

**Universidade de Brasília - UnB
Curso de Química Tecnológica**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE
SECAGEM DE CAGAITA EM SECADORES
ELÉTRICO E SOLAR**

Raquel Rocha Marques

**Brasília, DF
2017**

RAQUEL ROCHA MARQUES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM
DE CAGAITA EM SECADORES ELÉTRICO E SOLAR**

Monografia submetida ao curso de graduação em Química Tecnológica da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Andressa Regina Vasques Mendonça

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Marques, Raquel Rocha.

Modelagem matemática das curvas de secagem de cagaita em secadores elétrico e solar. Raquel Rocha Marques. Brasília: UnB, 2017. 71 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Instituto de Química, Brasília, 2017. Orientação: Andressa
Regina Vasques Mendonça.

1. Cagaita. 2. Modelagem matemática. 3. Cinética de secagem
I. Mendonça, Andressa. II. Modelagem matemática das curvas de
secagem e coeficiente de difusão da cagaita.

CDU Classificação

**MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CURVAS DE SECAGEM DE CAGAITA EM
SECADORES ELÉTRICO E SOLAR**

RAQUEL ROCHA MARQUES

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Química Tecnológica do Instituto de Química, da Universidade de Brasília, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.^a Dr.^a: Andressa Regina Vasques Mendonça
Presidente da Banca (IQ/UnB)

Prof. Dr. Alexandre Perez Umpierre
Membro titular (IQ/UnB)

Prof. Dr.: Gesley Alex Veloso Martins
Membro titular (IQ/UnB)

Brasília, DF
2015

Aos meus pais e à minha
irmã, por me apoiarem
em todas as minhas
escolhas e acreditarem
em mim.
Muito Obrigada!

AGRADECIMENTOS

À minha família, meu pai, minha mãe, minha irmã, minha cunhada e meu namorado que sempre acreditaram na minha capacidade de buscar meus sonhos. Obrigada pelo carinho, apoio, orientação, confiança, respeito e paciência em todos esses anos.

Agradeço a todos os meus amigos pelos vários anos que estiveram ao meu lado e por toda a ajuda e momentos que me proporcionaram, vocês sabem quem são.

Obrigada a toda família do meu namorado e a família da minha cunhada com as quais sei que sempre posso contar e ao resto da minha família, que mesmo longe mora em meu coração.

Pelo entusiasmo, paciência, orientação, participação e, principalmente, comprometimento neste projeto, agradeço a professora Andressa Vasques Mendonça, com quem tive o prazer de trabalhar.

Agradeço a Universidade de Brasília e o corpo docente que me proporcionou um estudo de excelência e muito aprendizado. Pelas dicas em modelagem matemática, agradeço a Isabela. Pelo apoio, sem o qual este trabalho não seria concluído, agradeço a ajuda da professora Janaína Diniz, Denize e todos do grupo InovaCerrado da Faculdade UnB Planaltina – FUP/UNB.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiv
LISTA DE EQUAÇÕES	xvi
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Cultivo dos frutos do Cerrado	19
2.2. Caracterização físico-química de alimentos	20
2.3. Secagem	21
2.3.1. Curvas de secagem	23
2.3.2. Desidratação de alimentos	24
2.3.3. Atividade da água e umidade em alimentos	26
2.3.4. Fluxograma geral para a produção de frutas	27
2.3.5. Tipos de secadores	29
2.3.6. Secador de bandejas de leito fixo com fluxo de ar forçado	30
2.3.7. Secagem natural versus artificial	34
2.3.8. Modelagem matemática	35
3. OBJETIVOS	37
3.1. Gerais	37
3.2. Específicos	37
4. METODOLOGIA	38
4.1. Origem da cagaita estudada	38
4.2. Análise físico-química da cagaita	38
4.3. Fluxograma proposto da secagem da cagaita	40
4.4. Curvas de secagem	40
4.5. Modelagem matemática	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1. Análise físico-química	47
5.2. Curvas de secagem	49
5.3. Modelagem matemática	53

5.4. Difusividade efetiva e energia de ativação _____	60
6. CONCLUSÃO _____	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	67

RESUMO

MARQUES, Raquel Rocha. **Modelagem matemática das curvas de secagem de cagaita em secadores elétrico e solar**. Universidade de Brasília, julho, 2017.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Andressa Regina Vasques Mendonça.

O processo de secagem se propõe a reduzir o teor de água dentro do sólido fazendo com que a atividade da água dentro dos produtos diminua e, conseqüentemente, aumente o tempo de vida útil de alimentos, assim como facilita o transporte, manuseio e armazenamento, não possibilitando o desenvolvimento de microrganismos, além de ser um processo simples e de baixo custo. Uma das espécies presente no Cerrado é a cagaita (*Eugenia desynterica*). Essa fruta possui esse nome devido seu composto bioativo, que causa um efeito laxativo. Ela é comumente conhecida pelos extrativistas, mas não é comercializada em ampla escala, fazendo o estudo da desidratação dessas frutas de suma importância. A cagaita verde e madura foram caracterizadas através de análises físico-químicas, como teor de umidade (perda por dessecação) e teor de cinzas (resíduo por incineração). A cagaita apresentou um teor alto de umidade com mais de 91% em base úmida. Por meio do uso de um secador solar se determinou curvas de secagem das cagaitas verde e madura congelada, o mesmo foi feito em um secador elétrico convectivo de bandejas de leito fixo nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C para estas cagaitas e a cagaita verde *in natura*. Através dessas curvas foram avaliados os aspectos físicos da fruta, assim como sua cinética de secagem, principalmente a taxa de secagem, em que se observa a influência da temperatura no processo. Com isso, é possível realizar a modelagem matemática, onde um conjunto de equações são capazes de prever o funcionamento do método. Por fim, foram calculadas a difusividade efetiva, que segue a Lei de Fick e a energia de ativação. As cagaitas secas em secador elétrico à 70°C mostraram os melhores resultados em relação a taxa de secagem com menor tempo necessário para realizar a secagem e foram as que melhor se adequaram aos dados experimentais na modelagem matemática.

Palavras-chave: cagaita, frutos do cerrado, cinética de secagem, curvas de secagem, modelagem matemática.

ABSTRACT

MARQUES, Raquel Rocha. **Mathematical modeling of drying curves of cagaita in electric and solar dryers.** University of Brasília, July, 2017.

Adivisor: Dr.^a Andressa Regina Vasques Mendonça.

The drying process proposes to reduce the water content within the solid by making the water activity within the products diminish and, consequently, increase the shelf life of the food, as well as facilitate transportation, handling and storage and not enabling the development of microorganisms, in addition the process is considered simple and low-cost. One of the species present in Cerrado is the cagaita (*Eugenia desynerica*). This fruit has this name due to its bioactive compound, which causes a laxative effect. It is commonly known by extractivists, but is not marketed on a large scale, making the study of dehydration undoubtedly important. The *in natura* green cagaita, the green frozen cagaita, the mature frozen were characterized through chemical physical analysis, such as moisture content (desiccation loss) and ash content (residue per incineration). The cagaita has a high moisture content with more than 91% in wet basis. Using a solar drier the drying curves of the green frozen and the mature frozen cagaita were determined, the same was done for convective drier with fixed bed trays at temperatures of 50°C, 60°C and 70°C for these cagaitas and the green *in natura*. Through curves, it is possible to evaluate the physical aspect of the fruit, such as their drying kinetics, especially the drying rate, in which the influence of temperature in the process is observed. With this, it is possible to perform a mathematical modeling, where a set of equations are able to predict the operation of the method. Finally, were calculated the effective diffusivity, which follows Fick's law, and activation energy. The dry cagaitas at 70°C showed the best results in relation to the drying rate with the shortest time necessary to carry out the drying and they were the best suited to the experimental data in mathematical modeling.

Keywords: cagaita, Cerrado fruits, drying kinetics, drying curves, mathematical modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cagaitas verde e madura (cor amarela) <i>in natura</i> (à esquerda) e cagaitas verde e madura congeladas (à direita).....	20
Figura 2: Curva típica de velocidade de secagem constante. GEANKOPOLIS, 1998. Adaptado por COUTO, 2015.....	23
Figura 3: Fluxograma geral para desidratação de frutas. Fonte: MELONI, 2003.	27
Figura 4: Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas. Fonte: MELANI, 2003.	31
Figura 5: Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar através das bandejas. Fonte: MELANI, 2003.	31
Figura 6: Secador tipo túnel concorrente. Fonte: MELANI, 2003.	32
Figura 7: Secador tipo túnel contracorrente. Fonte: MELONI, 2003.	33
Figura 8: Esquema do fluxo de ar quente circulando sobre o produto. Fonte: MELONI, 2003.	33
Figura 9: Esquema do fluxo de ar quente atravessando o produto. Fonte: MELONI, 2003.	33
Figura 10: Fluxograma proposto para no processo de secagem.	40
Figura 11: Cagaitas verdes fatiadas, sementes das cagaitas e fatiador.	41
Figura 12: Desidratador elétrico modelo Pardal PEG 60. Vista frontal (à esquerda), vista lateral (centro) e secagem em batelada na bandeja com cagaitas verdes <i>in natura</i> (à direita).	42
Figura 13: Secador solar.	43
Figura 14: Seladora (à esquerda) e cagaitas verde <i>in natura</i> seladas (à direita).	43
Figura 15: Cagaitas verde e madura congeladas após a secagem (encolhimento das frutas).	49
Figura 16: Curva típica de secagem da cagaita verde <i>in natura</i> em secador elétrico.	49
Figura 17: Curva típica de secagem da cagaita verde congelada em secador elétrico.	50
Figura 18: Curva típica de secagem da cagaita madura congelada em secador elétrico.	51

Figura 19: Curva típica de secagem da cagaita verde e madura congelada em secador solar.	51
Figura 20: Curvas de ajuste da cagaita verde <i>in natura</i> em desidratador elétrico....	54
Figura 21: Curvas de ajuste da cagaita verde congelada em desidratador elétrico.	54
Figura 22: Curvas de ajuste da cagaita madura congelada em desidratador elétrico.	55
Figura 23: Curvas de ajuste da cagaita verde congelada em desidratador solar.	55
Figura 24: Curvas de ajuste da cagaita madura congelada em desidratador solar.	56
Figura 25: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaita verde <i>in natura</i> em desidratador elétrico.	61
Figura 26: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaita verde congelada em desidratador elétrico.	61
Figura 27: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaita madura congelada em desidratador elétrico.	62
Figura 28: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva das cagaitas verde e madura congeladas em secador solar.	62
Figura 29: Curvas obtidas para determinação da energia de ativação 1 através da difusividade efetiva 1 para as cagaitas secas em desidratadora elétrica.	64
Figura 30: Curvas obtidas para determinação da energia de ativação 2 através da difusividade efetiva 2 para as cagaitas secas em desidratadora elétrica.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de secadores. Fonte: COUTO, 2015.....	29
Tabela 2: Modelos matemáticos utilizados nas curvas da secagem da cagaita.	44
Tabela 3: Resultados das análises físico-químicas.....	47
Tabela 4: Valores de espessura para a fatia de cagaitas congeladas.	48
Tabela 5: Valores dos coeficientes de correlação linear (R^2), parâmetros dos modelos ajustados de secagem e erros médios estimados (SE) dos coeficiente de secagem (k) das cagaitas verde <i>in natura</i> , verde congelada e madura congelada em desidratadora elétrica e cagaitas verdes e maduras congeladas em desidratadora solar.....	56
Tabela 6: Difusividades efetivas (Def) obtidas nas secagens das cagaitas.	63
Tabela 7: Energia de ativação do processo de secagem da cagaita por secador elétrico.	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

B.U.	Base úmida
B.S.	Base seca
cm	Centímetros
D_{ef}	Difusividade efetiva (m^2/s)
D_0	Fator de Arrhenius
DF	Distrito Federal
E_a	Energia de ativação (J/mol)
et al.	et alii (e outros) ou et aliae (e outras)
g	Gramas
h	Horas
kcal	Quilocaloria
L	Comprimento característico, semi-espessura da amostra
$m_{amostra}$	Massa da amostra(g)
m_{cinzas}	Massa de cinzas (g)
$m_{úmida}$	Massa de água contida na amostra (g)
m	Metro
mg	Miligramas
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
m^2	Metros quadrados
R	Constante universal dos gases (8,314 J/mol)
RU	Razão de umidade
s	Segundos
t	Tempo (s)
T	Temperatura absoluta (K)
X	Conteúdo de umidade ($kg_{água}/kg_{massa\ seca}$)
\bar{X}	Conteúdo médio de umidade ($kg_{água}/kg_{massa\ seca}$)
X_{eq}	Conteúdo de umidade de equilíbrio ($kg_{água}/kg_{massa\ seca}$)
X_0	Conteúdo de umidade no instante inicial ($kg_{água}/kg_{massa\ seca}$)
Z	Direção da transferência (m)

Ȳ Conteúdo adimensional de umidade
°C Graus Celsius

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Teor de umidade.....	39
Equação 2: Teor de cinzas.....	39
Equação 3: Razão de umidade.....	44
Equação 4: Modelo de Newton.....	44
Equação 5: Modelo de Page.....	44
Equação 6: Modelo de Henderson & Pabis.....	44
Equação 7: Modelo de Verna.....	44
Equação 8: Balanço de massa.....	44
Equação 9: Balanço de massa.....	45
Equação 10: Balanço de massa.....	45
Equação 11: Balanço de massa.....	45
Equação 12: Balanço de massa.....	46
Equação 13: Inclinação do gráfico $\ln(X/X_0)$ versus t	46
Equação 14: Equação de Arrhenius da dependência da difusividade efetiva com a temperatura.....	46

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios mundiais é a produção de alimentos para uma população que já ultrapassa 7 bilhões de habitantes e continua a crescer. O Brasil é uma das grandes forças produtoras e exportadoras de alimentos, com mais de 150 milhões de hectares agricultáveis (MELONI, 2003), em que 2,2 milhões são utilizados para a plantação de frutas, a fim de produzir mais de 46 milhões de toneladas de frutas anualmente (REETZ et al., 2015).

O Cerrado é uma das maiores regiões brasileiras produtoras de alimento, com mais de 25% da produção brasileira de grãos alimentícios. É o segundo maior bioma do Brasil, ficando atrás somente da Floresta Amazônica. Abrange uma área de, aproximadamente, 23% do território nacional e estende-se pela região Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (CARDOSO, 2011; COUTO, 2015). Apesar de o Cerrado possuir limitações impostas ao desenvolvimento da flora e fauna, como por exemplo a característica ácida do solo e a escassez de chuvas, esse ecossistema apresenta uma grande variedade de espécies (COUTO, 2015).

O desenvolvimento de tecnologias e pesquisas na região vem transformando o Cerrado em um importante polo de produção alimentícia. Entretanto, as frutas nativas, que são utilizadas pela população local, ainda não foram inseridas no agronegócio devido a diferentes formas de exploração extrativista, falta de tecnologias para produção em escala, aspectos socioculturais ou pelo desconhecimento do potencial de aproveitamento das frutas (VIEIRA et al., 2006).

Dentre as espécies frutíferas brasileiras encontradas no Cerrado, tem-se a cagaita (*Eugenia dysenterica*). Tanto o nome vulgar como o nome científico se referem à propriedade laxativa do fruto, principalmente, no fruto maduro no início da fermentação. Sendo assim, essa espécie, assim como diversas outras do bioma, pode ser aproveitada para fins alimentícios e medicinais, porém é pouco conhecida pela população em geral e pouco utilizada, devido ao temor do efeito laxativo e sua sazonalidade (VIEIRA et al., 2006; CARDOSO, 2011).

Desse modo, com o intuito de aumentar a produção de alimentos e a exportação é necessário conservar as espécies nativas, assim como reduzir perdas na cadeia produtiva, e estudá-la, não se restringindo a apenas garantir sua sobrevivência (SILVA, 2015).

Nesse contexto, passa a ser indispensável métodos de conservação de alimentos. A secagem é um processo simples e de baixo custo de conservação de alimento que reduz as perdas pós-colheita. Tal processo consiste na eliminação de água presente no fruto e, conseqüentemente, aumenta o tempo de vida útil do alimento, já que microrganismos não terão um ambiente ideal para se reproduzir e desenvolver. O processo ainda reduz o peso do produto final o que causa um decréscimo nos custos de produção nas etapas de embalagem, transporte, armazenagem e, ainda, disponibiliza o produto durante todo o ano (MELONI, 2003).

Para escolher o método de secagem ideal, deve-se verificar diversos fatores como o tempo gasto de processo, isto é, a velocidade de troca de calor entre a matéria prima e o ar, que pode ser avaliado através da sua difusividade efetiva em diferentes temperaturas de processo (COUTO, 2015) e analisar a modelagem matemática das curvas de secagem, que é a área de conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos em sistemas reais. Assim, é necessário conhecer as relações matemáticas que descrevem o fenômeno envolvido (AGUIRRE, 2007).

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo realizar o estudo da influência de alguns parâmetros físico-químicos do processo de secagem da cagaita em um secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar forçada (desidratadora) e secagem solar, a fim de otimizar o método de produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cultivo de frutos do Cerrado

O Cerrado ocupa 23% do território brasileiro e está localizado em diversos estados do país, principalmente nos estados de Minas Gerais, Tocantins e toda região Centro-Oeste, compondo uma área de 206 milhões de hectares (VIEIRA et al., 2006).

Dentre os biomas brasileiros, o Cerrado é o mais característico do país ocupando posição de destaque devido a biodiversidade vegetal que pode ser utilizada de diferentes formas (CARDOSO, 2011). O uso da flora nativa tem grande importância para as populações rurais da região e seus frutos possuem lugar de destaque, pois apresentam características específicas capazes de contribuir para uma dieta balanceada e rica em nutrientes, como açúcares, proteínas, vitaminas e sais minerais, podendo ser consumidos *in natura* ou na forma de sucos, licores, sorvetes, farinhas, geleias e etc. (SOARES et al., 2009).

Portanto, os frutos nativos desse bioma tem despertado interesse devido suas propriedades funcionais e nutricionais, juntamente com a presença de compostos bioativos, que podem apresentar efeitos fisiológicos adicionais. Apesar da importância nutritiva, tais frutos apresentam pouco ou nenhum valor comercial (DUARTE et al., 2015).

A cagaita é uma dessas frutas encontrada no Cerrado e é conhecida pela espécie *Eugenia desynerica* DC que possui excelentes características nutricionais, mas é altamente perecível e não está disponível em períodos entressafra (DUARTE et al., 2015).

A cagaiteira, árvore que possui a fruta, pertence à família *Myrtaceae*, que vem do termo *myrtos*, que significa perfume. Tal família possui 14 gêneros e 211 espécies distintas, sendo a *Eugenia desynerica* DC a mais comumente encontrada na região Centro-Oeste do Brasil (VIEIRA et al., 2006). A floração da cagaiteira ocorre no mês de agosto, com flores brancas abundantes e seus frutos crescem logo em seguida, mesmo na época de seca, e caem maduros no fim de setembro e início de outubro. A árvore tem grande capacidade produtiva, variando de 500 a 2000 frutos, que pesam entre 13 a 20g, com comprimento de 3 a 4cm e diâmetro médio entre 3 a 5cm (SANTOS, 2015).



Figura 1: Cagaitas verde e madura (cor amarela) *in natura* (à esquerda) e cagaitas verde e madura congeladas (à direita).

Em alguns anos, todo o processo de floração e frutificação ocorre na ausência de chuvas, em que a planta usa as reservas de água presentes no subsolo, além de apresentar grande resistência ao fogo, pois a árvore apresenta a casca do tronco grossa e na época de queimadas já perdeu toda a sua folhagem. Por isso, o seu tempo de safra é considerado curto, com os frutos presentes na árvore durante 14 a 16 semanas. (VIEIRA et al., 2006). A fruta possui efeito laxativo quando consumida em grandes quantidades ou, principalmente, quando consumida madura, em que o período de fermentação é maior (VIEIRA et al., 2006), o que lhe confere um potencial bioativo para a possível fabricação de laxantes.

2.2. Caracterização físico-química de alimentos

A cagaita é uma planta alógama, ou seja, plantas que realizam polinização cruzada (acima de 95%), no caso da cagaiteira as abelhas causam a alogamia (VIEIRA et al., 2006). As espécies alógamas são caracterizadas pela heterogeneidade em relação às suas características, podendo ser influenciadas por componentes ambientais ou genéticos. Portanto, a análise de características físicas e físico-químicas da cagaita passa a ser de fundamental importância para a secagem e modelagem matemática (COUTO, 2015).

As análises realizadas foram de teor de umidade e teor de cinzas. Apesar das inúmeras potencialidades dos frutos do Cerrado, poucos são os dados disponíveis na literatura referente à cagaita, principalmente, por ter uma safra curta e não estar

disponível no período entressafra. Sendo observado um reduzido número de publicações referentes ao tema (DUARTE et al., 2015).

Segundo Costas et al. (2016) a cagaita apresenta teor de umidade de 3,55% em base seca e teor de cinzas de 9,43%. Já segundo Martins (2006) a fruta apresenta 91,33% de umidade em base úmida e 0,24% de teor de cinzas. Dessa forma, verificam-se poucas e conflitantes informações a respeito das características dessa fruta, assim como de tecnologias adequadas de processamento para produtos alimentícios, tornando a secagem um método de estudo interessante, além de despertar a comunidade científica sobre o potencial dos frutos nativos.

2.3. Secagem

Água e outros líquidos podem ser removidos de sólidos mecanicamente por prensas, centrífugas ou vaporização térmica. Em geral, a secagem de um sólido consiste na eliminação de pequenas quantidades de um líquido, em sua maioria, a água, a fim de reduzir o teor de líquido residual. A secagem, usualmente, é a etapa final de um processo que segue uma série de operações unitárias, em que o produto final estará pronto para ser empacotado (MCCABE, 1993).

A remoção de água mecanicamente é de baixo custo em relação a remoção de água termicamente. Portanto, é aconselhável reduzir a quantidade de líquido antes de começar a secagem para que o gasto de energia diminua. Porém, para melhor caracterizar as curvas de secagem, toda a água presente na fruta deve ser colocada na desidratadora, de modo que todo o líquido presente no material será analisado, já que o líquido presente na amostra final seca varia de produto para produto. Assim, o teor de umidade do produto seco varia, uma vez que depende do tipo de produto utilizado (MCCABE, 1993).

Os sólidos a serem secos possuem diferentes formas e, conseqüentemente, possuem diferentes classificações devido às suas propriedades diversas. O líquido que será vaporizado pode se encontrar em distintos lugares no sólido, isto é, pode ser encontrado na superfície, estar inteiramente dentro do sólido ou estar em ambos os lugares. O produto seco pode ser manuseado em um ambiente quente ou pode precisar de um tratamento especializado em temperaturas baixas ou moderadas (COUTO,2015).

Não existe um aspecto simples de classificação dos equipamentos de secagem. Alguns secadores podem ser contínuos, por bateladas, por agitação dos sólidos e alguns podem ser classificados sem agitação. Secadores que envolvem operação utilizando vácuo e baixas pressões, como os liofilizadores, reduzem a temperatura de secagem. Alguns tipos de secadores lidam com qualquer tipo de material, enquanto outros são limitados aos tipos de alimentação que podem aceitar. Portanto, existe uma divisão geral convencionada para os equipamentos de secagem classificada por (1) secadores em que o sólido é exposto diretamente a um gás quente (geralmente o próprio ar) e (2) secadores em que o calor é transferido para o sólido de um meio externo (geralmente através de uma superfície metálica com que o sólido se encontra em contato) (MCCABE, 1993).

Já o processo de secagem pode ser classificado como contínuos, quando o material é adicionado no equipamento continuamente, por bateladas, quando uma determinada quantidade de material é adicionada ao equipamento por um determinado período de tempo ou semi-contínuo, onde somente a alimentação ou o produto é obtido na forma contínua (COUTO, 2015).

Os processos de secagem também são classificados em relação às suas condições físicas utilizadas para fornecer o calor e extrair o vapor de água. Podem ser por ar quente, em que o calor é fornecido por contato direto entre o ar à pressão atmosférica e o vapor de água formado é retirado pelo mesmo ar, secagem à vácuo, onde as baixas pressões fornecem condições mais brandas de trabalho e mais rapidez na retirada da água, além de prover calor indiretamente pelo contato entre o sólido e as paredes de metal ou por liofilização, em que a água é sublimada diretamente a partir do material congelado com o funcionamento similar à secagem à vácuo (COUTO, 2015).

Couto (2015) estudou em seu trabalho a secagem de frutos do Cerrado, como o buriti e o pequi, em secador elétrico de leito fixo, verificando que a cinética de secagem é influenciada pela temperatura. Observou que para a temperatura de 70°C, obteve-se um tempo de secagem menor que em 60°C e 50°C, indicando que a temperatura é a maior variável durante o processo. Outros trabalhos como Silva et al. (2015), Leite et al. (2014), Reis et al. (2011), Martinazzo et al. (2007) e Morais et al. (2013) concordam com tal observação.

2.3.1. Curvas de secagem

A cinética de secagem é a rapidez com que o sólido perde umidade (COUTO, 2015). Para reduzir o conteúdo de umidade de um sólido, deve-se considerar o tamanho do secador necessário, as diferentes condições de umidade relativa do ar, as temperaturas variáveis do ar quente e o tempo necessário para secar o sólido (GEANKOPOLIS, 1998).

Para se determinar experimentalmente a velocidade do material a ser secado, a amostra de sólido deve ser colocada na bandeja de um secador e as amostras devem ser retiradas a cada período de tempo pré-determinado para ser pesada e seu valor anotado, a fim de determinar a umidade que segue o comportamento da figura abaixo.

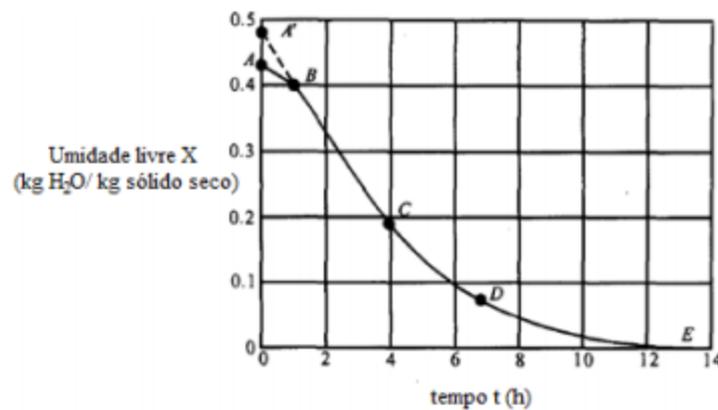


Figura 2: Curva típica de velocidade de secagem constante. GEANKOPOLIS, 1998. Adaptado por COUTO, 2015.

Na figura 2, o ponto A representa o conteúdo de umidade livre inicial. Geralmente, o sólido se encontra a uma temperatura inicial inferior à temperatura final e sua taxa de evaporação é crescente continuamente. Porém, se o sólido estiver inicialmente a uma temperatura superior, a velocidade de secagem começa no ponto A'. Ao chegar ao ponto B, a temperatura atinge seu equilíbrio na superfície do sólido. Este segmento AB corresponde ao período de adaptação do alimento às condições de secagem, enquanto a água livre está evaporando. Está igualdade se mantém no segmento BC.

Durante esse segundo segmento a superfície do sólido se encontra saturada, como um filme contínuo de água sobre o sólido, ou seja, a água do sólido se encontra em contato direto com o ar e não apresenta nenhuma resistência para

evaporar. A água removida nesse período é, principalmente, a água da superfície, sendo um período relativamente curto se o sólido não for poroso. Se o sólido for poroso, o período correspondente ao segmento BC é maior, pois a água superficial é substituída pela água do interior do sólido. Desse modo, esse período de secagem constante é mais pronunciado em materiais de umidade elevada.

O ponto C é atribuído ao fim do período de secagem constante e a umidade nesse ponto é conhecida como umidade crítica. A partir desse ponto há um aumento na resistência interna, ou seja, o movimento do líquido no interior do sólido em direção à superfície é insuficiente para compensar o líquido que é evaporado, mesmo que a dificuldade de escoamento dependa dos poros presentes no sólido. Inicia-se o primeiro período decrescente de velocidade (segmento CD), em que cada vez menos líquido se encontra na superfície do sólido para ocorrer evaporação, o que torna o sólido cada vez mais seco podendo causar rachaduras e outras deformidades em sua superfície (COUTO, 2015).

A partir do ponto D, expressa-se o segundo período decrescente, onde a umidade do sólido diminui até entrar em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa do ar (COUTO, 2015). Quando essa umidade de equilíbrio é alcançada, o processo de secagem é interrompido, pois significa que todo líquido presente no sólido foi evaporado. A umidade de equilíbrio é atingida quando a massa do alimento entra em equilíbrio, ou seja, quando o sólido ficou por tempo suficiente no secador a ponto de a pressão parcial de vapor de água da superfície do sólido ser igual a pressão parcial de vapor de água no ar atmosférico (GEANKOPOLIS, 1998).

2.3.2. Desidratação de alimentos

A grande maioria dos alimentos sofre deterioração com muita facilidade, diante dessa dificuldade, novas tecnologias e técnicas de conservação de alimentos vem surgindo, dentre as quais a secagem é bastante utilizada (CORNEJO et al., 2003).

A secagem possui diversas vantagens entre as quais estão a conservação do produto final, visto que com a secagem o teor de água livre diminui e se cria condições desfavoráveis para o crescimento microbiano no alimento (CORNEJO et al., 2003).

Portanto, a secagem ou desidratação de alimentos, normalmente constitui a remoção da umidade do sólido por evaporação. O que significa que os microrganismos que provocam a deterioração de alimentos não conseguem se desenvolver e se reproduzir. Além disso, muitas enzimas que possuem um papel fundamental na química dos alimentos não trabalham corretamente na ausência de água. Portanto, a redução de água pode ser controlada (até 5% de água em peso) para atingir um ponto em que o alimento ainda possua uma concentração de açúcares, ácidos, sais, entre outros componentes, que sejam suficientes para o alimento permanecer com suas características físicas nutritivas. Dessa forma, em elevadas concentrações, ou seja, possuir menos de 10% de água em peso, ocorre a redução da atividade de água causando inibição no desenvolvimento dos microrganismos (COUTO, 2015).

Outra vantagem da secagem de alimentos é a redução do peso com consequente redução dos custos em etapas de produção. Menor gasto com embalagem, pois poderá armazenar maior quantidade de produto (maior volume) por embalagem, menor custo no transporte, em que a quantidade em peso do produto será maior e não necessita de refrigeração e menor custo de armazenamento, visto que poderá ser armazenado uma quantidade maior do alimento por área (CORNEJO et al., 2003; MELONI, 2003). Assim, esse processo representa uma forma viável de conservação de alimentos para consumo humano.

Segundo Couto (2015), trabalhos realizados por Ramos e colaboradores mostram a conservação do teor de umidade de sólidos solúveis totais em alimentos desidratados, em que observaram que as embalagens de policloreto de vinilideno à vácuo, não alterava o teor de umidade nem o teor de sólidos totais do abacaxi desidratado no tempo de armazenamento, assim como, Goneli e colaboradores mostraram que a umidade dos frutos de mamona caíram com a desidratação e Gouveia e colaboradores, que fizeram o estudo da secagem do cajá em secadores de leito fixo, revelaram que a cinética de secagem é influenciada pela temperatura, ou seja, a aplicação de uma temperatura mais elevada diminuía o tempo necessário de secagem, significando que quanto maior a temperatura do ar, maior será a taxa de secagem em um mesmo tempo de processo.

2.3.3. Atividade da água e umidade em alimentos

A água é um recurso natural essencial à vida e um dos principais componentes na maioria dos alimentos. É a partir dela que toda a atividade industrial se centraliza, além de ter a capacidade de influenciar características físicas e químicas presentes nos alimentos.

Como um bem essencial a água tem diversas funções. Algumas dessas funções são a atividade da água e a umidade.

A atividade da água pode ser definida como a relação existente entre a pressão de vapor de uma solução ou de um alimento com relação à pressão de vapor da água pura. Assim, a atividade de água de um alimento e a umidade relativa do ambiente no qual se encontram tendem a se equilibrar (FILHO et al., 2011).

Já o conteúdo de água ou umidade é a determinação da água total dentro do alimento. No entanto, esse valor, não explicita como a água está distribuída dentro do alimento, nem permite prever se toda água está ligada do mesmo modo (COUTO, 2015).

Portanto a atividade da água é a função que fornece algumas informações como: migração da água dentro do alimento, estabilidade química e bioquímica, propriedades físicas, vida útil, crescimento e desenvolvimento microbiano, sendo que a umidade não provê essa informação, isso significa que ao mencionar a conservação de alimentos, a atividade da água é a melhor medida para ser comparada com o teor de umidade (FILHO et al., 2011).

Nesse caso, é necessário levar em consideração a existência de moléculas de água com propriedades de distribuição distintas no alimento, visto que o conhecimento dessas propriedades levará ao melhor entendimento de como a água funciona em seu interior (COUTO, 2015).

Portanto, há duas formas principais em que a água é encontrada no interior dos alimentos, sendo elas livre ou combinadas. A água livre se encontra fracamente ligada aos componentes não-aquosos do alimento, isto é, é facilmente eliminada. Já a água combinada está fortemente ligada aos componentes não-aquosos do alimento (substrato) e passa a ser mais difícil de ser removida, esta água, diferentemente da água livre, não está disponível para o crescimento de microrganismos e reações químicas (FILHO et al., 2011).

Dessa maneira, a atividade da água se refere a água livre, enquanto que a umidade se refere a água total contida no alimento, que é a junção da água combina com a água livre (FILHO et al., 2011).

Segundo Couto (2015), trabalhos foram realizados com farinha de mandioca por Neto e colaboradores que observou que a atividade da água aumenta com a elevação da temperatura, que pode ser causada devido ao aumento da solubilização das substâncias favorecida pelo aumento da temperatura.

2.3.4. Fluxograma geral da produção de frutas desidratadas

No processo e cadeia de produção da secagem de alimentos são necessários cuidados e ordem desde a coleta da matéria-prima até o produto final. A figura 3 abaixo mostra as etapas de produção e o sequenciamento a ser seguido para a secagem de alimentos.



Figura 3: Fluxograma geral para desidratação de frutas. Fonte: MELONI, 2003.

A primeira etapa, apesar de não ser uma etapa de processamento, é de fundamental importância para garantia do resto do processo. Essa etapa é a de recepção, onde ocorre o controle de recebimento das matérias-primas, em que ocorre a pesagem, retirada de amostras para análise e pré-avaliação visual do

produto recebido. A pesagem do material será importante para determinar o rendimento final, assim como, o custo final de produção.

A segunda etapa consiste na lavagem das frutas, quando as características físicas da matéria-prima fica mais aparente. As lavagens podem ser realizadas por imersão em água podendo ou não utilizar cloro, a fim de remover impurezas, por agitação de água, que aumenta a eficiência do processo consideravelmente ou por jatos d'água, sendo o método mais eficiente de limpeza, já que é combinada com a lavagem por imersão que amolece as sujeiras presentes e, em seguida, jatos de água sob altas pressões são aplicadas nas frutas retirando o resto das impurezas.

A terceira etapa do processo é o descascamento que são influenciados pela comprimento da casca, pelo grau de maturação das frutas, pelas "machucaduras", manchas, tipo de armazenamento, etc. O descascamento pode ser mecânico, químico ou térmico.

A etapa de aparação é feita manualmente e visa remover cascas residuais, insetos, porções podres, estragadas, que sofreram lesões ou que possuem algum defeito. Em seguida, ocorre a etapa de corte, onde as frutas podem ser cortadas de diferente formas (cubos, fatias, anéis, rodela, etc.). O tipo de corte deve ser definido de acordo com as necessidade do mercado, capacidade de carga das bandejas do secador e tempo de secagem. Além disso, é fundamental que as espessuras ou dimensões dos pedaços sejam o mais uniforme possível para não alterar as características físicas das frutas e não possibilitar o desenvolvimento de microrganismos, caso esses alimentos não sequem uniformemente.

O tratamento pré-secagem é feito por sulfuração, em que as frutas são colocadas em câmaras herméticas (lacradas) para que a distribuição do gás seja uniforme e não ocorra nenhum escape do gás, cujo objetivo é evitar o escurecimento das frutas quando embaladas em latas. Tal tratamento também pode ser feito por sulfitação, tratamento com ácido ascórbico e branqueamento. Posteriormente, vem a desidratação que consiste em reduzir a umidade das frutas.

A próxima etapa é de condicionamento, cujo objetivo é uniformizar a umidade entre as frutas. Esta parte do processo destaca os diferentes estágios de maturação dentro do lote, pedaços de diferentes tamanhos e problemas de distribuição de ar dentro da câmara de secagem, que pode levar a um produto final com diferentes teores de umidade. O condicionamento ideal é feito nas frutas secas em um período de 10 a 15 dias à temperatura ambiente, durante esse período não deverá ocorrer

condensação da umidade na superfície das frutas secas, se isso ocorrer, o produto não poderá ser comercializado, pois indica que sua umidade é superior a 25%.

Uma das etapas finais é a embalagem, onde o produto deve ser inspecionado para que as extremidades, partes escuras ou qualquer outro defeito sejam eliminados. A última etapa do processo de produção de frutas desidratadas é a estocagem, em que as caixas com o produto final deve ser protegido contra a ação de insetos, roedores, etc. (MELONI, 2003).

2.3.5. Tipos de secadores

Os tipos mais comuns de secadores utilizados são do tipo bandeja e o do tipo túnel, mas o uso do equipamento depende da capacidade e do uso desejado. A finalidade do equipamento é desidratar o alimento obtendo uma taxa máxima de secagem com o menor dano causado ao equipamento e ao produto e com o menor custo possível (COUTO, 215).

Tabela 1: Tipo de secadores. Fonte: COUTO, 2015.

Secador	Tipo de alimento	Princípio de operação	Vantagem	Desvantagem
Bandejas/ Cabines	Pedaço	Batelada ou contínuo, por condução ou convecção	Construção simples e de custo relativamente baixo	Longos ciclos de secagem (4-48h). Trabalho com carga e descarga
Esteira	Pedaço	Contínuo, por convecção	Possuem módulos com controle das condições de secagem independentes, melhorando seu desempenho e reduzindo os custos. Larga escala	Pode haver perda de material se as partículas do sólido forem muito finas
Leito fluidizado	Pedaço pequeno e granulado	Batelada ou contínuo, por convecção	A mistura e a transferência de calor são rápidas. O produto fica de 30 a 120 segundos para evaporação de líquido superficial e 15 a 20 minutos se tiver difusão interna	Partículas podem ser quebradas em partículas menores, sendo levadas com o gás de saída

Atomização/ Spray	Pastoso pouco viscoso e líquido	Contínuo, por convecção	Obtenção de produtos de qualidade. Temperaturas não tão altas (até 80°C)	Somente alimentos que podem ser atomizados
Tambor	Pastoso e líquido	Contínuo, por condução	Usado para materiais cristalinos e granulares que precisam permanecer limpos e não devem ser expostos a gases quentes	Altas temperaturas (120°C). Dificuldade para variar a temperatura em diferentes regiões da superfície do cilindro
Vácuo	Pastoso, pedaço e líquido	Batelada ou contínuo, por condução e radiação	Obtenção de alimentos com alta qualidade	Custos elevados
Liofilizador	Pedaço e líquido	Batelada ou contínuo, por condução	Usado em baixas temperaturas. Conserva as características e o valor nutritivo. Sublimação da água	Custos elevados, utilizado somente para produtos nobres

2.3.6. Secador de bandejas de leito fixo com fluxo de ar forçado (secador elétrico)

Como dito anteriormente, um dos secadores mais usados são o do tipo bandeja e do tipo túnel, que nada mais é que uma sequência de bandejas em uma câmara maior de secagem (CORNEJO et al., 2003).

O secador de bandejas de leito fixo com passagem de fluxo de ar forçado foi utilizado no experimento e, por isso, será descrito mais especificamente.

A desidratação de frutas por esses tipos de secadores ocorre com a transferência de calor feita por convecção forçada de ar quente (COUTO, 2015).

Esses secadores operam em bateladas, ou seja, um lote do produto é desidratado por vez em uma determinada quantidade de tempo. Eles possuem uma constituição simples e são de baixo custo. Além disso, são constituídos por uma câmara retangular de metal com parede dupla e isolamento térmico entre elas (COUTO, 2015) que recebe a bandeja com as frutas (ou alimentos) a serem secos. Também são constituídos por um compartimento onde é realizado o condicionamento do ar de secagem, que, por sua vez, é impulsionado por um ventilador, passando por um sistema de aquecimento e entrando em contato com a matéria-prima, que inicia o processo de secagem (CORNEJO et al., 2003).

Em secadores com grande capacidade (no caso dos secadores tipo túnel), as bandejas são colocadas em carrinhos para facilitar o carregamento e movimentação dentro do equipamento durante o aquecimento das bandejas (CORNEJO et al., 2003).

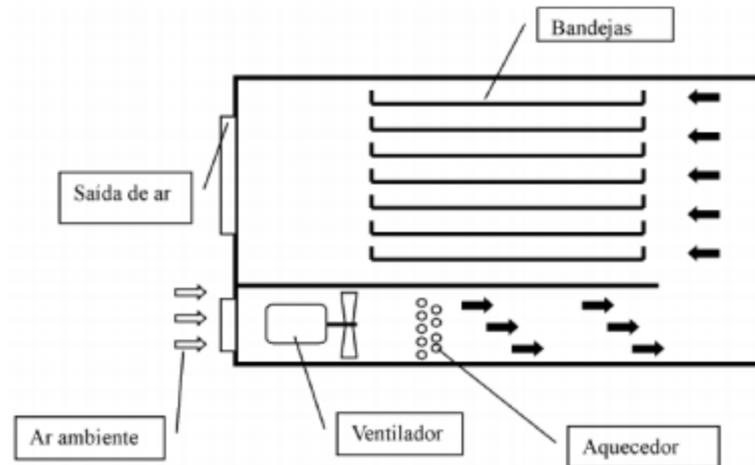


Figura 4: Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas. Fonte: MELANI, 2003.

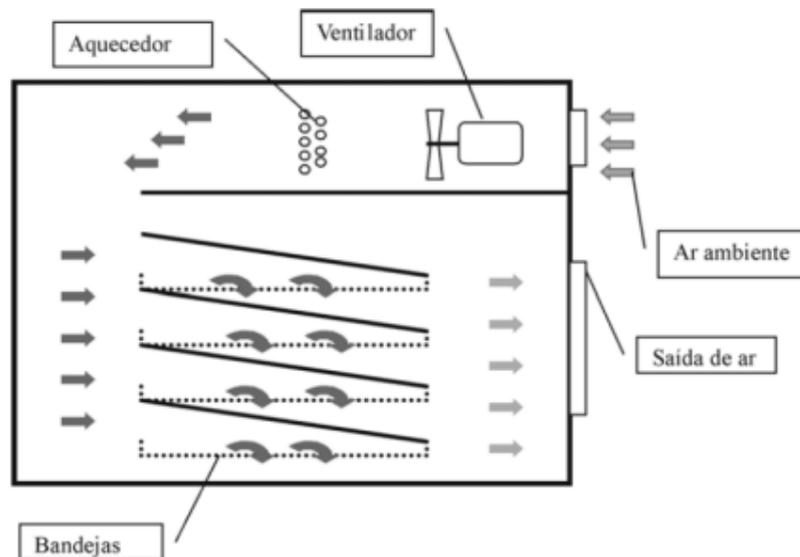


Figura 5: Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar através das bandejas. Fonte: MELANI, 2003.

Cerca de 10 a 20% do ar que passa sobre as bandejas é novo e o restante é ar quente recirculado. É aconselhável que durante o processo de secagem as bandejas sejam revezadas, para que a desidratação ocorra uniformemente em todas as bandejas (COUTO, 2015). Após a primeira batelada as bandejas são substituídas por outras para começar uma nova secagem.

Os secadores tipo túnel possuem vantagens, como as bandejas móveis que possibilitam a maior movimentação dos carrinhos que, conseqüentemente, geram economia de tempo, visto que os veículos podem ser carregados e descarregados para fora do secador. Esse tipo de secador é considerado semi-contínuo com uma capacidade de carga superior ao secador de bandeja de leito fixo (MELONI, 2003). A operação desse tipo de secador é simples, em uma extremidade do túnel se efetua a carga do carrinho com o produto úmido, enquanto que na outra extremidade é feita a retirada do carrinho obtendo o produto seco. Tais secadores podem ser construídos concorrente e contracorrente (COUTO, 2015).

No secador concorrente a secagem inicial é mais rápida em função do contato direto do ar quente com o alimento úmido, assim que ele adentra a câmara de secagem, ao final a secagem passa a ser mais lenta, visto que o carrinho se movimenta dentro do túnel e entra em contato com uma ar relativamente mais frio (MELONI, 2003).

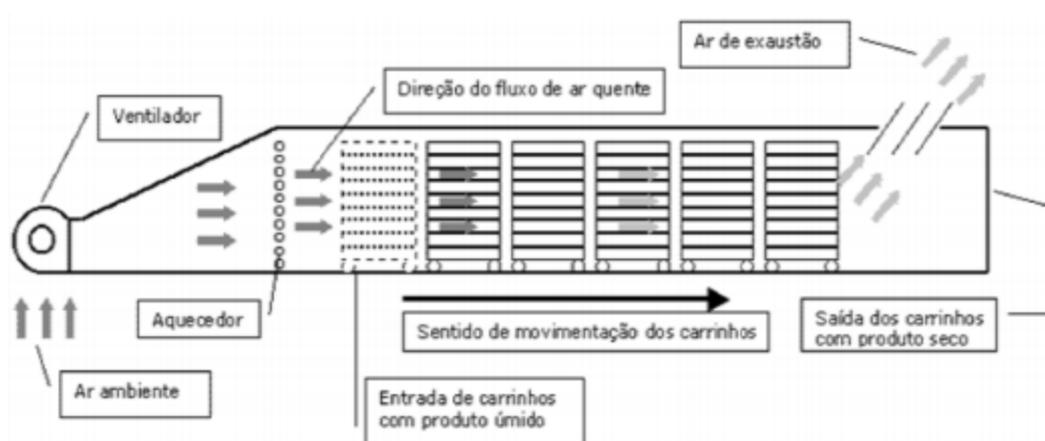


Figura 6: Secador tipo túnel concorrente. Fonte: MELANI, 2003.

Já o secador tipo túnel contracorrente ocorre o contrário, o contato primário do alimento úmido é com o ar frio e à medida que percorre o túnel entra em contato com o ar mais quente e seco (MELONI, 2003).

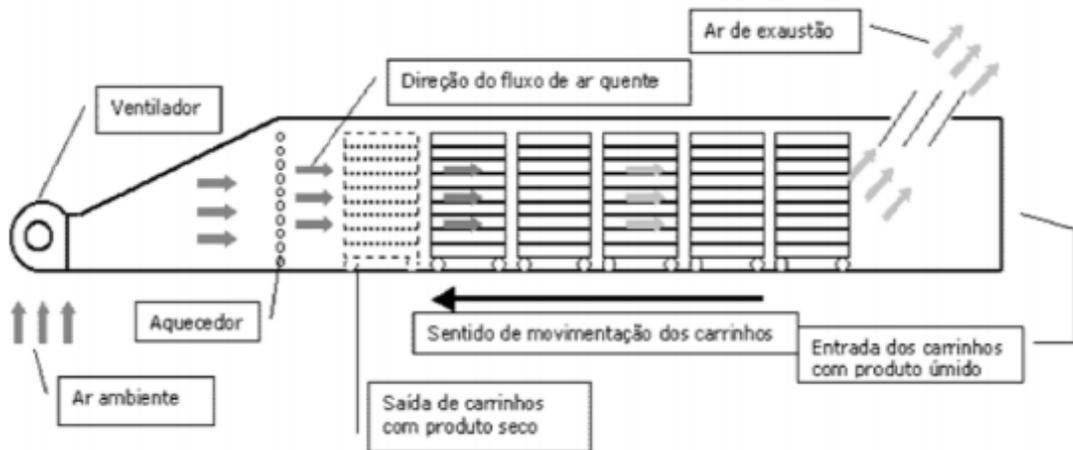


Figura 7: Secador tipo túnel contracorrente. Fonte: MELONI, 2003.

Na desidratação com frutas inteiras ou com pedaços maiores e desiguais, em que a distribuição das frutas sobre a bandeja é feita com uma única camada, o sentido de movimentação do ar é adotado em paralelo com as bandejas.

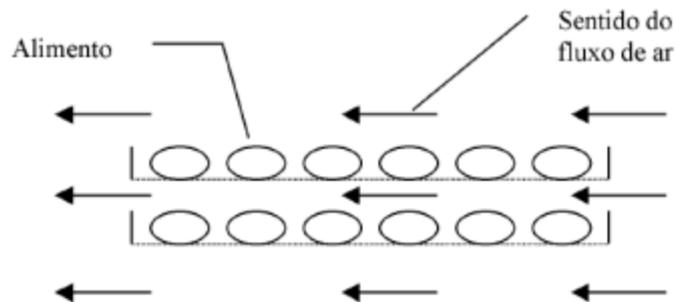


Figura 8: Esquema do fluxo de ar quente circulando sobre o produto. Fonte: MELONI, 2003.

A velocidade do ar aquecido pode variar entre 0,5 a 3 m/s, dependendo da movimentação de ar em relação as bandejas. Velocidades mais baixas podem ser empregadas sem causar alterações no processo de secagem quando o ar quente atravessa a camada de produto disposta sobre a bandeja (MELONI, 2003).

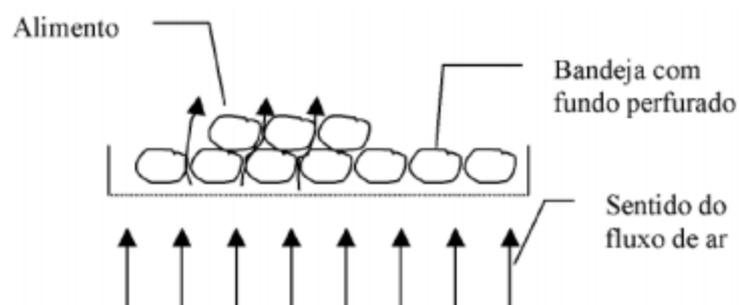


Figura 9: Esquema do fluxo de ar quente atravessando o produto. Fonte: MELONI, 2003.

Com este fluxo cruzado se obtém tempos de secagem mais curtos, devido a maior área superficial exposta ao ar. Nem todos os sólidos podem ser secados dessa maneira, pois é necessário que o ar quente possa atravessar a bandeja e a camada distribuída sobre ela.

O aquecimento do ar no interior da câmara pode ser realizado por meio da queima do gás GLP, por resistências elétricas, pelo uso de vapores em trocadores de calor ou aquecimento solar, mas a escolha do tipo de aquecimento deve ser feita dependendo dos tipos de frutos, das condições econômicas e do potencial de poluição ambiental (COUTO, 2015).

2.3.7. Secagem natural versus secagem artificial

A secagem natural consiste em expor a matéria-prima a períodos longos de radiação solar e sob condições climáticas de temperaturas relativamente altas, expondo o produto nas horas de mais radiação possível, além de ventos com intensidade moderada, baixas umidades relativas e locais propriamente isolados para que nenhum animal interfira na secagem.

Este método é mais lento e, quando utilizado, favorece a ocorrência de perdas de produto devido a contaminações de insetos e microrganismos, isto é, mesmo em um local mais adequado, cuidados especiais de manipulação e higiene são necessários e devem ser considerados para que o produto final não sofra grandes alterações e possua boa qualidade.

A secagem artificial é um processo de remoção de umidade que ocorre pelo controle da temperatura, o que não ocorre na secagem solar. Além disso, a desidratação artificial possibilita o condicionamento do ar de secagem pelo controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, já que implica no uso de equipamentos elétricos ou de outra fonte de energia que não a natural.

Nesse processo, as condições do ar de secagem não dependem das condições climáticas, o que favorece a obtenção de um produto com uma qualidade superior e menor tempo de processamento, visto que todo o processo de desidratação pode ser controlado (CORNEJO et al., 2003).

Deve-se levar em consideração que a energia solar para secagem de alimentos e outros produtos florestais apresenta uma excelente alternativa para regiões de clima tropical devido às favoráveis condições do clima. O uso de

secadores solares permite que o beneficiamento dos produtos possa ser feito com baixo capital se comparado aos secadores elétricos, além de exigir apenas treinamento básico para operação incentivando os produtores rurais a usarem essa técnica mais simples (MORAIS–DUZAT et al., 2002).

Morais-Duzat e colaboradores desenvolveram um secador multiuso para o beneficiamento de produtos naturais da Amazônia (grãos, sementes, castanhas, ervas medicinais, etc.) utilizando painéis solares fotovoltaicos, enquanto Almeida e colaboradores desenvolveram um secador solar construído a partir de material reciclável para secagem de alimentos. Já Bux et al. estudaram o desenvolvimento de um secador solar para a secagem de madeira em escala industrial mostrando que novas tecnologias na área de secagem solar vêm sendo estudadas apesar de não possuir o controle absoluto do processo devido as condições climáticas.

2.3.8. Modelagem matemática

O estudo da modelagem matemática tem despertado o interesse de vários pesquisadores para uma variedade de produtos. A modelagem matemática de um sistema dinâmico pode ser definida como “um conjunto de equações que podem prever a precisão do processo” (CASTIGLIONI et al., p. 988, 2013). Assim, existem diversos modelos matemáticos que depende do sistema considerado e das circunstâncias particulares de cada um deles, e é em função disto que um modelo pode ser mais adequado que outro modelo.

Dessa forma, estudos sobre cinética e sua otimização podem ser realizados através da modelagem. Na simulação, utiliza-se os modelos matemáticos que mais se adequam a perda de umidade do produto durante um determinado período de secagem (CASTIGLIONI et al., 2013).

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos que ocorrem na desidratação de alimentos, vários pesquisadores propuseram diversas teorias para descrever o comportamento da secagem. Dentre essas teorias se tem a teoria difusional que se apoia exclusivamente na Lei de Fick (COUTO, 2015).

Uma vez que os modelos são baseados na Lei de Fick nem sempre são satisfatoriamente representativos, deve-se calcular a difusividade, que varia conforme mudam as condições de secagem, seja temperatura ou velocidade do ar, isto é, a difusividade não é intrínseca do material e, por esse motivo, é convencionalmente chamada de difusividade efetiva (MORAIS et al., 2013).

Durante a modelagem matemática e a simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, diversos autores vem correlacionando o coeficiente de difusão com os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente temperatura e umidade relativa do ar (MORAIS et al., 2013).

Modelos como aproximação da difusão, Henderson & Pabis, Verna, Page, Newton, Midilli, Thompson, Wang & Sing e diversos outros usam tal Lei para descrever o comportamento da secagem através de parâmetros. O coeficiente de secagem (k) é um deles e demonstra o comportamento do método em relação à temperatura do processo, em que a transferência de calor e de massa está envolvida com a redução do teor de água do produto (REIS et al., 2011). Outros parâmetros são os coeficientes de regressão linear dos valores de difusão efetiva (a) que relaciona a velocidade de troca de calor entre a matéria-prima e o ar (MORAIS, 2013).

É essa simulação do comportamento de cada alimento durante a redução do teor de água, influenciada pelos parâmetros, que ajuda o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos de secagem (CORRÊA et al., 2010). Moraes et al. (2013), Reis et al. (2011), Martinazzo et al. (2007), Anjos et al. (2015), Leite et al. (2014), Corrêa et al. (2010), Park et al. (2001), entre outros estudaram a cinética de secagem de alimentos com base em modelos matemáticos e seus parâmetros envolvidos.

3. OBJETIVOS

3.1. Gerais geral

O objetivo deste trabalho consiste no estudo da influência de alguns parâmetro físico-químicos na cinética de secagem da cagaita em diferentes temperaturas e em diferentes estágios de maturação. As curvas foram realizadas um secador elétrico e um secador solar, a fim de representar o modelo matemático das curvas e calcular o seu coeficiente de difusividade e energia de ativação.

3.2. Específicos

- Obter curvas típicas de secagem da cagaita em secador de leito fixo elétrico com circulação forçada de ar nas temperatura de 50°C, 60°C e 70°C das cagaitas verde *in natura* e cagaitas verde e madura congeladas.
- Obter curvas típicas de secagem em secador solar das cagaitas verde e madura congeladas.
- Análise físico-química do teor de umidade e teor de cinzas das cagaitas verde e madura congeladas.
- Cálculo médio das espessuras das fatias das cagaitas verde e madura congeladas.
- Realizar a modelagem matemática das curvas de secagem para os modelos de Newton, Page, Henderson & Pabis e Verna.
- Obter os parâmetros dos modelos e interpretá-los.
- Calcular o coeficiente de difusividade e a energia de ativação do processo de secagem das cagaitas verde *in natura* e cagaitas verde e madura congeladas desidratadas por secador elétrico e cagaitas verde e madura congeladas desidratadas por secador solar.

4. METODOLOGIA

4.1. Origem da cagaita estudada

As análises físico-química desse experimento foram realizadas com a cagaita resultante de agricultura familiar e extrativismo de frutos de um plantio localizado no estado de Goiás, na antiga Fazenda Monjolo e Lagoa Bonita, Região Administrativa (RA) de Planaltina, Brasília - DF. Este plantio florestal pertence ao Assentamento Márcia Cordeiro Leite (Monjolo), que produz e comercializa produtos derivados da cagaita seca e de diversos outros frutos do Cerrado, tornando este trabalho de suma importância para investigação de melhores condições de trabalho para este assentamento.

4.2. Análise físico-química da cagaita

A metodologia utilizada para as análises físico-químicas das amostras de cagaita tem como base teórica as normas do Instituto Adolf Lutz. As análises realizadas foram perda por dessecação - umidade (Norma 012/IV) e resíduo por incineração - cinzas (Norma 018/IV).

Para a determinação do teor de umidade (perda por dessecação) da cagaita verde e madura, pesou-se 10 g da polpa de cada fruta congelada em um cadinho de porcelana de massa conhecida, separadamente. Os recipientes foram colocados em uma estufa a 105°C por 24 horas. Decorrido esse tempo, obteve-se 9,1041g e 9,1449g de massa seca da cagaita verde e da cagaita madura, respectivamente.

Logo em seguida, realizou-se o teste do teor de cinzas (resíduo por incineração). Colocou-se a massa seca de ambas as frutas em uma mufla a 550°C durante uma hora. Esta foi ligada antecipadamente para aquecimento prévio durante 30 minutos. As amostras foram levadas para mufla a 100°C com aquecimento gradual até 550°C para a obtenção de peso constante e de cinzas claras ou levemente acinzentadas. O tempo na mufla começou a ser contado quando a temperatura atingiu os 550°C. As amostras foram resfriadas gradualmente dentro da própria mufla até atingir temperatura ambiente e, em seguida, permaneceram por aproximadamente 30 minutos em repouso, para posterior pesagem em balança analítica.

A amostra foi retirada da mufla e se obteve uma massa de 0,0602g e 0,0504g de massa de cinzas da cagaita verde e madura, respectivamente.

O cálculo do teor de umidade e de cinzas foram feitos utilizando as equações a seguir:

$$\text{Teor de umidade} = \frac{m_{\text{úmida}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Teor de cinzas} = \frac{m_{\text{cinzas}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

$m_{\text{úmida}}$ = massa de água contida na amostra ou massa perdida (g);

m_{amostra} = massa da amostra (g);

m_{cinzas} = massa de cinzas (g).

4.3. Fluxograma proposto da secagem da cagaita

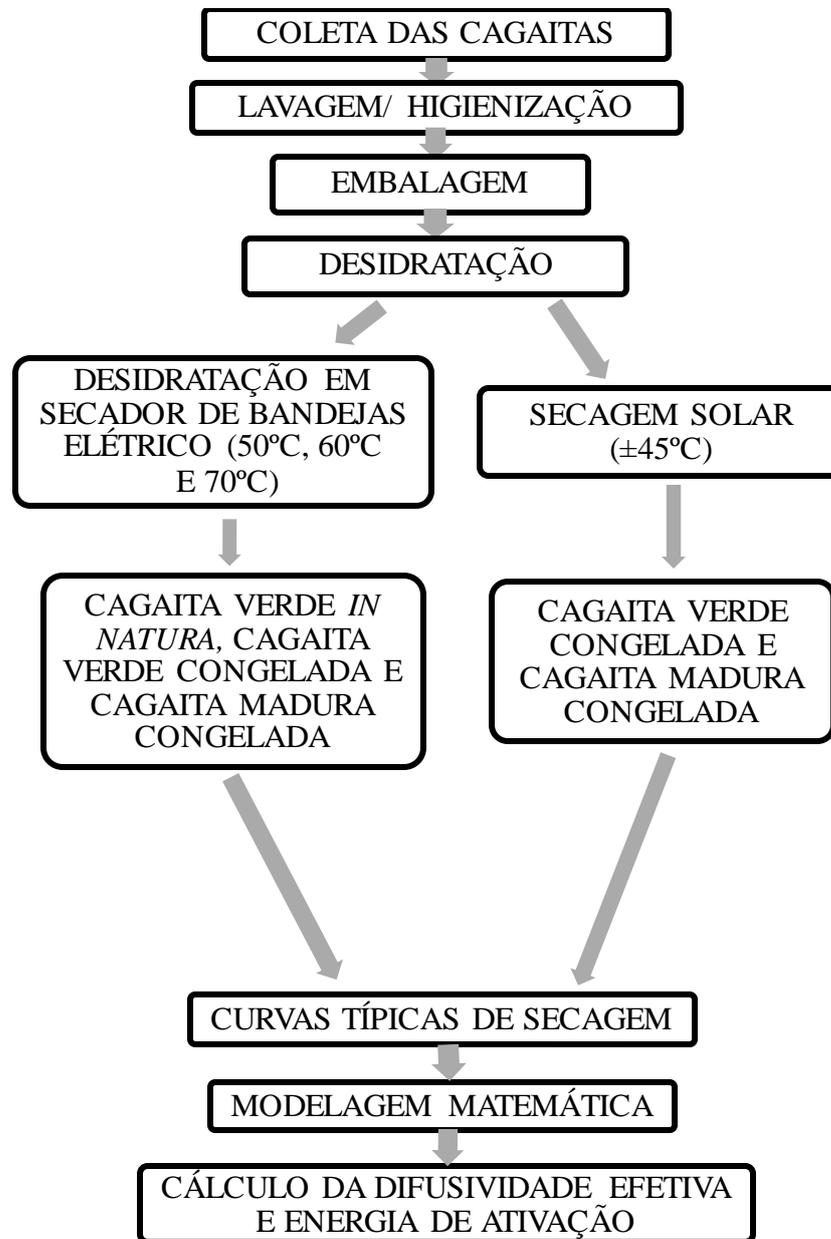


Figura 10: Fluxograma proposto para no processo de secagem.

4.4. Curvas de secagem

Após as análises físico-químicas foram determinadas as curvas de secagem para as cagaitas verde e madura *in natura* e cagaitas verde e madura congeladas em um secador elétrico e para a secagem solar das cagaitas verde e madura congeladas.

Primeiramente, todas as frutas coletadas *in natura* foram lavadas em água corrente para a retirada de impurezas superficiais e, em seguida, elas foram colocadas em um recipiente contendo água e água sanitária para total higienização. Para cada litro de água, colocou-se, aproximadamente, 10mL de água sanitária, onde as frutas foram deixadas durante 30 minutos. Parte das frutas *in natura* foram separadas para a realização das secagens, enquanto o restante foi congelado.

A polpa da fruta foi cortada com o auxílio de um fatiador, visando a simulação de placas planas infinitas. Logo após, a espessura de três fatias foram medidas com a assistência de um paquímetro e as fatias foram colocadas em cestos de massa conhecida contendo furos e pesadas em uma balança digital com precisão de $\pm 0,01\text{g}$. Em seguida, os recipientes contendo as fatias de cagaita foram colocados nas bandejas do desidratador elétrico de leito fixo, nas temperaturas de 50°C . O mesmo procedimento foi feito para as temperaturas de 60°C e 70°C .



Figura 11: Cagaitas verdes fatiadas, sementes das cagaitas e fatiador.

O acompanhamento da redução de umidade presente nas amostras foram realizadas por pesagens na balança digital, em intervalos de tempo pré-determinados, até o peso da amostra permanecer constante. O tempo medido foi de 2 em 2 minutos nos primeiros 10 minutos, de 5 em 5 minutos durante meia hora, de 10 em 10 minutos por mais meia hora, de 20 em 20 minutos durante uma hora e de 30 em 30 minutos até a estabilização do peso do produto.

O secador de bandejas elétrico utilizado (desidratadora) foi do modelo Pardal PEG 60. Tal secador foi ligado na tomada e colocado em funcionamento por 30 minutos para o condicionamento da temperatura do ar de secagem antes da realização do experimento. Tal equipamento pode ser classificado dentro da divisão geral de equipamentos como um secador em que o sólido é exposto diretamente a um gás quente (geralmente o próprio ar) (MCCABE, 1993).



Figura 12: Desidratador elétrico modelo Pardal PEG 60. Vista frontal (à esquerda), vista lateral (centro) e secagem em batelada na bandeja com cagaitas verdes *in natura* (à direita).

A secagem solar seguiu o mesmo procedimento de higienização, corte e pesagem. Os mesmos cestos de massa conhecido e a balança digital foram utilizadas no procedimento. O secador solar utilizado foi desenvolvido em parceria com alunos do curso de engenharia mecânica da Universidade de Brasília e possui a mesma classificação geral de equipamento que o secador elétrico. O experimento foi realizado entre às 11 horas da manhã e 16 horas da tarde, em que a incidência solar é mais alta. A temperatura foi medida em todos os intervalos de tempo em que a amostra foi pesada, com o auxílio de um termômetro digital, a fim de calcular a temperatura média final. O intervalo de tempo pré-determinado para a pesagem das frutas para esse secador foi o mesmo da desidratadora elétrica.



Figura 13: Secador solar.

Após a obtenção das curvas de secagem, a espessura das três fatias de cagaita foram medidas novamente com o auxílio de um paquímetro, para poder comparar a espessura inicial. Por fim, as amostras foram colocadas em sacos plásticos e embaladas com a ajuda de uma seladora e armazenadas em local arejado sem sol.



Figura 14: Seladora (à esquerda) e cagaitas verde *in natura* seladas (à direita).

4.5. Modelagem Matemática

A razão de umidade de um processo de secagem é a umidade inicial em base seca (b.s.) que faz relação com a quantidade de água e a quantidade de sólido seco. A determinação dessa razão de umidade no processo, para diferentes condições de secagem, considerando a massa de sólido seco e a porcentagem em base úmida, calculada pelo teor de umidade, pode ser calculada de acordo com a equação abaixo adimensional.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Onde:

RU = razão de umidade (adimensional)

X = teor de água médio do produto no tempo t (% b.s.)

X₀ = teor de água inicial (%b.s.)

X_e = teor de água de equilíbrio (%b.s.)

Os dados experimentais da secagem foram ajustados para os modelos matemáticos empíricos frequentemente usados para representação da secagem de produtos alimentícios.

Tabela 2: Modelos matemáticos utilizados nas curvas da secagem da cagaita.

Equação do Modelo	Modelo	
$RU = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(4)
$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(5)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson & Pabis	(6)
$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verna	(7)

*t: tempo de secagem (min); k, k₁: constantes de secagem; a: coeficientes dos modelos.

Para a escolha de um processo de secagem ideal é preciso analisar diversos fatores como, por exemplo, tempo e energia gastos. O tempo do processo, que é a velocidade de troca de calor entre a matéria-prima e o ar, pode ser analisado através da difusividade efetiva, nas diferentes temperaturas do processo.

A Teoria Difusional se baseia na Lei de Fick, em que expressa o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração da água. Utilizando a Lei de Fick para a equação de balanço de massa de água no interior do alimento, tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla X) \quad (8)$$

Onde:

X = conteúdo de umidade (kg_{água}/kg_{massa seca});

t = tempo (s);

D_{ef} = difusividade efetiva (m²/s).

Esta forma da Lei de Fick pode ser simplificada ao se desprezar a interdifusão. Tal hipótese pode ser justificada, uma vez que a água migra do interior de uma matriz fixa (água interna do alimento) para o exterior.

Considera-se a secagem em sistemas de coordenadas cartesianas, unidirecional (z), em uma placa de espessura $2L$, podendo utilizar a seguinte equação:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \cdot \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (9)$$

As seguintes condições inicial e de contorno devem ser obedecidas:

Umidade inicial uniforme: $X(z,t) = X(z,0) = X_0$.

Umidade máxima no centro: $\frac{\partial X}{\partial z} = 0$, em $z = 0$.

Aplicando a definição de média, tem-se:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \int_0^L X(z, t) dz \quad (10)$$

Assumindo-se que a umidade se distribui uniformemente e, que a resistência pode ser desprezada, a solução da Lei de Fick é representada por uma série infinita, mostrada abaixo:

$$\bar{Y} = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \cdot \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

Onde:

D_{ef} = Difusividade efetiva (m^2/s);

\bar{Y} = conteúdo adimensional de umidade;

\bar{X} = conteúdo médio de umidade ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{massa seca}}$);

X_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{massa seca}}$);

X_0 = conteúdo de umidade no instante inicial ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{massa seca}}$);

i = números de termos da série;

t = tempo (s);

z = direção de transferência (m)

L = comprimento característico, semi-espessura da amostra (m)

Para longos períodos de secagem a equação acima pode ser simplificada para somente o primeiro termo da série.

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot D_{ef} \cdot t \quad (12)$$

Os valores da difusividade efetiva foram determinados pela plotagem dos dados de secagem experimental, em termos do logaritmo natural da razão de umidade pelo tempo de secagem da equação (12) simplificada. O gráfico resultante fornece uma reta de inclinação que segue a equação abaixo:

$$\text{Inclinação} = -\frac{\pi^2}{4L^2} \cdot D_{ef} \quad (13)$$

Desse modo, com o dado obtido do coeficiente angular do gráfico é possível calcular a difusividade efetiva.

A dependência da difusividade efetiva em relação à temperatura é expressa pela energia de ativação baseada em uma equação do tipo Arrhenius.

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R \cdot T} \quad (14)$$

Onde:

D_{ef} = Difusividade efetiva (m^2/s);

D_0 = fator de Arrhenius (m^2/s);

E_a = energia de ativação (J/mol);

R = constante universal dos gases ($8,314 J/mol.K$);

T = temperatura (K).

Portanto, a energia de ativação pode ser calculada pela inclinação da reta do gráfico $\ln(D_{ef})$ pelo inverso da temperatura (K), conforme descrito pela equação do tipo Arrhenius.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análises físico-químicas

Os valores obtidos para as análises físico-químicas utilizando as equações 1 e 2 foram expressas na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das análises físico-químicas.

Fruta	Teor de umidade (%B.U.*)	Teor de umidade (%B.S.*)	Teor de cinzas (%)
Cagaita verde	91,05	8,95	0,602
Cagaita madura	91,45	8,55	0,504

*B.U.: base úmida; B.S.: base seca.

Os valores encontrados para o teor de umidade da cagaita verde e da cagaita madura em base úmida foram de 91,05% e 91,45%, respectivamente, sendo muito próximos. Esse resultado evidencia que, mesmo em diferentes estados de fermentação, ambas as cagaitas possuem, praticamente, o mesmo teor de água na fruta.

Segundo Martins (2006), que fez a avaliação físico-química de teor de umidade de frutos do cerrado desidratados por liofilização, a cagaita possui um teor de umidade em base úmida de 91,33%, o que significa que os valores encontrados foram satisfatórios. Outro valor de teor de umidade encontrado na literatura foi de 3,55% em base seca (COSTA et al., 2016) o que demonstra uma pequena discrepância entre os valores. Essa alteração entre os valores encontrados pode ter ocorrido devido aos diferentes tempos de secagem na estufa à 105°C, no presente trabalho as cagaitas ficaram por 24h na estufa, enquanto o trabalho encontrado na literatura deixou a fruta somente por 5h, o que indica que há uma possibilidade de a água não ter sido totalmente eliminada.

O valor de mais de 91% de teor de umidade em base úmida constata que a maior parcela da fruta é composta por água, isso significa que, teoricamente, o valor nutritivo da cagaita estaria bem concentrado na fruta seca. De acordo com Martins (2006), que determinou a composição centesimal e valor energético de frutos do cerrado após a liofilização, a cagaita possui 2,07% de glicídios redutores, 3,67% de glicídios não-redutores, 0,48% de proteínas e 0,17% de lipídios. Esse resultado

sugere que os nutrientes estão concentrados na cagaita seca e que com o valor de 17,92 kcal a fruta é considerada um alimento de baixa caloria.

O teor de cinzas encontrados na literatura são de 0,26% (MARTINS, 2006) e 9,43% (COSTA et al., 2016). O valor encontrado experimentalmente foi de 0,60% e 0,50% para a cagaita verde e para a cagaita madura, respectivamente. Estes resultados se mostram um pouco acima do esperado, mas dentro de uma faixa provável para o teor de cinzas, pois o erro é relativamente pequeno, mas apresenta uma grande diferença se comparado ao resultado de 9,43%.

No geral os resultados foram satisfatórios, apesar de alguns resultados desviarem dos valores encontrados na literatura.

A tabela 4 apresenta os valores encontrados para as espessuras das fatias das cagaitas verde e madura congeladas.

Tabela 4: Valores de espessura para a fatia de cagaitas congeladas.

	Antes da secagem (cm)	Depois da secagem (cm)
Cagaita verde congelada	0,41	0,23
	0,40	0,20
	0,40	0,21
Média	0,40	0,21
Cagaita madura congelada	0,42	0,21
	0,43	0,20
	0,40	0,19
Média	0,42	0,20

O encolhimento da fatia dos frutos pode ser explicado devido à perda de água durante a secagem das frutas, que causa a diminuição da tensão exercida pelo líquido nas paredes celulares do alimento provocando uma contração e, conseqüentemente, resultando em um menor volume. Na desidratação os espaços intercelulares é reduzido, ou seja, a matéria seca passa a ocupar o lugar que antes pertencia à água (COUTO, 2015).



Figura 15: Cagaitas verde e madura congeladas após a secagem (encolhimento das frutas).

Após a secagem é possível notar a diferença de cor das frutas, a mudança de textura, o seu encolhimento e ressecamento, porém estes resultados não serão considerados no trabalho, a fim de simplificar a modelagem matemática.

5.2. Curvas de secagem

As figuras 16 a 19 mostram as curvas típicas de secagem das cagaitas verde *in natura*, verde congelada, madura congelada para três temperaturas diferentes e da secagem solar da fruta.

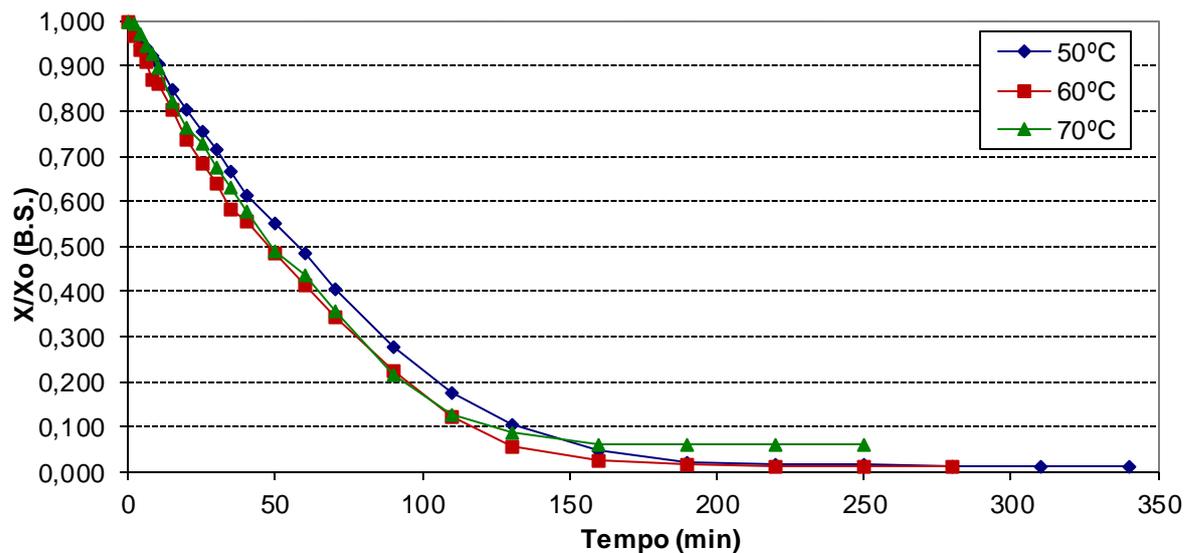


Figura 16: Curva típica de secagem da cagaita verde *in natura* em secador elétrico.

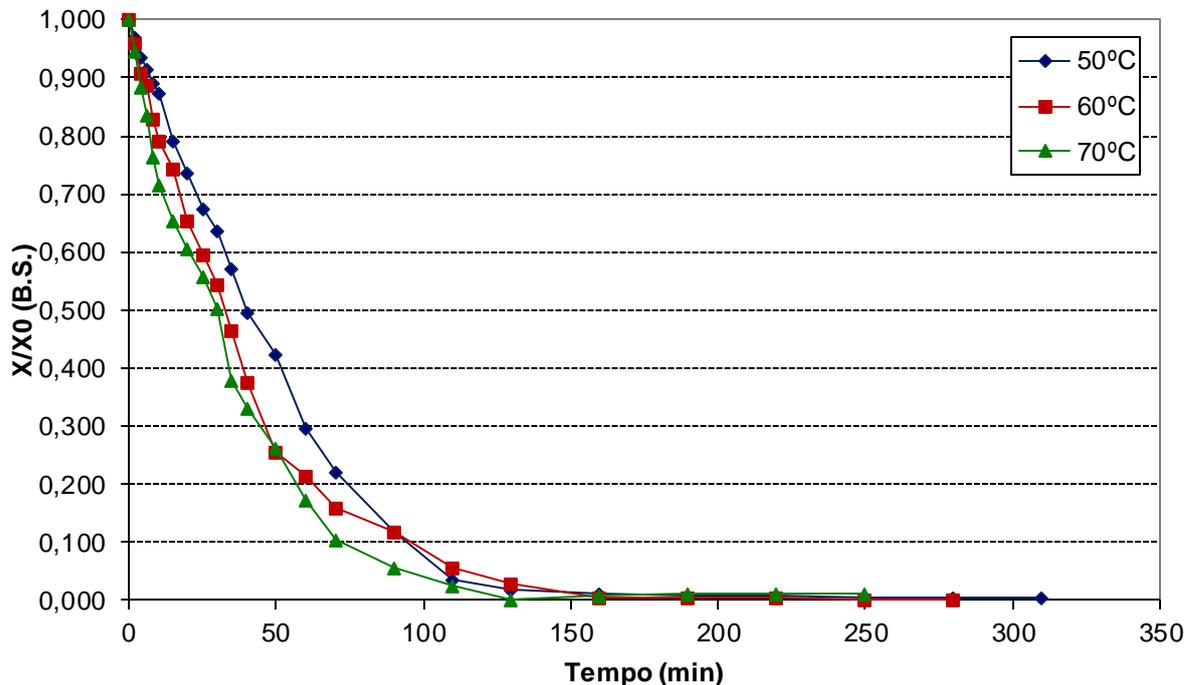


Figura 17: Curva típica de secagem da cagaita verde congelada em secador elétrico.

Comparando o gráfico da figura 16 e 17, correspondente à cagaita verde *in natura* e cagaita verde congelada desidratadas em secador elétrico, é possível notar que entre os valores de 0 e 0,4 de razão de umidade, a cagaita verde *in natura* apresentou menos resistência a secagem, visto que a curva típica de secagem se encontra mais contínua. Isso significa que a água exposta na superfície da cagaita verde *in natura* é substituída pela água do interior da fruta mais facilmente, ou seja, a fruta possui menos resistência interna ao movimento da água do interior ao se deslocar para a superfície do sólido. Segundo Couto (2015), as curvas típicas de secagem para o araticum e o pequi apresentam o mesmo comportamento. Esse fato pode ser explicado devido a cagaita congelada possuir maior quantidade de água inicial, pois o líquido a ser eliminado ainda tem que sofrer fusão para começar a ser evaporado, enquanto que a cagaita verde *in natura* não possui água congelada, tal ocorrência pode ser observada, principalmente, na curva típica de secagem à 60°C e 70°C, onde apresentam uma maior descontinuidade visível.

O mesmo comportamento ocorre na curva de secagem da cagaita madura congelada e na secagem solar da cagaita verde congelada, que demonstra uma curva típica descontínua e, por isso, aparenta ter menos facilidade em eliminar a água. Neste último caso, além da cagaita estar congelada e, por isso, possuir um

teor de água inicial maior, a temperatura de secagem do ar não é constante e não pode ser controlada, o que causa a descontinuidade da curva e, conseqüentemente, um maior tempo de secagem para atingir o equilíbrio. A mesma comparação pode ser concluída entre a cagaita madura congelada seca pela radiação solar como pode ser visto nas figuras 18 e 19.

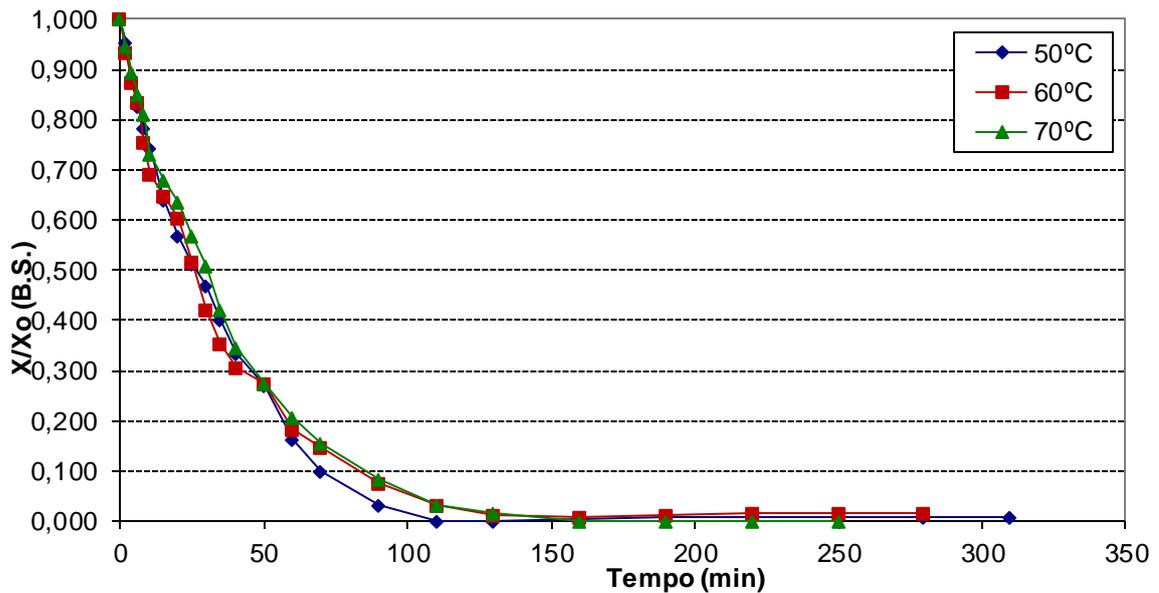


Figura 18: Curva típica de secagem da cagaita madura congelada em secador elétrico.

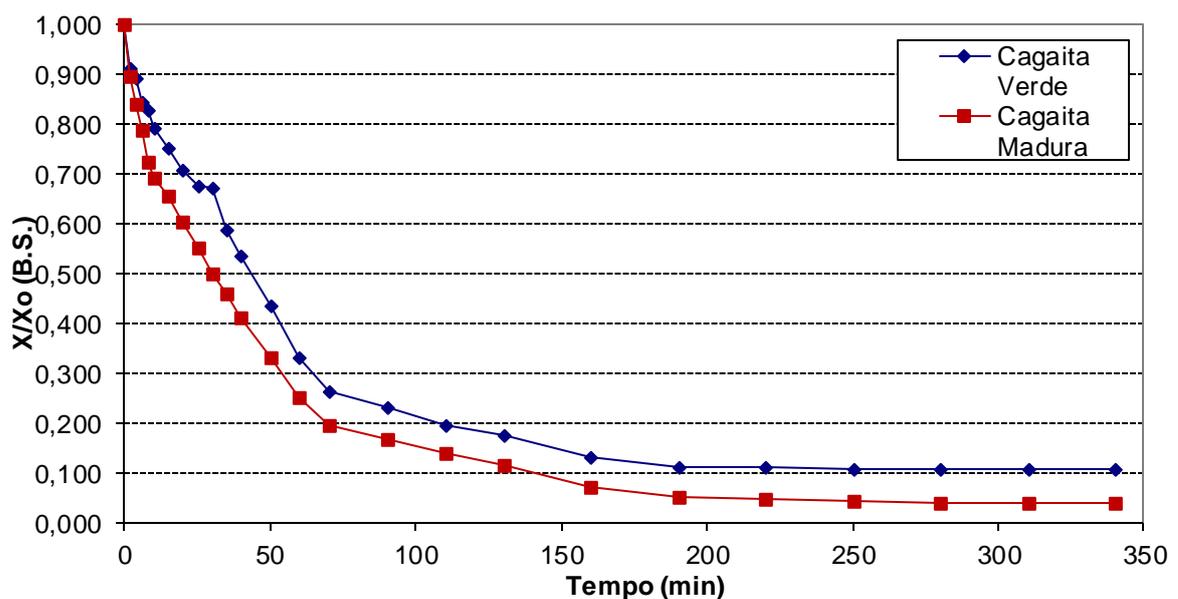


Figura 19: Curva típica de secagem da cagaita verde e madura congelada em secador solar.

No geral, ao analisar os gráficos representados nas figuras 16 a 19, pode-se observar que quanto maior for a temperatura do ar de secagem, maior é a taxa de secagem, o que acarreta em um menor tempo de secagem. Assim, em temperaturas mais altas, a secagem atinge o equilíbrio mais rapidamente, ou seja, a água é eliminada mais facilmente do interior da fruta concordando com vários pesquisadores da literatura (Morais et al., 2013; Leite et al., 2014; Martinazzo et al., 2007; Anjos et al., 2015).

Para a secagem solar, a média da temperatura de secagem do ar foi de 45°C. Ambas as curvas típicas de secagem podem ser comparadas a temperatura de 50°C do secador de bandejas elétrico. Como pode ser observado o tempo de secagem é praticamente o mesmo, sendo a secagem solar um pouco mais lenta, pois leva cerca de 30 minutos a mais para atingir o equilíbrio. Isso pode ser explicado devido as condições do tempo como o vento, a radiação solar disponível e o fato de não ser possível controlar a temperatura de secagem, além da média de temperatura ser 5°C abaixo da secagem elétrica, neste caso.

Couto (2015) estudou a cinética de secagem de frutos do cerrado (araticum e pequi) em secador elétrico de leito fixo de mesmo modelo empregado por este trabalho e observou que as curvas de secagem são influenciadas pela temperatura, indicando que com o aumento da temperatura o tempo de secagem reduzia. Assim, para um mesmo tempo de processo se constatou que quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior será a velocidade de secagem. Para temperatura de 50°C e 70°C, Couto (2015), obteve um período de secagem de, aproximadamente, 3 horas e 20 min e 1 hora e 40 minutos, respectivamente, para o pequi. Já para o araticum, obteve-se 6 horas de secagem para 50°C e 3 horas e 20 min para 70°C. Enquanto o tempo de secagem da cagaita no presente trabalho foi de 5 horas e 10 minutos à 50°C e 4 horas e 10 minutos para 70°C evidenciando que ao aumentar a temperatura o tempo de secagem diminui.

De acordo com o comportamento geral de uma curva típica de velocidade de secagem constante é possível notar que o período de adaptação do alimento às condições de secagem, isto é, os primeiros 10 minutos de secagem em que a água livre é evaporada, são similares para todas as secagens independente do estado de maturação da fruta ou do tipo de secagem. Já em um segundo período, chamado de secagem constante, em que a superfície do sólido se encontra saturada, ou seja, existe um filme contínuo de água em cima da superfície da fruta tendo o ar em

contato direto com o sólido, encontra-se algumas diferenças. As cagaitas secas em secador elétrico apresentam um período menor (entre 10 minutos e 60 minutos) enquanto que as cagaitas secas em secador solar apresentam um segundo período maior (entre 10 minutos e 70 minutos) evidenciando que as condições não constantes de uma secagem solar, como o condicionamento do ar, influenciam na secagem.

Devido à alta porosidade da fruta esse período de secagem constante decrescente ocorre mais facilmente e é mais pronunciado em alimentos com uma umidade elevada, que é o caso da cagaita que possui mais de 90% de umidade.

Após o fim do período de secagem constante se atinge a umidade crítica, onde ocorre o aumento da resistência interna, isto significa que o movimento do líquido no interior do sólido em direção à superfície é insuficiente para compensar o líquido que é evaporado, ou seja, há dificuldade no escoamento da água que causa rachaduras na fruta. De acordo com os gráficos esse período é maior para a secagem solar do que para a secagem elétrica, sendo de 70 minutos a 160 minutos e de 60 minutos a 130 minutos, respectivamente.

Por fim, ocorre um segundo período decrescente, em que a umidade do sólido diminui até atingir o equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa do ar. Para a secagem solar esse período ocorre de 160 minutos em diante, enquanto que para a secagem elétrica ocorre a partir dos 130 minutos até atingir o equilíbrio dependendo da temperatura. Nesse período, as secagens elétricas possuem vantagens devido ao controle da temperatura e, conseqüentemente, do ar de secagem. Os gráficos demonstram que a medida que se aumenta a temperatura de secagem o equilíbrio é atingido mais rapidamente.

5.3. Modelagem matemática

A partir dos gráficos de curvas típicas de secagem foi possível ajustar os gráficos de modelagem matemática através do programa OriginPro 9.0 de 32 bit. Como visto antes, os dados experimentais se ajustam à modelos empíricos. Nesse caso, os ajustes foram realizados para quatro modelos (Newton, Page, Henderson & Pabis e Verna) para a secagem elétrica da cagaita verde *in natura*, verde congelada e madura congelada nas temperatura de 50°C, 60°C e 70°C e para a secagem solar das cagaitas verde e madura congeladas a uma temperatura média de 45°C. Tais gráficos podem ser observados nas figuras 20 a 24.

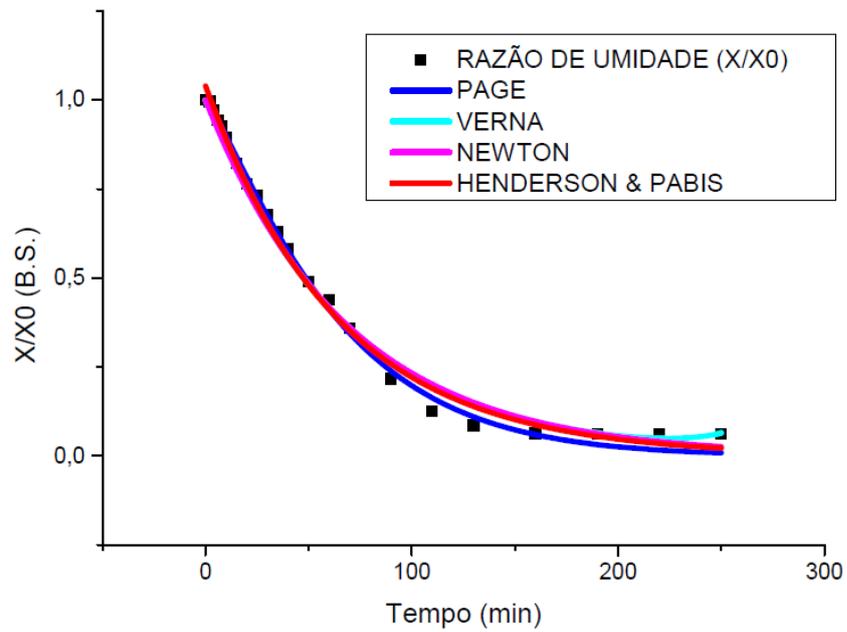


Figura 20: Curvas de ajuste da cagaita verde *in natura* em desidratador elétrico.

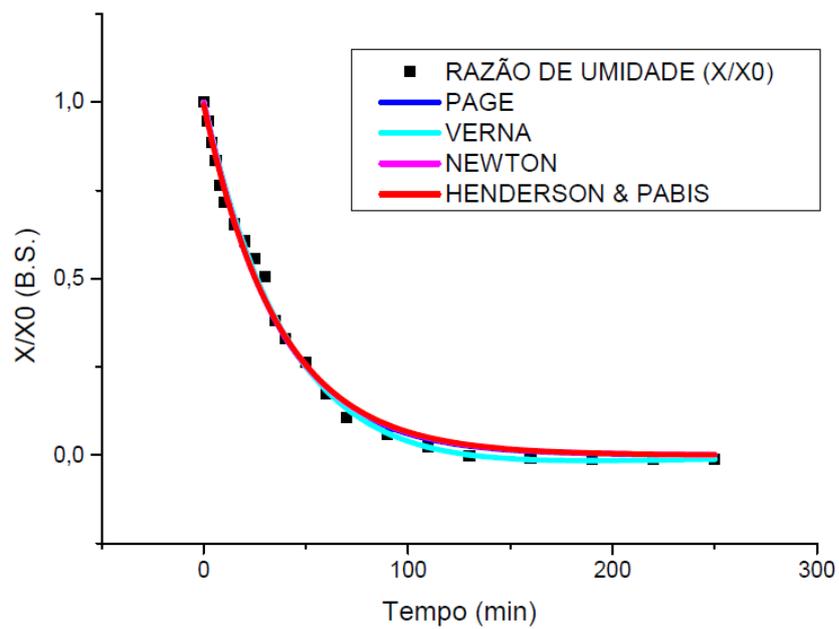


Figura 21: Curvas de ajuste da cagaita verde congelada em desidratador elétrico.

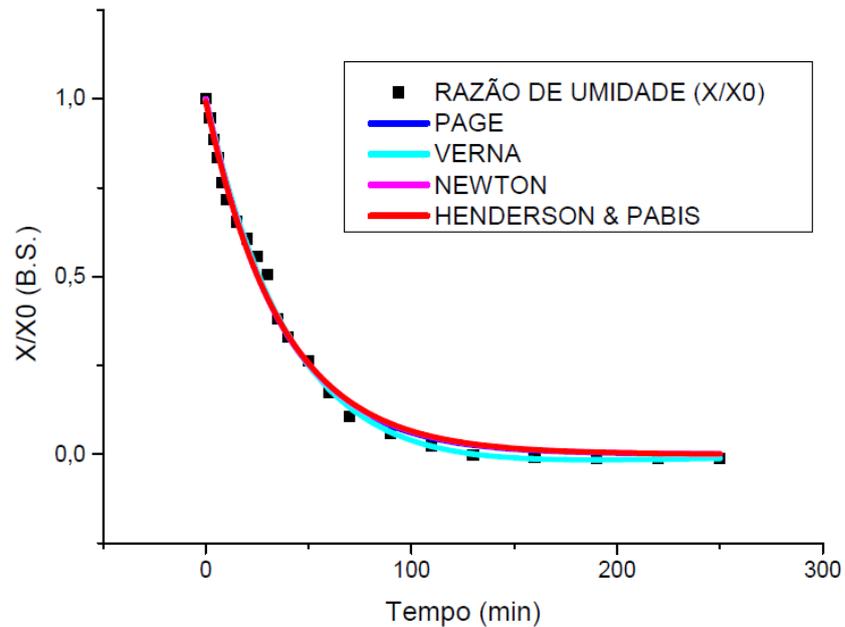


Figura 22: Curvas de ajuste da cagaita madura congelada em desidratador elétrico.

As figuras 20 a 22 apresentam as curvas obtidas pela modelagem matemática apenas para a temperatura de 70° em secador elétrico, pois apesar de praticamente todas as curvas neste secador apresentarem coeficiente de correlação linear (R^2) acima de 99% e erros médios (SE) do coeficiente de secagem (k) pequenos, os modelos que melhor se adequam ao dados obtidos experimentalmente foram nessa temperatura e, portanto, facilita a comparação para os diferentes estados de maturação das frutas.

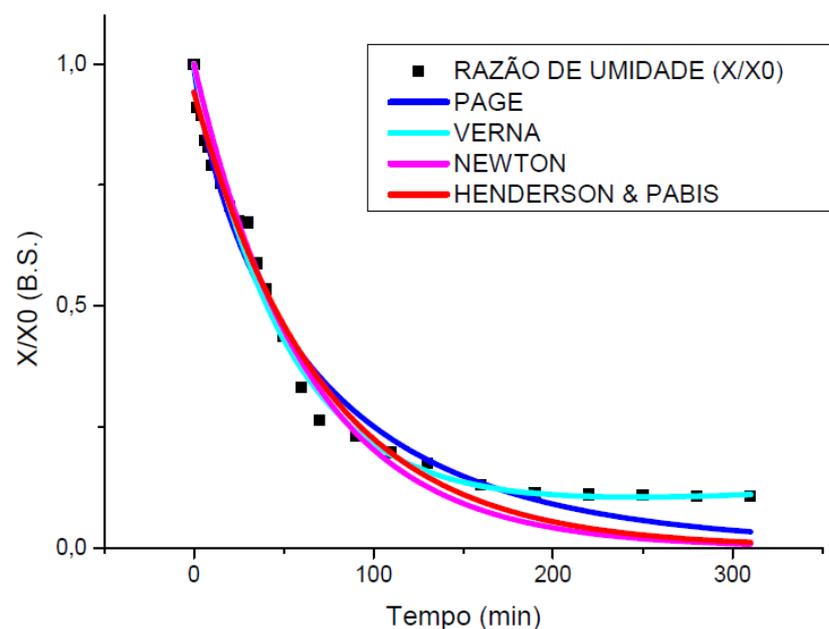


Figura 23: Curvas de ajuste da cagaita verde congelada em desidratador solar.

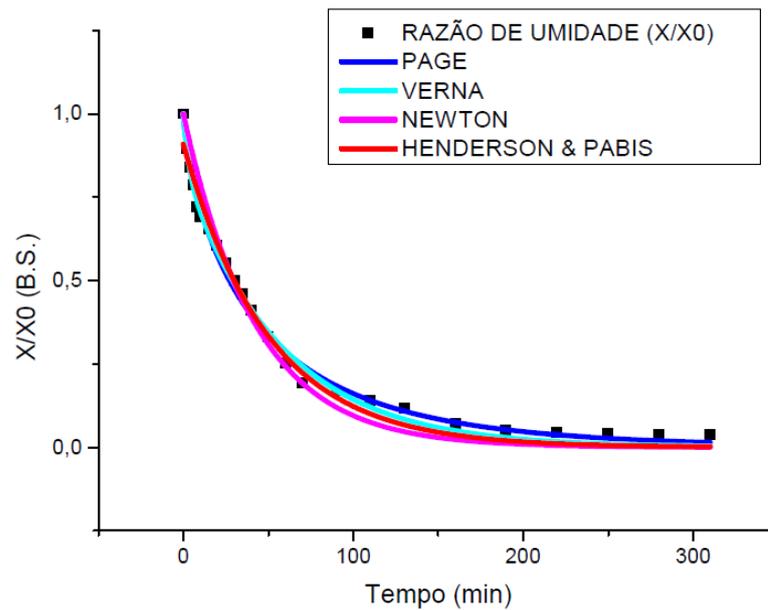


Figura 24: Curvas de ajuste da cagaita madura congelada em desidratador solar.

Os parâmetros utilizados nos modelos, assim como, os valores estão explicitados na tabela 5, junto aos valores do coeficiente de correlação linear de determinação (R^2) e os erros médio (SE).

Tabela 5: Valores dos coeficientes de correlação linear (R^2), parâmetros dos modelos ajustados de secagem e erros médios estimados (SE) dos coeficiente de secagem (k) das cagaitas verde *in natura*, verde congelada e madura congelada em desidratadora elétrica e cagaitas verdes e maduras congeladas em desidratadora solar.

CAGAITA VERDE <i>IN NATURA</i> (SECADOR ELÉTRICO)				
Modelo	Temperatura (°C)	Constantes	R^2	SE
Newton	50	$k = 0,01326$	0,99095	4,25244E-4
	60	$k = 0,01589$	0,99445	3,85479E-4
	70	$k = 0,01458$	0,99074	4,4691E-4
Page	50	$k = 0,00527 \quad n = 1,22273$	0,99830	5,73162E-4
	60	$k = 0,01027 \quad n = 1,10949$	0,99666	0,00129
	70	$k = 0,00719 \quad n = 1,17679$	0,99603	0,00105
Henderson & Pabis	50	$k = 0,01395 \quad a = 1,0342$	0,99256	5,03622E-4
	60	$k = 0,01621 \quad a = 1,01315$	0,99451	4,98036E-4
	70	$k = 0,01549 \quad a = 1,03942$	0,99349	4,93472E-4

Verna	50	$k = 0,00824$ $k_1 = -0,00813$ $a = 37,62904$	0,99459	0,15585
	60	$k = 0,01027$ $k_1 = -0,01009$ $a = 25,76264$	0,99692	0,12850
	70	$k = 0,01464$ $k_1 = 1$ $a =$ $0,04752$	0,99041	4,6894E-4

CAGAITA VERDE CONGELADA (SECADOR ELÉTRICO)

Modelo	Temperatura (°C)	Constantes	R ²	SE
Newton	50	$k = 0,01856$	0,98791	7,0755E-4
	60	$k = 0,02334$	0,99540	5,30693E-4
	70	$k = 0,02745$	0,99373	7,21378E-4
Page	50	$k = 0,00631$ $n = 1,28166$	0,99757	8,6803E-4
	60	$k = 0,01552$ $n = 1,1127$	0,99728	0,001173
	70	$k = 0,02538$ $n = 1,02215$	0,99354	0,003730
Henderson & Pabis	50	$k = 0,01971$ $a = 1,04282$	0,99004	8,49859E-4
	60	$k = 0,02396$ $a = 1,01833$	0,99567	6,75536E-4
	70	$k = 0,02713$ $a = 0,99192$	0,99351	9,49646E-4
Verna	50	$k = 0,01143$ $k_1 = -0,01131$ $a = 49,60586$	0,99202	0,19463
	60	$k = 0,01628$ $k_1 = -0,01605$ $a = 26,83227$	0,99634	0,19056
	70	$k = 0,02142$ $k_1 = -0,01368$ $a = 1,56973$	0,99490	0,01224

CAGAITA MADURA CONGELADA (SECADOR ELÉTRICO)

Modelo	Temperatura (°C)	Constantes	R ²	SE
Newton	50	$k = 0,02830$	0,99604	5,97822E-4
	60	$k = 0,02857$	0,99591	5,99059E-4
	70	$k = 0,02745$	0,99373	7,21378E-4
Page	50	$k = 0,02581$ $n = 1,02619$	0,99600	0,00301
	60	$k = 0,03344$ $n = 0,95479$	0,99616	0,00341
	70	$k = 0,02531$ $n = 1,02284$	0,99354	0,00372

Henderson & Pabis	50	k = 0,02814 a = 0,99595	0,99588	7,90948E-4
	60	k = 0,02774 a = 0,97996	0,99627	7,34276E-4
	70	k = 0,02713 a = 0,99191	0,99351	9,49601E-4
Verna	50	k = 0,02078 k ₁ = -0,01577 a = 2,14403	0,99746	0,01348
	60	k = 0,02825 k ₁ = -0,066 a = 1,00329	0,99599	9,0797E-4
	70	k = 0,02142 k ₁ = -0,01368 a = 1,56973	0,99490	0,01224

CAGAITA VERDE CONGELADA (SECADOR SOLAR)

Modelo	Temperatura (°C)	Constantes	R ²	SE
Newton	45	k = 0,01594	0,96928	7,89719E-4
Page		k = 0,03491 n = 79885	0,98083	0,00594
Henderson & Pabis		k = 0,01431 a = 0,94184	0,97637	8,59053E-4
Verna		k = 0,1899 k ₁ = 0,00175 a = 0,9376	0,98767	0,00169

CAGAITA MADURA CONGELADA (SECADOR SOLAR)

Modelo	Temperatura (°C)	Constantes	R ²	SE
Newton	45	k = 0,02353	0,97328	0,00111
Page		k = 0,05965 n = 0,74305	0,99475	0,02113
Henderson & Pabis		k = 0,02003 a = 0,9893	0,98726	9,19252E-4
Verna		k = 0,01763 k ₁ = -0,29615 a = 0,8350	0,99417	8,77193E-4

Os ajustes dos modelos matemáticos testados foram feitos de acordo com Ferreira et al. (2012). Tal trabalho consiste na modelagem matemática da secagem em camada delgada do bagaço de uva fermentado. A uva possui uma alto teor de água (de 55 a 72% em base úmida), o que a torna perecível, possui a casca fina e é bastante porosa. Tais características são semelhantes as características da cagaita

e, por esse motivo, os valores iniciais tentados para modelagem matemática foram de acordo com esse artigo, a fim de obter um parâmetro mais acurado, que depois foi ajustado pelo próprio programa OriginPro 9.0.

De acordo com Madamba et al. (1996) o coeficiente de correção linear (R^2) não constitui, sozinho, um bom critério para a seleção dos modelos, portanto, foram considerados os erros médios estimados obtidos. Assim, depois de escolhidos os valores iniciais, foi realizada a seleção do melhor modelo para prever a secagem das cagaitas.

Nota-se que, para as temperaturas em estudo, as cagaitas secas em desidratadora elétrica apresentam o coeficiente de determinação maior que 99%, com apenas uma exceção para a cagaita verde congelada com 98%, enquanto as cagaitas desidratadas pelo secador solar apresentam uma faixa de 96% a 99%. Além disso, observa-se que o erro estimado para todas as cagaitas desidratadas com secador elétrico foram na quarta casa decimal para os modelos de Newton e de Henderson & Pabis, sendo o primeiro com o erro ainda menor que o segundo. Os dados ainda demonstram que o modelo de Verna para a desidratadora elétrica apresentam, em geral, os maiores erros médios.

De acordo com a Tabela 5 e os gráficos 23 e 24 é possível observar que o modelo que mais se adequa aos dados experimentais para as cagaitas desidratadas em secador solar foi o modelo de Verna com coeficientes de determinação de 98% e 99% e erros médios de 0,00169 e 0,00087, aproximadamente, para a cagaita verde e madura congeladas, respectivamente.

Segundo Ferreira et al. (2012) a uva fermentada também apresentou R^2 superior a 99% para todos os modelos escolhidos nesse trabalho e erros estimados na quarta e quinta casa decimal, o que indica que as frutas possuem características semelhantes e que os resultados foram compatíveis.

Reis et al. (2011) que estudou a modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará e Martinazzo et al. (2007) que trabalhou com a descrição matemática da cinética de secagem de folhas capim-limão observaram que tanto o coeficiente de secagem (k), quanto a constante n para o melhor modelo selecionado, no caso o modelo de Midilli, aumentam com o aumento da temperatura e a constante 'a' não demonstrou comportamento em função da temperatura. O mesmo comportamento é observado para a modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão-caupi que utilizou como melhor modelo o de Henderson & Pabis.

O presente trabalho mostra que os valores de 'k' e 'n' aumentam com o aumento da temperatura para o modelo de Newton para a cagaita verde *in natura* desidratada pelo secador elétrico, indicando que este foi o melhor resultado para essa fruta. A mesma correspondência pode ser feita com para a cagaita verde congelada seca nessa desidratadora para os modelos de Newton e de Henderson & Pabis. Tais resultados estão em decorrência com a literatura, visto que outros valores de 'k' e 'n' aumentam ou diminuem, se mantendo em uma média, com o aumento da temperatura para as cagaitas maduras congeladas secas pelo secador elétrico. Esse resultado também indica que devido a cagaita estar congelada ela pode causar alteração nos parâmetros de secagem, independente da maturação da fruta. Essas observações não podem ser inferidas para as cagaitas utilizadas no secador solar, visto que para esse método se usa uma média de temperatura.

Considerando uma perspectiva industrial a modelagem matemática para a secagem de cagaitas em temperaturas de 70°C se mostra promissora, visto que com temperaturas maiores o tempo de secagem é reduzido e gastaria menos energia para secar a mesma quantidade de frutas. Ainda nesse ponto de vista a secagem da cagaita em secador solar não é favorável, industrialmente, uma vez que as modelagens não se adequam completamente nos modelos e eles apresentam erros médios mais altos e coeficientes de determinação menores, além de possuírem desvantagens quanto ao controle da temperatura e umidade e de interferentes físicos externos, ou seja, apesar desse tipo de secagem apresentar vantagens como nenhum custo de energia a modelagem, neste caso, não se aplica apropriadamente.

5.4. Difusividade efetiva e energia de ativação

As figuras 25 a 28 mostram as curvas obtidas para a determinação da difusividade efetiva (Equação 12) para a cagaita verde *in natura*, apenas para secagem elétrica, e para a cagaita verde congelada e madura congelada em ambos os tipos de secadores.

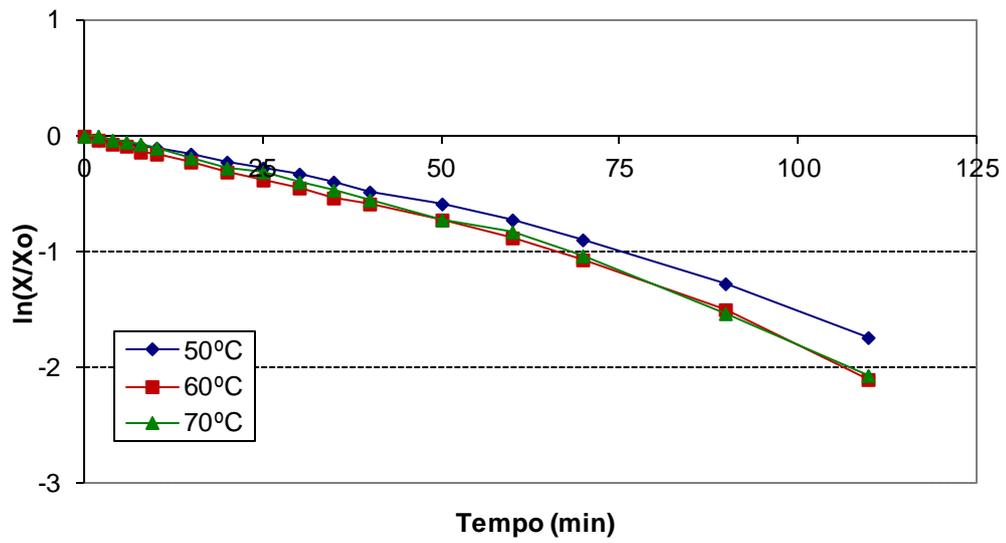


Figura 25: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaíta verde *in natura* em desidratador elétrico.

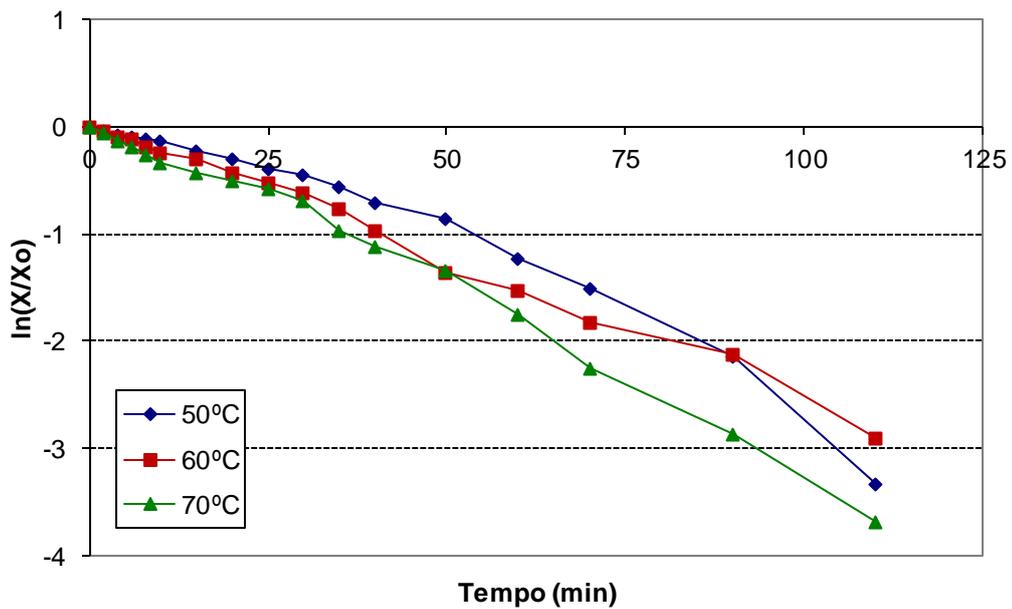


Figura 26: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaíta verde congelada em desidratador elétrico.

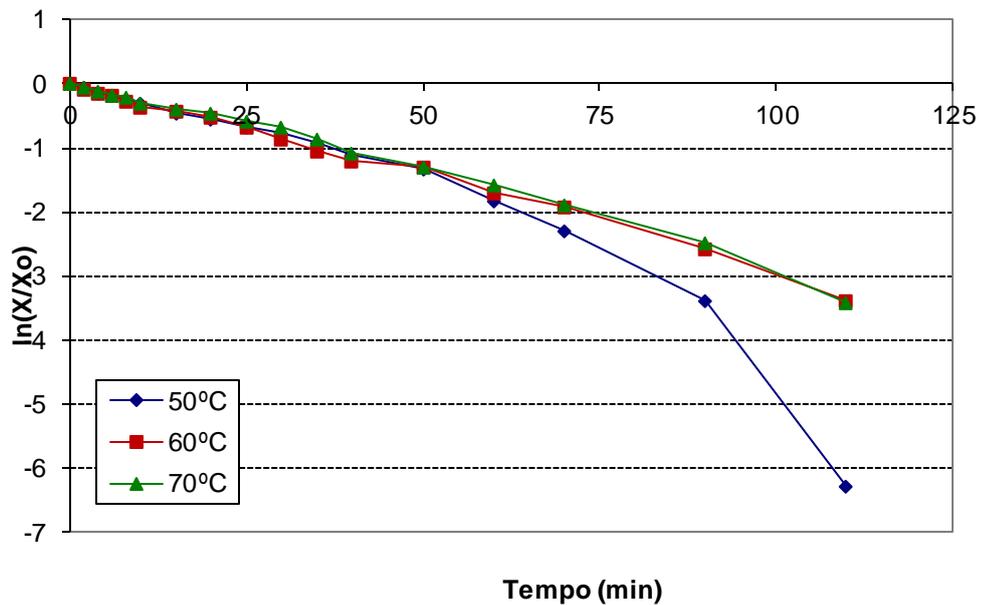


Figura 27: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva da cagaita madura congelada em desidratador elétrico.

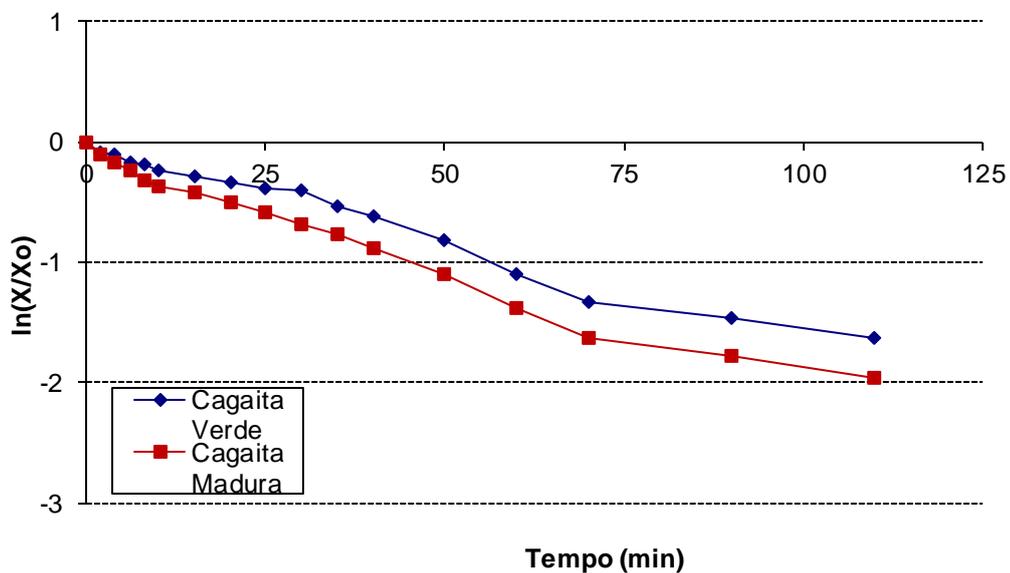


Figura 28: Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade efetiva das cagaitas verde e madura congeladas em secador solar.

Através das curvas do gráfico é verificado que existem dois coeficientes de difusão nas curvas, o que indica que há alteração no mecanismo de transferência de massa dentro das fatias da cagaita durante o processo de secagem. Essa existência de dois coeficientes está relacionada com o aumento dos espaços intercelulares que

são formados na medida em que a água é retirada, possibilitando a formação de pequenos canais de condução de vapor até a superfície da fatia da fruta (VASQUES, 2003). O aumento desses espaços é intensificado à medida que se aumenta a temperatura (COUTO, 2015).

Fazendo a regressão linear e adicionando a linha de tendência nos gráficos 25 a 28 é possível utilizar a inclinação da reta para calcular a difusividade efetiva (Equação 13). A tabela 6 fornece os valores de difusividade encontrados para uma semi-espessura da fruta.

Tabela 6: Difusividades efetivas (Def) obtidas nas secagens das cagaitas.

Fruta	Temperatura (°C)	Def_1 (m ² /s)	Def_2 (m ² /s)
Cagaita Verde <i>in natura</i> (Secador elétrico)	50	2,03E-08	3,37E-08
	60	2,40E-08	4,20E-08
	70	2,37E-08	4,23E-08
Cagaita verde congelada (Secador elétrico)	50	3,29E-08	7,41E-08
	60	4,23E-08	4,34E-08
	70	4,81E-08	5,80E-08
Cagaita madura congelada (Secador elétrico)	50	4,88E-08	1,62E-07
	60	4,39E-08	6,00E-08
	70	4,25E-08	6,19E-08
Cagaita verde congelada (Secador solar)	45	2,79E-08	1,17E-08
Cagaita madura congelada (Secador solar)	45	3,47E-08	1,31E-08

A difusividade efetiva representa a facilidade com que a água se move no interior do sólido, ou seja, descreve a velocidade de saída da água do alimento. Ao analisar a Tabela 6, nota-se que, em geral, os valores obtidos das difusividades aumentam com a elevação da temperatura, o que significa que ocorre diminuição das resistências internas de secagem, ou seja, quanto maior o valor da difusividade de uma substância em relação à outra, mais rápido elas deslocam-se umas nas outras. Estes resultados estão em concordância com Costas et al. (2016) que encontrou valores de $7,1558E-7$ m²/s, $1,31714E-6$ m²/s e $1,06387E-6$ m²/s para a difusividade

efetiva de cagaitas verde *in natura* nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C, respectivamente, indicando que com o aumento da temperatura a resistência interna é reduzida.

É possível observar que tanto o valor de difusividade térmica das cagaitas verdes congeladas, quanto os valores para as cagaitas maduras congeladas, ambas à 50°C, que foram desidratadas pelo secador elétrico, são mais altos que as mesmas frutas desidratadas por secagem solar. A discrepância no valor pode ser ocorrência das condições não controladas em que o processo de secagem solar é realizado, como a interferência de ventos com diferentes temperaturas e a incidência solar não constante.

Devido a dependência da difusividade efetiva em relação à temperatura é possível calcular as energias de ativação evidenciadas na Tabela 7 através de uma equação do tipo Arrhenius (Equação 14) e do gráfico 29 e 30.

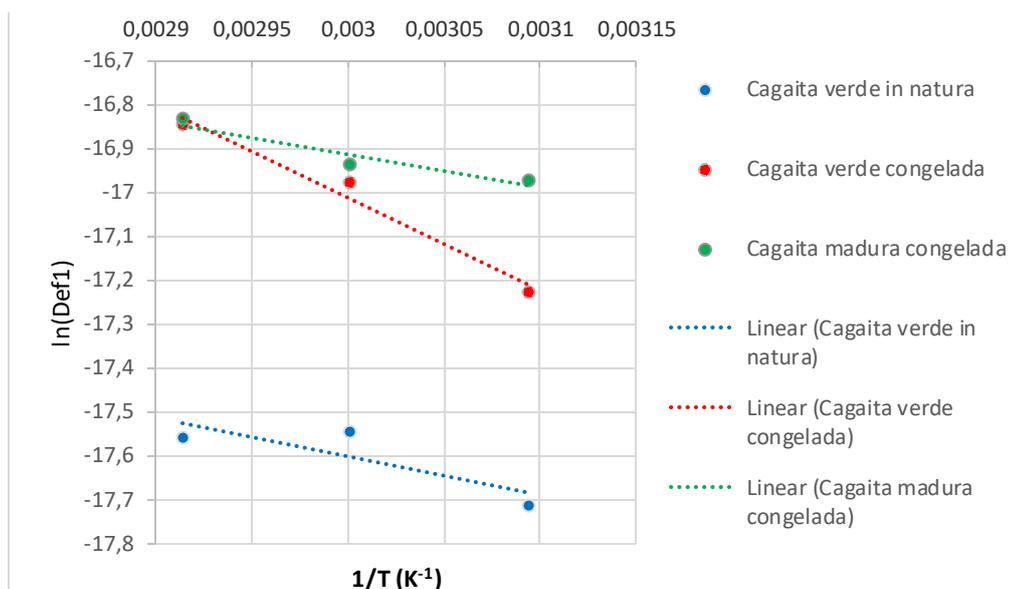


Figura 29: Curvas obtidas para determinação da energia de ativação 1 através da difusividade efetiva 1 para as cagaitas secas em desidratadora elétrica.

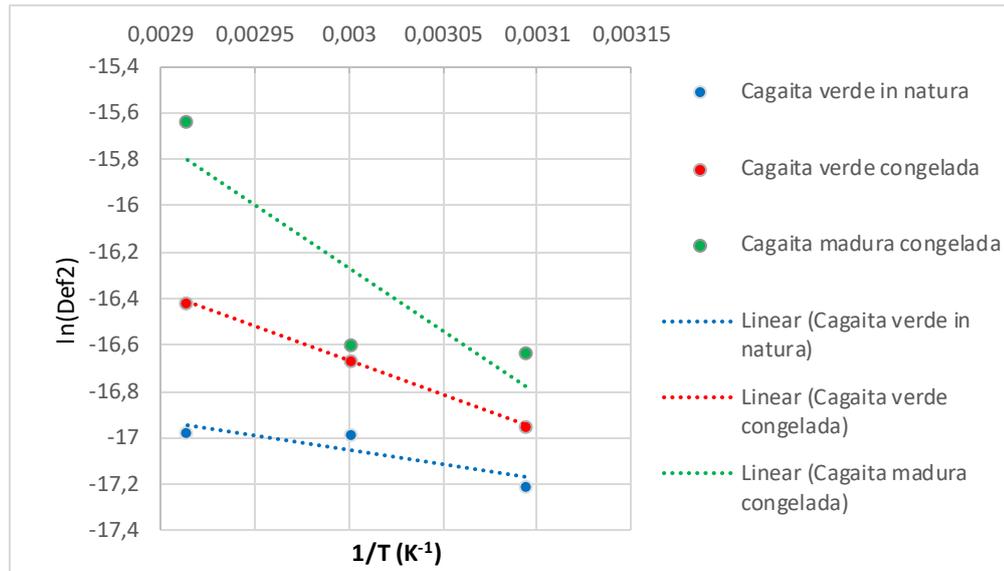


Figura 30: Curvas obtidas para determinação da energia de ativação 2 através da difusividade efetiva 2 para as cagaitas secas em desidratadora elétrica.

Tabela 7: Energia de ativação do processo de secagem da cagaita por secador elétrico.

Frutas	Energia de ativação 1	Energia de ativação 2
	(kJ/mol)	(kJ/mol)
Cagaita verde <i>in natura</i>	7240,496	10557,12
Cagaita verde congelada	17591,59	24615,26
Cagaita madura congelada	6363,452	45295,50

O cálculo da energia de ativação não foi realizado para as cagaitas desidratadas por secagem solar, pois elas dependem da radiação do sol e, conseqüentemente, não há controle em diferentes temperaturas. Comparando os resultados, pode-se perceber que a energia de ativação é maior para a cagaita verde congelada.

Segundo Costa et al. (2016) a cagaita tem valores de energia de ativação iguais a 80,3099, 59,3902 e 58,9621 a 50°C, 60°C e 70°C, respectivamente. Tais dados não concordam com a teoria sobre energia de ativação vinda da literatura, pois a mesma fruta não poderia possuir diferentes energias de ativação de acordo com uma única temperatura. É possível existir mais de uma energia de ativação, como no caso deste trabalho, para um tipo de fruta, se a mesma possuir duas difusividades efetivas, porém elas devem depender de diferentes temperaturas.

6. CONCLUSÃO

Através de análises físico-químicas da cagaita observou-se que a cagaita possui um alto teor de umidade de, aproximadamente, 91% em base úmida, que indica que a maior parte da fruta é composta por água.

Dentre o processo de secagem da cagaita em secadores elétrico e solar notou-se que as secagens em desidratadora elétrica à 50°C são mais rápidas que as secagens em desidratadora solar com uma média de 45°C, independente da maturação da fruta, devido ao fato de que a temperatura do ar de secagem pode ser controlada na primeira, enquanto que a segunda sofre interferências climáticas e de fatores externos.

Foi possível realizar as curvas de secagem para todas as cagaitas nos diferentes tipos de secadores, que mostraram que quanto maior a temperatura do ar de secagem maior será a taxa de secagem, que pode ser comprovada pelos modelos de Newton e de Henderson & Pabis e pelos coeficientes de secagem (k), sendo estes os melhores modelos que se adequavam com os dados experimentais obtidos devido aos baixos erros estimados e alto coeficiente de correção linear, principalmente para a desidratação da fruta à 70°C em secador elétrico. Do ponto de vista industrial a modelagem matemática não se aplica a desidratadores solares devido ao não controle da temperatura, erros médios mais altos e coeficiente de determinação mais baixo em comparação com o secador elétrico, apesar do modelo de Verna se adequar aos dados experimentais.

Por fim, foram calculadas as difusividades efetivas das cagaitas para a desidratadora elétrica, devido ao controle da temperatura, que apresentaram resultados satisfatórios em que a medida que a temperatura aumenta a difusividade efetiva também aumenta, indicando a facilidade que a água se move dentro do alimento com o aumento da temperatura de acordo com a literatura. Os cálculos para a energia de ativação foram realizados para a secagem das cagaitas em desidratadora elétrica em que se avalia a relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas – Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 730p.
- ALMEIDA, I. B.; LIMA, M. A. A.; SOUZA, L. G. M. **Desenvolvimento de secador solar construído a partir de material reciclável**. HOLOS, Ano 32, v. 4, p.197-205. 2016.
- ANJOS, E. V.; SILVA, J. A. **Cinética de secagem e modelagem matemática do fruto de buriti (*Mauritia flexuosa*)**. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Unicamp – Campinas – SP. 2015.
- BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. 2ª Edição. São Paulo: Varela, 1992. 143p.
- BUX, M.; BAUER, K.; MÜHLBAUER, W.; CONRAD, T. **Solar-assisted drying of timber at industrial scale**. The Southern African Forestry Journal, v. 192, p.73-78. 2001.
- CARDOSO, L. de M. **Araticum, cagaita, jatobá, mangaba, e pequi do cerrado de Minas Gerais: ocorrência e conteúdo de carotenoides e vitaminas**. 2011. Dissertação de Mestrado em Ciência da Nutrição – Departamento de Nutrição e Saúde, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2011.
- CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; JUNIOR, M. S. S. **Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca**. R. Bras. Eng. Agric. Ambiental, v.17, n.9, p.987-994. 2013.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípio de secagem de alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camada delgada.** Eng. Agric., v.27, n.2, p.501-510. 2007.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem.** Rev. Ceres, Viçosa, v.57, n.5, p.595-601. 2010.

CORNEJO, F. E. P.; NOGUEIRA, R. I.; WILBERG, V. K. **Secagem como Métodos de Conservação de Frutas.** Rio de Janeiro: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2003. 22p.

COSTA, B. T.; MENDONÇA, A. R. V. **Estudo da desidratação da cagaita e jatobá em secadora de bandejas.** Programa de Jovens Talentos - Universidade de Brasília. 2016.

Desidratador Pardal. Disponível em <http://www.pardal.com.br/desidratador-peg-60>. Acessado em 05 de maio de 2017.

DUARTE, E. L.; RODRIGUES, C. G.; OLIVEIRA, K. G.; ANDRADE, R. M.; CARLOS, L. A. **Caracterização físico-química de frutos do cerrado liofilizados.** 5º Simpósio de Segurança Alimentar – Alimentação e Saúde. Bento Gonçalves, RS. 2015.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. **Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado.** Pesq. Agropec. Bras., v.47, n.6, p.855-862. 2012.

FILHO, A. B. M.; VASCONCELOS, M. A. S. **Química dos alimentos.** Recife: UFRPE, 2011. 78p.

GEANKOPOLIS, C. J. **Processos de transporte y operaciones unitárias.** 3ª Edição. México: CECOSA, 1998. 1008p.

GONÇALVES, A. L. **Um estudo sobre a importância da modelagem matemática como metodologia de ensino.** 2010. Monografia – Instituto Superior de Educação da Faculdade Alfredo Nasser, Aparecida de Goiânia. 2010.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K.A. **The thin-layer drying characteristics of garlic slices.** Journal of Food Engineering, v.29, issue 1, p.75-97. 1996.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.11, n.3, p.301-306. 2007.

MARTINS, B. A. **Avaliação físico-química de frutos do cerrado *in natura* e processados para elaboração de multimisturas.** 2006. Dissertação de Mestrado - Programa de Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável, Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 2006.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering.** 5ª Edição. New York: McGraw-Hill, 1993. 1130p.

MELONI, P. L. S. **Desidratação de frutas e Hortaliças.** Fortaleza: Instituto Frutal, 2003. 87p.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. **Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.).** Rev. Ciênc. Agron., v.44, n.3, p.455-463. 2013.

MORAES-DUZAT, R.; MACEDO, H.; ROCHA, L. C.; NASCIMENTO, R. C.; BARBOSA, A. N. **Secador solar multi-uso para beneficiamento de produtos naturais da amazônia.** Na. 4. Enc. Energ. Meio Rural, 2002, Campinas.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. **Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica.** Ciênc. Tecnol. Aliment. V.21, n.1. 2001.

REETZ, E. R.; KIST, B. B.; SANTOS, C. E.; CARVALHO, C.; DRUM, M. **Anuário Brasileiro de Fruticultura.** Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2015. 104p.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, P. R. **Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.15, n.4, p.347-353. 2011.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. **Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*).** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande v.12, n.2, p. 171-178. 2010.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. **Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*) durante a secagem.** Eng. Agríc. v.31, n.6. 2011.

RIBOSKI, A. G.; LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; DERLAN, J. M. **Análise da cinética de secagem dos frutos de pitanga.** XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, Campo Grande – MS. 2014.

SANTOS, M. N. G. **Avaliação da polpa da cagaita (*Eugenia dysenterica DC.*) submetida ao congelamento e atomização.** Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos – Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2015.

SILVA, C. C. **Composição de um plano de Desenvolvimento de Assentamento (PDA): PA “Márcia Cordeiro Leite”.** Relatório de estágio supervisionado (Graduação) – Gestão do Agronegócio, Faculdade UnB Planaltina – FUP/UNB, PLANALTINA – DF, 2011.

SILVA, E. C. C. **Secagem e armazenamento de sementes de *Eugenia dysenterica* DC.** Dissertação de Mestrado em Ciências Agrárias – Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas. 2015.

SILVA, W. P., MATA, M. E. R. C., SILVA, C. D. P. S., GUEDES, M. A., LIMA, A. G. B. **Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* L. Walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem.** Eng. Agríc., v.28, n.2, p.325-333. 2008.

SOARES, F. P.; PAIVA, R.; NOGUEIRA, R. C.; STEIN, V.C.; SANTANA, J. R. F. **Marolo: uma frutífera nativa do Cerrado.** Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, 2009. (Boletim técnico, 82).

SOUZA, J. L. F. **Farinha do mesocarpo do pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess): Cinética de secagem, propriedades nutricionais, funcionais e enriquecimento de iogurtes.** Dissertação de Mestrado em Zootecnia – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde. 2015.

VASQUES, A. R.; VALLE, R. C.S. C.; VALLE, J. A. B. **Influência da temperatura no cálculo da difusividade efetiva e da energia de ativação em secagem de maçã gala.** XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2003, Itajaí - SC. XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2003.

VIEIRA, R. F.; COSTA, T. S. A.; SILVA, D. B.; FERREIRA, F. R.; SANO, S. M. **Frutas nativas da região Centro-Oeste.** Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. 2006. 320p.

ZENEON, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** Instituto Adolfo Lutz. São Paulo. 2008. 1020p.