



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS TÍPICAS DE SECAGEM
DE FRUTAS TROPICAIS**

Brenda Tudrei de Brito

Brasília, DF

2022

BRENDA TUDREI DE BRITO

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS TÍPICAS DE SECAGEM DE FRUTAS
TROPICAIS**

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
2022**

MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS TÍPICAS DE SECAGEM DE FRUTAS TROPICAIS

BRENDA TUDREI DE BRITO

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. Fábio Moreira da Silva
Membro titular (IQ/UnB)

Prof.^a Dr.^a: Maria Betânia D'heni Teixeira
Membro titular (IQ/UnB)

Brasília
2022

TUDREI, B. B. **Modelagem matemática de curvas típicas de secagem de frutas tropicais**. Trabalho de Conclusão do Curso de Química Tecnológica do Instituto de Química da Universidade de Brasília, 2022.

RESUMO

O armazenamento de alimentos envolve operações que variam das mais simples às mais complexas. Dentre elas, destaca-se a secagem convectiva em secadores elétricos, um processo simples e de baixo custo. A operação de secagem reduz o teor de umidade do produto até que este alcance o estado de equilíbrio, garantindo a manutenção dos nutrientes e o aumento da vida útil, assim como a diminuição da atividade microbológica e o volume do produto final, facilitando o transporte, manuseio e armazenamento. O Brasil é um dos maiores produtores de frutas no mundo, sendo favorecido devido ao clima tropical. Dentre essas frutas, foram analisadas a banana prata (*Musa paradisiaca*), uva Niágara (*Vitis labrusca*) e o kiwi verde (*Actinidia deliciosa*), sendo esta última uma fruta exótica que tem sido muito produzida e comercializada no país. As três frutas foram utilizadas para simular as geometrias de cilindro infinito, placas planas infinitas e esfera. As frutas foram caracterizadas pelo teor de umidade (perda por dessecação) em base seca e teor de cinzas (resíduo por incineração). O kiwi verde apresentou o maior teor de umidade, com mais de 85%, seguido da uva Niágara, 83,5%, e a banana prata, 70%. Com o auxílio de um secador elétrico convectivo de bandejas de leito fixo, foram determinadas as curvas de secagem nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C. A partir das curvas obtidas, foram avaliados os aspectos físicos de cada fruta, assim como a perda de umidade no decorrer da operação e a influência da temperatura. Com isso, é possível realizar a modelagem matemática, onde um conjunto de equações são capazes de prever o funcionamento do método. Os modelos de Page, Handerson & Pabis, Lewis e Midilli foram empregados na modelagem das cinéticas de secagem. Na análise gráfica, todas as curvas apresentaram taxa constante nas três temperaturas de estudo. Por fim, foram calculadas a difusividade efetiva, que segue a Lei de Fick, e a energia de ativação. As frutas secas a 70 °C obtiveram os melhores resultados para a taxa de secagem, modelagem matemática, difusividade efetiva e energia de ativação, portanto, foram as que perderam água com maior facilidade, alcançando o estado de equilíbrio em menor tempo.

Palavras-chave: Frutas tropicais; curvas de secagem; modelagem matemática.

ABSTRACT

Food storage involves operations that range from the simplest to the most complex. Among them, convective drying in electric dryers stands out, a simple and low-cost process. The drying operation reduces the moisture content of the product until it reaches the equilibrium state, ensuring the maintenance of nutrients and the increase in shelf life, as well as the decrease in microbiological activity and the volume of the final product, facilitating transport, handling and storage. Brazil is one of the largest fruit producers in the world, being favored due to its tropical climate. Among these fruits, burro banana (*Musa paradisiaca*), niagara grape (*Vitis labrusca*) and green kiwi (*Actinidia deliciosa*) were analyzed – the last one an exotic fruit that has been widely produced and marketed in the country. The three fruits were used to simulate infinite cylinder, infinite flat plates and sphere geometries. Fruits were characterized by moisture content (loss by desiccation) on dry basis and ash content (residue by incineration). The green kiwi had the highest moisture content, with more than 85.3%, followed by the niagara grape, 83.5%, and the burro banana, 70%. With the aid of an electric convective fixed bed tray dryer, drying curves were determined at temperatures of 50 °C, 60 °C and 70 °C. From the curves obtained, the physical aspects of each fruit were evaluated, as well as the moisture loss during the operation and the influence of temperature. With this, it is possible to perform mathematical modeling, where a set of equations are able to predict the operation of the method. Page, Handerson & Pabis, Lewis and Midilli models were used to model drying kinetics. In the graphical analysis, all curves showed a constant rate at the three temperatures. Finally, the effective diffusivity, which follows Fick's Law, and the activation energy were calculated. Dried fruits at 70 °C obtained the best results for the drying rate, mathematical modeling, effective diffusivity and activation energy, therefore, they were the ones that lost water more easily, reaching the equilibrium state in the shortest time.

Keywords: Tropical fruits; drying curves; mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Curvas do teor de umidade, taxa de secagem e temperatura do produto ao longo do tempo. Fonte: LIMA, 2017.	6
Figura 3.2 - Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas. Fonte: MELANI, 2003.	9
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia realizada experimentalmente para a obtenção das curvas de secagem em diferentes geometrias e temperaturas. Fonte: Autor, 2022.	14
Figura 4.2 - Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas Pardal PEG 60. Fonte: Repositório digital Pardal.....	15
Figura 5.1 - Encolhimento das frutas estudadas. Fonte: Autor, 2022.	21
Figura 5.2 - Curva típica de secagem da banana prata em formato cilíndrico. Fonte: Autor, 2022.	23
Figura 5.3 - Curva típica de secagem da banana prata em corte de placa plana. Fonte: Autor, 2022.	23
Figura 5.4 - Curva típica de secagem do kiwi em corte de placa plana. Fonte: Autor, 2022.	25
Figura 5.5 - Curva típica de secagem da uva Niágara esférica. Fonte: Autor, 2022.	25
Figura 5.6 - Curvas de ajuste da banana prata em geometria cilíndrica. Fonte: Autor, 2022.	27
Figura 5.7 - Curvas de ajuste da banana prata em placa plana infinita. Fonte: Autor, 2022.	27
Figura 5.8 - Curvas de ajuste do kiwi verde em placa plana infinita. Fonte: Autor, 2022.	28
Figura 5.9 - Curvas de ajuste da uva Niágara em geometria esférica. Fonte: Autor, 2022.	28
Figura 5.10 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da banana prata cilíndrica. Fonte: Autor, 2022.	32
Figura 5.11 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da banana prata em corte de placa plana. Fonte: Autor, 2022.	32
Figura 5.12 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade do kiwi verde em corte de placa plana. Fonte: Autor, 2022.	33

Figura 5.13 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da uva Niágara cilíndrica. Fonte: Autor, 2022. **33**

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Modelos semiempíricos utilizados para ajuste de dados experimentais. Fonte: Autor, 2022.	16
Tabela 5.1 - Resultados da caracterização dos teores de umidade e cinzas. Fonte: Autor, 2022.	20
Tabela 5.2 - Dimensões das frutas pré e pós secagem no secador de bandejas. Fonte: Autor, 2022.	21
Tabela 5.3 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a banana prata na geometria de cilindro infinito. Fonte: Autor, 2022.	29
Tabela 5.4 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a banana prata em placa plana infinita. Fonte: Autor, 2022.	29
Tabela 5.5 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para o kiwi verde em placa plana infinita. Fonte: Autor, 2022.	30
Tabela 5.6 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a uva Niágara na geometria esférica. Fonte: Autor, 2022.	30
Tabela 5.7 - Difusividades efetivas obtidas na secagem das frutas em diferentes geometrias. Fonte: Autor, 2022.	34
Tabela 5.8 - Energias de ativação obtidas. Fonte: Autor, 2022.	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Teor de umidade	12
Equação 2: Teor de cinzas	12
Equação 3: Teor de umidade base seca	15
Equação 4: Teor de umidade adimensional	16
Equação 5: Modelo semiempírico de Page	16
Equação 6: Modelo semiempírico de Henderson & Pabis	16
Equação 7: Modelo semiempírico de Lewis	16
Equação 8: Modelo semiempírico de Midilli	16
Equação 9: Balanço de massas	16
Equação 10: Solução analítica para placa plana infinita em termos de série	17
Equação 11: Solução analítica para cilindro infinito em termos de série	17
Equação 12: Solução analítica para esfera em termos de série	17
Equação 13: Equação de difusividade para placas planas infinitas	18
Equação 14: Equação de difusividade para cilindros infinitos	18
Equação 15: Equação de difusividade para esferas	18
Equação 16: Equação de Arrhenius da dependência da difusividade efetiva com a temperatura	18

NOMENCLATURA

Letras Latinas

B.U.	Base úmida
B.S.	Base seca
cm	Centímetros
Def	Difusividade efetiva (m^2/s)
D_0	Fator de Arrhenius
DF	Distrito Federal
E_a	Energia de ativação (J/mol)
et. al.	et alli (e outros)
g	Gramas
h	Horas
kcal	Quilocalorias
L	Comprimento característico, semi espessura
mamostra	Massa da amostra (g)
mcinzas	Massa de cinzas (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 em segundos
T	Temperatura absoluta (K)
U	Conteúdo de umidade (kgágua/kgmassa seca)
\bar{U}	Conteúdo médio de umidade (kgágua/kgmassa seca)
U_{eq}	Conteúdo de umidade de equilíbrio (kgágua/kgmassa seca)
X_0	Conteúdo de umidade no instante inicial (kgágua/kgmassa seca)
Z	Direção de transferência (m)
\bar{Y}	Conteúdo adimensional de umidade
°C	Graus Celcius

Letras Gregas

θ Temperatura do produto (°C)

∇ Gradiente

∂ Derivada parcial

Sobrescrito

*

Adimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Gerais	3
2.2. Específicos	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1. Cultivo de frutas tropicais	4
3.2. Secagem de alimentos	4
3.3 Cinética de secagem	6
3.3.1 Período de indução	7
3.3.2 Secagem a taxa constante	7
3.3.3 Secagem a taxa decrescente	8
3.4 Atividade de água nos alimentos	8
3.5 Secador de bandejas de leito fixo com fluxo de ar forçado	9
3.6 Modelos de secagem	10
4. METODOLOGIA	12
4.1. Origem das frutas analisadas	12
4.2. Caracterização de teor de umidade e cinzas	12
4.2. Curvas de secagem	13
4.4. Modelagem matemática	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1. Caracterização física de umidade e cinzas da banana prata, kiwi verde e uva Niágara	20
5.2. Curvas de secagem	23
5.3. Modelagem matemática	26
5.4. Difusividade efetiva e energia de ativação	31
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A produção de produtos agrícolas no Brasil desempenha um papel muito importante para a economia. Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, atrás apenas da China e da Índia, com um volume de produção estimado em 43,6 milhões de toneladas. Informações do Instituto Brasileiro de Frutas (IBRAF) mostram que a fruticultura, com aproximadamente 2,2 milhões de hectares de terras cultivadas, é responsável por aproximadamente 27% da força de trabalho em todas as atividades agrícolas no Brasil.

Nos países tropicais e subtropicais, as perdas de frutas frescas representam cerca de 50% da produção, devido à má refrigeração e armazenamento. O principal objetivo do processamento de alimentos é convertê-los em produtos mais estáveis e que possam ser armazenados por muito tempo, sendo os mais importantes o enlatamento, o congelamento e a desidratação (SOUZA, 2007).

Com o desenvolvimento tecnológico e as mudanças que exigem o armazenamento a longo prazo dos alimentos, surgiram diversas formas de processamento, dentre as quais se destaca a secagem. Esta técnica é caracterizada pela redução da água nos alimentos, o que ocasiona na diminuição da atividade biológica, das reações químicas e bioquímicas e o desenvolvimento de microrganismos prejudiciais à saúde. A secagem proporciona produtos compactos, fáceis de transportar e com valor nutricional concentrado, apresentando estabilidade no armazenamento (PANI et al., 2008).

A pesquisa no setor de alimentos possibilita o desenvolvimento de novos produtos e processos que ajudarão a agricultura de subsistência, indústrias extrativas e outros setores, além de colaborar para o enfrentamento de problemas graves como a fome e a desnutrição. Desta forma, no desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de alimentos agrícolas é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. A simulação é fundamentada na secagem, sendo utilizado modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a redução do teor de umidade do produto no decorrer do tempo.

Na literatura são encontrados diversos modelos matemáticos propostos para analisar a secagem de produtos agrícolas, podendo ser semiempíricos ou teóricos. Entre os modelos semiempíricos, os modelos de Page, Henderson e Pabis, Lewis e Midilli que são largamente utilizados (SIQUEIRA et al., 2013). Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem têm a difusão como mecanismo principal, sendo ela baseada na segunda Lei de Fick, a qual expressa o fluxo de massa por unidade de área que é proporcional ao gradiente de concentração de água no produto (PARK et al., 2001).

A modelagem matemática das curvas típicas de secagem do produto possibilita a determinação dos índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, como o coeficiente de difusão. Os índices físicos possibilitam a comparação da velocidade de secagem de produtos com tamanhos, formas e texturas diferentes. Já os índices termodinâmicos expressam a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, possibilitando a avaliação energética do processo de secagem (BOTELHO et al., 2015), além de ser importante fonte de informação para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura e os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos (CORRÊA et al., 2010).

Para escolher o método de secagem ideal, é necessário verificar o tempo gasto no processo, assim como a velocidade de troca de calor entre a fruta e o ar que pode ser avaliado através da sua difusividade efetiva em diferentes temperaturas de processo e analisar a modelagem matemática das curvas de secagem, que desenvolve e implementa modelos matemáticos em sistemas reais. Assim, é necessário conhecer as relações matemáticas que descrevem o fenômeno envolvido (AGUIRRE, 2007).

Desta maneira, este trabalho teve como pretensão, realizar o estudo da influência de alguns parâmetros no processo de secagem de três frutas tropicais com geometrias diferentes, sendo elas: banana prata (*Musa paradisiaca*), kiwi verde (*Actinidia deliciosa*) e uva Niágara (*Vitis labrusca*). A secagem foi realizada em um secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar forçada, a fim de elaborar uma modelagem matemática aplicada à cinética de secagem. Os resultados destas propriedades foram comparados também, com os modelos de predição encontrados na literatura.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo realizar a secagem de diferentes frutas tropicais a fim de avaliar quais modelos matemáticos que melhor representam os dados experimentais e calcular os coeficientes de difusividade e energias de ativação.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a secagem da banana prata nas geometrias de cilindro infinito e placa plana infinita, kiwi verde em placa plana infinita e uva Niágara esférica nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C;
- Obter curvas de cinética de secagem das frutas tropicais estudadas em diferentes temperaturas;
- Realizar a caracterização dos teores de umidade e cinzas;
- Analisar as mudanças geométricas das frutas utilizadas;
- Estudar numericamente as cinéticas de secagem ao longo do processo em diferentes condições operacionais de temperatura;
- Determinar os modelos matemáticos que melhor representam os dados experimentais obtidos;
- Obter os parâmetros dos modelos e interpretá-los;
- Calcular os coeficientes de difusividade e as energias de ativação do processo de secagem das frutas estudadas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cultivo de frutas tropicais

As frutas tropicais são definidas como originárias e de melhor produção em lugares com climas de temperatura mais elevada. Elas são produzidas por plantas de diversos tipos de ecossistema, sendo intolerantes a climas de temperatura baixa. Suas principais características estão relacionadas com a riqueza em vitaminas, elevado valor nutritivo e o sabor. A crescente demanda por frutas tropicais estimulou a expansão dos plantios de bananas e citros na América Central e Caribe. Com o hábito de consumo, a modernização dos sistemas de transporte, armazenamento e de tecnologias de processamento, a produção de frutas tropicais expandiu, tanto na América Latina como em outras regiões de climas tropicais. O Brasil é um dos maiores produtores de frutas tropicais do mundo (CRISÓSTOMO & NAUMOV, 2009).

As frutas são caracterizadas pelo seu alto teor inicial de umidade, sendo considerados produtos altamente perecíveis, com perdas bastante consideráveis, variando de 25% a 50%. Portanto, o processo de secagem implica na redução de custo na manipulação do produto, embalagem e armazenamento, além de prolongar sua vida útil. A remoção de umidade provoca a diminuição da atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de microrganismos e retardando a deterioração de origem físico-química. A industrialização é, sem dúvida, uma excelente alternativa para o aproveitamento integral das frutas estudadas.

3.2 Secagem de alimentos

A secagem é um processo físico que consiste na evaporação da água de um sólido envolvendo fenômenos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento, estado de equilíbrio e variações dimensionais do sólido ao longo do processo. Na secagem, a retirada de moléculas se dá por movimentação do líquido devido a diferença de pressão parcial do vapor de água entre a superfície do produto e o ar quente que o envolve

Considerada um dos métodos de conservação de alimentos mais antigos, por séculos a secagem foi a operação utilizada para prolongar a vida útil dos alimentos, juntamente com o processo de salga de carnes e peixes. Com a manipulação correta do produto que se deseja secar, é possível obter um maior rendimento do secador, economizar tempo, mão de obra, combustível, etc. (LEWICKI & JAKBUCZYK, 2004). A escolha do processo de secagem a ser utilizado para a retirada de água de um produto poroso depende das características iniciais deste produto e do produto final desejado.

Secagem com ar quente, também denominada secagem por convecção, é realizada através da aplicação de fluxo de ar quente através do sólido, cedendo calor que penetra no corpo promovendo o aquecimento a partir de suas camadas mais externas em direção às camadas mais internas. Este tipo de aquecimento cria um gradiente de temperatura e de massa no interior do produto, estimulando o transporte da umidade das camadas mais internas para as camadas mais externas. Segundo a teoria da difusão líquida, uma parte do calor aquece o sólido e a outra parte vaporiza a água em sua superfície, sendo que o vapor produzido é retirado das vizinhanças pelo fluxo de ar. Este processo de secagem é indicado principalmente para a secagem de grãos e frutas, devido a possibilidade de secagem de grandes volumes a custos razoáveis (BROOKER et al., 1992).

Na secagem do alimento, a transferência de calor interna é geralmente muito rápida em comparação à transferência externa, portanto, a transferência de calor durante a secagem geralmente é controlada externamente. Em contraste, a transferência de massa depende tanto do movimento da umidade dentro do sólido ou o movimento do vapor de água da superfície sólida para o meio. Dependendo do processo utilizado, a remoção de água pode ser limitada pelo calor, transferência de massa ou as resistências a esses dois fenômenos de transporte podem ser acopladas, pois eles dependem um do outro (KAREL & LUND, 2003).

Os fatores que governam a velocidade dos mecanismos de transferência que determinam a taxa de secagem são: pressão de vapor d'água do material e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (PARK, 2002).

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos, como ilustrado na Figura 3.1..

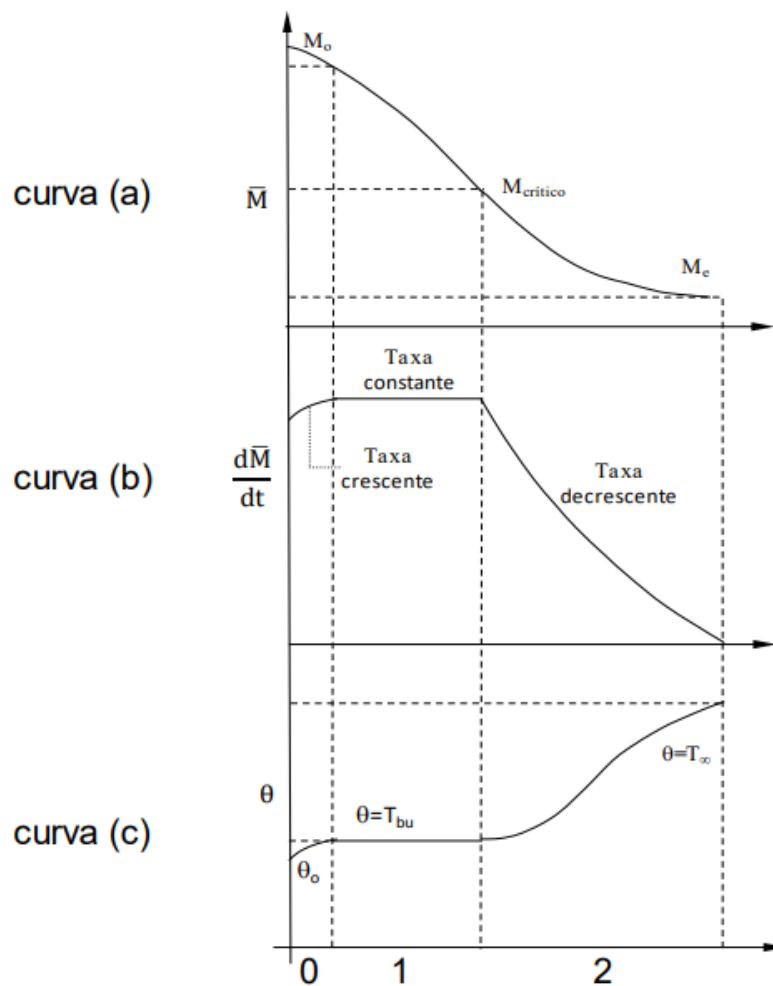


Figura 3.1 - Curvas de teor de umidade, taxa de secagem e temperatura do produto ao longo do tempo. Fonte: LIMA, 2017. A curva **(a)** representa a diminuição do teor de umidade do produto em relação ao tempo (t) durante a secagem, onde a curva é obtida pela pesagem do produto em intervalos de tempos distintos; A curva **(b)** representa a velocidade de secagem do produto e a curva **(c)** representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (PARK, 2002).

Onde: \bar{M} é o teor de umidade médio (Kg/Kg); M_0 é o teor de umidade inicial (Kg/Kg); M_e é o teor de umidade de equilíbrio (Kg/Kg); M_{critico} é o teor de umidade intermediário (Kg/Kg); $\frac{d\bar{M}}{dt}$ é a variação do teor de umidade em função do tempo (Kg/s); θ é a temperatura do produto ($^{\circ}\text{C}$); θ_0 é a temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$); $\theta = T_{bu}$ é a temperatura do bulbo úmido e $\theta = T_{\infty}$ é a temperatura do meio externo.

3.3 Cinética de secagem

A cinética de secagem do produto é o dado mais importante e necessário para o projeto e simulação de secadores, pois representam a facilidade com que um produto é desidratado em condições específicas de secagem, sendo influenciadas pelas condições externas do meio e da estrutura química e física do alimento. O teor

de umidade de uma amostra de alimento deve ser medido em função do tempo para obter a curva cinética de secagem.

Segundo Foust *et al.* (1982) e Park (1998), o processo de secagem de um produto sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar pode ser dividido em um período de indução, velocidade constante e outro de velocidade decrescente, devido a evolução das transferências simultâneas de calor e massa no decorrer do processo.

3.3.1 Período de Indução:

Refere-se do período anterior ao regime operacional, onde geralmente o produto é mais frio que o ar e a pressão de vapor de água na superfície do produto são baixas, e como consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também serão baixas. O calor chegando em excesso, faz com que a temperatura do produto se eleve, ocasionando um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno dura até que haja um equilíbrio na transferência de calor e de massa. Se a temperatura do ar for menor que a do produto, ocorrerá a diminuição da temperatura do produto até que atinja a umidade de equilíbrio. A duração desse período não tem importância em relação ao período total de secagem (PARK, 1998).

3.3.2 Secagem a taxa constante

No período de secagem a taxa constante, as transferências de calor e massa na superfície ar-produto que governam e fixam a velocidade de secagem. O produto permanece com a superfície coberta por uma camada de líquido, constituindo umidade não ligada, e com temperatura de bulbo úmido do ar, sendo que o líquido absorve calor e se vaporiza a uma taxa constante. Nesse período, a migração de umidade do interior para a superfície compensa a perda por vaporização, portanto, a secagem se comporta como a evaporação de uma superfície líquida (PARK, 1998)

Na secagem de produtos agrícolas é difícil a existência da taxa constante, pois nesse período as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material (PARK, 1998).

A secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, pois não existe continuidade de água em toda a superfície de evaporação. Como a superfície de evaporação diminui, a taxa total de evaporação da superfície decresce. Os principais mecanismos de transportes sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor, que podem ocorrer simultaneamente (PARK, 1998).

3.3.3 Secagem a taxa decrescente

O período de secagem a taxa decrescente é o mais observado na desidratação de frutas, tendo início quando a quantidade de água na superfície do sólido se torna escassa e a velocidade de secagem diminui. Ao teor de umidade intermediário do sólido relativo aos períodos de taxa constante e de taxa decrescente, dá-se o nome de umidade crítica, período onde a troca de calor não é mais compensada e, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e se aproxima cada vez mais à temperatura do ar. Durante todo este período, o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa de secagem acontece por conta da redução da pressão parcial de vapor de água na superfície do sólido. Ao final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem será nula (KEEY, 1972).

O período de taxa decrescente pode ser subdividido em primeiro período de taxa decrescente e o segundo período de taxa decrescente (PARK, 1998):

- Primeiro período - a água livre (fase líquida) que se encontra no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, ocupando todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem;
- Segundo período - a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto, originando bolsões de ar que ficam dispersos na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos isolados.

A taxa de secagem de qualquer um desses períodos depende dos coeficientes de transferência de calor e massa, coeficientes de difusão, a natureza dos alimentos, e as condições externas de secagem. A otimização de um ou de todos esses fatores resultam em maiores taxas de secagem.

3.4 Atividade de água nos alimentos

A água, além de ser um recurso natural essencial à vida, é um dos principais componentes na maioria dos alimentos, influenciando suas características físicas e químicas. A partir dela, é obtido os valores de atividade da água e umidade do alimento. A atividade da água pode ser definida como a relação existente entre a pressão de vapor 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). A 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).

A atividade da água fornece informações da existência de moléculas de água com propriedades de distribuição distintas, migração da água dentro do alimento, estabilidade química e bioquímica, propriedades físicas, vida útil, crescimento e desenvolvimento microbiano, informações que não podem ser previstas pela umidade, portanto, a atividade da água é a melhor medida para ser comparada com o teor de umidade (FILHO et al., 2011 e COUTO, 2015).

Sendo o alimento formado de água e matéria seca, e contendo: proteínas, vitaminas, sais minerais, entre outras, a atividade de água não é somente função do conteúdo de água, mas de todas as substâncias que exercem efeito de ligação de água na estrutura do alimento.

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 ao componentes não-aquosos do alimento, sendo facilmente eliminada. Já a água combinada está fortemente ligada ao substrato, componentes não-aquosos do alimento, sendo mais difícil de ser removida e não estando disponível para o processo de deterioração (FILHO et al., 2011).

3.5 Secador de bandejas de leite fixo com fluxo de ar forçado

Existe uma grande variedade de equipamentos e processos de secagem, por isso, os critérios de seleção e classificação de um sistema também são bastante variáveis. Na indústria, são utilizados equipamentos para processar sólidos, pastas e líquidos em operações do tipo batelada ou contínua. Mas para selecionar uma configuração de secador ideal para o tipo de processo é necessário avaliar a natureza do sólido, forma, qualidade desejada no fim do processo, condições operacionais, forma física, escala de produção e o regime de operação (GASPARETO, 2005; PARK et al., 2007).

Os secadores de leite fixo de bandejas são os mais antigos e mais utilizados devido a simplicidade de operação, versatilidade e baixo custo de operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto, podendo ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios. A secagem 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, portanto, em uma unidade de processamento os alimentos são submetidos a uma série de transformações até a obtenção do produto final (COUTO, 2015). O secador de bandeja mais simples, é

constituído por uma câmara retangular de metal com parede dupla e isolamento térmico entre elas onde são alocadas bandejas com fundos em tela retangulares distribuídas sequencialmente ao longo da cabine. O ar de secagem geralmente é introduzido sob o primeiro prato, atravessando perpendicularmente os outros pratos em fluxo ascendente (SILVA et al., 1997). Também são constituídos por um compartimento onde é realizado o condicionamento do ar de secagem, que 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).

A flexibilidade na utilização do equipamento e as condições operacionais dos secadores de bandejas permite que sejam utilizados por pequenos agricultores para melhor aproveitamento produtivo que trabalhem com baixa capacidade produtiva. A imagem 3.2 ilustra o esquema de funcionamento de um secador de bandejas de leito fixo.

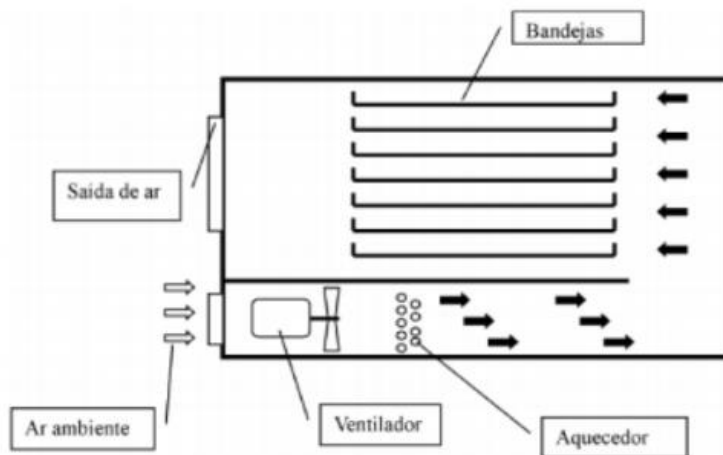


Figura 3.2 - Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas. Fonte: MELANI (2003).

Se houver desconhecimento sobre o comportamento de resposta da taxa de secagem em relação às condições experimentais e das características do material no processo de secagem, é necessário realizar um estudo experimental a fim de obter informações necessárias para o melhor entendimento das relações envolvidas no processo. Com a análise das curvas de secagem do material, é possível definir as condições e procedimentos para garantir a qualidade esperada (OLIVEIRA et al., 2002).

3.6 Modelos de secagem

Os modelos de secagem são caracterizados como um conjunto de equações que podem prognosticar a precisão de processos industriais. A modelagem matemática de processos e equipamentos de secagem tem como finalidade assegurar

a escolha das condições de operação e do método de secagem adequado para um determinado produto. Por essa razão, a modelagem matemática é uma das mais importantes tecnologias de secagem (KARATHANOS & BELESSIOTIS, 1999).

O princípio da modelagem é baseado em ter um sistema de equações matemáticas que caracterizam completamente o sistema a ser modelado. Dessa forma, a solução destas equações possibilita a previsão de parâmetros do processo em função do tempo de secagem, com base nas condições iniciais, de contorno e simplificações, embora alguns dados de saída sejam necessários para o cálculo do processo de secagem. O ponto de partida na modelagem matemática é a definição do processo a ser analisado, a descrição dos dados de entrada que influenciam o processo, assim como as variáveis dependentes do comportamento do processo.

Os principais modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem podem ser divididos em modelos semiempíricos e teóricos. Os modelos semiempíricos relacionam teoria e aplicação entre o tempo de secagem e o teor de água do produto, admitindo solução analítica da teoria difusional que se apoia exclusivamente na Lei de Fick, ou seja, não considera os fundamentos termodinâmicos da operação (COUTO, 2015). Já os modelos teóricos, consideram as etapas elementares de transferência de massa e seus parâmetros, apresentando significado físico e solução numérica (COUTINHO et al., 2005).

Como o processo de secagem é bastante complexo, envolvendo fenômenos físicos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais do produto, é necessário gerar modelos matemáticos que simulem a secagem com grande realismo físico. Assim, é importante inserir o máximo de informações que ocorreram durante o processo, possibilitando a relação correta do modelo com situação real.

Os detalhes quantitativos são obtidos através de cálculos analíticos e numéricos, relacionando matematicamente os modelos semiteóricos e empíricos. Devido à falta de representatividade dos modelos baseados na Lei de Fick, é necessário calcular a difusividade. A difusividade não é intrínseca ao material, pois varia conforme mudam as condições de secagem. Por isso, é chamada de difusividade efetiva (MORAIS et al., 2013).

Modelos como aproximação da difusão, Page, Henderson & Pabis, Newton, Midilli, Dois termos, Logarítmico, 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, onde a transferência de calor e de massa está envolvida com a redução do teor de água do produto (REIS et al., 2011). Também são considerados os coeficientes de regressão linear dos valores de difusão efetiva, 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).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Materiais e Combustíveis (LMC), pertencente ao Instituto de Química (IQ), localizado na Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, DF.

4.1 Origem das frutas analisadas

Para a realização dos ensaios, utilizou-se banana prata, kiwi verde e uva Niágara. As frutas foram adquiridas em um supermercado local no dia em que foram processadas.

4.2 Caracterização dos teores de umidade e cinzas

A caracterização das frutas estudadas teve como base teórica as normas do Instituto Adolf Lutz. Portanto, as análises realizadas foram perda por dessecação - umidade (Norma 012/IV) e resíduo por incineração - cinzas (Norma 018/IV).

Para a determinação dos teores de umidade (perda por dessecação) em base úmida e base seca, pesou-se 10 g da polpa de cada fruta em um cadinho de porcelana com massa conhecida. Os cadinhos com as polpas foram colocados em uma estufa a 105 °C onde permaneceram por 24 horas. Decorrido esse tempo, obteve-se a massa seca da banana prata, kiwi verde e uva Niágara.

Na determinação do teor de cinzas (resíduo por incineração), colocou-se os cadinhos contendo as massas secas das três frutas em uma mufla previamente aquecida durante uma hora. As amostras aqueceram-se gradualmente de 100 °C até 550 °C para a obtenção de peso constante e de cinzas claras ou levemente acinzentadas. O tempo na mufla começou a ser contabilizado ao atingir 550 °C. Após o tempo decorrido, transferiu-se os cadinhos com as amostras para um dessecador, onde permaneceu até atingir a temperatura ambiente. Por fim, obteve-se a massa de cinzas das três frutas estudadas.

Os teores de umidade e cinzas foram calculados mediante as Equações 1 e 2:

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

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

Onde,

$m_{\text{úmida}}$: é a massa de água contida na amostra, g;

m_{amostra} : é a massa da amostra, g;

m_{cinzas} : é a massa de cinzas, g.

4.3 Curvas de secagem

Após as análises dos teores de umidade e cinzas, foram determinadas as curvas de secagem para as frutas tropicais em um secador elétrico.

Para a obtenção de bons resultados experimentais, antes da operação de secagem foi realizada uma seleção das frutas com melhores condições de maturidade, tamanho, forma, cor, textura e densidade, garantindo a uniformidade na desidratação. As frutas selecionadas foram lavadas em água corrente para retirar as impurezas superficiais e em seguida sanitizadas em um recipiente contendo água e água sanitária para total higienização. Para cada litro de água, colocou-se, aproximadamente, 10 mL de água sanitária, onde as frutas permaneceram por 30 minutos.

Em seguida, cada fruta foi preparada de acordo com a simulação geométrica a ser estudada. As dimensões das frutas foram aferidas com um paquímetro e a massa em uma balança digital com precisão de $\pm 0,01$ g a fim de obter resultados mais padronizados e uniformes possíveis, maximizando a homogeneidade durante as secagens, que foram realizadas nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C.

Para a simulação de cilindro infinito, utilizou-se banana prata. As bananas selecionadas foram descascadas manualmente e suas extremidades cortadas com uma faca. Aferiu-se os comprimentos, diâmetros, e a massa da amostra que posteriormente foi colocada na tela da bandeja do desidratador elétrico de leito fixo. As bananas foram pesadas a cada 1 hora.

Para simulação de placas planas infinitas, utilizou-se banana prata e kiwi verde, analisadas separadamente. A banana foi descascada manualmente e o kiwi com o auxílio de uma faca. As frutas foram cortadas com o auxílio de um fatiador a fim de obter fatias de 0,5 cm de espessura. As amostras foram pesadas e colocadas na tela da bandeja do desidratador. As fatias de banana foram pesadas a cada 30 minutos, e as de kiwi, a cada 15 minutos.

A uva Niágara foi utilizada para simular a geometria esférica, portanto, não foi descascada e cortada. Selecionou-se bagos de uva que apresentaram dimensões aproximadas nos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura, que em

seguida foram pesadas e colocadas na tela da bandeja do desidratador. As uvas foram pesadas a cada 30 minutos.

Os procedimentos de secagem para as diferentes geometrias foram realizados nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C, até apresentarem peso constante. As secagens foram realizadas na bandeja central do equipamento. A figura 4.1 apresenta um fluxograma com a metodologia realizada.

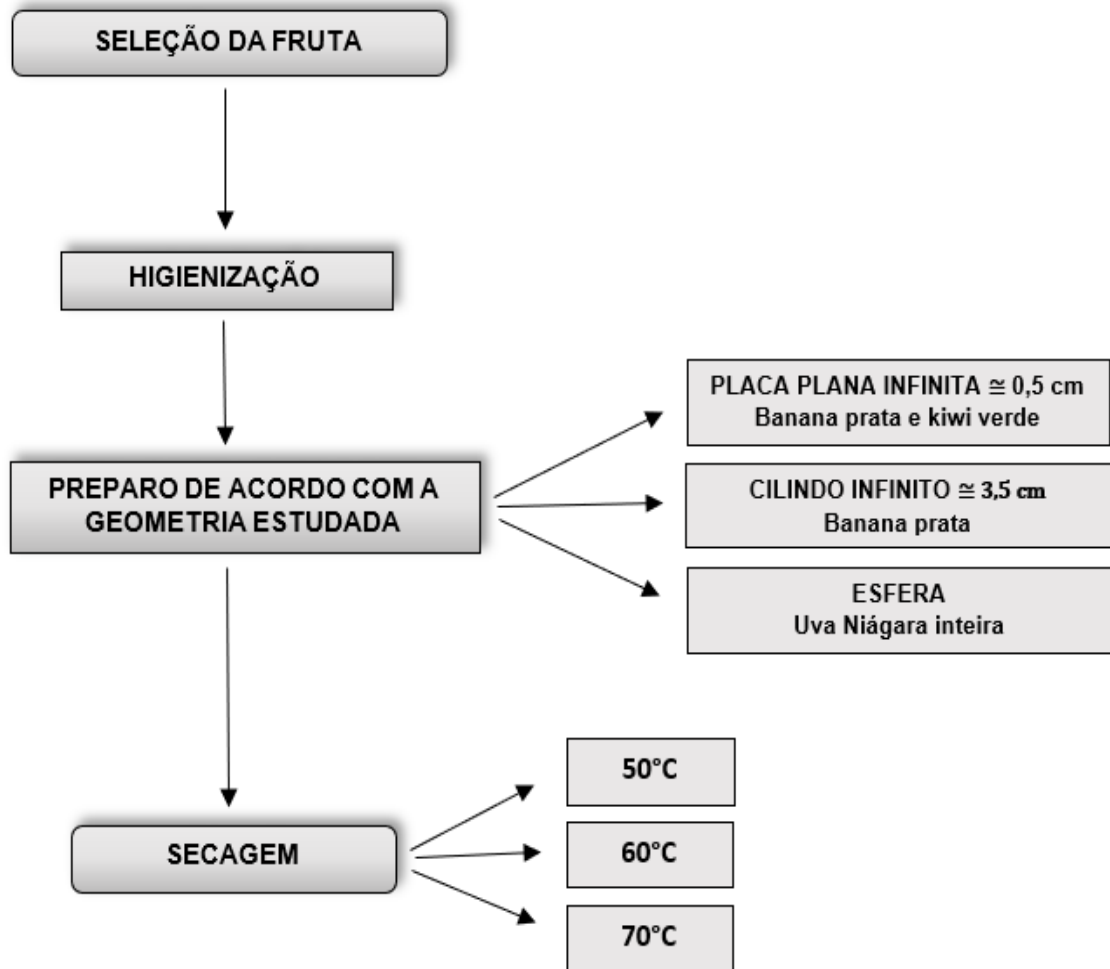


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia realizada experimentalmente para a obtenção das curvas de secagem em diferentes geometrias e temperaturas.

Fonte: Autor (2022)

O secador de bandejas elétrico utilizado (desidratadora) foi do modelo Pardal PEG 60. Modelo composto por um gabinete em aço inox, paredes duplas com isolamento térmico total, 8 bandejas em plástico próprio para alimentos, bordas em aço inox, válvula de saída de vapor na parte superior frontal, carga máxima de 60 kg de banana in natura descascadas e área total de secagem de 3,20 m². O controle de temperatura é automático (termostato analógico), a temperatura de trabalho varia de 0 a 70 °C e o sistema de ventilação forçada garante a homogeneidade da temperatura.

O 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. A desidratadora pode ser classificada 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). O equipamento não apresenta a opção de alteração de velocidade do ar, portanto, considerou-se velocidade constante. A figura 4.1 ilustra o equipamento utilizado na execução experimental.



Figura 4.2 - Secador de bandejas de leito fixo com circulação de ar sobre as bandejas Pardal PEG 60. Fonte: Repositório digital Pardal.

Após a desidratação e obtenção de peso constante, as dimensões das frutas estudadas foram medidas novamente para efeitos de comparação com as dimensões iniciais.

4.4 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. O resultado experimental foi expresso em % de umidade em base úmida e posteriormente convertido para base seca por meio da Equação 3:

$$U_{bs} = \frac{U_{bu}}{(1-U_{bu})} \quad (3)$$

Onde,

U_{bu} : é a umidade em base úmida.

U_{bs} : é a umidade em base seca.

Em seguida, foi realizado o cálculo das umidades em cada experimento com base na massa seca, utilizando a Equação 4, em razão de umidade adimensional.

$$RU = \frac{u - u_e}{u_0 - u_e} \quad (4)$$

Onde,

RU: razão de umidade, adimensional;

u: teor de água médio do produto no tempo t, % b.s.;

u₀: teor de água inicial, % b.s.;

u_e: teor de água de equilíbrio, % b.s..

Considerando os secadores de bandeja, os modelos matemáticos utilizados para descrever a perda de umidade durante o processo de secagem das frutas, foram os modelos semiempíricos. Portanto, os dados experimentais da secagem foram ajustados para as Equações 5-10 apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Modelos semiempíricos utilizados para ajuste de dados experimentais.

Modelo matemático	Equação	Referência
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$ (5)	PAGE (1949)
Henderson & Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$ (6)	HENDERSON & PABIS (1961)
Lewis	$RU = \exp(-k.t)$ (7)	LEWIS (1921)
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$ (8)	MIDILLI (2002)

* t: tempo de secagem (min); k: coeficiente de secagem (s⁻¹); a, b, n - constantes dos modelos (adimensional).

Como é necessário analisar tempo e energia gastos para a escolha do processo de secagem ideal, foi calculada a difusividade efetiva referente a velocidade de troca de calor entre a matéria-prima e o ar quente. A Teoria Difusional se baseia na Lei de Fick, que está relacionada com o movimento vibracional das moléculas e átomos para a difusão de calor no sólido e expressa a facilidade de remoção da água do produto, ocupando a posição de equilíbrio estável (MALISKA, 2004).

Utilizando a Lei de Fick para a equação de balanço de massa de água no interior do alimento, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (Def \cdot \nabla \cdot u) \quad (9)$$

Onde,

u : teor de água $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$;

D_{ef} : difusividade efetiva de massa, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

t : variável temporal, s.

A Equação (9) descreve os fenômenos de transporte de difusão de calor ou massa, que estão presentes nos fenômenos de resfriamento, aquecimento, congelamento e secagem.

Considerando diferentes condições iniciais e de contorno, Crank (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão. Portanto, essas soluções são aplicadas aos sólidos de formas geométricas simples (placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linear ou exponencialmente com a concentração de água, que são apresentadas nas Equações 10-12:

> Placa plana

$$RU = \frac{u - u_e}{u_0 - u_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 Def t}{4L^2}} \quad (10)$$

> Cilindro

$$RU = \frac{u - u_e}{u_0 - u_e} = \frac{4}{a^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{b_n^2 \cdot \pi^2} e^{-(b_n^2 \cdot Def \cdot t)} \quad (11)$$

> Esfera

$$RU = \frac{u - u_e}{u_0 - u_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-(n^2 \cdot \pi^2 \cdot Def \cdot \frac{t}{r^2})} \quad (12)$$

Onde:

RU : razão do teor de umidade, adimensional;

u_0 : teor de água inicial, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$;

u_e : teor de água de equilíbrio, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$;

u : teor de umidade média no tempo, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ms}}$;

t : tempo, s;

n : número de termos na série;

L : comprimento característico, semiespessura da amostra, m;

D_{ef} : difusividade efetiva de massa.

Para longos períodos de secagem, a equação acima pode ser simplificada E para períodos mais longos as Equações 14, 15 e 16, podem ser simplificadas apenas ao primeiro termo, e logaritmando ambos os termos as equações tornaram-se:

$$\ln \left(\frac{u}{u_0} \right) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot D_{\text{ef}} \cdot t \quad (13)$$

$$\ln \left(\frac{u}{u_0} \right) = \ln \frac{4}{a^2} - \frac{\pi^2}{r^2} \cdot D_{\text{ef}} \cdot t \quad (14)$$

$$\ln \left(\frac{u}{u_0} \right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{r^2} \cdot D_{\text{ef}} \cdot t \quad (15)$$

Os valores da difusividade efetiva foram determinados pela plotagem dos dados de secagem experimental em termos do logaritmo natural da razão de umidade e tempo de secagem utilizando a simplificação das Equações 18-20.

Desse modo, com o dado obtido do coeficiente angular do gráfico, calculou-se 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.

$$\ln(D_{\text{ef}}) = \ln(D_0) - \frac{Ea}{R \cdot T} \quad (16)$$

Onde:

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

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

Ea = energia de ativação (J/mol);

R = constante universal dos gases ($8,314 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$);

T = temperatura (K).

Portanto, calculou-se a energia de ativação pela inclinação da reta do gráfico $\ln(\text{Def})$ pelo inverso da temperatura (K), conforme descrito pela Equação 16 do tipo Arrhenius.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos teores de umidade e cinzas

Os valores obtidos utilizando as equações 1 e 2 foram expressos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados da caracterização dos teores de umidade e cinzas.

Fruta	Teor de umidade (B.U.*)	Teor de umidade (B.S.*)	Teor de cinzas
Banana prata	70%	2,33%	0,63%
Kiwi verde	85,3%	5,80%	0,48%
Uva Niágara	83,5%	5,06%	0,6%

*B.U.: base úmida; B.S.: base seca. Fonte: Autor (2022)

Os valores encontrados para teor de umidade da banana prata, kiwi verde e uva Niágara foram de 70%, 85,3% e 83,5%, respectivamente, correspondendo à perda de massa de cada fruta quando aquecida em condições que favorecem a remoção de água. O teor de umidade é referente à água livre presente na superfície externa das frutas que é facilmente evaporada, e a umidade adsorvida, referente à água ligada, encontrada no interior.

Segundo Brito (2010), que realizou um estudo sobre a composição química de uma ampla variedade de bananas, na análise físico-química da banana prata, o teor de umidade encontrado foi de 71,9% e 0,8% para o teor de cinzas. Silva et al. (2016), encontraram 87,3% de umidade e 0,57% de teor de cinzas para o Kiwi verde. Para a uva Niágara, Rosa (2017) encontrou 85,6% e 0,45% para umidade e teor de cinzas. Portanto, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e muito parecidos com os valores encontrados nas espécies descritas na Tabela de Composição de Alimentos – TACO (2006).

Os altos teores de umidade em base úmida demonstram que a água é a maior fração constituinte das frutas estudadas, assim, a composição nutritiva fica concentrada na fruta seca. Os teores de cinzas, se referem aos resíduos minerais fixos (cálcio, fósforo, potássio, sódio, cloreto de alumínio, manganês, zinco, magnésio,

ferro, cobre e outros componentes minerais) resultante da incineração da matéria orgânica em altas temperaturas.

A tabela 3 apresenta os valores encontrados para as dimensões das frutas antes de depois de serem desidratadas:

Tabela 5.2 - Dimensões das frutas pré e pós secagem no secador de bandejas.

Fruta	Dimensões pré secagem	Dimensões pós secagem
Banana prata cilindro	10 cm de comprimento 3 cm de diâmetro	9 cm de comprimento 1,5 e 2 cm de diâmetro
Banana prata placa	0,5 cm de espessura 3 cm de diâmetro	0,25 cm de espessura 2 cm de diâmetro
Kiwi placa	0,5 cm de espessura 4 x 5 cm de diâmetro	0,15 cm de espessura 2,5 x 3 cm de diâmetro
Uva Niágara esfera	6 cm de circunferência 1,8 cm de diâmetro	- 2 x 1,5 cm de diâmetro

Fonte: Autor (2022)

O encolhimento das frutas ocorre devido à perda de água durante a secagem, ocasionando na diminuição da tensão exercida pelo líquido nas paredes celulares provocando uma contração, resultando na diminuição dimensional. A figura 5.1 mostra o encolhimento do kiwi verde e banana prata em placas planas, uva Niágara esférica e banana prata cilíndrica, possibilitando a visualização da deformação que as frutas sofreram.



Figura 5.1 - Encolhimento das frutas estudadas. Fonte: Autor (2022)

Quando ocorre a transferência de massa de água, os espaços intercelulares são reduzidos de forma que a matéria seca passa a ocupar o lugar que antes pertencia à água.

O kiwi verde e a banana prata cortados a fim de representar placas planas, apresentaram encolhimento e deformação nas extremidades. A banana prata em corte cilíndrico apresentou uma leve curvatura e depressão na superfície. Ao parti-la ao meio, foi observado um orifício que pode ter sido formado na segunda etapa da taxa constante, quando a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar em seu interior, originando bolsões de ar que ficam dispersos na fase líquida dentro dos poros.

A secagem em altas temperaturas também pode resultar em espaços vazios caso a superfície do alimento fique seca e rígida antes da desidratação do interior do sólido. No fim da operação, quando o alimento se desidrata e encolhe, a água é retirada das camadas mais rígidas, resultando em espaços porosos de ar no interior. A uva Niágara, que representou a geometria esférica, foi a fruta que mais sofreu deformação. A presença da casca como película protetora dificultou a evaporação da água, no entanto, com o aquecimento da polpa, houve o rompimento abrupto da casca que expeliu todo o conteúdo interno.

Pela análise da Tabela 5.2, é observado que a razão entre o diâmetro final e inicial foi significativamente maior que a relação de comprimento para a banana cilíndrica, pois a umidade na direção radial se difunde mais rápido devido o efeito geométrico, ocasionando em um encolhimento não homogêneo.

Após a secagem é possível notar a alteração da cor, textura, encolhimento e ressecamento, porém, estes resultados serão desconsiderados, a fim de simplificar a modelagem matemática.

5.2 Curvas de secagem

As figuras 5.2 a 5.5, mostram as curvas típicas de secagem obtidas experimentalmente a partir da secagem das bananas prata na geometria cilíndrica e placa plana, kiwi em placa plana e uva Niágara esférica nas temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C.

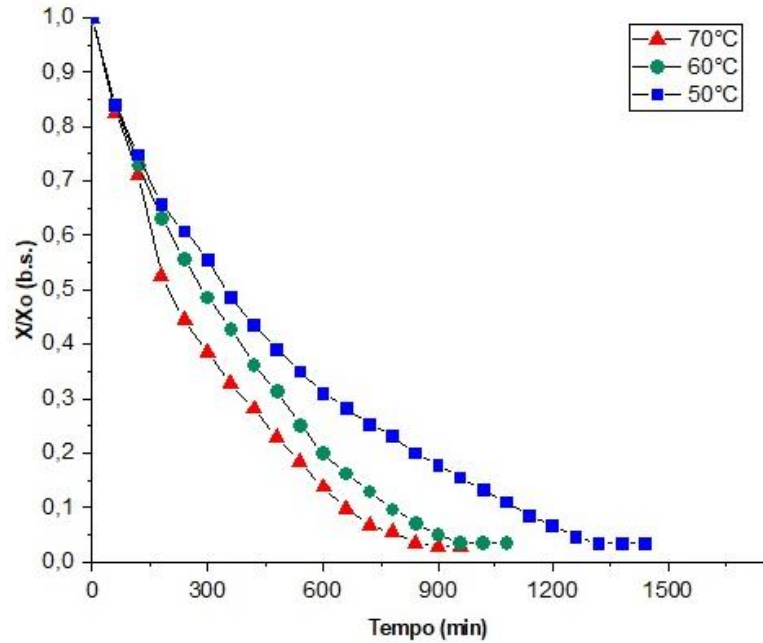


Figura 5.2 - Curva típica de secagem da banana prata em formato cilíndrico.
Fonte: Autor (2022)

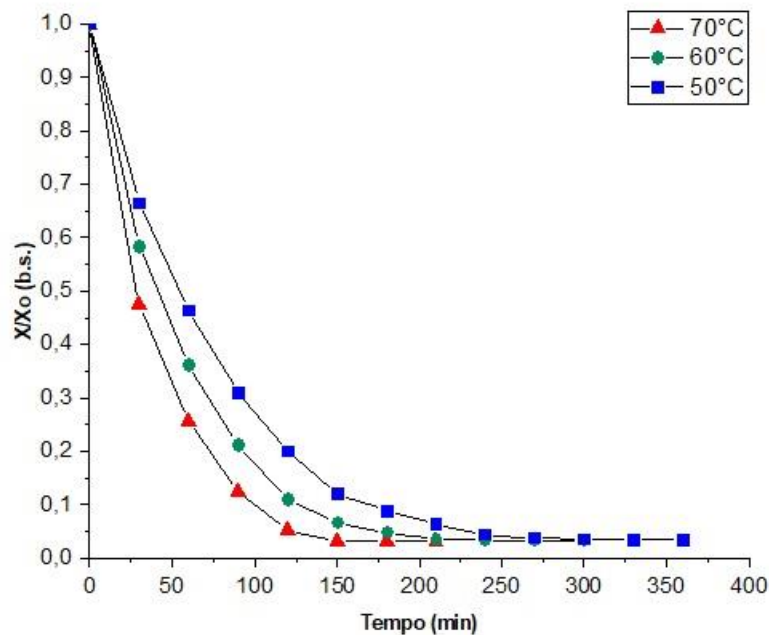


Figura 5.3 - Curva típica de secagem da banana prata em corte de placa plana.
Fonte: Autor (2022)

A comparação das duas curvas para a banana prata em geometrias diferentes nas figuras 5.2 e 5.3, evidencia que o aumento da temperatura favorece as taxas de transferência de calor, promovendo o aumento da energia disponível para vibração das moléculas de água, facilitando a quebra das interações entre as moléculas na fase líquida e facilitando sua transferência para a fase gasosa. A cinética de secagem da banana simulando placas planas foi muito superior a cinética de secagem da banana cilíndrica, isso se deve a diferença geométrica de cada uma. Como a banana que simulou placas planas apresentou semiespessura de 0,25 cm, sua superfície foi diretamente exposta à secagem, se aproximando rapidamente à umidade de equilíbrio, assim, a água exposta na superfície é substituída pela água do interior da fruta mais facilmente.

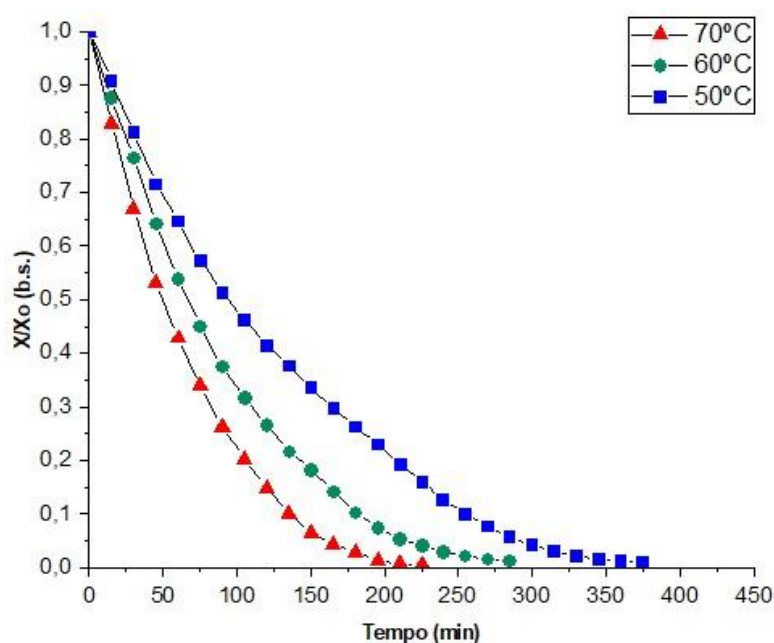


Figura 5.4 - Curva típica de secagem do kiwi em corte de placa plana.

Fonte: Autor (2022)

Na análise das curvas de secagem do kiwi verde, é notório que na primeira hora de operação ocorre a diminuição do conteúdo de umidade muito rápido. Em seguida, para todas as temperaturas de trabalho, a secagem se tornou mais lenta. Nos estudos de Simal et al. (2005) e Kaya et al. (2007) a taxa de secagem do kiwi no início da operação apresentou o mesmo comportamento, assim como o favorecimento do aumento da temperatura na cinética de secagem. Comparando as curvas das figuras 5.3 e 5.4, para as duas frutas que foram estudadas com cortes de semiespessura iguais, a banana prata apresentou cinéticas de secagem muito menores se comparada às cinéticas do kiwi. Isso ocorre, pois a banana apresenta menor concentração de água, sendo 70%, e o kiwi, 85,3%, portanto, já era esperado que a água presente na banana fosse escassa primeiro.

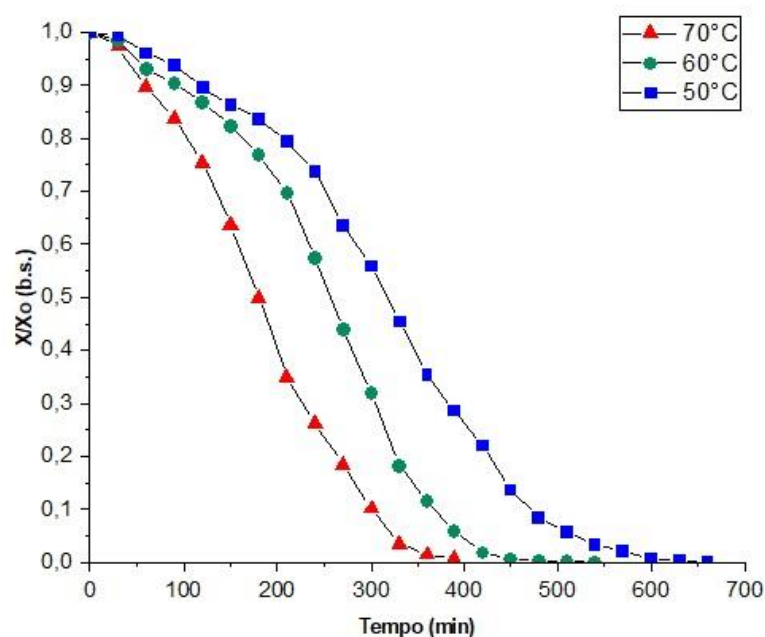


Figura 5.5 - Curva típica de secagem da uva Niágara esférica.
 Fonte: Autor (2022)

O elevado tempo necessário para a secagem da uva se deve a presença da membrana cuticular, a casca que cobre toda a polpa. A casca da uva contém uma fina camada de cera hidrofóbica, estabelecendo uma barreira contra a evaporação de água da polpa. No entanto, para reduzir o tempo de secagem da uva, é necessário retirar a cera antes de submeter à uva ao processo de desidratação (GABAS, 1998).

A perda de massa de água da uva Niágara no início do processo é muito lenta, apresentando perda inferior a 10 g nos primeiros 30 minutos. Para as três temperaturas, a perda de água passou a ser significativa após 60 minutos no secador elétrico. Após a primeira hora, a casca se rompeu, favorecendo a evaporação da água. Após 7 horas de secagem, a perda de massa de água foi bem pequena e quase constante. A secagem completa da uva Niágara demandou 11, 9 e 7 horas, respectivamente, para as temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C. Resultado aproximado ao tempo de secagem que foi encontrado por Santos et al. (2010), que obteve a fruta seca em 8 horas à temperatura de 65 °C.

Ao analisar os gráficos representados nas figuras 5.2 a 5.5, foi constatado que quanto maior for a temperatura do ar de secagem, maior será a taxa de secagem. Portanto, se a água contida na fruta é eliminada facilmente em temperaturas mais altas, rapidamente atingirão o equilíbrio, concordando com vários pesquisadores da literatura (Martinazzo et al., 2007; Anjos et al., 2015; Morais et al., 2013).

Alguns alimentos não apresentam período constante na taxa de secagem, no entanto, todas as cinéticas de secagem apresentaram taxa constante para as três temperaturas de trabalho. Durante o período de taxa constante, a superfície da fruta

se encontra saturada com água, ou seja, existe um filme contínuo de água em cima da superfície da fruta tendo o ar em contato direto com o sólido. O período de taxa constante é presente em produtos agrícolas em que o movimento da água é controlado por capilares e forças de gravidade. Esse mesmo comportamento foi observado por Santos et al. (2014) na secagem de grãos de urucum, Azzouz et al. (2002) e Yaldiz et al. (2001) na secagem de uva.

Devido à alta porosidade das frutas estudadas, o período de secagem constante decrescente ocorre mais facilmente. Após o fim do período de secagem constante, é atingida a umidade crítica, onde ocorre o aumento da resistência interna. Assim, o movimento do líquido no interior do sólido em direção à superfície é insuficiente para compensar o líquido que é evaporado, dificultando o escoamento da água. 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. As curvas dos gráficos demonstram que à medida que se aumenta a temperatura de secagem, o equilíbrio é atingido mais rapidamente.

5.3 Modelagem matemática

Para o ajuste dos dados experimentais, foram utilizados os modelos cinéticos de secagem de Page, Henderson-Pabis, Lewis e Midilli, aplicando as umidades iniciais (U_i) e de equilíbrio (U_e), determinadas no item 4.3. As tabelas 5.3 a 5.6 apresentam, a partir dos ajustes, os parâmetros cinéticos e estatísticos de cada um dos modelos nas temperaturas de estudo, 50 °C, 60 °C e 70 °C. Para o ajuste, foi utilizado o programa Origin 2017 64 bit e foram obtidos os valores referentes aos coeficientes de secagem (k), constantes dos modelos (n) adimensional, coeficientes de correlação linear (R^2) e erros médios estimados (SE) para as frutas estudadas em diferentes geometrias.

As figuras 5.6 a 5.9, apresentam as curvas obtidas pela modelagem matemática nas três temperaturas de estudo, apesar da modelagem em 70°C ter apresentado os melhores resultados. Não foram todos os ajustes que apresentaram coeficientes de correlação linear (R^2) acima de 99% e erros médios (SE) do coeficiente de secagem (k) pequenos.

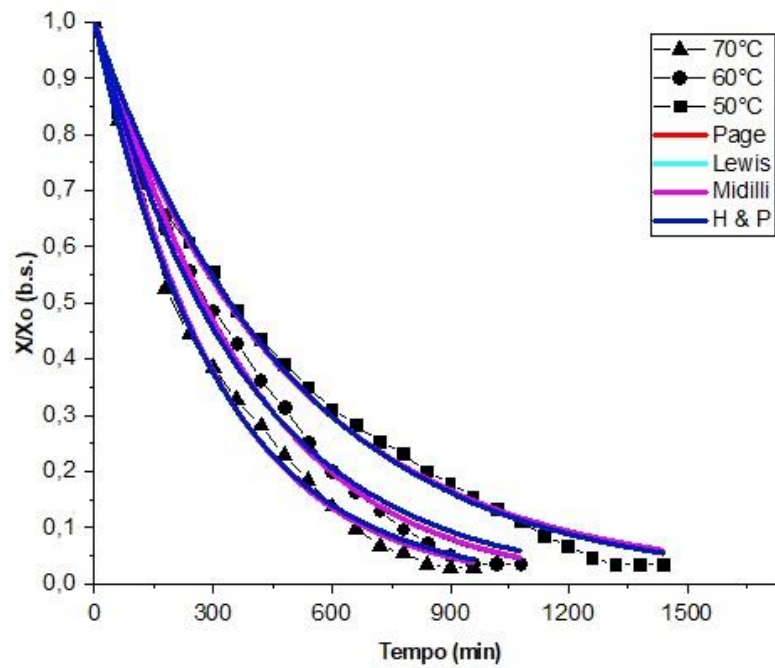


Figura 5.6 - Curvas de ajuste da banana prata em geometria cilíndrica.
Fonte: Autor (2022)

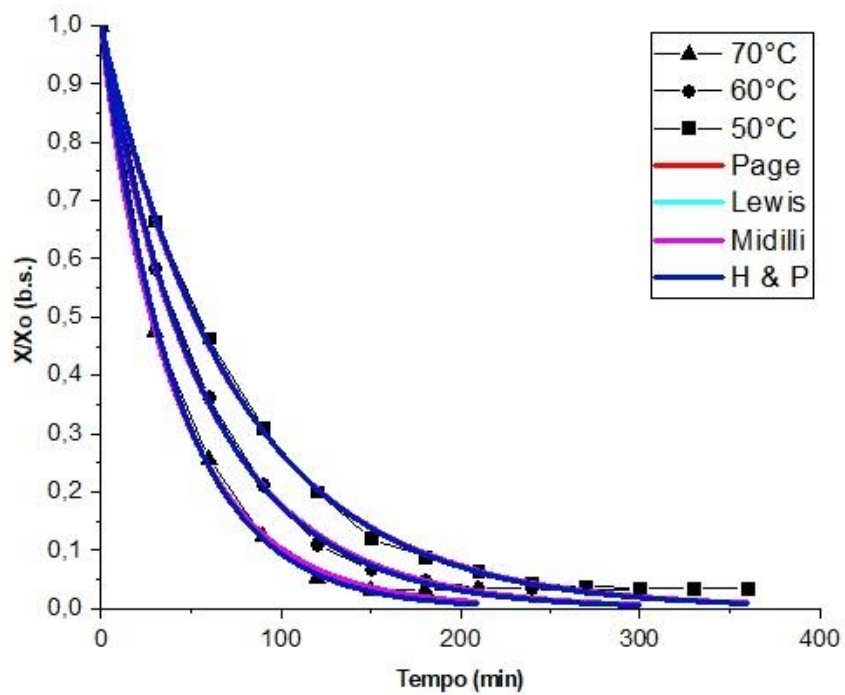


Figura 5.7 - Curvas de ajuste da banana prata em placa plana infinita.
Fonte: Autor (2022)

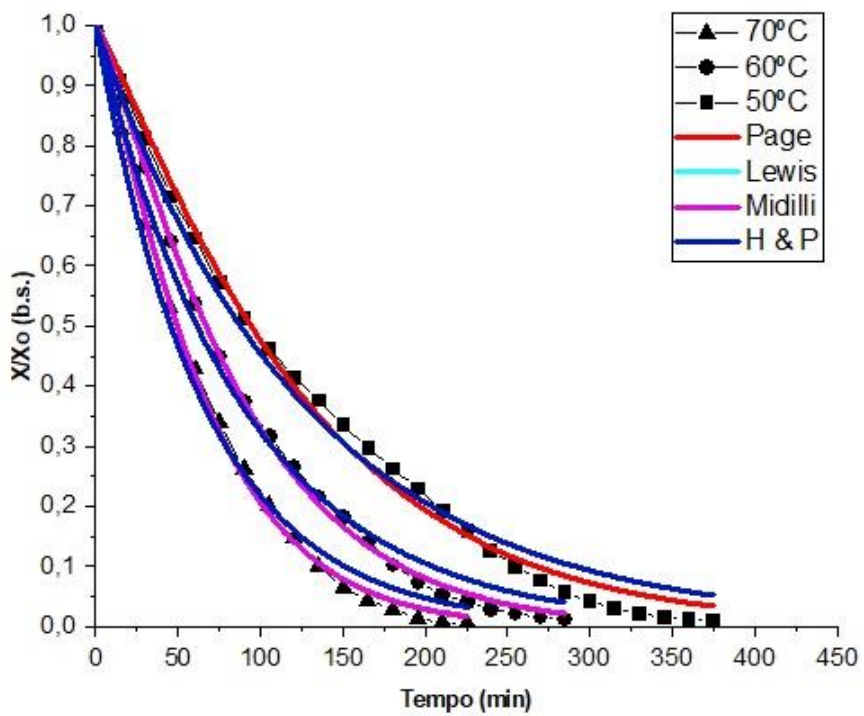


Figura 5.8 - Curvas de ajuste do kiwi verde em placa plana infinita.
 Fonte: Autor (2022)

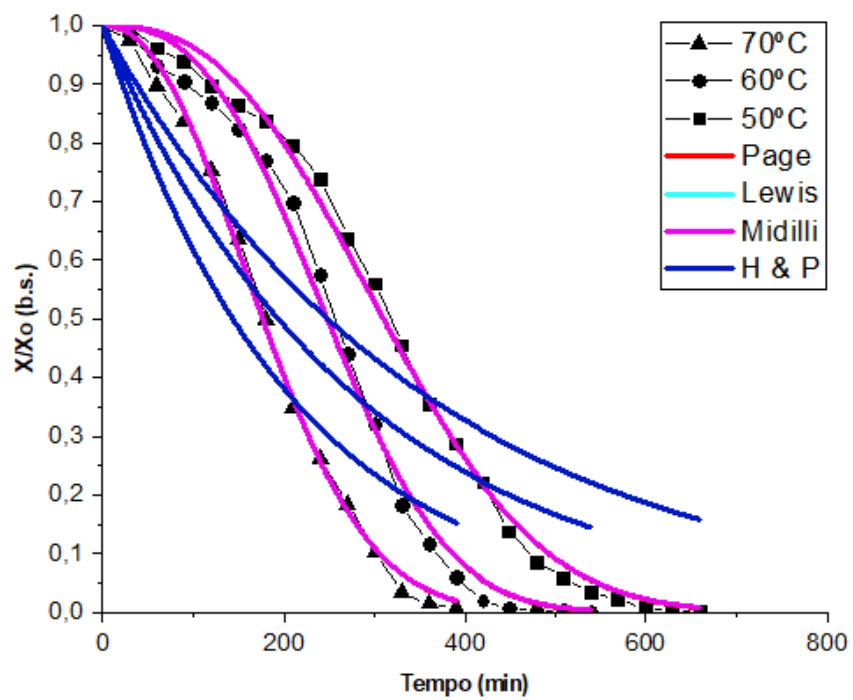


Figura 5.9 - Curvas de ajuste da uva Niágara em geometria esférica.
 Fonte: Autor (2022)

Os parâmetros utilizados nos modelos contam nas tabelas 5.3 a 5.6, junto aos valores do coeficiente de correlação linear de determinação (R^2) e os erros médio (SE).

Tabela 5.3 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a banana prata - cilindro infinito.

Modelo	T (°C)	Constantes	R^2	SE
Page	50	k= 0,0023 n= 0,96984	0,9938	4,6509E-4
	60	k= 0,00147 n= 1,09494	0,9941	5,7397E-4
	70	k= 0,00246 n= 1,04140	0,9960	4,3554E-4
Henderson e Pabis	50	k= 0,00202	0,9936	4,8400E-4
	60	k= 0,00263	0,9909	8,0119E-4
	70	k= 0,00327	0,9948	4,6206E-4
Lewis	50	k= 0,00215	0,9937	4,7200E-4
	60	k= 0,00276	0,9918	7,9648E-4
	70	k= 0,00334	0,9952	4,5712E-4
Midilli	50	k= 0,0024 n= 0,9706	0,9936	4,9843E-4
	60	k= 0,0026 n= 1,0964	0,9937	5,8428E-4
	70	k= 0,0025 n= 1,0441	0,9954	4,4154E-4

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5.4 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a banana prata - placa plana infinita.

Modelo	T (°C)	Constantes	R^2	SE
Page	50	k= 0,0141 n= 0,98569	0,9981	1,7610E-4
	60	k= 0,01972 n= 0,97039	0,9978	2,2371E-4
	70	k= 0,03113 n= 0,93149	0,9987	1,6914E-4
Henderson e Pabis	50	k= 0,01321	0,9981	1,6884E-4
	60	k= 0,01738	0,9997	1,7031E-5
	70	k= 0,02362	0,9982	2,1339E-4
Lewis	50	k= 0,01354	0,99993	4,2286E-6
	60	k= 0,01738	0,99773	2,1857E-4
	70	k= 0,02362	0,99823	2,1339E-4
Midilli	50	k= 0,0140 n= 0,9870	0,9980	1,801E-4
	60	k= 0,0197 n= 0,9712	0,9977	2,2635E-4
	70	k= 0,03105 n= 0,9321	0,9987	1,7176E-4

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5.5 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para o kiwi verde - placa plana infinita.

Modelo	T (°C)	Constantes	R ²	SE
Page	50	k= 0,00376 n= 1,1486	0,9942	5,4453E-4
	60	k= 0,0049 n= 1,1819	0,9988	1,2065E-4
	70	k= 0,00715 n= 1,1722	0,9982	1,9453E-4
Henderson e Pabis	50	k= 0,00790	0,9902	0,00114
	60	k= 0,01128	0,9907	8,8595E-4
	70	k= 0,01525	0,9915	8,4414E-4
Lewis	50	k= 0,00790	0,9937	0,00103
	60	k= 0,01128	0,9916	8,5996E-4
	70	k= 0,01525	0,9923	8,3114E-4
Midilli	50	k= 0,0037 n= 1,1508	0,9941	5,4824E-4
	60	k= 0,0048 n= 1,1818	0,9988	1,2233E-4
	70	k= 0,0072 n= 1,1707	0,9980	1,9660E-4

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5.6 - Parâmetros cinéticos e estatísticos obtidos para a uva niágara - esfera.

Modelo	T (°C)	Constantes	R ²	SE
Page	50	k= 2,7094 E-7 n= 2,57271	0,9966	5,8440E-4
	60	k= 2,3135 E-7 n= 2,70497	0,9933	0,00116
	70	k= 8,4277 E-6 n= 2,18731	0,9980	4,0175E-4
Henderson e Pabis	50	k= 0,00279	0,8123	0,03114
	60	k= 0,00358	0,8094	0,02873
	70	k= 0,00483	0,8624	0,01811
Lewis	50	k= 0,00279	0,8237	0,02627
	60	k= 0,00358	0,8147	0,02939
	70	k= 0,00483	0,8699	0,01847
Midilli	50	k= 2,7226E-7 n= 2,5721	0,9962	5,9095E-4
	60	k= 2,3391E-7 n= 2,7040	0,9930	0,00118
	70	k= 2,4421E-7 n= 2,1878	0,9974	4,0480E-4

Fonte: Autor (2022)

De acordo com as tabelas 5.3 a 5.6, os modelos experimentais ajustaram adequadamente os dados experimentais de secagem, apresentando coeficientes R² superiores a 0,99, com exceção da uva Niágara, onde os modelos de Henderson & Pabis e Lewis apresentaram R² inferiores a 0,90 e erros relativos alto, portanto, os modelos não representaram os dados experimentais, mas apresentaram bons resultados para os modelos de Page e Midilli.

Nas quatro análises, os modelos de Henderson & Pabis e Lewis, apresentaram resultados muito próximos, o mesmo ocorreu com os modelos de Page e Midilli. De acordo com Madamba et al. (1996), os coeficientes de determinação analisados isoladamente, não constituem bons parâmetros para a seleção de modelos não-lineares. Apesar dos modelos de Page e Midilli apresentarem resultados próximos, os erros relativos foram menores no ajuste ao modelo de Page, portanto, esse é o modelo mais apropriado para descrever os dados experimentais.

Panchariya et al. (2002) afirmou que os modelos semiempíricos de Page e Midilli são comumente utilizados para ajustar curvas de secagem de produtos agrícolas ricos em fibras, como é o caso das frutas estudadas. Santos (2018) que estudou a secagem de fibras de coco verde e Moscon et al. (2017) que estudaram a secagem de grãos de quinoa, obtiveram resultados semelhantes.

Reis et al. (2011) que estudou a modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará e Martinazzo et al. (2007) de folhas capim-limão, observaram que tanto o coeficiente de secagem (k), quanto a constante n para o modelo de Midilli, não demonstrou comportamento em função da temperatura. O mesmo comportamento foi observado neste estudo.

Dessa forma, apesar dos dois modelos apresentarem comportamentos e resultados semelhantes, este estudo selecionou o modelo matemático de Page para representar a cinética da secagem da banana prata, kiwi verde e uva niágara em geometrias diferentes, por apresentar operações matemáticas simples e ser frequentemente recomendado e aplicado para prever o processo de secagem de produtos agrícolas.

5.4 Difusividade efetiva e energia de ativação

Os coeficientes de difusividade e a energia de ativação foram determinados para as geometrias de cilindro infinito, placa plana infinita e esfera como descrita no item 4.3.

Nas figuras 5.10 a 5.13 são apresentadas as curvas obtidas para a determinação da difusividade efetiva para as bananas prata na geometria de cilíndrico infinito, banana e kiwi em placas planas infinitas e uva na geometria esférica nas diferentes temperaturas.

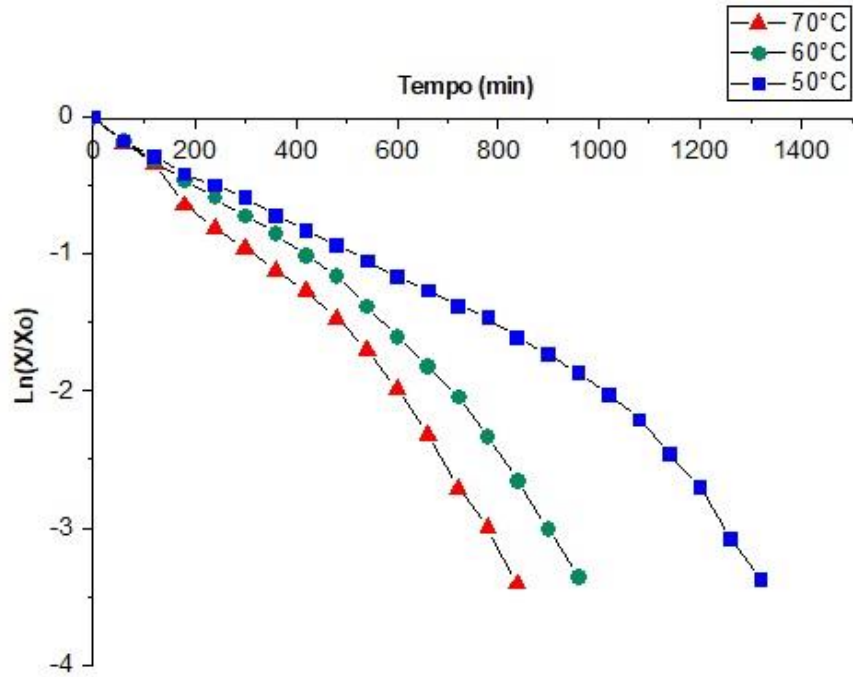


Figura 5.10 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da banana prata cilíndrica. Fonte: Autor (2022)

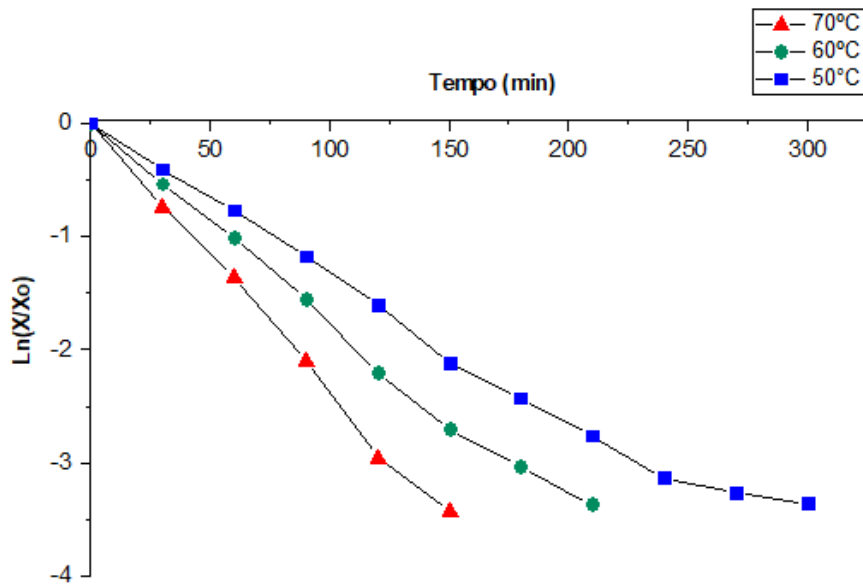


Figura 5.11 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da banana prata em corte de placa plana. Fonte: Autor (2022)

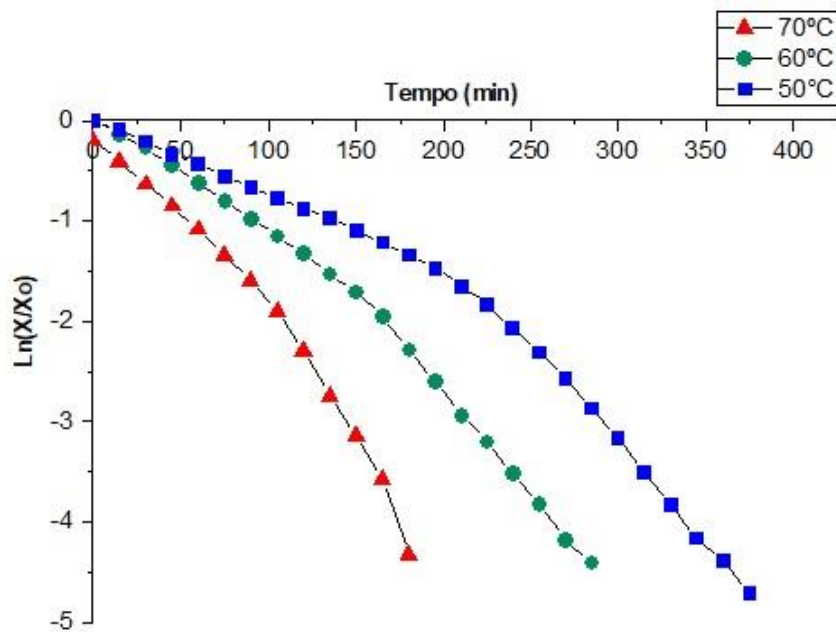


Figura 5.12 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade do kiwi verde em corte de placa plana. Fonte: Autor (2022)

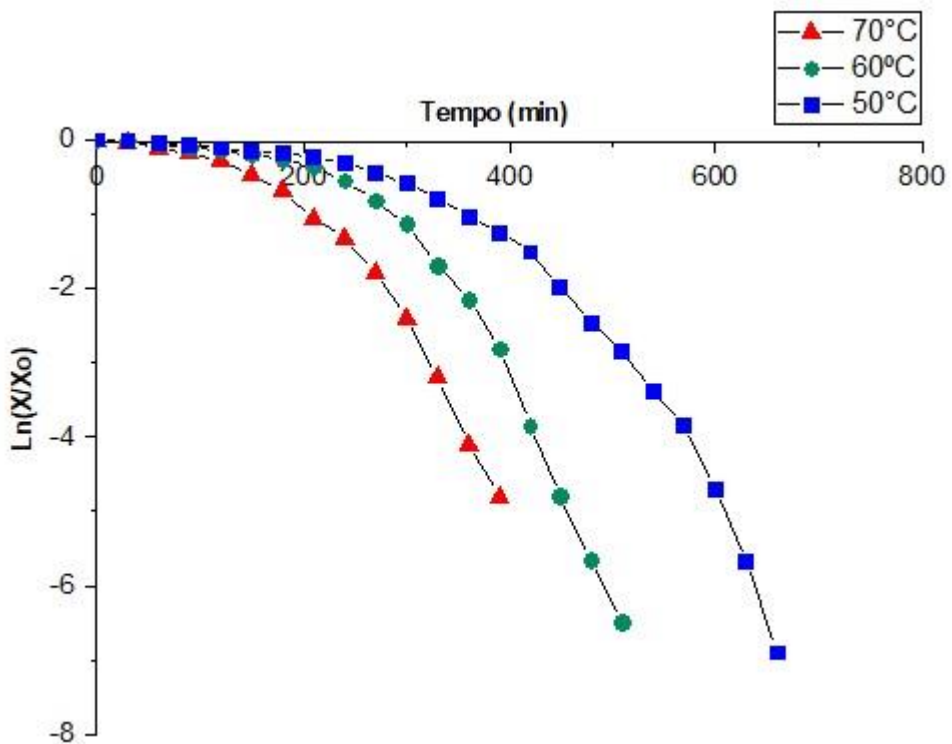


Figura 5.13 - Curvas obtidas em diferentes temperaturas para determinação da difusividade da uva Niágara cilíndrica. Fonte: Autor (2022)

Através das curvas para a determinação da difusividade, foi constatado que existe mais de um coeficiente de difusão, sendo a uva Niágara a que mais apresentou inclinações, indicando que há alterações nos mecanismos de transferência de massa durante o processo de secagem. Segundo Vasques (2003), a existência de mais de um coeficiente é referente ao aumento dos espaços intercelulares formados conforme a água é removida, o que possibilita a formação de pequenos canais de condução de vapor até a superfície da fruta. À medida que a temperatura aumenta, esses espaços intercelulares são intensificados.

Fazendo a regressão linear e adicionando a linha de tendência nas curvas obtidas foi possível utilizar a inclinação da reta para calcular a difusividade efetiva. A tabela 5.4 apresenta os resultados encontrados para o semicilindro da banana, semiespessura da banana e kiwi e semiesfera da uva.

Tabela 5.7 - Difusividades efetivas obtidas na secagem das frutas em diferentes geometrias.

Fruta	T (°C)	Def ₁ (m ² /s)	Def ₂ (m ² /s)	Def ₃ (m ² /s)	Def ₄ (m ² /s)
Banana prata cilindro	50	4,34E-8	1,05E-7	-	-
	60	5,48E-8	9,58E-8	-	-
	70	7,07E-8	1,35E-7	-	-
Banana prata placa plana	50	3,22E-8	7,61E-10	-	-
	60	4,21E-8	5,07E-10	-	-
	70	5,93E-8	2,54E-10	-	-
Kiwi placa plana	50	1,93E-8	4,97E-8	-	-
	60	2,99E-8	5,17E-8	-	-
	70	3,98E-8	7,15E-8	-	-
Uva Niágara esfera	50	2,86E-8	1,19E-7	3,58E-7	9,53E-7
	60	3,38E-8	1,92E-7	7,48E-7	-
	70	6,23E-8	2,88E-7	7,01E-7	-

Fonte: Autor (2022)

Os valores de difusividade efetiva encontrados, representam a facilidade da água de se mover no interior do sólido, assim, indica a velocidade de saída da água do alimento. Analisando a Tabela 5.7, é perceptível que os valores de difusividade aumentam com a elevação da temperatura, indicando que houve diminuição das resistências internas, favorecendo a secagem do alimento. Entretanto, a difusividade também pode diminuir durante a secagem como observado para a banana prata em placas planas infinitas, esse comportamento é justificado pela redução de água disponível no alimento.

De acordo com Crank (1975), a geometria do sólido interfere diretamente na secagem, pois em sólidos cilíndricos e esféricos a difusão pode ser radial, e em placas, no sentido da espessura. É possível afirmar que a composição do alimento que simula determinada geometria também interfere na secagem. Alimentos com maior disponibilidade de água apresentam taxas de secagem menores e difusividades maiores.

A partir dos coeficientes de difusividade efetiva em função da temperatura, foram determinadas as energias de ativação pela equação de Arrhenius (18).

Tabela 5.8 - Energias de ativação obtidas.

Fruta	T (°C)	Energia de ativação 1 (kJ/mol)	Energia de ativação 2 (kJ/mol)	Energia de ativação 3 (kJ/mol)	Energia de ativação 4 (kJ/mol)
Banana prata cilindro	50	8427,37	6052,96	-	-
	60	8041,40	6492,12	-	-
	70	7552,97	5717,83	-	-
Banana prata placa plana	50	9226,21	19284,5	-	-
	60	8770,32	21003,8	-	-
	70	8054,53	23610,8	-	-
Kiwi placa plana	50	10605,03	8060,95	-	-
	60	9715,21	8199,65	-	-
	70	9192,52	7522,47	-	-
Uva Niágara esfera	50	9548,43	5706,34	2756,15	129,56
	60	9381,42	4566,72	804,6523	-
	70	7914,71	3547,59	1012,85	-

Fonte: Autor (2022)

A energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam as barreiras dos tecidos das frutas durante sua migração no interior do produto. Logo, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. Dentre as frutas estudadas em diferentes geometrias, a banana prata em geometria cilíndrica, foi a que apresentou os menores valores para a energia de ativação, portanto, a água do produto migra com maior facilidade para a superfície. O fato da banana prata e kiwi verde simulando placas infinitas apresentarem altos valores de energia de ativação, se deve ao ressecamento que sofrem, dificultando a migração das moléculas de água para a superfície.

CONCLUSÃO

Através da secagem das frutas banana prata, kiwi verde e uva Niagara em um secador elétrico de leito fixo, essa operação se mostrou viável para redução do teor de água em diferentes temperaturas. À temperatura de 70 °C todas as frutas alcançaram o equilíbrio em tempo inferior às secagens feitas a 60 °C e 50 °C. Com o estudo das cinéticas de secagem, foi observado que nas temperaturas de estudo, todas as frutas em diferentes geometrias, apresentaram taxa constante, período em que a superfície da fruta se encontra saturada com água tendo o ar em contato direto com o sólido. Devido à alta porosidade das frutas estudadas, o período de secagem constante decrescente ocorreu mais facilmente, e no fim desse período, foi atingida a umidade crítica

Os modelos matemáticos escolhidos para representar os dados experimentais permitiram, em geral, um bom ajuste aos dados em todas as temperaturas, com exceção da uva Niágara, onde os dados experimentais não se ajustaram satisfatoriamente aos modelos de Henderson & Pabis e Lewis, e conseqüentemente, os coeficientes de correlação linear foram inferiores a 0,90. Os dados do experimento tiveram melhor ajuste para os modelos de Page e Midilli.

A partir dos dados experimentais, também foi possível obter os coeficientes de difusividade e a determinação das energias de ativação pela equação de Arrhenius, que reforçaram que quanto maior for o valor de energia de ativação, menores serão os valores de difusividade.

Desta forma, o presente trabalho pode se apresentar como base para a realização de estudos da secagem de frutas tropicais em secador de bandejas com convecção forçada de ar, possibilitando a análise do comportamento desses frutos em relação à perda de umidade facilitando assim, mediante a modelagem matemática, que parâmetros sejam fixados e outros encontrados, não havendo necessidade da realização de inúmeros experimentos anteriores ao processo de secagem propriamente dito.

6. 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.
- AZZOUZ, S. et al. **Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes**. Journal of Food Engineering, London, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.
- BOTELHO, F. M.; GRANELLA, S. J.; BOTELHO, S. C. C.; GARCIA, T. R. B. **Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja**. Engenharia na Agricultura, v. 23, n. 3, p. 212-219, 2015
- CORRÊA, P. C. et al. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas**. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- COUTO, M. L. **Estudo do processo de secagem de frutos do cerrado em secador de bandejas com circulação forçada de ar**. Universidade de Brasília, julho de 2015.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Clarendon Press. Oxford. 1975.
- CRISÓSTOMO, A. L.; NAUMOV, A. **Aduando para alta produtividade e qualidade: fruteiras tropicais do Brasil**. Fortaleza-CE Brasília, DF: Embrapa Agroindústria Tropical; Horgen/Suiça: Instituto Internacional da Potassa, 2009.
- COSTA, L. M. et al. **Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089–1096, 2011.
- EMBRAPA. **A cultura da banana**. Brasília, DF: Editora Embrapa SPI, 1997, p. 9-10.
- FILHO, A. B. M.; VASCONCELOS, M. A. S. **Química dos alimentos**. Recife: UFRPE, 2011. 78 p.
- GOMES, J.C. **Análise de Alimentos**. 2.ed. Viçosa: UFV, DTA: FUNARBE. 153p., 2003;
- GOMES, D. A.; GRAMACHO, R. W. **Modelagem matemática aplicada à otimização e à análise de processos** [recurso eletrônico] — Tocantins : EDUFT, 2019. Dados eletrônicos (ePub).

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agriculture Eng. Research., v.6, p.169-174, 1961.

HANIF, R.; IQBAL, Z.; HANIF, S. E RASHEED, M. **Use of Vegetables as nutritional food: Role in human health.** Journal of Agricultural and Biological Science. Vol.1, no. 1, julho, 2006;

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 698p., 2003;

Instituto Adolfo Lutz. **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos.** 3a ed. São Paulo. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 4, p. 553, 2008

Instituto Brasileiro de Fruticultura – IBRAF Disponível em: <Núcleo de Estudo).http://www.todafruta.com.br/todafruta/mostra_conteudo.asp?> Acesso em setembro de 2022.

KAREL, M.; LUND, D. **Physical principles of food preservation.** 2 nd ed. New York: Marcel Dekker, 2003. Chap. 12.

KAYA, S.; KAHYAOGU, T. **Moisture sorption and thermodynamic properties os safflower petals and tarragon.** Journal of Food Engineering, v. 78, p. 413-421, 2007

KEEY, R.B. **Moisture: solid relationships. Drying principle and practices.** Oxford,.v.9, n.19, p.4, 1972.

LEWICKI P.P.; JAKUBCZYK, E. **Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples.** Journal of Food Engineering, v. 64, 307-314, 2004.

LEWIS W. K. **The rate of druing of solid materials.** Indust. Eng. Chem., v.13, p. 423, 1921.

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.

MAIA, J. D. G.; CAMARGO, U. A. **O cultivo da videira Niágara no Brasil.** Brasília: Embrapa, 2012.

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.

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. **Manual de produção de Frutas Desidratadas**. Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura e Agroindústria – Frutal/ Sindicato dos Produtores de frutas do Estado do Ceará – Sindifruta, 2006

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAZ, Z. **A new model for single-layer drying**. Drying Technology, (20) 1503-1513, 2002.

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.

MOURA, S. C. S. R., FRANÇA, V. C. L., LEAL, A. M. C. B. **Propriedades termofísicas de modelos similares a sucos – parte I**, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.23, n.1, p. 62-68, jan-abr, 2003.

OLIVEIRA, L. F.; NASCIMENTO, M. R. F.; BORGES, S.V.; RIBEIRO, P. C. N.; RUBACK, V. R. **Aproveitamento alternativo da casca do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* F. Flavicarpa) para produção de doce em calda**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, n.22, v. 3, p. 259-262, 2002.

PAGE, C. **Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers**. West Lafayette,. MSc Thesis, Purdue University. Indiana. 1949.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. **Thin-layer modeling of black tea drying process**. Journal of Food Engineering, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PANI, P.; LEVA, A.A.; MAESTRELLI, A.; TORREGGIANI, D. **Influence of an osmotic pretreatment on structure-property relationships of air-dehydrated tomato slices**. Jour. of Food Eng., v. 86, p. 105–112, 2008.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. **Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias**. Ciên. Tecnol. Aliment. v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, K. J., **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, SP – Brasil. 1998.

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.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenamento**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 145p .Maio de 2004.

SIMAL, S. et al. **Water desorption thermodynamic properties of pineapple**. Journal of Food Engineering, v. 80, p. 1293-1301, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.001>

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. Campinas, NEPA UNICAMP, 2011.

VAN ARSDEL, W.B. e COPLEY, M.J., **Food Dehydration** Vol. 1. Principles.,AVI Pupliching, 1963.