maior temperatura de operação. Assim, mesmo com uma massa inicial de 32,26 g, o experimento conduzido para a temperatura de 65 °C foi o que mais retirou, no mesmo intervalo de tempo, a maior quantidade de água da fruta.

Figura 4.16 - Influência da temperatura no processo de secagem da guapeva ( $v=5$  m/s).



Fonte: o autor.

## 4.2 Modelagem Fenomenológica

Para a resolução do problema inverso considerando o modelo fenomenológico foram considerados os dados experimentais adimensionais apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Dados experimentais adimensionais da guapeva.

$t$	0	0.0083	0.0167	0.0250	0.0333	0.0417	0.0583	0.0751	0.0917	0.1083	0.1251	0.1667
$T_{(r=0,8413)}$	0.0196	0.0392	0.0392	0.0588	0.0784	0.1176	0.1569	0.2353	0.2745	0.3333	0.3725	0.4706
$T_{(r=1)}$	0	0.0981	0.1961	0.2745	0.3333	0.3529	0.4314	0.4902	0.549	0.5882	0.6275	0.6863
$t$	0.2083	0.2501	0.2917	0.3333	0.4167	0.5001	0.5833	0.6667	0.7501	0.8333	0.9167	1
$T_{(r=0,8413)}$	0.5686	0.6471	0.7059	0.7647	0.8431	0.8824	0.8824	0.9021	0.9021	0.9216	0.9216	0.9412
$T_{(r=1)}$	0.7647	0.8235	0.8627	0.9021	0.9412	0.9608	0.9608	0.9804	0.9804	0.9804	1	1
$X_{(t=0, r=0,8413)}$	1											
$X_{(t=0,5, r=0,8413)}$		0.5317										
$X_{(t=1, r=0,8413)}$			0.5182									
$X_{(t=0, r=1)}$				0.3901								
$X_{(t=0,5, r=1)}$					0.3139							
$X_{(t=1, r=1)}$						0.3017						

Fonte: o autor.

Além disso, também foram consideradas as seguintes informações no modelo adimensionalizado: condições iniciais ( $X_0 = -3.8431r + 4.2332$  e  $T_0 = 0$ ) e de contorno ( $X_l =$  umidade em  $r = R_1(0.8413)$ ;  $T_l =$  temperatura em  $r = R_1(0.8413)$ ;  $X_r =$  umidade em  $r = R(1)$  e  $T_r =$  temperatura em  $r = R(1)$ , bem como  $t_f$  igual a 120 s e  $R = 6,3$  cm.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes dos modelos polinomiais descritos nas Equações 3.9 e 3.10 considerando o algoritmo de ED. Nesta tabela observa-se um bom valor para o funcional  $f$ , que na idealidade deveria ser igual a zero. Todavia, por se tratar de um problema com dados experimentais reais, o valor da função objetivo não seria, a priori, igual a zero.

Tabela 4.5 - Resultados obtidos utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial.

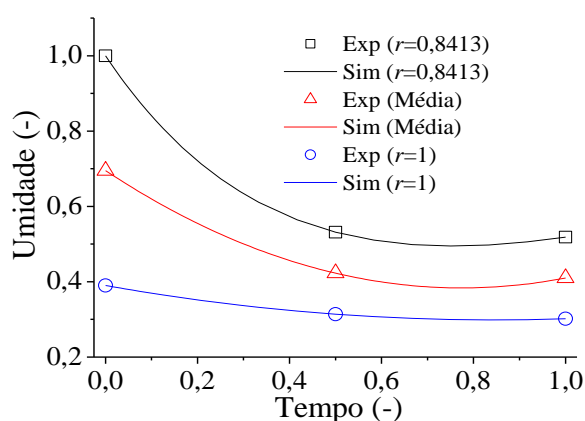
$\beta_1$ (-)	$\beta_2$ (-)	$\beta_{11}$ (-)	$\beta_0$ (-)	$\theta_1$ (-)	$\theta_2$ (-)	$\theta_{11}$ (-)	$\theta_0$ (-)	$f$
23,5667*	-2,6571	0,9893	0,0883	0,3532	-2,2213	23,9869	0,8874	0,1501
2,4803**	0,4060	0,0646	0,0060	0,0875	0,0575	3,5032	0,0489	0,0001

\* Melhor valor obtido e \*\* Desvio padrão.

Fonte: o autor.

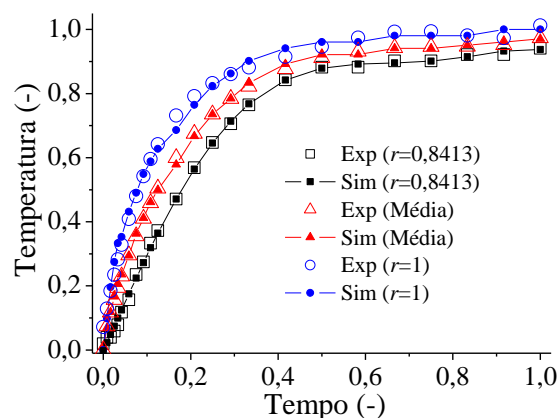
As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os perfis experimentais (Exp) e simulados (Sim) para a umidade e a temperatura da guapeva considerando os parâmetros listados na Tabela 4.6.

Figura 4.17 - Teor de umidade experimental e simulada da guapeva considerando diferentes posições radiais.



Fonte: o autor.

Figura 4.18 - Temperatura experimental e simulada da guapeva considerando diferentes posições radiais.



Fonte: o autor.

Fisicamente, conforme esperado, observa-se na Figura 4.17 que a umidade diminui ao longo do tempo, visto que a fruta está perdendo umidade e que quanto menor o valor do raio, maior é o valor da umidade, isto é; quanto mais próximo a semente da fruta ( $r = R_0$ ),

maior é o teor de umidade. Por outro lado, na Figura 4.18 observa-se o contrário, quanto maior o valor do raio, maior o valor da temperatura, visto que a fruta é aquecida a partir da casca. Do ponto de vista da otimização, nestes gráficos observa-se uma boa concordância entre os valores simulados e experimentais.

### 4.3 Caracterização da Farinha da Casca da Guapeva

Como descrito anteriormente, a maior parte da composição da guapeva é casca (aproximadamente 64%), o que favorece a sua utilização na produção da farinha, visto que essa parte do fruto é, geralmente, descartada. A Figura 4.19 apresenta a farinha da casca da guapeva conforme o procedimento apresentado anteriormente.

Figura 4.19 - Farinha de casca de guapeva.



Fonte: o autor.

Como pode ser observado nessa figura, a farinha apresentou coloração marrom, além de aroma intenso característico. O rendimento da farinha foi de aproximadamente 30%, semelhante a outras farinhas de frutas estudadas na literatura, como a farinha de seriguela que apresentou rendimento de 37% (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016). Por se tratar de aproveitamento de resíduo, considera-se que esse é um bom rendimento, visto que a matéria prima seria, naturalmente, descartada.

A composição centesimal e valor calórico total da farinha de casca de guapeva são apresentados na Tabela 4.6, tendo resultados de macronutrientes expressos em gramas do componente por 100 gramas de farinha, valor calórico medido em quilocalorias e compostos fenólicos em gramas de ácido gálico por 100 gramas de farinha.

Tabela 4.6 - Composição da farinha de casca de guapeva.

Composição centesimal e valor calórico total da farinha de casca de guapeva em 100 g	
Umidade (g)	7,11
Proteína (g)	7,86
Lipídeos (g)	10,07
Carboidratos (g)	22,41
Fibra alimentar total (g)	50,5
Fibra solúvel (g)	8,2
Fibra insolúvel (g)	42,3
Resíduo mineral fixo (g)	2,05
Valor Calórico Total (kcal)	240,15
Compostos Fenólicos Totais (mg AG)	3286

Fonte: o autor.

Em comparação aos resultados apresentados por Siqueira *et al.* (2017), no qual foi realizado o estudo da guapeva *in natura*, observa-se que a produção da farinha da casca da guapeva foi eficaz no que tange a preservação das características físico-químicas do fruto. No fruto *in natura*, o resíduo mineral fixo é de 1,46 g/100g; proteína igual a 2,99 g/100g; lipídeos iguais a 5,63 g/100g e carboidratos iguais a 16,58 g/100g. Conforme esperado, esses atributos foram encontrados em maiores quantidades na farinha de guapeva do que no fruto *in natura*, pois o processo de secagem faz com que ocorra concentração aparente.

O teor de umidade da farinha de casca de guapeva é de 7,11%, se aproximando do valor obtido na produção de farinhas de outras frutas, como a farinha de Mirtilo com 6,78% de umidade (GOLDMEYER *et al.*, 2014), a farinha de banana verde com 7,54% de umidade (OLIVEIRA *et al.*, 2015), e a farinha de seriguela com 8,48% de umidade (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016). Todavia, a farinha de guapeva produzida foi superior em relação ao teor de umidade encontrado na farinha de casca de jabuticaba, com 4,67% de umidade (MICHELETTI *et al.*, 2018) e a farinha de casca de maracujá com 5,64% de umidade (SOUZA *et al.*, 2008), mas atendendo à RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005 da ANVISA, que determina teor de umidade para farinhas em no máximo 15%. Baixo teor de umidade possibilita maior vida útil do produto devido à redução do desenvolvimento microbiano e aumento da estabilidade química e enzimática (EVANGELISTA, 2005).

O percentual de proteínas na composição da farinha de casca de guapeva (7,86%) foi superior ao teor de proteínas encontrados nas farinhas de mirtilo e bagaço de mirtilo, isto é; com 2,81% e 5,27%, respectivamente (GOLDMEYER *et al.*, 2014), a obtida a partir de resíduos de frutas com 3,87% (ARANHA *et al.*, 2017), a de casca de jabuticaba com 2,88%

(MICHELETTI *et al.*, 2018). Todavia, a farinha produzida foi inferior em termos do teor de proteínas a aquela encontrada na farinha de casca de maracujá com 11,76% (SOUZA *et al.*, 2008) e a obtida com resíduos de acerola com 8,88% (AQUINO *et al.*, 2010). Com isso, a farinha de casca de guapeva pode ser classificada como um alimento fonte de proteínas, conforme nº 54, de 12 de novembro de 2012 (BRASIL, 2012), da ANVISA. Quanto ao valor calórico (240,15 kcal/100g), a farinha de casca de guapeva é menos calórica que as farinhas de seriguela, 313,21 kcal/100g (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016), de casca de jaboticaba, 382,88 kcal/100g (MICHELETTI *et al.*, 2018) sendo mais calórica que a farinha de resíduo de frutas obtida por Aranha *et al.* (2017), que apresenta 150,61 kcal a cada 100 gramas de farinha.

Comparada a outras farinhas de frutas, onde foram encontrados percentuais de lipídeos variando entre 0,2 e 5,23%, para as farinhas de casca de jaboticaba e de resíduos de acerola (MICHELETTI *et al.*, 2018; AQUINO *et al.*, 2010), a farinha da casca da guapeva apresentou um teor de lipídeos mais elevado (aproximadamente 10,07%). Quanto aos carboidratos, a farinha de casca de guapeva apresentou percentual significativamente inferior (22,41%) em relação a outras farinhas de frutas, como por exemplo, a farinha de casca de jaboticaba com 90,04% (MICHELETTI *et al.*, 2018); a farinha de seriguela com 71,77% (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016); as farinhas de mirtilo e de bagaço de mirtilo com 86,78 e 85,15%, respectivamente (GOLDMEYER *et al.*, 2014).

Segundo a resolução nº 54, de 12 de novembro de 2012 (BRASIL, 2012), da ANVISA, são considerados alimentos com alto teor de fibras aqueles que possuem valores acima de 6%. Portanto, a farinha de casca de guapeva pode ser considerada um alimento com alto teor de fibras, por conter 50,5% de fibra alimentar em sua composição, sendo 8,2% de fibras solúveis e 42,3% de fibras insolúveis. Esse quantitativo é superior ao encontrado em farinha produzida com resíduos de frutas (39,36%), casca de jaboticaba (33,86%), resíduos de acerola (37,9%), sendo inferior apenas ao teor de fibra alimentar presente na farinha de casca de maracujá, que possui 66,37% deste componente (ARANHA *et al.*, 2017; MICHELETTI *et al.*, 2018; STORCK *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2008).

O resíduo mineral fixo, também chamado de cinzas, é obtido através da incineração do alimento, onde a matéria orgânica é transformada em gases, permanecendo os minerais presentes no alimento. A farinha de guapeva apresentou 2,05 g/100g de resíduo mineral fixo, valor semelhante a farinha de resíduos de acerola, 2,03 g/100g (STORCK *et al.*, 2015) e superior aos teores de cinzas encontrados em farinhas de mirtilo (0,87 g/100g). Porém, se

mostrou inferior em relação às farinhas de resíduos de laranja (3,4 g/100g) e maçã (4,38 g/100g) (STORCK *et al.*, 2015).

Nos alimentos, os compostos fenólicos tem influência sobre a qualidade sensorial como cor, amargor, adstringência e também, quando em grandes quantidades, podem causar escurecimento enzimático. Esses compostos são importantes na prevenção de doenças, por sua capacidade antioxidante (ROCHA *et al.*, 2011). Os teores de compostos fenólicos variam de acordo com o método de extração utilizado para preparação do extrato. No presente trabalho foi utilizado o extrato alcoólico. A farinha de guapeva apresentou 3286 mg de ácido gálico a cada 100g, valor muito significativo se comparado a frutas *in natura*, como o açaí (3268 mg) e a jabuticaba (3584 mg), que são frutas de referência em se tratando de compostos fenólicos, sendo inferior à juçara (5672 mg) (RUFINO *et al.*, 2010).

De forma geral, conclui-se que a produção de farinha de casca de guapeva configura-se como uma alternativa viável para aproveitamento deste resíduo tendo em vista seu alto valor nutritivo e elevado teor de compostos bioativos que podem ser favoráveis à elaboração de novos produtos e nutrição humana.

No presente capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a formulação e resolução de um problema inverso proposto para a determinação de modelos cinéticos para o processo da secagem da guapeva, a modelagem matemática do processo de secagem, bem como a produção e análise físico-química de uma farinha obtida com a casca da guapeva. De forma geral, foi possível observar uma boa concordância entre os pontos experimentais e os preditos por cada modelo proposto, boa concordância entre os pontos experimentais e os simulados pelo modelo matemático, bem como constatar que a farinha produzida pode ser considerada uma alternativa viável para a substituição e/ou complementação das tradicionais farinhas comercializadas no mercado. Cabe ressaltar a importância do resultado apresentado, visto o aproveitamento da casca deste fruto que compreendem cerca de, aproximadamente 64% do seu total. Assim, uma matéria orgânica que, normalmente seria descartada, pode ser utilizada para outras finalidades na forma de farinha. Além disso, fica evidenciada a necessidade de estudos complementares sobre a utilização da farinha de casca de guapeva visando à avaliação da aceitação sensorial do produto, bem como maior caracterização de seus componentes, tais como minerais e proteínas.

## Capítulo 5

---

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

Esta dissertação teve por objetivo contribuir com o estudo do processo de secagem da guapeva, fruta característica do cerrado brasileiro. Para essa finalidade foram realizados experimentos em um secador do tipo túnel para: *i*) a determinação dos parâmetros de alguns modelos cinéticos via formulação e resolução de um problema inverso; *ii*) a determinação da difusividade efetiva e da condutividade térmica para a caracterização do modelo fenomenológico; e *iii*) da produção e análise da farinha obtida com a casca da guapeva. A partir dos resultados obtidos, os seguintes pontos podem ser destacados:

- O secador do tipo túnel desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Triângulo Mineiro se mostrou eficiente para a proposta do trabalho em questão, visto que foi possível realizar uma ampla gama de experimentos para fins da secagem da guapeva;
- Os resultados obtidos com a resolução do problema inverso proposto para a determinação de modelos cinéticos usando o algoritmo de Evolução Diferencial foram considerados satisfatórios, visto a boa concordância observada entre os pontos experimentais e os preditos. Os modelos com dois parâmetros (Page e de Singh *et al.*) foram os que apresentaram os melhores valores de coeficiente de determinação, isto é; cerca de aproximadamente 98% da variabilidade dos dados experimentais são explicados pelas referidas equações;
- Os resultados obtidos com a resolução do problema inverso proposto para determinação da difusividade efetiva e da condutividade térmica da guapeva usando o algoritmo de Evolução Diferencial também foram considerados satisfatórios em termos dos valores da função objetivo e dos desvios padrão encontrados.
- Em termos da análise físico-química da farinha da casca da guapeva produzida, conclui-se que a mesma configura-se como uma boa alternativa para complementação nutricional e até mesmo substituição parcial de tradicionais

farinhas existentes no mercado, isto se deve ao potencial nutritivo da farinha. Além disso, ressalta-se que a produção da farinha da guapeva é importante no que tange questões ambientais, visto que minimiza o desperdício desta matéria orgânica.

Como propostas de trabalhos futuros têm-se: *i)* a avaliação de novos produtos desenvolvidos a partir da farinha de casca de guapeva, bem como a produção e caracterização de produtos oriundos de outros resíduos de interesse regional; *ii)* o desenvolvimento de um modelo considerando não só a direção radial, mas também as variáveis angulares, visto que o modelo estudado é uma simplificação do processo real; *iii)* avaliar a presença de incertezas no modelo matemático em termos de métodos de integração estocásticos e de técnicas para a análise de robustez e confiabilidade.

---

## REFERÊNCIAS

---

AGUIAR, T. M.; RODRIGUES, F. S.; SANTOS, E. R.; SABAASRUR, A. U. Caracterização química e avaliação do valor nutritivo de sementes de acerola. *Nutrire: Revista da Sociedade Brasileira de Alimentação e Nutrição*, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 91-102, 2010.

ALBUQUERQUE, J. G.; DUARTE, A. M.; CONCEIÇÃO, M. L.; AQUINO, J. S. Integral utilization of seriguela fruit (*Spondias purpurpúrea* L.) in the production of cookies. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 38, n. 3, p. 1-7, jun/jul, 2016.

ARANHA, J. B.; NEGRI, T. C.; MARTIN, J. G. P.; SPOTO, M. H. F. Efeito da radiação gama nos parâmetros microbiológicos, físico-químicos e compostos fenólicos de farinha de resíduos de frutas durante armazenamento. *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 20, e2016123, 2017.

ARRUDA, E. B.; LOBATO, F. S.; ASSIS, A. J.; BARROZO, M. A. S. Modeling of fertilizer drying in roto-aerated and conventional rotary dryers. *Drying Technology*, London-United Kingdom, v. 27, n. 3, p. 1192–1198, 2009.

ARRUDA, E. B. *Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes*. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

AOAC – Association Official Analytical Chemists. *Official methods of analysis of the association of official analytical chemistry*. 16 ed. Washington, 1995.

AQUINO, A. C. M. S.; MÓES, R. S.; LEÃO, K. M. M.; FIGUEIREDO, A. V. D.; CASTRO, A. A. Avaliação físico-química e aceitação sensorial de biscoitos tipo cookies elaborados com farinha de resíduos de acerola. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 69, n. 3, p. 379-386, 2010.

BARBOSA, T. A. Otimização do processo de desidratação osmótica da manga usando o algoritmo de colônia de vagalumes e otimização multi-objetivo. In: VII SIMPÓSIO DE MATEMÁTICA E MATEMÁTICA INDUSTRIAL, 2016, Catalão. *Anais...* Catalão: UFG, 2016. p. 65-70.

BARBOSA, T. A.; LOBATO, F. S. Determinação da cinética de secagem de produtos alimentícios usando algoritmos genéticos. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia, v. 3, n. 3, p. 29-39, 2016.

BARBOSA, T. A.; LOBATO, F. S.; DANTAS, S. C.; ARRUDA, E. B. Determinação da Cinética de Secagem da Guapeva Usando Evolução Diferencial. In: XXIII JORNADA EM ENGENHARIA QUÍMICA, 2018, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: UFU, 2018. p. 191-197.

BONTEMPO, L. H. S.; SILVA, R. N.; CARDOSO, V. S.; CASTEJON, L. V.; SANTOS, K. G. Avaliação da farinha de fruta obtida por meio da secagem convectiva de cascas de mexerica. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2016. *Anais...* Campinas, GALOÁ, 2016.

BOX, M. J., HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. *Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, John Wiley and Sons, New York, 1978.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução, RDC nº 54 de 12 de novembro de 2012. Dispõe sobre o regulamento técnico sobre informação nutricional complementar. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução, RDC nº 263 de 22 de setembro de 2005. Aprova o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos, constantes do anexo desta portaria. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2005.

BROOKER, D. B. ; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W., *Drying cereal grains*. The Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1974.

CABRAL, J. S. R.; SALES, J. F.; SILVA, F. G.; BRANQUINHO, A. C.; OLIVEIRA, R. C. Physiological Quality of Guapeva (*Pouteria gardneriana* Radlk) Seeds During Storage, *Global Science Technology*, Rio Verde, v. 06, n. 01, p.127–133, 2013.

CHAPRA, S. C. *Métodos numéricos aplicados com Matlab para engenheiros e cientistas*. Editora Mc Graw Hill, 3 ed, 655p, 2013.

COELHO, L. M.; WOSIACKI, G. Avaliação sensorial de produtos panificados com adição de farinha de bagaço de maçã. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 30, n. 3, p. 582-588, 2010.

COELHO, L. S. *Fundamentos, potencialidades e aplicações de algoritmos evolutivos*. Notas em Matemática Aplicada, Volume 2, SBMAC, 94p. São Carlos, 2003.

COSTA, D. M. G. *Estudo Químico e Avaliação da Atividade Mutagênica dos Extratos Hidroalcoólicos das Folhas de Pouteria Torta e Pouteria Ramiflora (Sapotaceae)*, Universidade Estadual Paulista, 2014.

DEB, K. *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. New York, John Wiley and Sons, 2001.

DIAMANTE, L. M.; MUNRO, P. A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar energy*, v. 51, p. 271-276, 1993.

DIÁRIO DE CIENCIAS APLICADAS. *Buenos aires, Argentina*. Disponível em: <<http://www.diariodeciencias.com.ar/tuneles-de-secado-cintas-para-secado/>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

EIK, N.M. Avaliação de Pré-Tratamentos e Aplicação de Coberturas Comestíveis na Secagem de Frutas. Campinas, UNICAMP, 2008. 151p.

- EVANGELISTA, J. *Tecnologia de alimentos*. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2005. 652 p.
- FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 573–583, 2012.
- FASOLIN, L. H.; ALMEIDA, G. C.; CASTANHO, P. S.; NETTO-OLIVEIRA, E. R. Biscoitos produzidos com farinha de banana: avaliações química, física e sensorial. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 27, n. 3, p. 524-529, 2007.
- GILI, R. D.; IRIGOYEN, R. M. T.; PENCI, M. C.; GINER, S. A.; RIBOTTA, P.; D. Wheat germ thermal treatment in fluidised bed. Experimental study and mathematical modelling of the heat and mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 221, p. 11-19, 2018.
- GOLDMEYER, B.; PENNA, N. G.; MELO, A.; ROSA, C. S. Características físico-químicas e propriedades funcionais tecnológicas do bagaço de mirtilo fermentado e suas farinhas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 36, n. 4, p. 980-987, 2014.
- GOMES, G. J. C.; VARGAS JUNIOR, E. A. A coupled system based on Differential Evolution for the determination of Rainfall intensity equations. *RBRH*, Porto Alegre, v. 23, e55, 2018.
- HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A computacional producer for deep-bed drying analysis. *Journal of Agricultural Engineerig Research*, v. 13, p. 85-95, 1968.
- IAL – INSTITUTO ADOLFO LUTZ. *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. 4 ed. Brasília: Anvisa, 2005.
- JUAREZ-GARCIA, E.; AGAMA-ACEVEDO, E.; SÁYAGO-AYERDI, S. G.; RODRÍGUEZ-AMBRIZ, S. L.; BELLO-PÉREZ, L. A. Composition, digestibility and application in breadmaking of banana flour. *Plant Foods for Human Nutrition*, New York, v. 61, p. 131-137, 2006.
- KEEY, R.B. *Drying: Principles and Practice*. Oxford: Pergamon, 1975.
- KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Modeling and optimization of fluidized bed and rotary dryers. *Drying Technology*, v. 42, p. 3030-3040, 1997.
- LEWIS, W. K. The rate of drying of solid material. *Ind. Eng. Chem.*, v. , p. 427, 1921.
- LIMA, V. L. A. G. DE; MELO, E. A.; MACIEL, M. I. S.; SILVA, G. S. B.; LIMA, D. E. S. Fenólicos totais e atividade antioxidante do extrato aquoso de broto de feijão-mungo (*vigna radiata* l.). *Revista de Nutrição*, Campinas, v. 17, n. 1, p. 53-57, 2004.
- LIMA, L.; SILVA, J. B.; LIMA, A. G. B. Transferência de calor e massa durante a secagem de sólidos com forma arbitrária: uma abordagem concentrada. *Engenharia agrícola*, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 150-62, 2003.
- LOBATO, F.S. Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia. Uberlândia, UFU, 2008. 354p.

LOBATO, F. S.; ARRUDA, E. B.; BARROZO, M. A. S.; STEFFEN JR, V. Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics Conference Series*, New York, v. 135, n.1, p. 1-8, 2008.

LOBATO, F. S.; STEFFEN JR, V.; NETO, A. J. S. Evolução diferencial (differential evolution). In: NETO, A. J. S. *Técnicas de inteligência computacional inspiradas na natureza: aplicações em problemas inversos em transferência radiativa*. São Carlos: SBMAC, 2009. cap. 10, p. 91-100.

LOBATO, F. S.; STEFFEN JR, V.; NETO, A. J. S. Resolução de problemas inversos em processos difusivos e transferência radiativa usando o algoritmo de evolução diferencial. In: LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. *Computação evolucionária em problemas de engenharia*. Curitiba: Omnipax, 2011. cap. 9, p. 173-195.

LOBATO, F. S.; BARBOSA, T. A.; SILVA, B. A. Determinação da cinética de secagem do abacaxi usando evolução diferencial e otimização robusta. *Higiene Alimentar*, v. 31, n. 266/267, p. 4096-4100, 2017.

MACHADO, A. V. *Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo*. 143 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MALTA, L. G. *Avaliação Biológica de Frutas do Cerrado Brasileiro: Guapeva, Gabiroba e Murici*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp, 2011.

MELO, E. A.; MACIEL, M. I. S.; LIMA, V. L. A. G.; NASCIMENTO, R. J. Capacidade antioxidante de frutas. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, São Paulo, v. 44, n. 2, 2008.

MERRIL, A. L.; WATT, B. K. *Energy value of foods: basis and derivation*. Washington: US Department of Agriculture, 1973.

MICHELETTI, J.; SOARES, J. M.; FRANCO, B. C.; CARVALHO, I. R. A.; CANDIDO, C. J.; SANTOS, E. F.; NOVELLO, D. The addition of jaboticaba skin flour to muffins alters the physicochemical composition and their sensory acceptability by children. *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v.21, e2017089, 2018.

MONTEIRO, R. L.; A. M. B., CARCIOFI; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. *Journal of Food Engineering*, London, v. 178, n. 4, p. 1–11, 2016.

MORZELLE, M. C.; BACHIEGA, P.; SOUZA, E.C., VILAS BOAS, E.V.B.; LAMOUNIER, M.L. Chemical and physical characterization of fruits from cerrado: curriola, gabiroba and murici, *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 3, n.1, p.96-103, 2015.

MUSIELAK, G. Modeling of heat and mass transfer during ultrasound-assisted drying of a packed bed consisting of highly shrinkable material. *Chemical Engineering Research and Design*, I 29, p. 25-33, 2018.

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. *Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos*. Barueri: Manole, 2006. 612 p.

OLIVEIRA, D. A. S. B.; MULLER, P. S.; FRANCO, T. S.; KOTOVICZ, V.; WASZCZYNSKYJ, N. Avaliação da qualidade de pão com adição de farinha e purê da banana verde. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabel, v. 37, n. 3, p. 699-707, set, 2015.

OLIVEIRA-FILHO, R.; LOBATO, F.; DUARTE, M. & STEFEN JR., V., Estimação dos parâmetros de um filtro adaptativo utilizado como ferramenta para controle de qualidade em linha de montagem de câmbios automotivos através da técnica de evolução diferencial. In: *Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Salvador, BA, 2008.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, New York, v. 16, n. 3, p. 112–113, 1973.

PAGE, G. E. *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layer*. Indiana, Purdue University, 1949.

PERFEITO, D. G. A.; CORRÊA, I. M.; PEIXOTO, N. Elaboração de bebida com extrato hidrossolúvel de soja saborizada com frutos do cerrado. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia, v. 4, n. 1, p. 21-27, 2017.

ROCHA, W. S.; LOPES, R. M.; SILVA, D. B.; VIEIRA, R. F.; SILVA, J. P.; AGOSTINI-COSTA, T. S. Compostos fenólicos totais e taninos condensados em frutas nativas do cerrado. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.33, n.4, p.1215-1221, 2011.

RANGEL, I. C. S. S.; RANGEL, L. S.; STUTZ, L. T. Identificação de danos estruturais a partir de um modelo de superfície de resposta. *TEMA (São Carlos)*, v. 17, n. 3, p. 267-282, 2016.

RUFINO, M. S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; JIMÉNEZ J. P.; CALIXTO, F. S. Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, London, v. 121, n. 4, p. 966-1002, 2010.

SARAMAGO, S. F. P. *Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e simulated annealing*. Notas em Matemática Aplicada, Volume 6, SBMAC, 35 p. São Carlos, 2003.

SHAHARI, N. A., *Mathematical modelling of drying food products: application to tropical fruits*. Nottingham: University of Nottingham, 2012, 247 p.

SILVA, M. R.; LACERDA, D. B. C. L.; SANTOS, G. G.; MARTINS, D. M. O. Caracterização química de frutos nativos do cerrado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 6, p. 1.790-1.793, 2008.

SILVA-NETO, A.J.; MOURA-NETO, F.D. *Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações*. Rio de Janeiro, UERJ. 168p, 2005.

SINGH, F.; KATIYAR, V. K.; SINGH, B. P. Mathematical modeling to study drying characteristic of Apple and potato. International Conference on Chemical, Environment & Biological Sciences (CEBS-2014), Kuala Lumpur (Malaysia), 2014.

SIQUEIRA, A. P. S.; OLIVEIRA, J. M.; MACHADO Jr, D. R., LOURENÇO, M. F. C. Chemical characterization and antioxidant capacity of guapeva. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 39, n. Spe., (e-584) DOI 10.1590/0100-29452017 584, 2017.

SIQUEIRA, A.P.S.; PACHECO, M.T.B.; NAVES, M.M.V. Nutritional quality and bioactive compounds of partially defatted baru almond flour. *Food Science and Technology*, Campinas, 35, v.1, p. 127-132, 2015.

SITOMPUL, J. P.; WIDIASA, I. I. N. Modeling and Simulation of Deep-Bed Grain Dryers, *Drying Technology*, Vol. 19(2), pp. 269–280, 2001.

SOUZA, M. W. S.; FERREIRA, T. B. O.; VIEIRA, I. F. R. Composição centesimal e propriedades funcionais tecnológicas da farinha da casca do maracujá. *Alimentos e Nutrição*, v. 19, n. 1, p. 33-36, 2008.

STORCK, C. R.; BASSO, C.; FAVARIN, F. R.; RODRIGUES, A. C. Qualidade microbiológica e composição de farinhas de resíduos da produção de suco de frutas em diferentes granulometrias. *Brasilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 18, n. 4, p. 277-284, out./dez., 2015.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, *Technical Report TR- 95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley, 1995.

UDOMKUN, P.; ARGYROPOULOS, D.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; JANJAI, S.; MÜLLER, J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. *LWT - Food Science and Technology*, London, v. 64, n. 23, p. 67–73, 2015.

VANDERPLAATS, G.N. *NUMERICAL OPTIMIZATION TECHNIQUES FOR ENGINEERING DESIGN*. Vanderplaats Research And Development, Inc., 1999.

VILLADSEN, J., MICHELSEN, M.L. *Solution of differential equation models by polynomial approximation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1978.

ZIELINSKI, H.; KOZLOWSKA, H. Antioxidant activity and total phenolics in selected cereal grains and their different morphological fractions. *Journal of agricultural and food chemistry*, Washington, v. 48, p. 2008-2016, 2000.

ZLATANOVIC, I; KOMATINA M.; ANTONIJEVIC, D. Low-temperature convective drying of apple cubes. *Applied Thermal Engineering*, London, v. 53, n. 1, p. 114–123, 2013.

*Apêndice A*

---

**RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

---

<b>Experimento 01</b>		<b>Experimento 02</b>		<b>Experimento 03</b>	
<i>T=40°C; v=2,0 m/s</i>		<i>T=40°C; v=3,5 m/s</i>		<i>T=40°C; v=5,0 m/s</i>	
tempo (min)	peso (g)	tempo (min)	peso (g)	tempo (min)	peso (g)
0	46,05	0	23	0	28,99
1	45,74	1	22,66	1	28,47
2	45,46	2	22,43	2	28,09
3	45,22	3	22,19	3	27,78
4	44,92	4	21,99	4	27,44
5	44,63	5	21,77	5	27,24
7	44,14	7	21,36	7	26,65
9	43,63	9	20,96	9	26,14
11	43,14	11	20,61	11	25,61
13	42,67	13	20,28	13	25,13
15	42,23	15	19,97	15	24,65
20	41,22	20	19,28	20	23,53
25	40,33	25	18,66	25	22,48
30	39,51	30	18,13	30	21,6
35	38,72	35	17,66	35	20,78
40	37,92	40	17,24	40	19,96
45	-	45	-	45	-
50	36,34	50	16,57	50	18,76
60	34,9	60	15,99	60	17,69
70	33,6	70	15,49	70	17,08
80	32,48	80	15,05	80	16,42
100	30,56	100	14,3	100	14,96
120	28,94	120	13,75	120	13,99
140	27,45	140	13,06	140	13,94
160	26,24	160	12,75	160	13,4
180	25,27	180	12,34	180	12,91
200	24,38	200	12,01	200	12,46
Umidade final (g)	13,04	Umidade final (g)	5,04	Umidade final (g)	4,86
Umidade final (%)	52,348454	Umidade final (%)	42,211055	Umidade final (%)	37,616099

<b>Experimento 04</b>	
$T=52^{\circ}\text{C}; v=2,0 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	27,71
1	27,42
2	27,19
3	26,92
4	26,64
5	26,41
7	25,96
9	25,78
11	25,13
13	24,71
15	24,29
20	23,29
25	22,43
30	21,68
35	20,92
40	20,2
45	-
50	18,97
60	17,98
70	17,18
80	16,46
100	15,28
120	14,33
140	13,57
160	12,95
180	12,39
200	11,95
Umidade final (g)	4,22
Umidade final (%)	35,343384

<b>Experimento 05</b>	
$T=52^{\circ}\text{C}; v=3,5 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	23,26
1	22,88
2	22,55
3	22,19
4	21,88
5	21,54
7	20,95
9	20,37
11	19,86
13	19,4
15	18,99
20	18,06
25	17,27
30	16,61
35	16,01
40	15,3
45	-
50	14,4
60	13,71
70	13,22
80	12,67
100	11,78
120	11,05
140	10,47
160	10,01
180	9,58
200	9,25
Umidade final (g)	2,78
Umidade final (%)	30,184582

<b>Experimento 06</b>	
$T=52^{\circ}\text{C}; v=5,0 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	29,41
1	28,78
2	28,36
3	27,92
4	27,47
5	27,12
7	26,32
9	25,58
11	24,93
13	24,3
15	23,72
20	22,42
25	21,26
30	20,27
35	19,54
40	18,8
45	-
50	17,49
60	16,74
70	15,96
80	14,91
100	13,93
120	13,12
140	12,46
160	11,91
180	11,48
200	11,1
Umidade final (g)	3,02
Umidade final (%)	27,23174

<b>Experimento 07</b>	
$T=65^{\circ}\text{C}; v=2,0 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	34,03
1	33,45
2	33,07
3	32,72
4	32,31
5	31,95
7	31,3
9	30,63
11	29,98
13	29,4
15	28,8
20	27,19
25	26,17
30	25
35	23,92
40	22,89
45	-
50	21,12
60	19,57
70	18,29
80	17,23
100	15,58
120	14,24
140	13,26
160	12,49
180	11,89
200	42,56
Umidade final (g)	2,71
Umidade final (%)	23,792801

<b>Experimento 08</b>	
$T=65^{\circ}\text{C}; v=3,5 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	27,08
1	26,78
2	26,47
3	26,13
4	25,84
5	25,52
7	24,95
9	24,41
11	23,95
13	23,44
15	23,01
20	21,97
25	21,06
30	20,28
35	19,67
40	19,02
45	18,38
50	17,81
60	16,77
70	15,84
80	15,03
100	13,57
120	12,48
140	11,59
160	10,8
180	10,16
200	9,61
Umidade final (g)	3,91
Umidade final (%)	40,60228

<b>Experimento 09</b>	
$T=65^{\circ}\text{C}; v=5,0 \text{ m/s}$	
tempo (min)	peso (g)
0	32,26
1	31,81
2	31,09
3	30,55
4	30,02
5	29,5
7	28,25
9	27,47
11	26,57
13	25,56
15	24,73
20	23,06
25	21,58
30	20,04
35	19,07
40	18,21
45	-
50	16,81
60	15,71
70	14,79
80	13,99
100	12,43
120	11,76
140	11,08
160	10,52
180	10,15
200	9,88
Umidade final (g)	1,28
Umidade final (%)	12,981744

<b>Experimento 10</b>						
T = 65° C ; v <sub>ar</sub> = 5,0 m/s						
Tempo (min)	Temperatura (°C)		Umidade			
	Entrecasca	Casca	Entrecasca (g/%)		Casca (g/%)	
0	24	23	2,533	68,64499	0,988	61,4046
1	25	28				
2	25	33				
3	26	37				
4	27	40				
5	29	41				
7	31	45				
9	35	48				
11	37	51				
13	40	53				
15	42	55				
20	47	58				
25	52	62				
30	56	65				
35	59	67				
40	2	69				
50	66	71				
60	68	72	1,3467	68,30147	0,795	57,4837
70	68	72				
80	69	73				
90	69	73				
100	70	73				
110	70	74				
120	71	74	1,3126	69,42769	0,7641	56,0561

## Apêndice B

## RESULTADOS LABORATORIAIS



Laboratório de Controle de Qualidade de Alimentos - UFV

LCQA



Praça Universitária, esq. cl 1ª Avenida, 1º andar, Sala 26, S. Universitário, Goiânia, GO  
 (Faculdade de Farmácia / Prédio da Faculdade de Odontologia / UFV)  
 Telefone: (62) 3209-6460/ (62) 3209-6444- CEP: 74605-220 - lcqafarmacia@gmail.com

## RELATÓRIO DE ENSAIO

Laudo de análise n°: 01089-18	Entrada no Laboratório: 28/11/2018
Solicitante: Thais Alves Barbosa	
Endereço:	Telefone:

## DADOS DA AMOSTRA

Amostra/Produto: Farinha casca guarepava	Marca: N/C	Lote: N/C
Embalagem: Saco plástico	Fabricação: 28/11/2018	Validade: N/C
Fabricante: Thais Alves Barbosa	Data de entrada: 28/11/2018	Hora de entrada: 15:32

## DADOS DA COLETA

Responsável pela coleta: Solicitante	Unidades: 01	Peso/Volume: 200g	Data da coleta: Não informado	Hora da coleta: Não informado
-----------------------------------------	-----------------	----------------------	----------------------------------	----------------------------------

## RESULTADOS DAS ANÁLISES

Ensaio	Especificações*	Resultados	Metodologia
Lipídios	----	10.07 g/100g	Extração etérea
Proteína	----	7.86 g/100g	Micro-kjeldahl
Resíduo mineral fixo	----	2.05 g/100g	Incineração

## Referência dos métodos

Extração etérea: IAL. Métodos químicos e físico-químicos para análise de alimentos; 4ª ed.; p. 117-118.

Incineração: IAL. Métodos químicos e físico-químicos para análise de alimentos; 4ª ed.; p. 105-106.

Micro-Kjeldahl: IAL. Métodos químicos e físico-químicos para análise de alimentos; 4ª ed.; p. 123-125.

## Legislações

\* Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005, ANVISA.

<b>CONCLUSÃO:</b> Ausência de legislação específica para a amostra analisada.
----------------------------------------------------------------------------------

REF. LABM: 1988/18  
PÁGINA: 1/1



## CERTIFICADO DE ANÁLISE

### DADOS DO CLIENTE

CLIENTE: THAÍS ALVES BARBOSA  
ENDEREÇO:  
CNPJ/CPF:

TELEFONE: 4

### DADOS DA AMOSTRA

MATERIAL: FARINHA DE CASCA DE GUAPEVA  
AMOSTRA ENVIADA POR: THAÍS ALVES  
DATA DE INÍCIO DA ANÁLISE: 03/12/2018  
FABRICAÇÃO: 28/11/2018  
DATA E HORA DA COLETA: 20/11/2018 10:00h

DATA DE ENTRADA: 03/12/2018  
DATA DE TÉRMINO DA ANÁLISE: 21/12/2018  
VALIDADE: ---  
LOTE: ---

### ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

PARÂMETROS	MÉTODO	UNIDADE	RESULTADO	PADRÕES	
				MINIMO	MAXIMO
Fibra alimentar total	AOAC (1)	g/100g	50,5	---	---
Fibra alimentar insolúvel	AOAC (1)	g/100g	42,3	---	---
Fibra alimentar solúvel	AOAC (1)	g/100g	8,2	---	---

#### MÉTODOS:

(1): AOAC. Official Methods of Analysis - Fibra alimentar solúvel e insolúvel: Método enzimático gravimétrico.

#### UNIDADES:

g/100g: gramas por 100 gramas

### ABRANGÊNCIA

Os resultados contidos neste certificado referem-se exclusivamente à amostra analisada.  
Este Certificado só pode ser reproduzido integralmente com autorização do responsável pelo seu conteúdo.

Belo Horizonte, 21 de Dezembro de 2018.