



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS SOCIAIS E AGRÁRIAS
BACHARELADO EM AGROINDÚSTRIA

MARIA NATÁLIA LIMA SILVA

CINÉTICA DE SECAGEM CONVENCIONAL E POR MICRO-ONDAS DA POLPA
DO FRUTO MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)

BANANEIRAS-PB

2024

MARIA NATÁLIA LIMA SILVA

**CINÉTICA DE SECAGEM CONVENCIONAL E POR MICRO-ONDAS DA POLPA
DO FRUTO MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Bacharelado em Agroindústria da Universidade Federal da Paraíba, em atendimento às exigências parciais para a obtenção do Grau de Bacharel em Agroindústria.

Orientadora: Profa. Dra. Arianne Dantas Viana

BANANEIRAS-PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586c Silva, Maria Natália Lima.

Cinética de secagem convencional e por micro-ondas da polpa do fruto macaúba (*Acrocomia aculeata*) / Maria Natália Lima Silva. - Bananeiras, 2024.

36 f. : il.

Orientação: Arianne Dantas Viana.

TCC (Graduação) - UFPB/CCHSA.

1. *Acrocomia aculeata*. 2. Desidratação. 3. Secagem dielétrica. 4. Modelagem matemática. I. Viana, Arianne Dantas. II. Título.

UFPB/BSPJAT

CDU 664 (043)

MARIA NATÁLIA LIMA SILVA

**CINÉTICA DE SECAGEM CONVENCIONAL E POR MICRO-ONDAS DA POLPA
DO FRUTO MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Bacharelado em Agroindústria da Universidade Federal da Paraíba, em atendimento às exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Agroindústria.

Monografia julgada e aprovada em 21 / 10 / 2024

Comissão Examinadora



Prof. Dra. Arianne Dantas Vianna

Orientadora, DGTA - UFPB

Documento assinado digitalmente
 **CAMILA SAMPAIO MANGOLIM**
Data: 30/10/2024 08:36:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Camila Sampaio Mangolim

Examinador, DGTA – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **DALYANE LAIS DA SILVA DANTAS**
Data: 29/10/2024 21:15:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Dalyane Laís da Silva Dantas

Examinador, DGTA – UFPB

BANANEIRAS-PB

2024

Dedico esse trabalho a minha mãe, Patrícia, e a minha avó, Maria de Lourdes (*in memoriam*), com toda minha gratidão. Que debaixo de muito sol, me fizeram chegar até aqui na sombra.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre esteve presente em minha vida, guiando-me mesmo quando eu não percebia sua atuação em minha vida. Sou grata por todos os benefícios e milagres operados em minha vida, e pela gloriosa intercessão da virgem Maria.

A minha mãe, Patrícia, e a minha avó, Maria de Lourdes (*in memoriam*), que sempre foram, ao longo da minha trajetória, meu maior exemplo de força, coragem e determinação. Sou eternamente grata pelo apoio incondicional, por nunca terem soltado minha mão e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu filho, Nicollas Samuel, que é minha maior fonte de força e determinação para nunca desistir de mim mesma.

Ao meu irmão, Rickastley Natan, e à minha cunhada, Kaylla Costa, pelo incentivo constante.

Ao meu namorado, Alexandre, por me encorajar a acreditar que a cada dia posso ser melhor, por me ajudar a superar traumas e medos, e por me apoiar a enfrentar os desafios da vida.

A Clara Felix, e as minhas amigas Inara Lucas e Jaciara Medeiros, que em momentos decisivos foram meu apoio e incentivo para chegar até aqui.

A minha orientadora, Dra. Arianne Dantas Viana, pela oportunidade e por todos os ensinamentos, paciência e incentivo.

As professoras Dra. Camila Sampaio Mangolim e Dra. Dalyane Laís da Silva Dantas, por aceitarem e dedicarem seu tempo para fazer parte da minha banca.

A todos os profissionais do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba que contribuíram de alguma forma para minha formação profissional e pessoal, principalmente, ao corpo docente do curso bacharelado em agroindústria, por me capacitarem.

RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa do Brasil com múltiplas possibilidades de uso industrial, principalmente na indústria alimentícia, onde seus frutos são utilizados para a produção de doces, sorvetes, licores e outros produtos. No entanto, esses frutos apresentam um alto teor de umidade, o que contribui para o crescimento de microrganismos e dificulta sua conservação e armazenamento. O estudo da cinética de secagem dessa matéria-prima é essencial para escolher o método mais adequado, e a modelagem matemática desempenha um papel fundamental ao possibilitar a simulação, otimização e dimensionamento do sistema de secagem, facilitando sua aplicação em escala comercial. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a cinética de secagem da polpa do fruto da macaúba, utilizando métodos convencionais e por micro-ondas. O experimento foi conduzido no laboratório de frutas do campus III da Universidade Federal da Paraíba, onde a polpa da macaúba foi submetida a secagem convencional no secador *pratic dryer* a 60 °C, com cinco repetições, e a secagem por micro-ondas, com potências de 20% (280W) e 30% (420W), sendo realizadas três repetições para cada tratamento. As curvas de secagem obtidas foram analisadas e os dados obtidos passaram por modelagem matemática, permitindo a comparação das taxas de remoção de umidade entre os dois métodos. Treze modelos foram testados, e a escolha do mais adequado considerou três critérios: o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM) e o qui-quadrado (X^2). Um modelo foi considerado satisfatório quando apresentou resultados consistentes e padronizados entre os três tratamentos. Os resultados mostraram que a secagem por micro-ondas, na potência de 420W, foi significativamente mais rápida, com tempo de secagem de 17 minutos, em comparação com a secagem convencional, que levou cerca de 600 minutos (10 horas). Além disso, essa técnica apresentou maiores valores de k (0,182728) e n (1,75715). Assim, as conclusões desse estudo indicam que o modelo Page Modificado 2 foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem de ambos os métodos testados. Ademais, a secagem por micro-ondas mostrou-se mais eficiente e apresenta potencial para ser explorada em maior escala para a conservação do fruto da macaúba.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*. Desidratação. Secagem dielétrica. Modelagem matemática.

ABSTRACT

The macaúba (*Acrocomia aculeata*) is a palm native to Brazil with multiple industrial uses, primarily in the food industry, where its fruits are used for producing sweets, ice creams, liqueurs, and other products. However, these fruits have a high moisture content, which contributes to the growth of microorganisms and complicates their preservation and storage. Studying the drying kinetics of this raw material is essential for selecting the most suitable method, and mathematical modeling plays a fundamental role by enabling the simulation, optimization, and scaling of the drying system, facilitating its application on a commercial scale. In this context, the present study aimed to evaluate the drying kinetics of macaúba fruit pulp using conventional and microwave methods. The experiment was conducted in the fruit laboratory at Campus III of the Federal University of Paraíba, where the macaúba pulp was subjected to conventional drying in a practical dryer at 60 °C, with five repetitions, and microwave drying at powers of 20% (280W) and 30% (420W), with three repetitions for each treatment. The drying curves obtained were analyzed, and the data underwent mathematical modeling, allowing for the comparison of moisture removal rates between the two methods. Thirteen models were tested, and the selection of the most suitable model considered three criteria: the coefficient of determination (R^2), the mean square error (MSE), and the chi-square (χ^2). A model was considered satisfactory when it provided consistent and standardized results across the three treatments. The results showed that microwave drying at 420W was significantly faster, with a drying time of 17 minutes, compared to conventional drying, which took about 600 minutes (10 hours). Additionally, this technique exhibited higher values of k (0.182728) and n (1.75715). Thus, the conclusions of this study indicate that the Modified Page 2 model was the most appropriate for describing the drying kinetics of both tested methods. Furthermore, microwave drying proved to be more efficient and has the potential to be explored on a larger scale for the preservation of macaúba fruit.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. Dehydration. Dielectric drying. Mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Curva do tempo de secagem versus teor de umidade presente no sólido.....	16
Figura 2-	Curva da taxa de secagem versus teor de umidade na secagem.....	16
Figura 3-	Seleção dos frutos da macaúba.....	19
Figura 4-	Despolpamento manual do fruto macaúba.....	20
Figura 5-	Secador <i>pratic dryer</i> utilizado para os experimentos de secagem, configurado a 60 °C.....	21
Figura 6-	Amostras de polpa de macaúba durante processo de secagem.....	21
Figura 7-	Micro-ondas utilizado na secagem da polpa da macaúba configurado nas potências 20 e 30%.....	22
Figura 8-	Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem convectiva à 60°C.....	27
Figura 9-	Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem em micro-ondas na potência de 20%.....	28
Figura 10-	Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem em micro-ondas na potência de 30%.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Modelos matemáticos aplicados na estimativa das curvas de secagem convencional e por micro-ondas da polpa do fruto da macaúba.....	23
Tabela 2-	Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em micro-ondas à potência de 280W.....	25
Tabela 3-	Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em micro-ondas à potência de 420W.....	25
Tabela 4-	Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em secador convectivo à 60 °C.....	26
Tabela 5-	Valores dos parâmetros da Cinética de Secagem observados nos gráficos das figuras 8, 9 e 10.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3	REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1	MACAÚBA.....	12
3.2	SECAGEM DE ALIMENTOS.....	13
3.2.1	Secagem convencional	14
3.2.2	Secagem por micro-ondas	14
3.3	CINÉTICA DE SECAGEM.....	15
3.4	MODELOS MATEMÁTICOS.....	17
4	MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1	MATERIAL.....	19
4.1.1	Processamento	19
4.1.2	Descongelamento	19
4.1.3	Seleção	19
4.1.4	Lavagem e sanitização	20
4.1.5	Despolpamento	20
4.2	MÉTODOS DE SECAGEM.....	20
4.2.1	Secagem convencional	20
4.2.2	Secagem por Micro-ondas	21
4.3	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE.....	22
4.4	CINÉTICA DE SECAGEM.....	23
4.4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERENCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira frutífera pertencente à família Arecaceae, nativa do Brasil e com alta concentração nos biomas Cerrado e Pantanal. Os frutos da macaúba apresentam uma estrutura composta pelo epicarpo (casca), mesocarpo (polpa), endocarpo e endosperma (amêndoa), dados em cachos (Pereira *et al.*, 2021). Esta palmeira é uma planta com múltiplas possibilidades de uso, com aplicações tanto na nutrição animal, quanto nas indústrias alimentícias, farmacêuticas e energéticas (Alves, 2022). Na indústria alimentícia, em particular, a polpa pode ser consumida diretamente como fruta (*in natura*) ou empregada como ingrediente em uma variedade de produtos, incluindo goma de mascar, doces, sorvetes, geleias e farinhas (Lima, 2017).

A colheita da macaúba é realizada comumente entre os meses de setembro a janeiro. Esse período limitado pode representar um grande obstáculo para a indústria, uma vez que o processamento dos frutos precisa ser feito em um curto espaço de tempo anualmente. Além disso, os frutos apresentam um alto teor de umidade após a colheita, o que cria condições favoráveis para o crescimento e desenvolvimento de microrganismos durante o armazenamento (Silva *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022). Dessa forma, torna-se essencial buscar métodos eficazes para a conservação dessa matéria-prima.

Para proporcionar um adequado armazenamento dos frutos de macaúba, é essencial retirar a água dos frutos através dos processos de secagem. Essa prática contribui para sua conservação, pois resulta na diminuição da atividade de água e, conseqüentemente, no controle do desenvolvimento de microrganismos e na desaceleração das reações químicas de degradação do produto (Carvalho, 2022).

A secagem é uma técnica amplamente empregada desde os tempos mais remotos da humanidade para a conservação de alimentos. Essa técnica consiste na remoção da água ou de qualquer outro líquido presente no alimento (Almeida; Machado, 2021). Atualmente, a indústria alimentícia continua a utilizar técnicas de secagem como parte do processo de conservação e comercialização de alimentos, pois a secagem oferece diversas vantagens, tais como o prolongamento da vida útil dos produtos e a redução de problemas relacionados à sazonalidade (Gomes *et al.*, 2022).

Ultimamente, o método de secagem por micro-ondas tem se destacado em relação aos métodos convencionais. Esse método apresenta várias vantagens, incluindo uma elevada taxa de secagem e menor consumo de energia, resultando na redução do teor de

água e em redução dos custos do processo (Khodja *et al.*, 2020). Ao contrário dos métodos de secagem convencionais, nos quais a energia é transferida por condução, convecção ou radiação térmica, o secador por micro-ondas emprega energia diretamente ao material por meio de ondas eletromagnéticas emitidas na faixa de frequências entre 300 MHz e 300 GHz (Santos Junior; Ferreira, 2022).

A escolha do fruto da macaúba para realizar avaliações da sua cinética de secagem baseia-se em diversos fatores de relevância científica e prática. Em primeiro lugar, a macaúba é um fruto abundante no campus III da UFPB, o que facilita o acesso e a coleta dos espécimes necessários para a pesquisa. Apesar de sua disponibilidade, o fruto da macaúba tem sido desperdiçado, devido à falta de conhecimento e exploração adequada de suas potencialidades. Adicionalmente, o processo de secagem nesse fruto ainda é pouco estudado e a falta de informações sobre a cinética de secagem do mesmo impede a otimização dos processos industriais e o aproveitamento integral de suas propriedades. Neste contexto, se faz necessário compreender o comportamento desse fruto durante o processo de secagem.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a cinética dos processos da secagem convencional e por micro-ondas da polpa do fruto da macaúba.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar e comparar as taxas de secagem dos dois métodos utilizados (convencional e por micro-ondas);
- Determinar qual método mais eficaz na remoção de umidade das amostras da polpa do fruto da macaúba;
- Contribuir com dados relevantes para pesquisas posteriores sobre a cinética de secagem do fruto da macaúba.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MACAÚBA

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é originária das Américas do Sul e Central, pertencente à família Arecaceae, e é encontrada em todas as regiões do Brasil (Ampese, 2021). A família Arecaceae é composta por um grupo de espécies genericamente ou popularmente conhecidas como palmeiras. No total, são reconhecidos 185 gêneros e 2522 espécies (Rodolfo, 2022)

A macaúba é uma espécie de planta rústica que apresenta características morfológicas notáveis, sendo perene e nativa de regiões tropicais, onde as temperaturas variam entre 15 e 35 °C. Ela pode alcançar de 15 a 20 metros de altura e possui um tronco de 20 a 30 cm de diâmetro, coberto por espinhos escuros de até 10 cm de comprimento. Suas folhas são longas, pinadas e medem entre 4 e 5 metros. Cada planta pode produzir entre 2 e 8 cachos, contendo de 250 a 500 frutos cada, resultando em uma produtividade de aproximadamente 25.000 a 40.000 kg de frutos por hectare por ano (Rodolfo, 2022).

Os frutos da macaúba são esféricos, com diâmetros que variam de 2,5 a 5 cm, e estão organizados em cachos volumosos. Apresentam um epicarpo fibroso que muda de verde para castanho com a maturação, um mesocarpo carnoso rico em ácidos graxos, e um endocarpo lenhoso que circunda uma amêndoa rica em lipídios, proteínas, ácidos graxos insaturados e fibras (Lopes, 2024). A polpa (mesocarpo) geralmente é consumida *in natura* ou utilizada em preparações regionais como sorvetes e sucos, sendo conhecida por seu elevado teor de açúcares, proteínas, sais minerais, ácidos graxos, vitaminas do complexo B e carotenoides, enquanto a amêndoa é utilizada na extração de óleo (Mooz *et al.*, 2014).

No Brasil, a macaúba é predominantemente explorada de forma extrativista, contribuindo significativamente para a renda de muitas comunidades em várias regiões do país. Essa atividade envolve a comercialização de frutos frescos ou processados para a produção de farinhas, óleos e carvão (Cardoso, 2020). Além disso, a palmeira apresenta múltiplas possibilidades de uso, sendo aplicada na nutrição animal, indústrias alimentícias, farmacêuticas e energéticas (Alves, 2022).

A colheita da macaúba é realizada comumente entre os meses de setembro a janeiro. Esse período limitado pode representar um grande obstáculo para a indústria, uma vez que o processamento dos frutos precisa ser feito em um curto espaço de tempo anualmente. Além disso, os frutos apresentam um alto teor de umidade após a colheita, o

que cria condições favoráveis para o crescimento e desenvolvimento de microrganismos durante o armazenamento (Silva *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022).

Sendo assim, devido à sazonalidade e ao elevado teor de água apresentado pelo fruto da macaúba, é crucial investigar métodos eficientes para sua conservação e armazenamento. A secagem tem se destacado como uma das estratégias mais eficazes. Esta técnica foi extensivamente estudada em diversos frutos com o objetivo de assegurar qualidade e prolongar a sua vida útil, como o fruto do noni (Oliveira, 2023), jambolão (Soares; Pereira, 2020) e frutos de gueroaba (Jorge *et al.*, 2020). Contudo, há uma carência de estudos dedicados especificamente ao fruto da macaúba nesse contexto, especialmente utilizando técnicas não convencionais de secagem, como a secagem por micro-ondas.

3.2 SECAGEM DE ALIMENTOS

Desde a antiguidade até os dias atuais, a indústria alimentícia emprega técnicas de secagem com o objetivo de aprimorar a conservação e facilitar a comercialização dos produtos (Gomes *et al.*, 2022). Essa técnica tem como objetivo reduzir o volume e a massa durante a remoção da água, com o intuito de obter produtos de excelência que satisfaçam as demandas do mercado, especialmente quando a matéria-prima não está disponível (Sousa *et al.*, 2021).

Os métodos de secagem são classificados em duas categorias: natural, que usufrui do sol ou do vento e é o método mais antigo, e artificial, que necessita de uma fonte de energia. O método artificial pode ser subdividido conforme a frequência do fornecimento de calor, que pode ser contínua ou intermitente (Almeida; Machado, 2021). Entre os métodos de secagem mais comumente utilizados, destacam-se os convencionais e não convencionais. Os métodos convencionais incluem: condução (como estufas e fornos), convecção (como secadores convectivos) e radiação (como secagem por infravermelho). Já os métodos não convencionais incluem: liofilização (ou secagem por *freeze-drying*) e dielétrica, que abrange técnicas como a secagem por micro-ondas, que tem se destacado como um método promissor devido à sua rapidez e eficácia.

Atualmente, existem vários métodos para realizar a secagem. No entanto, a escolha do método apropriado depende da natureza do alimento, da forma e qualidade desejadas para o produto processado, do valor econômico e das condições de operação (Machado, 2009).

3.2.1 Secagem convencional

A secagem convencional, também conhecida como secagem por ar quente ou por convecção, é um método muito empregado para a remoção de água de diversos materiais, inclusive de alimentos. De acordo com Machado (2009), este é um dos métodos mais comuns, onde o calor sensível é transferido para o material por convecção. O agente de secagem (ar pré-aquecido) passa sobre ou através do sólido, evaporando a umidade e transportando-a para fora do secador. Tendo em mente o aumento da eficiência térmica e a economia de energia, uma recirculação total ou parcial do ar de secagem é também muito utilizada.

Dentre os variados secadores existentes, estão os secadores de bandejas, que são amplamente empregados em processos intermitentes e oferecem eficiência considerável, além de serem econômicos tanto na construção quanto na manutenção. Um exemplo notável de sua versatilidade é seu uso frequente na secagem de alimentos, na qual o produto é distribuído em bandejas e exposto a ar aquecido. Desde sua introdução no mercado, esses secadores têm sido adotados por pequenas e médias empresas no setor alimentício (Machado, 2009).

3.2.2 Secagem por micro-ondas

Nos últimos anos, os fornos de micro-ondas se tornaram comuns não apenas em residências, mas também têm encontrado aplicação crescente na indústria. Hoje em dia, são empregados na sinterização de cerâmicas, como reatores e na preparação de amostras para análises laboratoriais (Nogueira, 2016).

A secagem em micro-ondas vem representando uma alternativa promissora para diminuir a umidade de materiais vegetais. Ao contrário dos métodos convencionais de secagem, nos quais a energia é transferida por condução, convecção ou radiação térmica, no secador de micro-ondas, a energia é fornecida diretamente ao material por meio de ondas eletromagnéticas, induzindo aquecimento dielétrico no produto (Santos Junior; Pereira, 2022).

Na secagem utilizando micro-ondas, há uma redução significativa no tempo de processamento, o que resulta em economia de energia. Além da rapidez, este método permite uma taxa de secagem mais eficiente em áreas com maior umidade, sem afetar as partes já secas do alimento. Conseqüentemente, os alimentos secos por micro-ondas tendem a apresentar melhor qualidade sensorial em comparação com outros métodos e ocupam menos espaço físico de instalação (Amaral, 2023).

Observa-se um aumento significativo na quantidade de estudos que empregam micro-ondas na secagem de diversos produtos alimentícios, como vegetais e frutas. Exemplos dessas pesquisas incluem a cinética de secagem do repolho branco (*Brassica oleracea var. capitata*) (Luka *et al.*, 2023), amoreira preta (*Morus nigra*) (Kipcak; Doymaz, 2020), fatias de tâmara (*Phoenix dactylifera*) (Rabie *et al.*, 2020) e aspargo (*Asparagus officinalis*) (Kipcak; Ismail, *et al.*, 2018), entre muitos outros estudos recentes que exploraram essa técnica.

3.3 CINÉTICA DE SECAGEM

A cinética de secagem refere-se à taxa na qual um alimento perde umidade, influenciada pelas propriedades da sua estrutura e geralmente controlada por variáveis como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar (Almeida; Machado, 2021). Durante o processo de desidratação, a perda de água não ocorre de maneira constante. À medida que a secagem avança sob condições fixas, a velocidade de remoção de água diminui, sendo raro alcançar um nível de umidade zero na prática (Silva, 2013).

Nesse contexto, a cinética de secagem busca compreender como o material se comporta, o que é observado nas curvas de secagem e de taxa de secagem. A curva de secagem de um sólido úmido, exposto a um fluxo de ar a uma temperatura específica eventualmente se estabiliza, indicando que a taxa de remoção de umidade do material se torna constante ou atinge um valor de equilíbrio. A curva de taxa de secagem é obtida derivando os dados de teor de água em função do tempo de secagem (Farias, 2023).

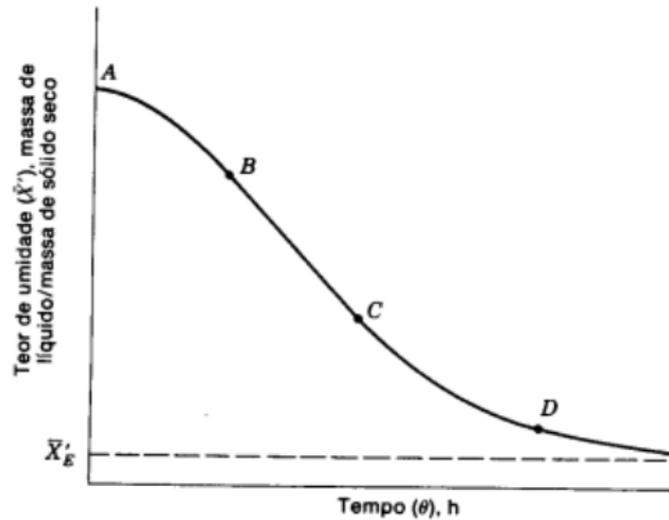
Ambas as curvas (Figuras 1 e 2) representam o comportamento do teor de umidade ao longo do tempo de secagem e a relação deste com a taxa de secagem. Entre os pontos B e C, observa-se uma variação constante na umidade do sólido, indicando um equilíbrio entre a difusão de água no interior do sólido e a quantidade que se vaporiza na superfície (Martins *et al.*, 2020).

No estágio inicial de secagem (AB), a temperatura do sólido e a taxa de secagem aumentam até o segundo estágio (BC), onde a taxa de secagem se estabiliza. Este estágio continua até que a umidade no sólido seja suficientemente baixa para reduzir a difusão de água para a superfície, especialmente em sólidos orgânicos fibrosos, onde esse intervalo é tipicamente curto, dependendo das condições do ar (Martins *et al.*, 2020).

Quando as resistências à transferência de massa se tornam maiores do que a vaporização da água na superfície do sólido, observa-se uma diminuição na taxa de secagem, como mostrado no intervalo CD em ambas as figuras. Conforme a energia necessária para

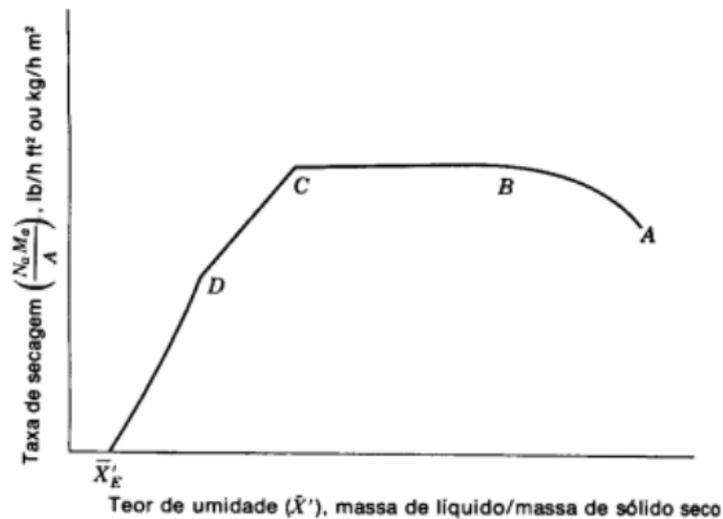
vaporizar a água diminui, o sólido aumenta sua temperatura. A partir do ponto D, o teor de umidade no sólido é muito baixo e não há uma área de saturação na superfície. A secagem continua até atingir o teor de umidade de equilíbrio (XE), onde a pressão de vapor no sólido é igual à pressão parcial do vapor no ar (Martins *et al.*, 2020).

Figura 1: Curva do tempo de secagem versus teor de umidade presente no sólido



Fonte: Martins *et al.*, 2020.

Figura 2: Curva da taxa de secagem versus teor de umidade na secagem



Fonte: Martins *et al.*, 2020.

Compreender as transformações físicas e químicas durante a secagem de matérias-primas alimentícias é essencial para identificar a sua aplicabilidade industrial. Estudar propriedades como temperatura, condutividade térmica, calor específico, velocidade do ar, teor de água e densidade do meio de secagem é fundamental para explorar o mecanismo envolvido na cinética de secagem, bem como estruturar o processo industrial e estudar sua viabilidade econômica (Cosme-De Vera *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a aplicação de modelos matemáticos torna-se uma ferramenta essencial, pois possibilita a simulação de diferentes condições de secagem e a previsão do impacto de variáveis como temperatura e umidade relativa na qualidade da matéria-prima, garantindo que a remoção de água ocorra de forma eficaz, preservando as características desejadas (Resende *et al.*, 2010).

3.4 MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos desenvolvidos ao longo dos anos foram aplicados em cálculos voltados ao projeto e construção de novos sistemas, à otimização de processos e à descrição de seu comportamento. Estudos sobre secagem geralmente analisam o impacto de diversas variáveis externas, como temperatura, velocidade do ar e umidade relativa, sobre o produto. Dessa forma, esses modelos permitem prever o tempo de secagem, a evolução da umidade, a transferência de calor e massa, além de outros parâmetros cruciais para otimizar o processo (Santana *et al.*, 2021). Entre os principais tipos de modelos matemáticos estão: os empíricos, os difusionais, os baseados em mecanismos e os híbridos.

Os modelos empíricos baseiam-se no ajuste de equações matemáticas a dados experimentais de secagem. Embora não representem fisicamente o fenômeno, são de fácil aplicação e eficazes em diversos contextos. Um dos mais utilizados é o modelo de Page, descrito pela equação:

$$RU = \exp(-(k \cdot T)^n)$$

Onde RU é a razão de umidade, k e n são constantes determinadas experimentalmente, e T é o tempo de secagem. Este modelo é amplamente utilizado na secagem de alimentos, como frutas e grãos, por sua simplicidade e boa precisão em determinados intervalos de umidade (Aghbashlo *et al.*, 2009).

Entre os modelos teóricos utilizados para o processo de secagem encontra-se os modelos baseados na difusão de umidade, que são derivados das equações de transporte de massa, como a Lei de Fick, que descreve o movimento de umidade dentro de um sólido (Goneli *et al.*, 2014).

Os modelos mecanísticos levam em consideração os mecanismos físicos envolvidos na secagem, como a difusão de vapor de água, evaporação na superfície e capilaridade. Um exemplo são os modelos de transferência simultânea de calor e massa. Esses modelos utilizam as equações de conservação de energia e massa (Santos, 2002).

Os modelos híbridos combinam aspectos empíricos e mecanísticos para capturar tanto a simplicidade quanto a precisão dos fenômenos de secagem. Um exemplo é o uso de redes neurais para ajustar parâmetros difusionais ou empíricos com base em grandes quantidades de dados experimentais, o que permite maior flexibilidade na predição do comportamento de secagem para diferentes materiais (Zogzas; Maroulis, 1996).

A escolha do modelo matemático para a cinética de secagem depende das características do material, do grau de precisão desejado e da complexidade computacional permitida. Modelos empíricos, embora simples, são amplamente aplicados quando se busca rapidez e eficiência em situações práticas. Modelos difusionais e mecanísticos fornecem maior precisão e são essenciais em pesquisas científicas e na indústria de alta tecnologia, onde a compreensão detalhada dos processos de secagem é crucial (Castiglione *et al.*, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias (CCHSA), situado no Campus III da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), na cidade de Bananeiras – PB. A pesquisa e os processos de secagem foram realizados no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos Frutohortícolas, Bananeiras-PB

4.1 MATERIAL

Os frutos da macaúba foram coletados previamente logo após caírem no solo de plantas localizadas no CCHSA-UFPB durante o período de safra. Em seguida, foram higienizados (lavados com sabão neutro) e armazenados sob congelamento a 2°C no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Bebidas Fermento-Destiladas do Campus III até a realização do experimento.

4.1.1 Processamento – Para a execução desta pesquisa, os frutos foram transportados ainda congelados até o laboratório de frutas. Após o transporte, os frutos foram submetidos aos processos de descongelamento, sanitização, seleção e despulpamento.

4.1.2 Descongelamento - Os frutos da macaúba foram descongelados sob refrigeração a 12°C, mantendo-se nessa temperatura até o completo descongelamento, o que facilitou o processo de despulpamento.

4.1.3 Seleção - A seleção dos frutos foi realizada removendo aqueles que apresentaram qualquer tipo de injúria. Essa etapa se fez importante para garantir que os frutos utilizados no experimento estivessem em bom estado físico.

Figura 3- Seleção dos frutos da macaúba.



Fonte: Arquivo próprio (2024).

4.1.4 **Lavagem e sanitização** - Os frutos foram submetidos a uma lavagem em água corrente para remover as sujidades superficiais. Em seguida, foi realizada a sanitização para eliminar agentes contaminantes, para isso utilizou-se uma solução de cloro ativo a 200 ppm, deixando os frutos imersos nessa solução por 10 minutos. Após a sanitização, a água foi drenada e os frutos foram colocados para secar naturalmente.

4.1.5 **Despolpamento** - O despolpamento foi feito manualmente, com o auxílio de um martelo para quebrar a casca rígida, facas de aço inoxidável para retirar a polpa, tábua para corte e recipientes para separar a polpa.

Figura 4- Despolpamento manual do fruto macaúba.

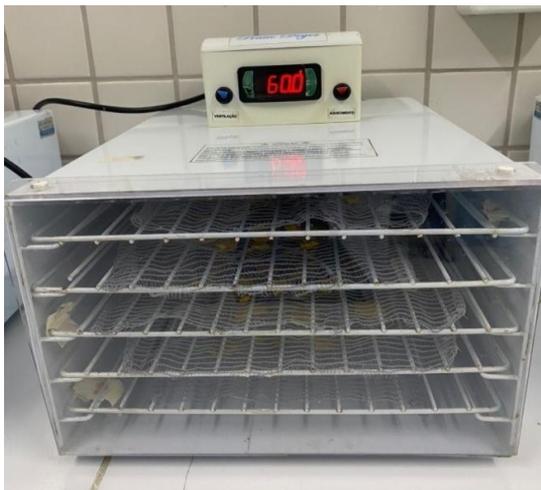


Fonte: Arquivo próprio (2024).

4.2 METÓDOS DE SECAGEM

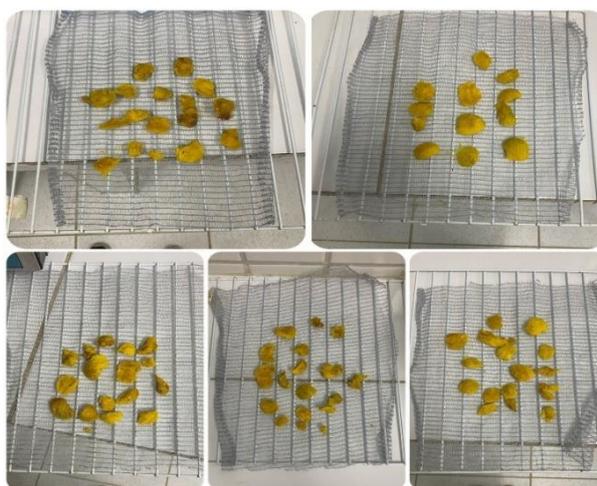
4.2.1 **Secagem convencional** - Inicialmente, as bandejas do secador foram previamente pesadas e identificadas como B0, B3, B5, B6 e B10. Em seguida, as amostras da polpa dos frutos da macaúba foram pesadas e distribuídas de maneira uniforme nas bandejas do secador *pratic dryer*, garantindo que não houvesse sobreposição para permitir uma boa circulação do ar. As amostras foram então submetidas à secagem sob temperatura de 60 °C. Durante o processo, foram realizadas pesagens regulares em intervalos de tempo de 15 minutos até a primeira hora, de 30 minutos até a segunda hora, e de 60 minutos até que as amostras atingissem a estabilidade. Dessa forma, foi possível acompanhar e determinar a perda de água e a variação da umidade até o peso constante ser alcançado.

Figura 5- Secador *pratic dryer* utilizado para os experimentos de secagem, configurado a 60 °C.



Fonte: Arquivo próprio (2024).

Figura 6- Amostras de polpa de macaúba durante processo de secagem.



Fonte: Arquivo próprio (2024).

4.2.2 Secagem por Micro-ondas - Para esse método de secagem foi utilizado um micro-ondas da marca Philco modelo PM034IP/220V-1400W. As amostras da polpa do fruto da macaúba foram pesadas e distribuídas em um prato de porcelana adequado para micro-ondas. Foram realizadas três repetições para cada potência ajustada. A primeira potência foi ajustada para 20% (280W) e a segunda potência para 30% (420W). Durante o processo, foram feitas pausas em intervalos regulares a cada 1 minuto para monitorar a perda de água por meio da pesagem das amostras, até que o peso constante fosse alcançado.

Figura 7- Micro-ondas utilizado na secagem da polpa da macaúba configurado nas potências 20 e 30%



Fonte: Arquivo próprio (2024).

4.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

A determinação do teor da umidade foi realizada conforme a metodologia de perda por dessecação (umidade) descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), utilizando secagem direta em estufa a 105°C. Foram pesados 5,4g de amostra da polpa de macaúba em placas de petri previamente secas e taradas. As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105°C durante 24 horas. Após esse período, as placas foram retiradas da estufa, resfriadas a temperatura ambiente em um dessecador e pesadas em balança analítica. O teor de umidade foi obtido pelo seguinte cálculo:

$$\frac{100 \times N}{P} = \text{umidade ou substâncias voláteis a } 105 \text{ } ^\circ\text{C por cento m/m}$$

Onde:

N = n° de gramas de umidade (perda de massa em g).

P = n° de gramas da amostra.

4.4 CINÉTICA DE SECAGEM

Os dados do experimento foram tabulados em planilhas do Excel para elaboração das curvas de secagem (perda de umidade ao longo do tempo) dos métodos convencional e por micro-ondas.

Posteriormente, foi realizada a modelagem matemática com os resultados obtidos dos dois métodos de secagem e comparados os parâmetros estatísticos, verificando quais dos modelos matemáticos se ajustou melhor aos dados experimentais dos métodos utilizados. Adicionalmente, foi conduzida uma análise comparativa destacando as vantagens e desvantagens de cada método em termos de eficiência de secagem.

4.4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os modelos matemáticos listados na Tabela 1 foram utilizados para estimar o tempo necessário para redução do teor de umidade da polpa de macaúba, tanto no processo de secagem convectiva, quanto no processo de secagem por micro-ondas.

Tabela 1. Modelos matemáticos aplicados na estimativa das curvas de secagem convencional e por micro-ondas da polpa do fruto da macaúba.

MODELOS	EQUAÇÕES
(1) Newton	$var2 = \exp(-K * var1)$
(2) Page	$var2 = \exp(-K * var1^n)$
(3) Modific Page 1	$var2 = \exp((-K * var1)^n)$
(4) Modific Page 2	$var2 = \exp(-(k * var1)^n)$
(5) Henderson & Pabis	$var2 = a * \exp(-k * var1)$
(6) Logarithmic	$var2 = a * \exp(-k * var1) + c$
(7) Two term	$var2 = a * \exp(-k_0 * var1) + b * \exp(k_1 * var1)$
(9) Two term exponential	$var2 = a * \exp(-k * var1) + (1 - a) * \exp(-k * a * var1)$
(10) Wang & Singh	$var2 = 1 + (a * var1) + (b * var1^2)$
Aproximation of	
(11) diffusion	$var2 = a * \exp(-k * var1) + (1 - a) * \exp(-k * b * var1)$
(12) Verma	$var2 = a * \exp(-k * var1) + (1 - a) * \exp(-k_1 * var1)$
Modif. Henderson &	$var2 = a * \exp(-k * var1) + b * \exp(-k_0 * var1) + c * \exp(-$
(13) Pabis	$k_1 * var1)$

(14)	Midilli	$var2=a*\exp(k*var1^n)+b*var1$
------	---------	--------------------------------

Onde: var2= razão de umidade; var1= tempo de secagem; (k, k0, k1) = coeficientes de secagem; (a, b, c)= constantes dos modelos; n= parâmetro de ajuste.

A seleção do modelo matemático mais adequado foi realizada com base em três critérios: o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM) e o qui-quadrado (X^2). Um ajuste satisfatório foi considerado quando o modelo, ao ser comparado entre os três tratamentos, apresentou resultados consistentes e padronizados. Dessa forma, foi possível discutir de maneira mais precisa as variáveis do modelo, como os parâmetros k e n.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A polpa da macaúba *in natura* apresentou um teor de umidade inicial de 48,6%. A modelagem matemática aplicada às cinéticas de secagem, tanto no secador convectivo à 60°C, quanto no micro-ondas com potências de 280W e 420W, indicou que vários modelos tiveram bom ajuste aos dados experimentais, como demonstrados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em micro-ondas à potência de 280W.

Modelos	Parâmetros	R ²		
		(%)	DMQ	X ²
Newton	k=0,0923	92,58	0,0853	0,0006
Page Modificado 2	k=0,0896; n= 1,7270	99,91	0,0080	0,0000
Henderson e Pabis	a=1,1618; K= 0,1068	95,42	0,0537	0,0003
Verma	a=0,0990; K=0,0923; K1= 0,0923	92,58	0,0853	0,0007
Henderson e Pabis Modificado	a=0,3872; K=0,1068; b= 0,3872; K0=0,1068; C=0,3872; K1=0,1068	95,42	0,0004	0,0096

Fonte: Dados experimentais do autor (2024).

Na secagem por micro-ondas com potência de 280W, observa-se que o Modelo de Page Modificado 2 apresentou o melhor ajuste ($R^2 = 99,91\%$), indicando assim que ele descreve bem a secagem a essa potência, apresentando os menores valores de DMQ e X².

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em micro-ondas à potência de 420W.

Modelos	Parâmetros	R ² (%)	DMQ	X ²
Newton	k= 0,1722	93,68	0,0774	0,0006
Page	k= 0,0411; n= 1,7571	99,99	0,0018	0,0000
Page Modificado 2	k= 0,1627; n= 1,7571	99,99	0,0018	0,0000
Henderson e Pabis	a= 1,1535; k= 0,1952	95,85	0,0270	0,2513
Dois termos	a=0,7180; k0= 0,1952; b= 0,4355; k1= 0,1952	95,85	0,0270	0,0630
Wagn e Sing	a=-0,1248; b=0,0038	98,16	0,0270	0,0630
Midilli	a=1,0046; k= -0,0424; n= 1,7441; b= 0,0000	99,99	0,0270	0,0630

Fonte: Dados experimentais do autor (2024).

Na secagem por micro-ondas a 420W de potência, tanto o Modelo de Page Modificado 2 e o Modelo de Page se destacaram, ambos com $R^2 = 99,99\%$, indicando um ótimo ajuste. Além disso, os valores de DMQ e X^2 desses modelos foram muito baixos, indicando uma descrição precisa do processo de secagem.

Tabela 4– Parâmetros dos modelos matemáticos que apresentaram ajustes na cinética de secagem em secador convectivo à 60°C.

Modelos	Parâmetros	R ² (%)	DM Q	X ²
Newton	k=0,0066	99,80	0,012	0,00
Page Modificado 2	k=0,0066; n= 0,9542	99,87	0,010	0,00
Aproximação de difusão	a=0,0384 ; K=0,0812 ; b=0,0767	99,89	0,008	0,00
Dois termos	a=0,0331 ; K= 0,1890	99,89	0,008	0,00
Wang e Sing	a=-0,0044; b= 4,8310E-06	96,35	0,056	0,00
Verma	a=0,0383; K=0,0063; K1= 0,0062	99,89	0,008	0,00
Henderson e Pabis Modificado	a=0,3270; K=0,1068; b= 0,3269; K0=0,0063; C=0,3269; K1=0,0064	99,86	0,011	0,00

Fonte: Dados experimentais do autor (2024).

É possível observar que vários modelos apresentaram um excelente ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação superiores a 90%, e valores de quadrado médio relativo e qui-quadrado inferiores a 1% em todos os tratamentos. No entanto, na modelagem da secagem convencional, como mostrado na Tabela 4, embora os modelos de Aproximação de Difusão, Verma e Dois Termos tenham alcançado um R^2 de 99,89% e demonstrado um bom ajuste, o modelo de Page modificado 2 se destacou ao se considerar a comparação entre os três métodos, visando padronizar esses resultados.

Dessa forma, o modelo de Page Modificado 2 demonstrou ser o mais adequado para explicar a cinética de secagem em ambos os tipos de tratamento, permitindo assim uma análise mais precisa das variáveis do modelo, como os parâmetros k e n, com base na padronização dos dados experimentais.

O modelo de Page modificado 2 é uma variação amplamente utilizada do modelo empírico de Page, comumente aplicado para descrever a cinética de secagem de materiais, especialmente em produtos alimentícios. Esse modelo é particularmente eficaz quando há mudanças significativas nas taxas de secagem, devido a mecanismos internos como difusão

ou evaporação. Esse ajuste permite que o modelo capture de forma mais precisa as fases de secagem rápida inicial e lenta conforme a umidade diminui, o que é comum em produtos que apresentam variações significativas na porosidade, na composição e na transferência de calor e massa durante o processo de secagem (Midilli *et al.*, 2002; Erbay; Icier, 2010).

No modelo, o parâmetro k representa a constante de secagem, que sofre influência da temperatura do ar de secagem, velocidade do ar, umidade relativa do ar e as características do material. Valores mais altos de k indicam uma taxa de secagem mais rápida, enquanto valores mais baixos sugerem uma secagem mais lenta (Midilli; Kucuk; Yapar, 2002; Erbay; Icier, 2010). Essa constante é necessária para a modelagem precisa do processo, permitindo ajustar o modelo às condições específicas da secagem.

O parâmetro n , por sua vez, representa o expoente que ajusta a curvatura da equação de secagem, permitindo uma melhor correspondência com os dados experimentais. Esse expoente representa a sensibilidade da taxa de secagem ao tempo. Valores maiores de n tendem a representar uma fase de secagem mais acelerada no início, seguida de uma desaceleração, o que é característico de muitos processos de secagem de alimentos, onde a taxa de secagem diminui à medida que a umidade interna diminui (Midilli; Kucuk; Yapar, 2002). Portanto, o modelo de Page Modificado 2 é eficaz em capturar essas características dinâmicas, o que é crucial para prever com precisão a cinética de secagem e ajustar os parâmetros operacionais em processos industriais.

As variações dos parâmetros de k e n podem ser observados nas figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 – Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem convectiva à 60°C.

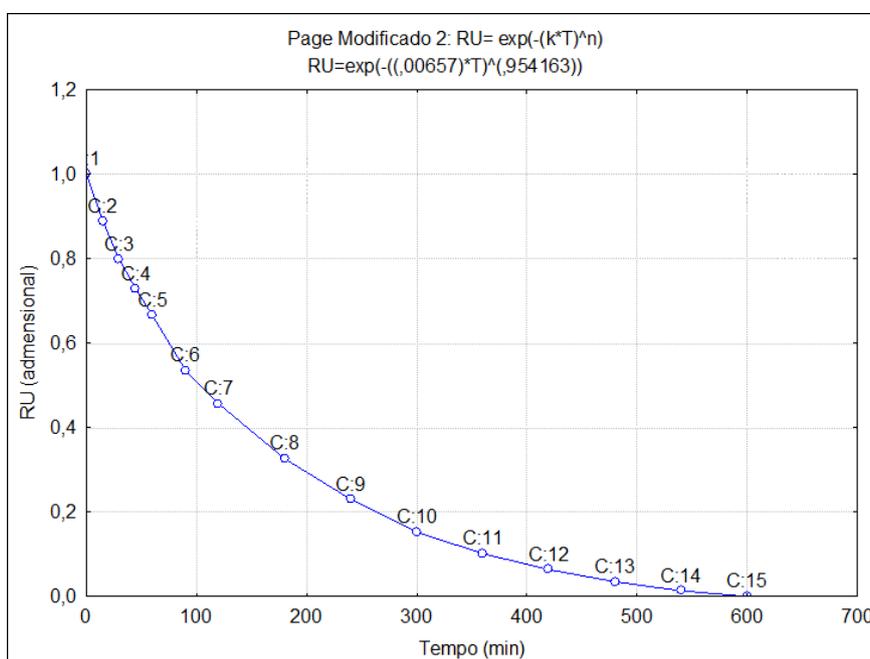


Figura 9 – Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem em micro-ondas na potência de 280W

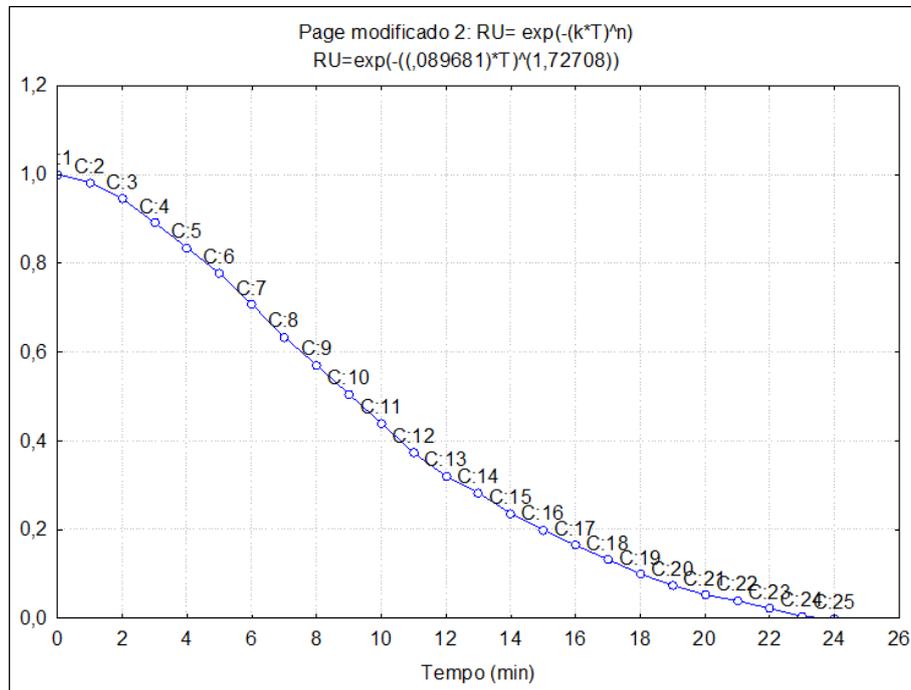
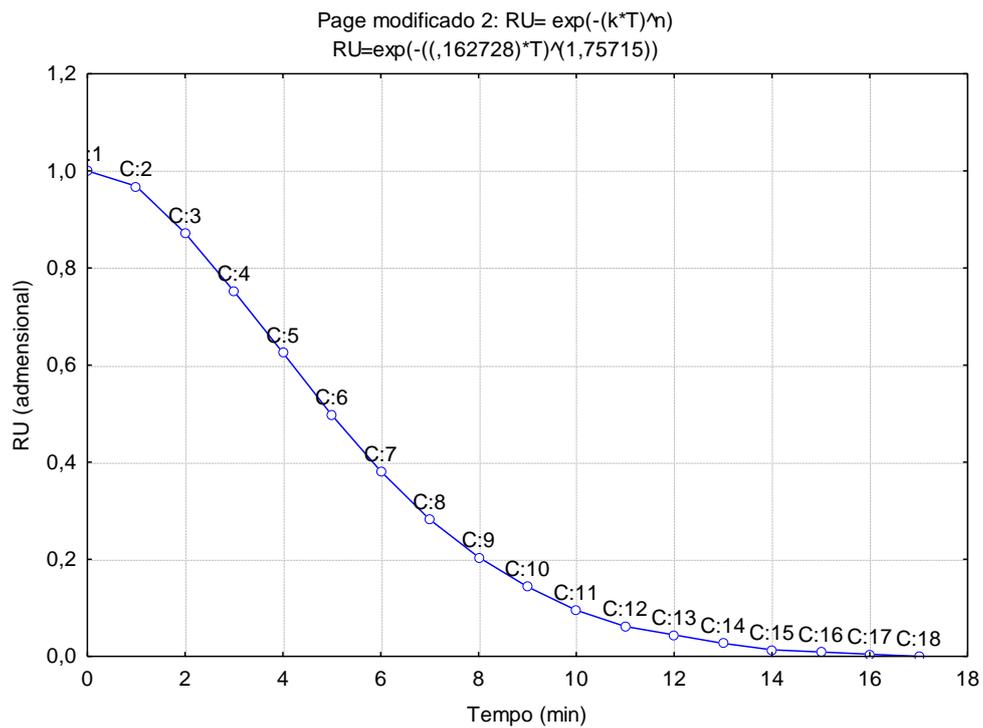


Figura 10 – Comportamento do ajuste do modelo de Page Modificado 2 para a secagem em micro-ondas na potência de 420W.



A análise das figuras 8, 9 e 10 revela o comportamento da razão de umidade ao longo do tempo e os parâmetros estatísticos, destacando diferenças entre os métodos de secagem. Conforme mostrado na figura 8, a secagem convectiva apresentou o menor valor de k , confirmando ser um método mais lento, levando cerca de 600 minutos (10 horas) para atingir a umidade de equilíbrio. Em contraste, a secagem no micro-ondas a 420W de potência, que gera mais energia no interior da amostra, como ilustrado na figura 9, apresentou o maior valor de k , sendo o método mais rápido, com apenas 17 minutos.

Tabela 5- Valores dos parâmetros da Cinética de Secagem observados nos gráficos das figuras 8, 9 e 10.

Gráfico	Parâmetro (k)	Parâmetro (n)	Tempo de secagem (min)
Gráfico (imagem 8)	0,00657	0,954163	600
Gráfico (imagem 9)	0,089681	1,72708	24
Gráfico (imagem 10)	0,182728	1,75715	17

Fonte: Dados experimentais do autor (2024).

Os tratamentos no micro-ondas também apresentaram maiores valores de n , indicando uma secagem inicial mais rápida, com desaceleração subsequente. Esse comportamento é semelhante ao observado por Luka *et al.* (2023), que verificaram uma taxa de secagem dupla no micro-ondas ao trabalhar com repolho branco, em contraste com a taxa única observada no secador de ar quente. De forma geral, a secagem divide-se em dois períodos: um rápido, quando a água da superfície evapora rapidamente, e um lento, quando a taxa de secagem diminui à medida que a umidade interna predomina, até atingir um teor constante de umidade (Zhao *et al.*, 2013; Zhen-Dong *et al.*, 2022).

Os três gráficos demonstram que o Modelo de Page Modificado 2 é altamente eficaz para descrever a cinética de secagem em diferentes condições e intensidades. Carvalho *et al.* (2022), também elegeram o modelo de Page modificado como um dos melhores modelos para representar a Cinética de Secagem de amêndoas de Macaúba. Em termos comparativos, os valores mais elevados de k e n nos dois últimos gráficos sugerem que processos de secagem mais rápidos exigem ajustes mais complexos do modelo para capturar as dinâmicas não lineares. Dessa forma, o Modelo de Page Modificado 2 provou-se adequado para diversos tratamentos de secagem, com parâmetros ajustáveis que refletem a dinâmica tanto em processos mais lentos (secagem convectiva) quanto em mais rápidos (micro-ondas).

Esses resultados evidenciam a relevância de conduzir a cinética de secagem em micro-ondas, uma técnica que se revelou não apenas mais rápida e eficiente, mas também relativamente pouco utilizada em comparação aos métodos tradicionais de secagem. Entretanto, é fundamental investigar os efeitos a longo prazo sobre a qualidade nutricional e sensorial do produto, assegurando que essas vantagens não venham a comprometer a qualidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa sobre a cinética de secagem da polpa do fruto macaúba utilizando os métodos de secagem convencional e por micro-ondas, apresentou resultados positivos para a conservação desse fruto. Com base nos resultados obtidos, constatou-se que o método de secagem por micro-ondas mostrou-se significativamente mais rápido, com um tempo de secagem de apenas 17 minutos, enquanto o método convencional levou cerca de 600 minutos (10 horas) para atingir a mesma condição.

Além da velocidade de secagem superior, o modelo matemático de Page Modificado 2 foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem de ambos os métodos, indicando precisão da modelagem utilizada. Os resultados apontam que o método por micro-ondas apresenta um grande potencial para ser explorado em escalas maiores, proporcionando uma alternativa eficaz e econômica para a preservação da polpa do fruto macaúba.

Conclui-se, portanto, que a secagem por micro-ondas com potência ajustada a 420W foi a técnica mais eficaz aplicada neste estudo, destacando-se como uma opção promissora para a conservação da macaúba, ao permitir uma significativa redução no tempo de processamento.

REFERENCIAS

- AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; SAMIMI-AKHIJAHANI, H. Modeling of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 5, p. 1348-1355, 2009.
- ALMEIDA, R. F.; MACHADO, A. P. O. Secagem de alimentos e seu impacto na pós-colheita. In II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, **Anais do II CoBICET**– 2021.
- ALVES, G. D. C. **Caracterização morfo-agronômica de maciços naturais das palmeiras macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq) Lodd. ex Mart.) e bocaiúva (*Acrocomia totai* Mart.)**. 2022. 62 p. Dissertação (mestrado) - Instituto Agronômico, Programa de Pós-Graduação, Campinas, 2022.
- AMARAL, R. H. F. **Métodos de secagem e seu papel na redução das perdas e desperdícios em alimentos: uma revisão bibliográfica**. 2023. 47 p. (Trabalho de Conclusão de curso) – Universidade Federal de São Carlos, Buri, 2023.
- AMIRI, M.; AMIRI, C. R.; ESNA-ASHARI, P. J. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in fixed and fluidised bed convective dryer. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 11, p. 28–40, 2011.
- AMPESE, L. C. **Valorização de cascas de macaúba através da integração de reatores de hidrólise em água subcrítica e de digestão anaeróbia para produção de metano**. 2021. 137 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2021.
- CARDOSO, A. N.; SANTOS, G. S.; FAVARO, S. P.; DINIZ, C. B.; SOUSA, H. U. Extrativismo da macaúba na região do Cariri Cearense: comercialização e oportunidades. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 25261-25279, 2020.
- CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A. D.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 987-994, 2013.
- CARVALHO, M. S.; CORRÊA, P. C.; SILVA, G. N.; LOPES, L. M.; SOUSA, A. H. Cinética e modelagem matemática do processo de secagem de amêndoas de macaúba. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 199-205, 2022.

COSME-DE VERA, F. H.; SORIANO, A. N.; DUGOS, N. P.; RUBI, R. V. C. A comprehensive review on the drying kinetics of common tubers. **Applied Science and Engineering Progress**, v. 14, n.2, p.146-155, 2021.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010.

FARIAS, J. R. S. **Cinética de secagem da folha e do extrato concentrado da jaramataia**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande, 2023.

GOMES, F. P.; RESENDE, O; SOUSA, E. P. Food drying: a review on applications/Secagem de alimentos: uma revisão sobre aplicações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 12759-12777, 2022.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. D. C.; VILHASANTI, H. D. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 56-64, 2014.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos físico-químicos para análise de alimentos**, 4. ed. São Paulo: IMESP, p. 21 – 22. 2008.

JORGE, A. P.; FERREIRA JUNIOR, W. N.; SILVA, L. C. D. M.; OLIVEIRA, D. E.; RESENDE, O. Cinética de secagem da polpa dos frutos de gueroaba (*Syagrus oleracea*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 23-29, 2020.

JUNIOR, P. S. S.; FERREIRA, M. C. Secagem via Micro-ondas das Folhas de Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) e Avaliação da Degradação da Cor.- In: **XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 23 a 26 de outubro de 2022, Uberlândia, MG.

KHODJA, Y. K.; DAHMOUNE, F.; MADANI, K.; KHETTAL, B. Cinética da secagem convencional e por micro-ondas de folhas de *Laurus nobilis*: efeitos sobre os compostos fenólicos e a atividade antioxidante. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. e2019214, 2020.

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; YAPAR, Z. A review on thin-layer drying curve equations. **Drying Technology**, v. 20, n. 4-5, p. 1027-1040, 2002

KIPCAK, A. S.; DOYMAZ, I. Mathematical modeling and investigation of the drying characteristics of microwave-dried blackberries. **International Journal of Fruit Science**, v. sup3, p. S1222-S1233, 2020.

KIPCAK, A.; İSMAIL, O. Comparison of microwave drying kinetics of cultural and natural asparagus. **Acta Scientiarum-Tecnologia**, v. 40, 2018.

LIMA, J. M. **Secagem da polpa de macaúba para obtenção do β -caroteno**. 2017. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2017.

LOPES, R. S. **Caracterização da composição química da polpa de frutos de *Acrocomia* de três populações de interesse econômico visando aplicação industrial**. 2024. 75 p. Dissertação (mestrado) - Programa de pós-graduação agricultura tropical e subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2024.

LUKA, B. S.; VIHIKWAGH, Q. M.; NGABEA, S. A.; MACTONY, M. J.; ZAKKA, R.; YUGUDA, T. K.; ADNOUNI, M. Convective and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleraceae var capitata* L.): Mathematical modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics. **Journal of Agriculture and Food Research**. v. 12, p. 100605, 2023.

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

MARTINS, F. P.; NETO, J. C. B.; SILVA, A. J. O.; DE OLIVEIRA SIQUEIRA, A. M. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 600-607, 2020.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MOOZ, E. D.; CASTELUCCI, A. C. L.; SPOTO, M. H. F. Potencial tecnológico e alimentício de frutos de macaúba *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos**, v. 3, n. 2, p. 86-89, 2012.

NOGUEIRA, G. D. R. **Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos de acerola**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

OLIVEIRA, B. F. **Otimização, modelagem e avaliação da secagem do fruto do noni (*Morinda citrifolia* L.) por leito de jorro.** 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Purdue University, West Lafayette, 1949.

PEREIRA, B. N.; CAVALCANTE, D. D.; BEZERRA, K. C. B.; OLIVEIRA, A. M. C. Macaúba (*Acrocomia aculeata*): determinação da composição centesimal e seu potencial nutricional para a saúde. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 15, p. e120101522689, 2021.

RABIE, S.; YOUNIS, O. S.; MOHAMED, A. Kinetic studies for microwave-assisted drying of Oraby date slices. **Egyptian Journal of Agricultural Research**, v. 98, n. 4, p. 670-689. 2020.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 19, n. 1, p. 19–27, 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**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RODOLFO, G. H. M. **Valorização da cadeia produtiva da Macaúba (*Acrocomia aculeata*): desenvolvimento de modelos de negócio sustentáveis.** 2022. 157 p. Tese (Doutorado em Biocombustíveis) – Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2022.

SANTANA, A. B.; SILVA, E. G.; RIGO, L.; OLIVEIRA, M. P.; LOSS, R. A.; GUEDES, S. F.; PAULA, J. M.; GERALDI, C. A. Q. Técnicas de secagem de frutas: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, [S. l.], v. 14, n. 10, 2021.

SANTOS, A. A. **Desenvolvimento e avaliação de um modelo mecanístico para estimativa da produtividade da cultura do cafeeiro.** 43f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SILVA, T. S. D. **Estudo de um secador solar fabricado a partir de sucata de tambor de polietileno.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M. C.; ROSSELLO, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 3, p. 323-328, 2005.

SOARES, A. C.; PEREIRA, N. R.; Secagem da polpa de jabolão (*Syzygium cumini*) em secador de leito de jorro: efeito da clara de ovo como agente carreador de secagem na qualidade do produto. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. e2019075, 2020.

SOUSA, A. P. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P.; COSTA, J. D.; MACEDO, A. D. B.; SANTANA, R. A. C. Drying kinetics of jackfruit residues (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e31510212610, 2021.

ZHAO, D.; ZHAO, C.; TAO, H.; AN, K.; DING, S.; WANG, Z. O efeito do pré-tratamento por osmose nas características de secagem com ar quente e secagem por microondas da polpa de pimenta (*Capsicum annuum* L.). **Jornal Internacional de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.48, n. 8, p.1589–1595, 2013.

ZHEN-DONG, C. H. U. *et al.* Dynamics of maize grain drying in the high latitude region of Northeast China. **Journal of Integrative Agriculture**, v.21, p.365–374, 2022.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. **Drying Technology**, v. 14, n. 7-8, p. 1543-1573, 1996.