



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA ROMÃ PARA ELABORAÇÃO DE
SUBPRODUTO**

HUGO GUIMARÃES MATOS

CAMPINA GRANDE - PB

2025

HUGO GUIMARÃES MATOS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA ROMÃ PARA ELABORAÇÃO DE
SUBPRODUTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Regina Nascimento Campos

CAMPINA GRANDE - PB

2025

M433a Matos, Hugo Guimarães.
Aproveitamento dos resíduos da romã para elaboração de subproduto /
Hugo Guimarães Matos. – Campina Grande, 2025.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Ana Regina Nascimento Campos".

Referências.

1. *Punica granatum* L.. 2. Desenvolvimento de Produto Alimentício -
Farinha. 3. Romã - Reaproveitamento de Resíduos. I. Campos, Ana
Regina Nascimento. II. Título.

CDU 634.64(043)

HUGO GUIMARÃES MATOS

**APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA ROMÃ PARA ELABORAÇÃO DE
SUBPRODUTO**

APROVADO EM: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ANA REGINA NASCIMENTO CAMPOS
Data: 10/03/2025 15:43:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ana Regina Nascimento Campos

Orientadora – UAEO/CCT/UFCG
Documento assinado digitalmente
 ANDRE LUIZ FIQUENE DE BRITO
Data: 10/03/2025 18:34:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Luiz Fiquene Brito

Examinador – UAEQ/CCT/UFCG

Documento assinado digitalmente
 ANTONIO DANIEL BURITI DE MACEDO
Data: 08/03/2025 09:01:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Daniel Buriti de Macedo

Examinador –

UFCG/PPGCNBiotec/FAPESQ

RESUMO

Os resíduos da romã (*Punica granatum* L.), representam um desafio para as indústrias, devido às significativas perdas geradas durante o processamento. Neste contexto, a elaboração dos produtos farináceos utilizando as cascas e as sementes de romã surgem como uma alternativa viável para o reaproveitamento, evitando o desperdício e desenvolvendo novos produtos a partir dos resíduos. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Bioprocessos (LabBio/UFCG). Foram realizadas análises físico-químicas em amostras dos resíduos *in natura* e nos produtos farináceos elaborados, sendo determinado: teor de água, pH, sólidos solúveis totais, acidez total, proteína bruta e resíduo mineral fixo. Dois métodos de secagem foram adotados para a elaboração do produto farináceo, a fim de comparações: convecção, utilizando estufa de circulação de ar e irradiação, usando o forno de micro-ondas para estudo das cinéticas de secagem, ajustando-se modelos matemáticos aos dados experimentais, com objetivo de prever o tempo e melhor temperatura/potência de secagem, para o dimensionamento e a otimização dos processos utilizando ajustes dos modelos matemáticos que foram realizados utilizando o programa computacional Statistica 12. Os dados das caracterizações físico-químicas das farinhas atenderam aos padrões estabelecidos, e os modelos matemáticos apresentaram bons resultados, destacando-se os de Midilli *et al.* e Verna, com coeficientes de determinação superiores a 0,9. As difusividades efetivas das cascas e sementes aumentaram com o incremento da temperatura e da potência. Para a energia de ativação, os valores obtidos foram de 12,7 kJ/mol para sementes e 8,10 kJ/mol para cascas no forno de micro-ondas, e de 24,58 kJ/mol para sementes e 56,10 kJ/mol para cascas na estufa. O forno micro-ondas (FMO) apresentou uma secagem mais rápida e direta, com um equipamento mais acessível à população e com possibilidade de reprodução do processo. Portanto, a secagem da romã pelo método de irradiação, utilizando forno de micro-ondas, apresenta potencial para futuros trabalhos na elaboração de produtos alimentícios.

Palavras-chave: Farinha; Desenvolvimento de novos produtos, *Punica granatum* L.

ABSTRACT

Pomegranate (*Punica granatum L.*) waste represents a challenge for industries due to the significant losses generated during processing. In this context, the preparation of flour products using pomegranate peels and seeds appears as a viable alternative for reuse, avoiding waste and developing new products from waste. The research was developed at the Bioprocess Laboratory (LabBio/UFCG). Physicochemical analyses were performed on samples of in natura waste and on the processed flour products, determining: water content, pH, total soluble solids, total acidity, crude protein and fixed mineral elimination. Two drying methods were adopted to prepare the flour product for comparison purposes: convection, using an air circulation oven, and irradiation, using a microwave oven to study the drying kinetics, adjusting mathematical models to the experimental data, with the aim of predicting the time and best drying temperature/power, for dimensioning and optimizing the processes using adjustments of the mathematical models that were used in the Statistica 12 computer program. The data on the physical-chemical characterizations of the flours met the established standards, and the mathematical models had good results, with emphasis on those of Midilli et al. and Verna, with coefficients of determination higher than 0.9. The effective diffusivities of the cascades and seeds increased with the increase in temperature and power. For activation energy, the values obtained were 12.7 kJ/mol for seeds and 8.10 kJ/mol for peels in the microwave oven, and 24.58 kJ/mol for seeds and 56.10 kJ/mol for peels in the greenhouse. The microwave oven (MWO) presented faster and more direct drying, with equipment more accessible to the population and with the possibility of reproducing the process. Therefore, drying pomegranates by the irradiation method, using a microwave oven, has potential for future work in the production of food products.

Keywords: flour; development of new products, *Punica granatum L.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1. ROMÃ	12
3.2. ALIMENTOS FUNCIONAIS	12
3.3 SECAGEM	13
3.3.1 Secagem Convectiva	14
3.3.2. Secagem por irradiação.....	15
3.4 PRODUTO FARINÁCEO	16
4. METODOLOGIA	17
4.1 SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	17
4.2 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA DO FRUTO DA ROMÃ	18
4.3 CINÉTICA DE SECAGEM	18
4.3.1 Secagem convectiva.....	19
4.3.2 Secagem irradiativa	19
4.4 MODELOS MATEMÁTICOS	20
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS E PRODUTOS FARINÁCEOS	21
4.4.1. Teor de água.....	21
4.4.2. Sólidos solúveis totais.....	21
4.4.3. Potencial hidrogeniônico	21
4.4.4. Resíduo mineral fixo.....	22
4.4.5. Proteína bruta	22
4.4.6. Acidez total.....	22
4.6 OBTENÇÃO DE PRODUTO FARINÁCEO A PARTIR DOS RESÍDUOS	22
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	23
4.8 ANÁLISE DE COR	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24

ARTIGO 1 – EFEITOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DA CASCA E SEMENTE DA ROMÃ UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ARTIGO 2 –ANALISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS FARINHAS DA CASCA E DA SEMENTE DE ROMÃ UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
REFERÊNCIAS GERAL	82
ANEXO A- Processo de obtenção do produto farináceo da casca da romã por secagem via micro-ondas.....	89

1. INTRODUÇÃO

A romãzeira, de nome científico *Punica granatum* L., produz romã, uma fruta amplamente valorizada tanto na medicina quanto na culinária. Pertencente à família Lythraceae, ela vem sendo admirada por suas propriedades excepcionais desde os tempos antigos. Originária da Ásia Central, a romã é amplamente cultivada em países como China, Irã, Índia e diversas regiões do Mediterrâneo, incluindo Turquia, Egito, Tunísia, Espanha e Marrocos. Ela prospera especialmente em ambientes áridos e semiáridos, tem uma boa adaptação a climas secos. A produção global da fruta gira em torno de 3 milhões de toneladas, com o Irã contribuindo significativamente, representando cerca de 47% desse total. A estrutura da romã é composta por várias partes importantes: o arilo, a semente e a casca. O arilo, que constitui aproximadamente 50% do peso total da fruta, é a parte comestível e altamente apreciada pelo seu sabor e valor nutricional. Por outro lado, a casca, embora não seja comestível, é uma rica fonte de polifenóis e apresenta propriedades adstringentes notáveis. Vale destacar que a coloração da casca não é um indicativo confiável de maturidade ou de sua prontidão para consumo, o que exige outros métodos para avaliar sua qualidade (Jayarathne *et al.*, 2024).

A valorização e aproveitamento dos resíduos alimentares estão atualmente no centro das discussões e representam uma área de pesquisa de extrema urgência na ciência dos alimentos. É essencial buscar soluções que atendam à demanda crescente por processos mais sustentáveis e ao mesmo tempo rentáveis. O Brasil, reconhecido como o principal produtor e exportador de culturas de diversas espécies e origens, enfrenta o desafio significativo de desperdício de alimentos ao longo da cadeia produtiva. Portanto, é fundamental implementar estratégias e tecnologias inovadoras para minimizar e aproveitar ao máximo esses resíduos, visando não apenas reduzir o impacto ambiental, mas também promover a eficiência e a sustentabilidade em todo o sistema alimentar (Komesu *et al.*, 2023).

A casca da romã é um resíduo agroindustrial com uma alta concentração de compostos fenólicos, com potencial para ser utilizada como antioxidantes naturais na indústria alimentícia e farmacêutica, trazendo benefícios tanto para a saúde quanto para a conservação de alimentos. A valorização da casca como fonte de compostos fenólicos

representa uma forma sustentável de aproveitar esse resíduo e promover a utilização de ingredientes naturais na produção de alimentos e medicamentos (Bertolo *et al.*, 2021).

No Brasil, a fome e o desperdício de alimentos continuam sendo desafios enfrentados pela população. Isso ocorre devido aos hábitos alimentares que muitas vezes não utilizam partes não convencionais dos alimentos, mesmo quando essas partes poderiam ser fontes importantes de nutrientes para a saúde (Ferreira *et al.*, 2018).

Os alimentos que oferecem benefícios à saúde além da simples nutrição básica são conhecidos como alimentos funcionais. Esses produtos são enriquecidos ou preparados com ingredientes biologicamente ativos, como vitaminas e minerais ou outros compostos, com o objetivo de proporcionar vantagens específicas à saúde, além de seu valor nutricional essencial. O principal propósito dos alimentos funcionais é promover o bem-estar geral, reduzir o risco de doenças e incentivar uma saúde ideal. Frequentemente, eles são desenvolvidos para atuar sobre processos fisiológicos específicos ou para abordar condições de saúde particulares. Exemplos incluem alimentos ricos em antioxidantes, como determinadas frutas e vegetais. Com o aumento do interesse das pessoas em melhorar a saúde por meio da alimentação, os alimentos funcionais têm ganhado destaque, sendo integrados a uma abordagem mais ampla de bem-estar e saúde preventiva. Essa categoria abrange uma vasta gama de produtos que, além de fornecerem nutrição básica, oferecem benefícios específicos à saúde. Esses alimentos podem ser encontrados na natureza ou ter sido modificados para incluir substâncias bioativas que promovem a saúde (Obayomi *et al.*, 2024).

A maioria dos alimentos está sujeita a deterioração com facilidade, o que levou ao desenvolvimento de várias técnicas de conservação. Dentre essas técnicas, a secagem é uma das mais amplamente utilizadas. A secagem de alimentos oferece várias vantagens, incluindo a melhor conservação do produto, redução de peso e, conseqüentemente, redução nos custos de transporte e armazenamento em comparação com alimentos enlatados e congelados (Emílio *et al.*, 2021).

A indústria de secagem é fundamental para a economia, reduzindo desperdícios e promovendo renda para os agricultores, contribuindo para o desenvolvimento local. Apesar de sua relevância, os secadores industriais, popularizados com a industrialização, enfrentam desafios como o alto custo decorrente do uso de energia convencional e os impactos ambientais associados. Esse processo exige grande consumo energético devido ao calor

latente necessário para remover a umidade, representando 12–25% da energia da indústria alimentícia e podendo elevar o custo do produto final em até 70% (Atia *et al.*, 2024).

A farinha é definida como o produto obtido a partir da moagem de partes comestíveis de diversas espécies de cereais, leguminosas, frutas, sementes, tubérculos e rizomas, utilizando processos tecnológicos seguros voltados para a produção de alimentos. Essa matéria-prima possui um grande potencial para incorporar frutas perecíveis, permitindo o desenvolvimento de produtos com maior vida útil e melhor viabilidade comercial. Além disso, essa abordagem contribui para a diversificação do setor alimentício (Silva *et al.*, 2025).

Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo estudar a cinética de secagem dos resíduos por diferentes métodos e desenvolver um produto farináceo a partir dos resíduos da romã, com o propósito de mitigar o seu descarte ambiental para posterior utilização em produtos alimentícios.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar a cinética de secagem dos resíduos por diferentes métodos e obter produto farináceo originado dos resíduos da romã (*Punica granatum L.*), por diferentes métodos de secagem, para posterior utilização em produtos alimentícios.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as características biométricas da romã;
- Caracterizar físico-quimicamente os resíduos do fruto *in natura*;
- Realizar cinética de secagem dos resíduos do fruto em estufa de circulação de ar, em diferentes temperaturas, e em forno micro-ondas, com diferentes potências e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais;
- Determinar as difusividades efetivas e as propriedades termodinâmicas do processo;
- Obter produto farináceo a partir dos resíduos desidratados, utilizando estufa de circulação de ar e forno de micro-ondas;
- Realizar análises físico-químicas dos produtos farináceos obtidos pelos diferentes processos de secagem e compará-los.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. ROMÃ

A romãzeira (*Punica granatum* L.), pertencente à família Lythraceae, tem sido empregada como planta produtora de frutas, decorativa em parques e jardins e possui propriedades terapêuticas (Lopes *et al.*, 2001). É reconhecida como uma planta medicinal emblemática do Mediterrâneo, utilizada há várias gerações para tratar úlceras, diarreia e infertilidade masculina. As evidências científicas atuais apontam para um vasto leque de atividades farmacológicas benéficas atribuídas à romã, tais como propriedades antidiabéticas, antitumorais, anti-inflamatórias, antimaláricas, antifibróticas, antifúngicas e antibacterianas. Além disso, o consumo regular de romã tem sido associado à melhora da saúde da microbiota intestinal, conferindo um possível benefício na prevenção de condições como obesidade e diabetes (Maphetu *et al.*, 2022).

A casca da fruta é especialmente rica em minerais como potássio, cálcio, fósforo, magnésio e sódio, além de conter polissacarídeos complexos e uma variedade de compostos bioativos, como fenóis, flavonoides, punicalaginas e seus isômeros, ácido galáctico, ácido elágico e glicosídeos. Para obter uma farinha da casca de alta qualidade, é essencial realizar um processo de secagem adequado, a fim de minimizar a deterioração causada pela umidade e prolongar a vida útil após a colheita (Shimizu *et al.*, 2020).

3.2. ALIMENTOS FUNCIONAIS

Alimentos funcionais contêm substâncias como polifenóis, ácidos graxos saudáveis e fitoesteróis, presentes em itens como vinho, subprodutos de peixe e plantas. Novos componentes e produtos funcionais surgem devido aos benefícios bem conhecidos de alimentos nutritivos para a saúde humana. Esses alimentos estão associados a melhorias na saúde, qualidade de vida e prevenção de doenças (Neo *et al.*, 2023).

A fabricação de alimentos de elevado valor agregado, utilizando a tecnologia de bioprocessos, que tem como objetivo atender a um público com ou sem problemas de saúde,

mas com uma ênfase crescente em uma alimentação saudável e rica em nutrientes. Com o intuito de satisfazer esses consumidores, a indústria alimentícia começou a incorporar ingredientes para a elaboração de novas formulações alimentares (Silva *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, o consumo de alimentos saudáveis tem registrado um aumento significativo, impulsionado pelo crescimento da população global e pela maior conscientização sobre estilos de vida saudáveis. Isso tem motivado os consumidores a optarem por alimentos que apresentem alegações de propriedades funcionais, especialmente aqueles com altos teores de compostos bioativos (Sbruzzi Fiebig *et al.*, 2024).

3.3 SECAGEM

A secagem tem sido uma prática utilizada desde tempos remotos e constituiu um procedimento eficiente empregado com o intuito de estender a durabilidade dos insumos agrícolas. A umidade intrínseca dos produtos recém-colhidos é diminuída a um patamar seguro, a fim de prevenir reações de deterioração e prejuízos. Produtos alimentícios desidratados evoluíram para se tornarem um requisito indispensável para diversos segmentos nas mais diversas comunidades (Sharshir *et al.*, 2023).

A secagem é uma etapa essencial que antecede a transformação de alimentos em pó. Reduzindo o risco de atividade microbiana e deterioração causada pela presença de água. No âmbito industrial, a secagem é de grande relevância para a conservação de alimentos, produtos agrícolas e no setor de gerenciamento de resíduos. A escolha do método de secagem adequado é determinante para assegurar a qualidade dos alimentos durante o processo. Assim, fatores como o tipo de aquecimento, temperatura utilizada e as configurações energéticas são importantes para garantir a preservação e a sustentabilidade da qualidade ao longo do processo de secagem (Arslan *et al.*, 2024).

3.3.1 Secagem Convectiva

O método mais amplamente empregado na secagem de alimentos é o aquecimento por convecção, que utiliza o ar tanto como fonte de calor quanto como meio para remover a água do material. A temperatura é o principal parâmetro nesse processo, sendo que seu aumento acelera a secagem. A secagem por convecção é comumente aplicada para conservar frutas, vegetais e carnes, porém, o uso de altas temperaturas e longos períodos de secagem pode comprometer a qualidade dos produtos, resultando em perda de valor nutricional, alterações na cor, no aroma e na textura. Além disso, a secagem por convecção não é a solução mais eficiente do ponto de vista energético (Ciurzyńska *et al.*, 2022).

O método oficial de pré-secagem por meio de estufa de circulação forçada, amplamente utilizado, apresenta um custo elevado e um tempo consideravelmente longo para obter resultados (Magno *et al.*, 2016).

Teles *et al.*, (2023) estudaram a cinética de secagem convectiva do bagaço de malte em estufa com circulação de ar, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. A partir das curvas de secagem foi possível comprovar que os resultados obtidos influenciaram a temperatura de secagem, comprovando também, o comportamento das curvas nas temperaturas e massas específicas. Ao realizarem a análise estatística observaram que o modelo que mais se adequou aos valores experimentais foi o de Page, obtendo assim melhor ajuste para descrever a umidade em função do tempo de secagem do bagaço. Com os dados obtidos, teve-se uma média de quanto tempo é necessário para realizar a secagem do produto em cada condição específica.

Cruz *et al.* (2023) realizaram o estudo utilizando o caroço da manga, que representa 10% do peso total da fruta, foi utilizado o secador convectivo com as temperaturas de (100, 125, 150, 175 e 200 °C), a taxa de secagem foi calculada a partir do modelo Gaussiano e a energia de ativação foi calculada a partir da lei de Arrhenius para cada teste, feito em diferentes velocidades do ar. Os tempos de secagem variaram de 2 a 5 horas. Os resultados dos experimentos mostraram que maiores taxas de secagem e difusividade efetiva ocorreram em temperaturas e velocidades mais altas. A energia de ativação permaneceu constante após 3 m/s. Com base nos resultados, sugerem-se estudos adicionais sobre a secagem de caroços de manga triturados. Este método de secagem convectivo consome menos energia em relação ao processo térmico, resultando em tempos de secagem consideravelmente menores.

3.3.2. Secagem por irradiação

O método de secagem via irradiação por micro-ondas gera calor pelo atrito molecular entre a água e outros componentes principais presentes nas amostras, tornando esse processo mais curto, ao mesmo tempo em que usa menores entradas de energia em comparação a outros métodos de secagem (Prates *et al.*, 2023).

Os fornos de micro-ondas, quando utilizados, apresentam uma redução significativa nos ciclos de secagem. Esses equipamentos utilizam ondas eletromagnéticas de alta frequência, geralmente na faixa de 2450 MHz, que corresponde à frequência das moléculas de água. Essa coincidência de frequências permite que a energia seja transferida diretamente para as moléculas de água presentes nos alimentos, resultando no aquecimento e cozimento dos mesmos. Como resultado, os ciclos de secagem são encurtados devido à eficiência na transferência de energia para as moléculas de água, proporcionando um processo mais rápido (Geromel *et al.*, 2020).

O emprego do forno micro-ondas (FMO) na secagem de alimentos, traz consigo tanto vantagens quanto desvantagens. Por um lado, ele é reconhecido como um método de secagem rápido e capaz de aprimorar a qualidade dos alimentos, além de proporcionar economia de energia. No entanto, é importante considerar que o uso desse método pode ocasionar danos ao produto devido à limitada capacidade de controlar a transferência de calor e massa durante o processo de secagem (Luka *et al.*, 2023).

A secagem por meio de micro-ondas é um processo caracterizado pela geração de calor no interior do material. Esse aquecimento interno provoca um aumento significativo da temperatura do centro até a superfície do material, resultando em uma secagem mais rápida em comparação com métodos convencionais. Além da rapidez, a secagem por FMO oferece a vantagem de reduzir a contaminação microbológica, como bactérias e fungos, devido às altas temperaturas alcançadas. Como resultado, os produtos secos apresentam uma melhor aparência e qualidade, atendendo aos padrões desejados (Marcante *et al.*, 2010).

Kusuma *et al.*, (2023) conduziram o estudo sobre a cinética de secagem de folhas de limão *kaffir* no forno micro-ondas, foram utilizadas quatro potências (136, 264, 440, 616 W) e três categorias de tamanho médio da amostra. Sete modelos de cinética de secagem em camada delgada: Lewis, Page, Logarítmico, Henderson-Pabis, Approximal de difusão,

Verma e Midilli-Kucuk foram comparados para melhor adequação aos dados experimentais, avaliando cinco funções estatísticas e de erro: soma dos erros ao quadrado (SSE), coeficiente de determinação (R^2), erro médio quadrado (RMSE), qui-quadrado (χ^2), e erro quadrático médio (MSE). O modelo de Midilli-Kucuk foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Dentro de todos os grupos de amostras, as condições ideais de secagem ocorreram com uma amostra grande usando 264 W por 150 s. Isso resultou em uma melhor aparência visual do produto final, foi atingido um teor de umidade de equilíbrio de 5,63% para folhas grandes de limão kaffir em 150 s e 264 W. Essas folhas secas, após a secagem utilizando forno de micro-ondas podem ser empregadas como um tempero instantâneo na indústria alimentícia.

3.4 PRODUTO FARINÁCEO

A obtenção de farinhas emerge como uma opção altamente atrativa, pois além de conferir valor agregado às frutas, proporciona oportunidades para o desenvolvimento de novos alimentos, como os cookies. Além disso, ao considera-se as propriedades nutricionais, como a presença de compostos fenólicos e o potencial antioxidante, a utilização dessas farinhas torna-se viável. O processo de secagem, ao preservar os compostos bioativos presentes nas frutas, abre perspectivas promissoras para as indústrias de alimentos e fomenta o avanço da agricultura regional (Santos, 2018).

O regulamento técnico nº 263 da Anvisa (Brasil, 2005) define farinhas como produtos obtidos por moagem ou outros processos seguros a partir de partes comestíveis de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas. Portanto, a obtenção de farinha de romã está respaldada pela legislação e por órgãos reguladores. As farinhas de origem vegetal são ricas em fibras e oferecem uma alternativa para prolongar a vida útil de produtos perecíveis. Seu processamento resulta em produtos de maior durabilidade em temperatura ambiente, mantendo valor nutricional e acessibilidade ao consumidor (Mattos, 2016).

Cangussu *et al.* (2024) investigou o potencial dos subprodutos da seriguela (*Spondias purpurea* L.) – casca, semente e polpa – como ingredientes alimentares ricos em compostos bioativos e fibras. As farinhas de casca e semente apresentaram maiores teores de fibras, carotenoides e polifenóis, enquanto a farinha de polpa teve maior bioacessibilidade de

polifenóis. A análise por FTIR e cromatografia gasosa revelou a presença de polissacarídeos como pectina e hemiceluloses, além de compostos inéditos, como trigonelina e taninos hidrolisáveis. O estudo destacou o potencial tecnológico desses subprodutos para a formulação de alimentos processados.

Apaliya *et al.* (2024) desenvolveu especificações para a secagem da polpa da banana-da-terra (*Musa parasidiaca*), analisando propriedades funcionais como densidade aparente, capacidade de absorção de óleo e pH, além da composição próxima (umidade, cinzas, proteína, carboidratos e gordura). O método de secagem afetou significativamente o teor de carboidratos e umidade. Não houve diferença significativa no teor de proteína entre as farinhas secas em micro-ondas e ao sol. A densidade aparente variou conforme o método de secagem, influenciando também a reidratação e difusividade de umidade. A cor da farinha seca em micro-ondas diferiu significativamente da farinha seca ao sol.

4. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Bioprocessos (LabBio) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus Campina Grande, Paraíba, Brasil.

4.1 SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

As romãs foram coletadas no Município de Princesa Isabel- PB (7° 44' 47" S 37° 59' 53" O), e transportados em temperatura ambiente, em bolsas de Papelão, até o laboratório de Bioprocessos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

As romãs foram lavadas em água corrente e sanitizadas com solução clorada a 200 ppm; em seguida, foram descascadas manualmente; as sementes foram submetidas a retirada da polpa de forma manual utilizando um pano para retirar toda a sua película.

4.2 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA DO FRUTO DA ROMÃ

Foi utilizado um paquímetro digital, ZAAS precision, para medição da largura central e comprimento dos frutos. Em seguida, foi determinada a massa individual dos frutos, utilizando uma balança digital analítica Shimadzu AY 220 e os resultados das pesagens expressos em gramas.

Para o estudo de secagem, foram feitos cortes nas cascas, obtendo uma largura de aproximadamente 10 mm, espessura de 1,5 mm e o comprimento de 4,5 mm. As sementes foram utilizadas integrais, com espessura de aproximadamente 6,5 mm.

4.3 CINÉTICA DE SECAGEM

As cinéticas de secagem da casca e da semente foram realizadas utilizando dois métodos de secagem: convecção em estufa com circulação de ar e irradiação em forno de micro-ondas doméstico.

4.3.1 Secagem convectiva

Para a cinética de secagem das amostras (cascas e sementes) por convecção, foi utilizada uma estufa com circulação de ar da marca Lucadema, modelo 82/768, com tensão de alimentação de 220 V. Os experimentos foram conduzidos em duplicata, em bandejas de alumínio com dimensão de 16mm, utilizando 10 g das amostras, em temperaturas de 50, 60 e 70 °C, visando determinar o tempo e a temperatura ideais para a secagem. As cinéticas de secagem foram realizadas mediante a monitoração periódica das massas em diferentes intervalos de tempo, iniciando de 5 em 5 min na primeira hora, depois de 15 em 15 min na segunda hora, de 30 em 30 min na terceira hora e de 1 em 1 h até a obtenção da massa constante. Com base nos dados coletados, foram determinados os valores da razão do teor de água (Equação 1), determinados pelo método padrão da estufa, a 105 ± 3 °C, até massa constante (IAL, 2008), os quais foram posteriormente ajustados a diferentes modelos matemáticos, objetivando encontrar o que melhor descreve o processo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto em determinado tempo (b. s.);

X₀ - teor de água inicial do produto (b. s.);

X_e - teor de água de equilíbrio do produto (b. s.).

4.3.2 Secagem irradiativa

Para a cinética de secagem irradiativa, utilizou-se um forno micro-ondas da marca Electrolux, modelo MTO30, com tensão de alimentação de 220 V, capacidade de 34 L, potência máxima de 1300 W e frequência de 60 Hz. Os experimentos foram realizados em duplicata, utilizando potências de 60, 80 e 100% (correspondendo a 780, 1040 e 1300W, respectivamente), com o objetivo de determinar o melhor tempo e potência de secagem. Depósitos de polipropileno com dimensões de 16cm de comprimento por 10 cm de largura foram utilizados durante toda o processo, uma vez que o material não absorve significativamente a energia de micro-ondas. Foram utilizadas 10 g das amostras. Um béquer,

também de polipropileno, contendo 150 mL de água foi colocado dentro da cavidade do forno para umidificar o ambiente e evitar combustão da amostra. A água do béquer foi trocada a cada nova sequência de secagem, a fim de evitar a ebulição e possíveis alterações na umidade das amostras. As massas das amostras foram registradas a cada 1 min até que se alcançasse uma massa constante. Com os dados obtidos, foram calculados os valores da razão do teor de água e, em seguida, esses dados foram aplicados a diferentes modelos matemáticos.

4.4 MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem podem ser classificados em teóricos, semi-teóricos e empíricos. Os modelos semi-teóricos buscam integrar a fundamentação teórica com a praticidade na aplicação. Exemplos comuns de modelos semi-teóricos incluem Page, Newton, Henderson & Pabis, Logarítmico, Midilli-Kucuk, Verma *et al.*, Dois Termos e Exponencial de Dois Termos. Por outro lado, os modelos empíricos estabelecem uma relação direta entre o tempo de secagem e o teor de umidade. (Ambawat *et al.*, 2024). Então, para descrever as cinéticas de secagem das cascas e sementes de romã foram utilizados os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos escolhidos para os ajustes.

Designação do modelo	Modelos	Equação
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot e^{-kt}$	(2)
Midilli <i>et al.</i>	$RU = a \cdot e^{-kt^n} + bt$	(3)
Logarítmico	$RU = a \cdot e^{-kt^n} + c$	(4)
Dois termos	$RU = a \cdot e^{-k_0t} + b \cdot e^{-k_1t}$	(5)
Exponencial de dois termos	$RU = a \cdot e^{-kt} + (1 - a) \cdot e^{-kat}$	(6)
Wang & Sing	$RU = 1 + at + bt^2$	(7)
Henderson e Pabis modificado	$RU = ae^{-kt} + be^{-k_0t} + ce^{-k_1t}$	(8)
Aproximação da difusão	$RU = ae^{-kt} + (1 - a) e^{-kbt}$	(9)

$$\text{Newton} \quad RU = e^{-kt} \quad (10)$$

$$\text{Thompson} \quad RU = e^{\frac{-a - (a^2 + 4bt)^{0.5}}{2b}} \quad (11)$$

$$\text{Page} \quad RU = e^{-kt^n} \quad (12)$$

$$\text{Verna} \quad RU = ae^{-kt} + (1 - a) \cdot e^{-k_1 t} \quad (13)$$

RU: razão de teor de água; t: tempo de secagem (min); a,b, c, k, k₀, k₁ e n: parâmetros dos modelos.

Fonte: Autor (2025)

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS E PRODUTOS FARINÁCEOS

Os resíduos *in natura* e os produtos farináceos foram submetidos à caracterização em triplicata, com o intuito de avaliar os parâmetros físico-químicos.

4.4.1. Teor de água

O teor de água (TA) foi determinado pelo método gravimétrico após secagem em estufa de secagem e esterelização a 105 °C, SL – 100 da marca SOLAB, até massa constante, de acordo com metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

4.4.2. Sólidos solúveis totais

Os sólidos solúveis totais (SST) foram determinados através da refratometria na escala °Brix. As leituras do °Brix foram realizadas utilizando o refratômetro digital (IAL, 2008).

4.4.3. Potencial hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado através de medidas potenciométricas do líquido sobrenadante, em peagâmetro (IAL, 2008).

4.4.4. Resíduo mineral fixo

A determinação do percentual do resíduo mineral fixo (RMF) ou cinzas foi realizada por incineração em forno mufla a 550 °C, até total queima da matéria orgânica, conforme metodologia descrita em IAL (2008).

4.4.5. Proteína bruta

O método Kjeldahl (Tedesco *et al.*, 1995) foi utilizado para determinação de proteína bruta (PB) das amostras *in natura* e do produto farináceo, e o fator de conversão utilizado foi de 6,25.

4.4.6. Acidez total

A acidez total foi determinada através do método acidimétrico descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL,2008), usando solução de hidróxido de sódio 0,1M, com os resultados expressos em porcentagem de ácido cítrico.

4.6 OBTENÇÃO DE PRODUTO FARINÁCEO A PARTIR DOS RESÍDUOS

A partir dos resultados das cinéticas de secagem, empregando estufa de circulação de ar e forno micro-ondas, foram identificados os valores ideais para a massa inicial, temperatura ou potência e tempo de secagem a serem utilizados, visando a obtenção da farinha.

Esse processo envolveu etapas como trituração em moinho de facas, tamisação em peneiras, acondicionamento a vácuo em sacos plásticos e armazenamento em temperatura ambiente. Por fim, o produto farináceo obtido foi submetido à análise de suas características físico-químicas, que foram descritas anteriormente no item 4.4.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os experimentos foram organizados em delineamento inteiramente casualizado e os dados submetidos a ANOVA ($p \leq 0,05$). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para o ajuste de cada modelo matemático aos dados experimentais da secagem, foram realizadas as análises de regressão não-linear pelo método Quasi-Newton. Os critérios utilizados para determinação do melhor ajuste das equações aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 14), desvio quadrático médio (DQM) (Equação 15) e qui-quadrado (χ^2) (Equação 16).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - \bar{RX})^2} \quad (14)$$

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{n-N} \sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (16)$$

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; DQM – desvio quadrático médio; χ^2 – qui-quadrado; $RX_{pred,i}$ – razão do teor de água predito pelo modelo; $RX_{exp,i}$ – razão do teor de água experimental; n – número de observações; N – número de constantes do modelo.

4.8 ANÁLISE DE COR

Os parâmetros de cor foram determinados em espectrofotômetro portátil (FRU, WR 10QC, China) por leitura direta no sistema de cor CIELAB. Com as coordenadas L^* (luminosidade); a^* (transição da cor verde ($-a^*$) para vermelho ($+a^*$)); e b^* (transição da cor azul ($-b^*$) para a cor amarela ($+b^*$)). Com os resultados de a^* e b^* será calculado os valores

de croma (C^*) (Equação 17), que representa a saturação ou intensidade de cor da amostra, sendo 0 = cor impura e 60 = para cor pura, e o ângulo de tonalidade (h°) (Equação 18).

$$C = \sqrt{(a')^2 + (b')^2} \quad (17)$$

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (18)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho resultaram em dois artigos científicos a serem submetidos e um pedido de depósito de patente, listados a seguir:

ARTIGO 1 - Efeitos na cinética de secagem da casca e semente da romã utilizando diferentes métodos

ARTIGO 2 - Análises físico-químicas das farinhas da casca e da semente de romã utilizando diferentes métodos de secagem

PATENTE – N° do Processo = BR 10 2024 019316 4 - Processo de obtenção do produto farináceo da casca da romã por secagem via micro-ondas

**ARTIGO 1 – EFEITOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DA CASCA E SEMENTE
DA ROMÃ UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS**

RESUMO

Punica granatum (L.) possui frutos com propriedades nutricionais e medicinais, com grande potencial industrial ainda pouco explorado. A secagem aumenta a vida útil das cascas e sementes, ampliando suas possibilidades de comercialização. O estudo da cinética de secagem permite entender a perda de água do produto, associada à difusividade efetiva e às propriedades termodinâmicas, essenciais para a análise da transferência de calor e massa, além de calcular a energia necessária para o processo. Esta pesquisa teve como objetivo estudar a cinética de secagem da casca e da semente de romã utilizando forno de micro-ondas e estufa de circulação e renovação de ar, determinando as propriedades termodinâmicas envolvidas. Foram avaliadas temperaturas (50, 60 e 70 °C) e potências (60, 80 e 100%), ajustando modelos matemáticos aos dados experimentais. Destaque para o modelo de Midilli e Verna, que apresentou melhores coeficientes de determinação ($R^2 > 0,99$) e menores desvios quadráticos médios (DQM) e qui-quadrados (χ^2). As difusividades efetivas foram bem descritas pela equação do tipo Arrhenius, com energias de ativação (E_a) de 56,10 kJ/mol em estufa e 56,10 kJ/mol e 8,10 kJ/mol em FMO para as cascas; as sementes apresentaram 24,58 kJ/mol em estufa e 12,7 kJ/mol em FMO. As mudanças de entalpia (ΔH) diminuíram com o aumento da temperatura, caracterizando uma reação endotérmica. As variações de entropia (ΔS) foram negativas e inversamente proporcionais à temperatura, e a energia livre de Gibbs (ΔG) foi positiva, indicando um processo endergônico, não espontâneo, que aumentou com a temperatura.

Palavras-chave: *Punica Granatum* L, Modelagem matemática; propriedades termodinâmicas.

ABSTRACT

Punica granatum (L.) has fruits with nutritional and medicinal properties, with great industrial potential that is still little explored. Drying increases the shelf life of the peels and seeds, expanding their commercialization possibilities. The study of drying kinetics allows us to understand the loss of water from the product, associated with the effective diffusivity and thermodynamic properties, essential for the analysis of heat and mass transfer, in addition to calculating the energy required for the process. This research aimed to study the drying kinetics of pomegranate peel and seeds using a microwave oven and an air circulation and renewal oven, determining the thermodynamic properties involved. Temperatures (50, 60 and 70 °C) and powers (60, 80 and 100%) were evaluated, adjusting mathematical models to the experimental data. The Midilli and Verna model stood out, as it presented better coefficients of determination ($R^2 > 0.99$) and lower root mean square deviations (MSD) and chi-squared (χ^2). The effective diffusivities were well described by the Arrhenius equation, with activation energies (E_a) of 56.10 kJ/mol in the oven and 56.10 kJ/mol and 8.10 kJ/mol in FMO for the shells; the seeds presented 24.58 kJ/mol in the oven and 12.7 kJ/mol in FMO. The enthalpy changes (ΔH) decreased with increasing temperature, characterizing an endothermic reaction. The entropy changes (ΔS) were negative and inversely proportional to temperature, and the Gibbs free energy (ΔG) was positive, indicating an endergonic, non-spontaneous process that increased with temperature.

Keywords: *Punica Granatum* L, Mathematical modeling; thermodynamic properties.

1. INTRODUÇÃO

Punica granatum L., ou romãzeira, originária do Afeganistão e Irã, é hoje cultivada globalmente. Suas folhas, flores, sementes, casca e suco têm amplos usos farmacológicos. Na medicina chinesa, as folhas apresentam atividades anticancerígenas, anti-inflamatórias, antioxidantes e antimicrobianas. O suco combate aterosclerose, doenças infecciosas, cardíacas e câncer. Sementes, subproduto do suco, possuem propriedades antioxidantes, antirrugas, antimicrobianas e anticancerígenas. As cascas exibem bioatividades antitumorais, antioxidantes, antibacterianas, anti-inflamatórias e hepatoprotetoras. Esses efeitos vêm de componentes bioativos, como polifenóis, polissacarídeos, terpenos, lignanas e alcaloides. Polissacarídeos, menos estudados, destacam-se por atividades antioxidantes, imunomoduladoras e anticancerígenas (Zhao *et al.*, 2024).

A romã, devido ao seu elevado teor de umidade e açúcar, é suscetível à deterioração causada por microrganismos e pela ação de enzimas. Por essa razão, é necessário submetê-la a algum processo de preservação para possibilitar seu consumo ao longo do ano. Entre os métodos mais utilizados para a conservação de frutas e vegetais, a secagem se destaca por ser uma alternativa prática, facilitando o transporte e aumentando a vida útil dos produtos (Ozay-Arancioglu *et al.*, 2021).

A secagem remove a umidade de sólidos por meio do transporte de calor e massa. Na desidratação convectiva, o calor do ar quente vaporiza a umidade do material, que se difunde e é transferida como vapor para o ar. Parâmetros como difusividade, coeficiente de transferência de umidade, tempo de meia secagem, fator de atraso e coeficiente de secagem são importantes para projetar e otimizar o processo. Este método, amplamente utilizado, reduz o teor de umidade e aumenta o valor calorífico da amostra, sendo menos afetado por condições climáticas, com tempo de secagem curto e baixos níveis de umidade no produto final. Contudo, apresenta desvantagens como baixa eficiência térmica e alto consumo energético, impactando os custos operacionais (Souza *et al.*, 2024; Agbede *et al.*, 2024; Ling *et al.*, 2022).

A secagem por micro-ondas é eficaz por atingir maior penetração e aquecimento volumétrico em alimentos, resultando em rápida taxa de aquecimento e menor tempo de

processamento. Ela seca de dentro para fora, o que reduz o tempo de secagem e retém os nutrientes essenciais. (Animashaun *et al.*, 2024).

A determinação de uma curva e das taxas de secagem pode ser realizada acompanhando o processo de desidratação do material alimentício. Essas informações permitem estabelecer a cinética de secagem do material. Diferentes modelos matemáticos são utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, o que é fundamental para o projeto de equipamentos e a otimização de processos. Essas soluções analíticas também são empregadas para determinar a difusão efetiva do fluxo de massa e o coeficiente de transferência de massa convectiva. Além disso, o coeficiente de difusão é essencial, pois possibilita simulações da distribuição de umidade no material alimentício durante a secagem e permite a determinação do estresse interno do material (Santos *et al.*, 2020).

O presente estudo tem como objetivo investigar a cinética de secagem da casca e da semente de romã, empregando secagem por irradiação via forno de micro-ondas e secagem convectiva utilizando estufa com circulação e renovação de ar, além de determinar as propriedades termodinâmicas associadas ao processo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATÉRIAS-PRIMAS E PROCESSAMENTO

As romãs foram coletadas no Município de princesa Isabel- PB, e transportados em temperatura ambiente, em bolsas de Papelão, até o laboratório de Bioprocessos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

As romãs foram lavadas em água corrente e sanitizadas com solução clorada a 200 ppm. Em seguida, foram descascadas manualmente e as sementes foram submetidas a retirada da polpa de forma manual utilizando um pano para retirar toda a película da polpa. Para a cinética de secagem as cascas foram medidas com um paquímetro, apresentando largura de 10 mm, espessura 1,5 mm e comprimento de 4,5 mm. As sementes foram usadas em seu tamanho integral, medindo 6,5 mm de espessura.

2.2 CINÉTICA DE SECAGEM

As cinéticas de secagem da casca e da semente foram avaliadas usando dois métodos: irradiação via forno de micro-ondas e secagem por convecção utilizando estufa de circulação e renovação de ar. A escolha desses métodos se baseia em suas diferentes abordagens para transferência de calor e suas respectivas influências na qualidade final do produto.

2.2.1 Secagem convectiva

Para a cinética de secagem das amostras (cascas e sementes) por convecção, foi utilizada uma estufa com circulação de ar da marca Lucadema, modelo 82/768, com tensão de alimentação de 220 V. Os experimentos foram conduzidos em duplicata, em bandejas de alumínio com dimensão de 16mm, utilizando as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, visando determinar o tempo e a temperatura ideais para a secagem. As cinéticas de secagem foram realizadas mediante a monitoração periódica das massas em diferentes intervalos de tempo, iniciando de 5 em 5 min na primeira hora, depois de 15 em 15 min na segunda hora, de 30 em 30 min na terceira hora e de 1 em 1 h até a obtenção da massa constante. Com base nos dados coletados, foram determinados os valores da razão do teor de água (Equação 1), determinados pelo método padrão da estufa, a 105 ± 3 °C, por 24 h (IAL, 2008), os quais

foram posteriormente ajustados a diferentes modelos matemáticos, objetivando encontrar o que melhor descreve o processo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto em determinado tempo (b. s.);

X₀ - teor de água inicial do produto (b. s.);

X_e - teor de água de equilíbrio do produto (b. s.).

2.2.2 Secagem por irradiação

Para a cinética de secagem por irradiação, utilizou-se um forno micro-ondas da marca Electrolux, modelo MTO30, com tensão de alimentação de 220 V, capacidade de 34 L, potência máxima de 1300 W e frequência de 60 Hz. Os experimentos foram realizados em duplicata, utilizando potências de 60, 80 e 100% (correspondendo a 780, 1040 e 1300W, respectivamente), com o objetivo de determinar o melhor tempo e potência de secagem. Depósitos de polipropileno com dimensões de 16cm de comprimento por 10 cm de largura foram utilizados durante toda o processo, uma vez que o material não absorve significativamente a energia de micro-ondas. Um béquer, também de polipropileno, contendo 150 mL de água foi colocado dentro da cavidade do forno para umidificar o ambiente e evitar combustão da amostra. A água do béquer foi trocada a cada nova sequência de secagem, a fim de evitar a ebulição e possíveis alterações na umidade das amostras. As massas das amostras foram registradas a cada 1 min até que se alcançasse uma massa constante. Com os dados obtidos, foram calculados os valores da razão do teor de água e, em seguida, esses dados foram aplicados a diferentes modelos matemáticos.

2.3 MODELOS DE AJUSTE DE CINÉTICA DE SECAGEM

Para realizar o ajuste de cada modelo matemático aos dados experimentais, foram realizadas análises de regressão não linear utilizando o método de Quasi-Newton. Essa análise foi conduzida utilizando o programa computacional Statistica 12.0 (STARTSOFT, Inc. 2007). Os modelos matemáticos escolhidos estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 -Modelos matemáticos ajustados aos dados das cinéticas de secagem.

Designação	Modelo	Equação
Aproximação da Difusão	$RX=a.exp(-k.t)+(1-a)exp(-k.b.t)$	(2)
Dois Termos	$RX=a.exp(-k_0.t)+b exp(-k_1.t)$	(3)
Exponencial de dois termos	$RX=a.exp(-k.t)+(1-a)exp(-k.a.t)$	(4)
Henderson e Pabis Modificado	$RX=a.exp(-k_0.t)+b exp(-k_1.t)+c exp(-k_2.t)$	(5)
Henderson e Pabis	$RX=a.exp(-k.t)$	(6)
Logarítmico	$RX=a.exp(-k.t)+c$	(7)
Midilli <i>et al.</i>	$RX=a. exp(-k.t.n) +b.t$	(8)
Newton	$RX=exp(-k.t)$	(9)
Page	$RX=exp(-k.t.n)$	(10)
Thompson	$RX=exp(-a-(a^2+4.b.t)0,5)/2.b)$	(11)
Verma	$RX=a.exp(-k.t)+(1-a) exp(-k_1.t)$	(12)
Wang e sing	$RX=1+a.t+b.t.2$	(13)

Onde: RX – razão do teor de água do produto (adimensional); t – tempo de secagem (min); k, k_0 e k_1 – constantes de secagem (1/min); a, b, c, n – coeficientes dos modelos.Fonte: Autor (2025)

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para o ajuste de cada modelo matemático aos dados experimentais da secagem, foram realizadas as análises de regressão não-linear pelo método Quasi-Newton. Os critérios utilizados para determinação do melhor ajuste das equações aos dados experimentais foram: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 14), desvio quadrático médio (DQM) (Equação 15) e qui-quadrado (χ^2) (Equação 16).

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2} \right) \quad (14)$$

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{n-N} \sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (16)$$

Onde: R^2 – coeficiente de determinação; DQM – desvio quadrático médio; χ^2 – qui-quadrado; $RX_{pred,i}$ – razão do teor de água predito pelo modelo; $RX_{exp,i}$ – razão do teor de água experimental; n – número de observações; N – número de constantes do modelo.

2.5 DIFUSIVIDADE EFETIVA

As difusividades efetivas foram determinadas ajustando-se o modelo de difusão líquida (Equação 17) aos dados experimentais obtidos durante o processo de secagem, utilizando uma aproximação com 10 termos (n=10). Esta equação representa a solução analítica da segunda lei de Fick, sendo aplicada sob a premissa de que a geometria das amostras, tanto as cascas quanto as sementes, pode ser aproximada à de uma placa plana infinita. Considerando que, para os propósitos da difusão, a espessura da semente é muito menor que suas outras dimensões, permitindo assim uma simplificação matemática e a utilização de soluções analíticas bem estabelecidas para a difusão em placas planas. Além disso, o modelo desconsidera a ocorrência de contração volumétrica ao longo do processo de secagem (Brooker *et al.*, 1992).

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{10} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{1}{4L^2} \right] \quad (17)$$

Em que:

D_{ef} - coeficiente de difusão efetivo (m²/s);

n - número de termos da equação;

L - dimensão característica (meia espessura da amostra) (m);

t - tempo (s).

Para avaliar o efeito da temperatura durante o processo de secagem sobre a difusividade efetiva das amostras, utilizou-se uma equação do tipo Arrhenius (Equação 18). Nesse contexto, foram determinadas as energias de ativação a partir da análise da definição da curva de Ln (Def) em função do inverso da temperatura absoluta (1/T). Esse método permitiu uma compreensão mais detalhada de como a temperatura influencia a difusão das amostras durante o processo de secagem.

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right) \quad (18)$$

Onde:

D_0 - fator pré-exponencial (m^2/s);

E_a - energia de ativação (kJ/mol);

R - constante universal dos gases (8,314 kJ/kmol K);

T_a - temperatura absoluta (K).

2.6 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

As propriedades termodinâmicas entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) foram obtidas utilizando, respectivamente, as Equações 19, 20 e 21. As equações específicas foram aplicadas a fim de determinar com precisão como variações de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, fornecendo uma análise completa e detalhada dos aspectos termodinâmicos do sistema.

$$\Delta H = E_a - RT \quad (19)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_0) - \ln\left(\frac{K_b}{h_p}\right) \right] - \ln T \quad (20)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (21)$$

Em que:

ΔH - entalpia específica (J/mol);

ΔS - entropia específica (J/mol K);

ΔG - energia livre de Gibbs (J/mol);

k_b - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

h_p - constante de Planck igual ($6,626 \times 10^{-34}$ J/s);

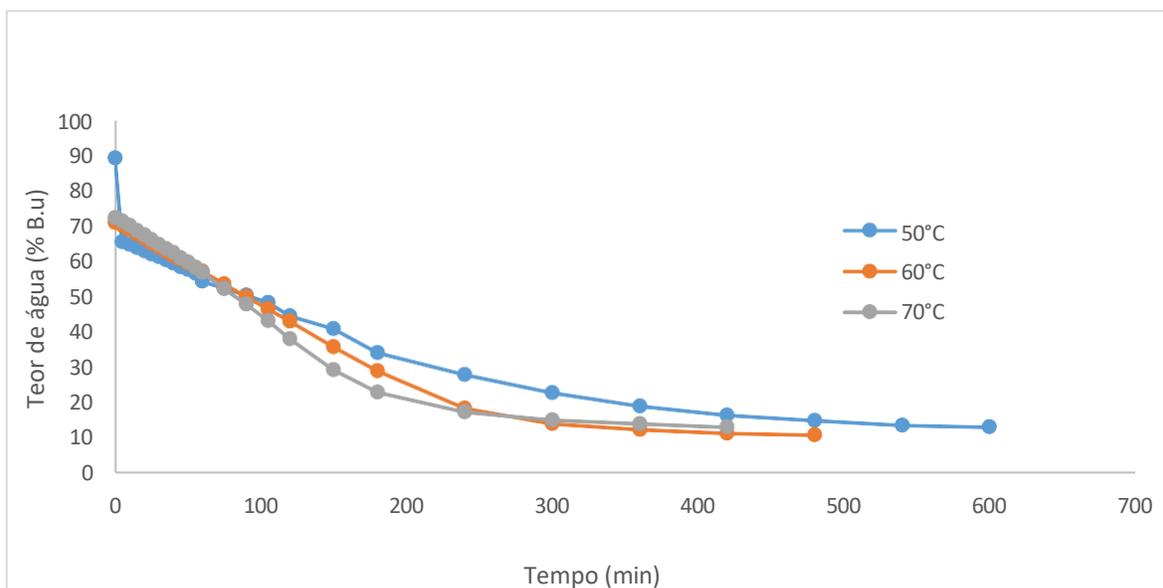
T - temperatura absoluta (K).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CINÉTICA DE SECAGEM

Na Figura 1, 2, 3, 4 são apresentados os tempos de secagem e teor de água em base úmida das cascas e sementes de romã em seus respectivos métodos de secagem.

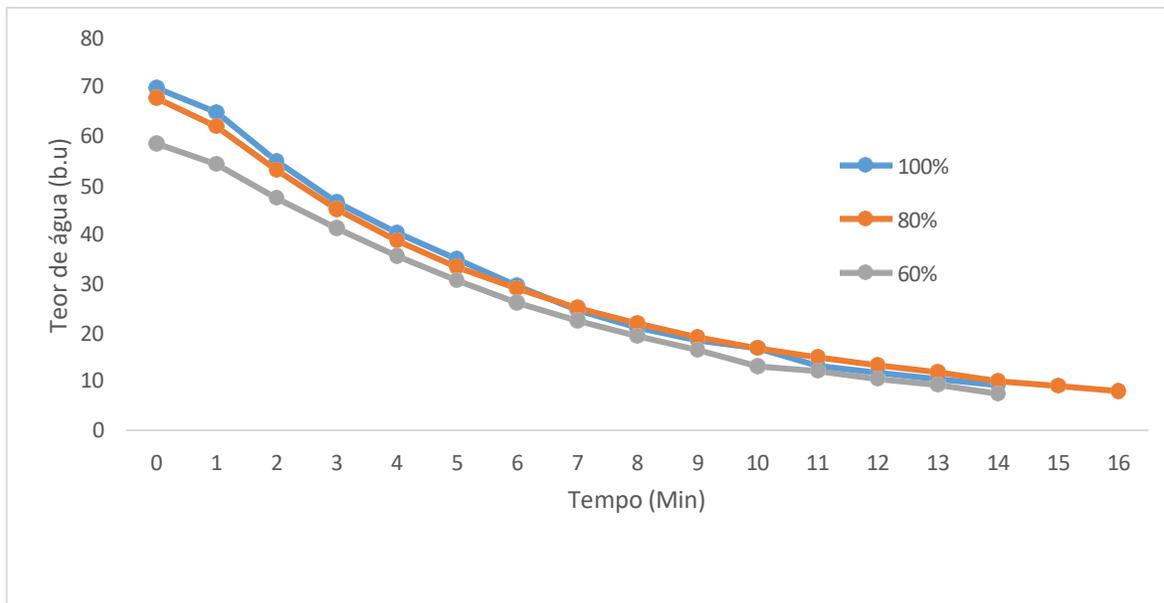
Figura 1- Valores médios dos tempos de secagens e teores de água de cascas de romã em temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 1 apresenta os tempos de secagem que variaram entre 420 a 600 min, entre 50 e 70 °C, até atingirem o ponto de equilíbrio, quando a massa se estabilizou, indicando que o processo de secagem foi concluído. Observou-se que, à temperatura de 70 °C, o tempo de secagem das cascas foi semelhante ao das cascas secas a 60 °C, sugerindo que a eficiência térmica não aumentou significativamente com a temperatura mais alta para esse material. Ao final da cinética de secagem, as temperaturas de 60 e 70 °C resultaram em valores de umidade residual (bu) entre $10,79 \pm 0,58$ e $13,03 \pm 0,5$. Esses resultados destacam a importância de otimizar as condições de secagem para maximizar a eficiência e reduzir o consumo energético, ao mesmo tempo em que se mantém a qualidade do produto final.

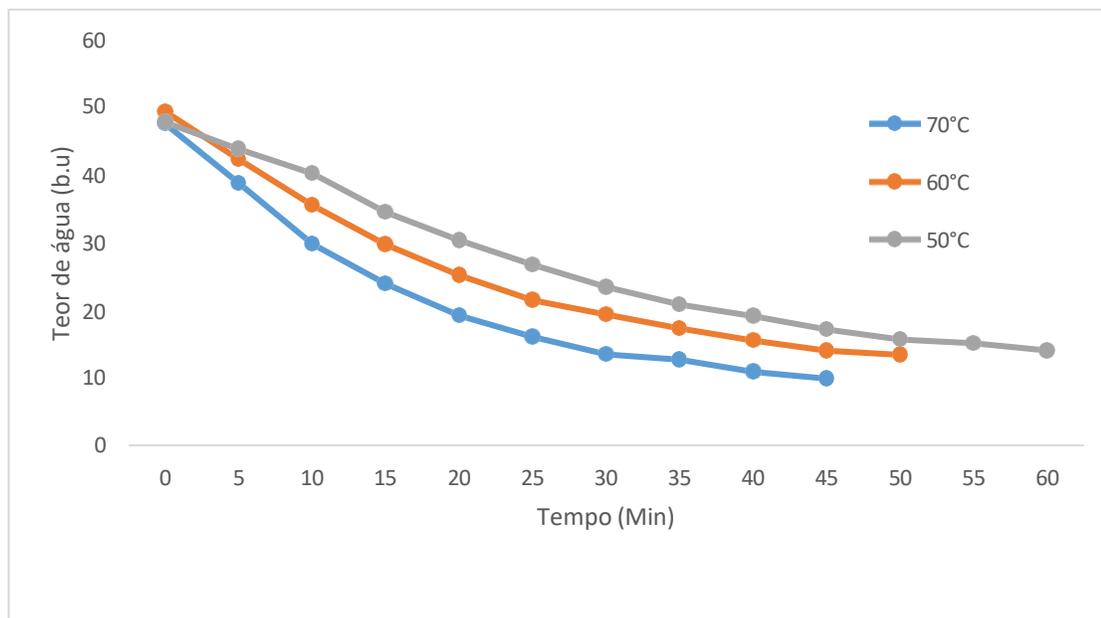
Figura 2- Valores médios dos tempos de secagens e teores de água de cascas de romã em forno de micro-ondas nas potências de 60, 80, 100%.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 2, observa-se os valores médios dos tempos de secagem e teores de água das cascas de romã submetidas ao processo de secagem em forno de micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%. O gráfico revela que as cascas secas alcançaram o ponto de equilíbrio em um intervalo de 14 a 16 minutos, indicando que a estabilização da massa ocorreu dentro desse período. Notavelmente, foi observado que a eficiência térmica não apresentou um aumento significativo quando se comparou as secagens a 100% de potência e a 60% de potência, especialmente nas cascas de romã, onde o tempo necessário para atingir a secagem adequada foi similar em ambas as potências. Ao final do processo, os valores de umidade residual (ubu) indicaram que a potência de 60% resultou em umidade de 7,40 bu enquanto que a potência máxima de 100% apresentou uma umidade residual de 9,15 bu. Estes resultados enfatizam a relevância de ajustar as potências de secagem, pois maximizam a eficiência energética e contribuem para a manutenção da qualidade do produto final, sugerindo que potências mais altas nem sempre resultam em uma secagem mais eficaz, especialmente para este tipo de material.

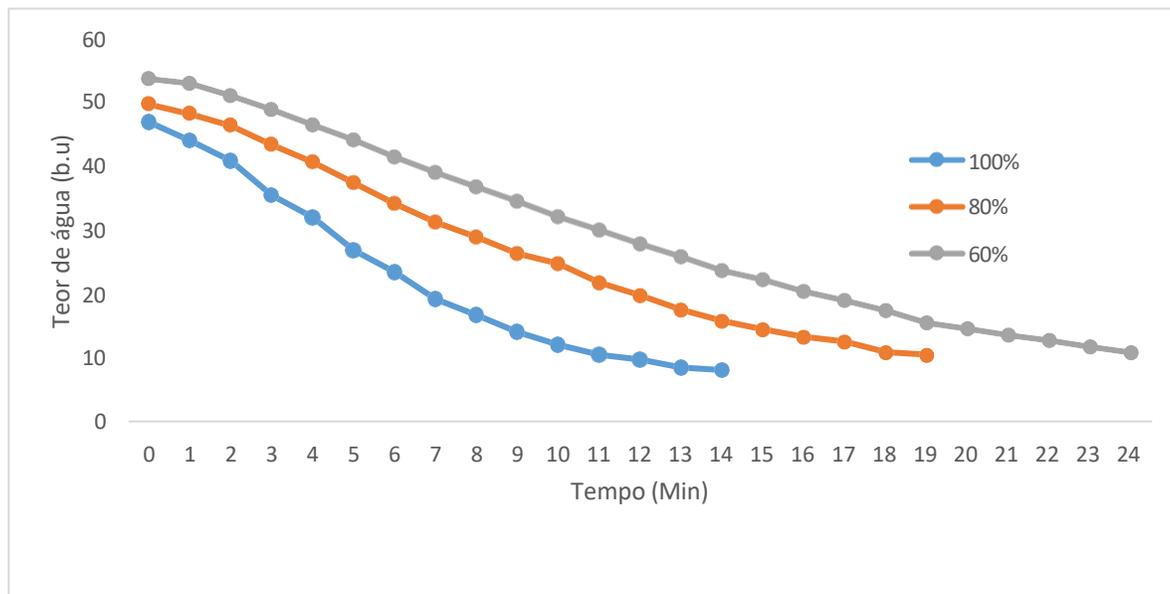
Figura 3- Valores médios dos tempos de secagens e teores de água de semente de romã em temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 3, o gráfico mostra que as sementes secas na estufa levaram de 45 a 60 minutos para alcançar estabilização da massa, momento em que a secagem foi considerada concluída. Indicando que o tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura. No final do processo de secagem, as temperaturas de 50 e 70°C resultaram em umidades residuais (ubu) de 9,85 a 14 bu, respectivamente. Esses resultados ressaltam a importância de otimizar as condições de secagem.

Figura 4- Valores médios dos tempos de secagens e teores de água de sementes de romã em potências de secagem de 60, 80 e 100% (780, 1040 e 1400W, respectivamente).



Fonte: Autor (2025)

A Figura 4 apresenta os valores médios dos tempos de secagem e os teores de água das sementes de romã submetidas ao processo de secagem em forno de micro-ondas, utilizando potências de 60, 80 e 100% (respectivamente correspondendo a 780, 1040 e 1400W). Os resultados indicam que o tempo necessário para que as sementes alcançassem a estabilização da massa variou de 14 a 24 minutos, tempo após o qual a secagem foi considerada concluída. A análise dos dados revela que o tempo de secagem tende a diminuir à medida que a potência de secagem aumenta. Ao final do processo, as umidades residuais (ubu) observadas variaram conforme a potência utilizada: para 60% de potência, a umidade residual foi de 8,03%, enquanto que para 100% foi de 10,86%. Esses resultados enfatizam a relevância de otimizar as condições de secagem, não apenas para maximizar a eficiência energética e reduzir o consumo, mas também para manter a qualidade do produto final.

3.2 CINÉTICA DE SECAGEM POR IRRADIAÇÃO (FORNO DE MICRO-ONDAS)

3.2.1- Casca da Romã

Na Tabela 2, estão apresentados os valores do coeficiente de determinação (R^2), do desvio quadrático médio (DQM) e do qui-quadrado (χ^2) para cada modelo matemático, nas três potências, empregado na adaptação dos dados da cinética de secagem por irradiação da casca da romã.

Tabela 2- Ajustes dos modelos matemáticos utilizados no processo de secagem da casca da romã por irradiação.

Modelo	Potência (%)	R^2	DQM	χ^2
Henderson e Pabis	60	0,99837	0,017314	0,000300
	80	0,99874	0,014105	0,000199
	100	0,99798	0,018577	0,000345
Logarítimo	60	0,99919	0,012225	0,000149
	80	0,99889	0,013225	0,000175
	100	0,99798	0,018538	0,000344
Dois termos	60	0,99837	0,017314	0,000300
	80	0,99874	0,014105	0,000199
	100	0,99798	0,018577	0,000345
Exponencial de dois termos	60	0,99939	0,010585	0,000112
	80	0,9989	0,013148	0,000173
	100	0,99789	0,018969	0,000360
Wang e Sing	60	0,99099	0,040623	0,001650
	80	0,95411	0,084104	0,007073
	100	0,9625	0,079245	0,006280
Henderson e Pabis modificado	60	0,99837	0,014823	0,000220
	80	0,99874	0,014039	0,000197
	100	0,99798	0,017961	0,000323
	60	0,99956	0,008786	7,72E-05

Midili <i>et al.</i>	80	0,99884	0,01329	0,000177
	100	0,99809	0,017803	0,000317
Aproximação da difusão	60	0,99965	0,008068	6,51E-05
	80	0,99872	0,014195	0,000201
	100	0,99784	0,019209	0,000369
Newton	60	0,99769	0,020597	0,000424
	80	0,99872	0,014195	0,000201
	100	0,9978	0,019357	0,000375
Page	60	0,99949	0,009661	9,33E-05
	80	0,99875	0,014059	0,000198
	100	0,99803	0,018323	0,000336
Thompson	60	0,99769	0,020601	0,000424
	80	0,99889	0,013243	0,000175
	100	0,9978	0,019358	0,000375
Verna	60	0,99907	0,013111	0,000172
	80	0,99872	0,014195	0,000201
	100	0,99784	0,019209	0,000369

Fonte: Autor (2025)

Dos parâmetros apresentados na Tabela 2, verifica-se que todos os modelos resultaram em R^2 superiores a 0,9 com baixos valores de DQM e χ^2 . Constatou-se que os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram mais baixos nos ensaios realizados com potências mais altas. Isso ocorre porque a maior potência causa maior variação nas condições do processo, resultando em maior dispersão dos dados experimentais e menor capacidade do modelo matemático de representar os dados. É possível verificar que o modelo matemático que melhor representou os dados experimentais da cinética de secagem para as três potências selecionadas foi o de Midili *et al.*. Esse modelo apresentou os maiores valores para o coeficiente de determinação (R^2), superior a 0,9; indicando o grau de capacidade de explicação dos dados coletados. Além disso, apresentou os menores valores do desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2), evidenciando que os dados possuem dispersão e divergência reduzidas em relação à distribuição esperada.

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros do modelo de Midili *et al.*, que foi ajustado aos dados experimentais da cinética de secagem da casca da romã por irradiação.

Tabela 3 - Parâmetros a, K, n e b obtidos no modelo de Midili *et al.* para a cinética de secagem por irradiação da casca da romã.

Parâmetros				
Potências (%)	a	K	n	b
60	1,008369	0,222474	1,096617	-0,000629
80	1,010201	0,322680	0,990142	0,000414
100	1,011119	0,341520	1,042847	0,000184

Fonte: Autor (2025)

A avaliação dos dados experimentais indicou que o coeficiente da taxa de secagem, representado pela constante "k", aumentou com o aumento da potência do forno de micro-ondas, sugerindo que o processo de secagem foi mais rápido à medida que os níveis de potência foram elevados. Isso é evidente na comparação entre diferentes potências 60 e 80% (780 e 1040 W, respectivamente), onde a potência superior resultou em uma diminuição mais rápida na taxa de umidade. Além disso, comparando os diferentes modelos de cinética de secagem, observou-se que o parâmetro "n", que caracteriza o formato da curva de secagem, variou significativamente entre os modelos e condições testadas. Esses resultados reforçam a adequação do modelo de Midili *et al.* como o mais apropriado para descrever a cinética de secagem da casca de romã, pois apresentou melhor ajuste aos dados experimentais em comparação com os outros modelos avaliados.

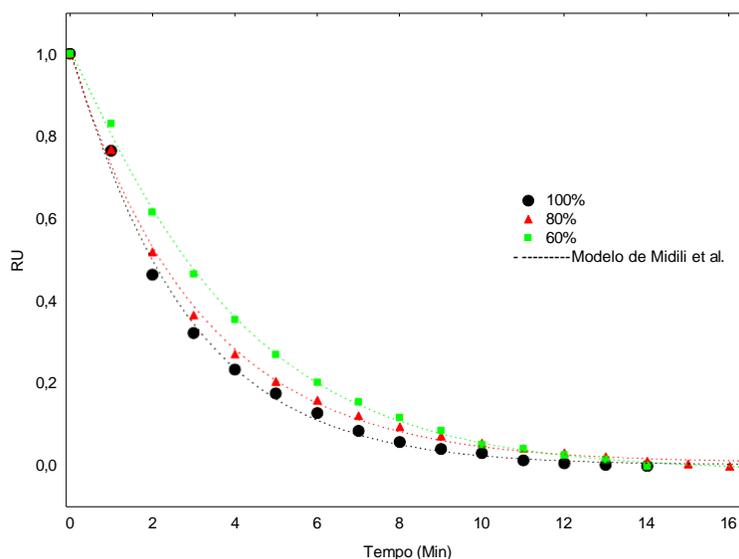
O parâmetro "a" aumentou com a elevação da potência do forno de micro-ondas. Fisicamente, "a" está relacionado à quantidade inicial de umidade na amostra que está prontamente disponível para ser removida durante a secagem. Isso sugere que uma maior potência facilita a remoção dessa umidade inicial de forma mais eficiente.

Observou-se também que o parâmetro "b" aumentou com a elevação da potência na faixa de 60 a 80%, mas apresentou um declínio na potência de 100%. O que pode estar

associado à taxa de remoção de umidade ligada mais firmemente à estrutura do material. A variação de "b" indica que há um ponto ótimo de potência (entre 60 e 80%) onde a remoção dessa umidade é maximizada, enquanto a potência máxima de 100% pode causar efeitos adversos, como superaquecimento ou mudanças na estrutura do material, reduzindo a eficiência de secagem.

A Figura 5 mostra as curvas cinéticas de secagem por irradiação da casca da romã para as potências de 60, 80 e 100% (correspondendo a 780, 1040 e 1300 W, respectivamente), com ajustes pelo modelo de Midilli *et al.*

Figura 5 - Valores experimentais da razão do teor de água estimados pelo modelo de Midilli *et al.* para a secagem por irradiação da casca da romã.



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 5, as curvas exibem uma maior inclinação à medida que a potência aumenta. A razão do teor de água cai rapidamente no início do processo e, em seguida, a redução se torna mais lenta à medida que o tempo de secagem avança. Segundo, Ge *et al.*, (2024) A transferência de calor ocorre muito mais rápido do que a de umidade, tornando a duração da secagem dependente principalmente da transferência de umidade. Enquanto o calor se transfere rapidamente, a difusão da umidade é mais lenta e demanda mais tempo. Elevar a temperatura do ar de ventilação pode acelerar a transferência de calor e favorecer a

difusão de umidade. Contudo, uma alta umidade relativa no ar de ventilação dificulta a remoção da umidade da superfície, prejudicando o processo de secagem.

Independentemente da potência aplicada. A influência das condições de secagem é evidente na redução progressiva dos tempos de secagem com a aplicação de potências mais altas. Além disso, nota-se que a curva de ajuste do modelo se aproxima dos dados experimentais para todas as potências analisadas. Para as potências de 80 e 100%, as curvas mostraram inclinações e tempos de secagem semelhantes, enquanto há um maior distanciamento na curva de 60%.

Com base na análise das curvas, foi selecionada a potência de 60% para a secagem da casca da romã, devido ao tempo reduzido de 12 minutos e ao menor impacto visual e degradação da amostra.

3.2.2 - Semente da Romã

A Tabela 4 mostra os valores do coeficiente de determinação (R^2), do desvio quadrático médio (DQM) e do qui-quadrado (χ^2) para cada modelo matemático usado para se ajustar os dados da cinética de secagem por irradiação da semente da romã.

Tabela 4 - Ajustes dos modelos matemáticos utilizados no processo de secagem da semente da romã por irradiação.

Modelo	Potência (%)	R^2	DQM	χ^2
Henderson e Pabis	60	0,99307	0,036905513	0,001362017
	80	0,98838	0,049159208	0,002417000
	100	0,98866	0,049195247	0,002420172
Logarítimo	60	0,99859	0,016665955	0,000277754
	80	0,99751	0,022824229	0,000520945
	100	0,99739	0,023660751	0,000559831
Dois termos	60	0,99307	0,036905513	0,001362017
	80	0,98838	0,049159208	0,002416628
	100	0,98866	0,049195247	0,002420172
	60	0,98836	0,04777198	0,002282162
	80	0,98193	0,061208313	0,003746458

Exponencial de dois termos	100	0,98454	0,057389073	0,003293506
Wang e Sing	60	0,99878	0,015524687	0,000241016
	80	0,99774	0,021747921	0,000472972
	100	0,9989	0,015377987	0,000236482
Henderson e Pabis modificado	60	0,99307	0,036905513	0,001362017
	80	0,98838	0,049159208	0,002416628
	100	0,98866	0,049195247	0,002420172
Midili <i>et al.</i>	60	0,99991	0,004314556	0,00001900
	80	0,99955	0,009681689	0,00009400
	100	0,99961	0,009121109	0,00008300
Aproximação da difusão	60	0,99934	0,011398844	0,000129934
	80	0,99878	0,015986436	0,000255566
	100	0,99855	0,017662067	0,000311949
Newton	60	0,98836	0,04777198	0,002282162
	80	0,98193	0,061208313	0,003746458
	100	0,98454	0,057389073	0,003293506
Page	60	0,99953	0,009655582	0,00009300
	80	0,9991	0,01372437	0,00018800
	100	0,99905	0,014290478	0,000204218
Thompson	60	0,98836	0,047776276	0,002282573
	80	0,98193	0,061212714	0,003746996
	100	0,98453	0,057396243	0,003294329
Verna	60	0,98836	0,04777198	0,002282162
	80	0,98193	0,061208313	0,003746458
	100	0,99855	0,017663025	0,000311982

Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 4, os ajustes dos modelos matemáticos utilizados no processo de secagem da semente da romã por irradiação apresentaram valores acima de 0,98 do coeficiente de determinação (R^2). O modelo de Midili *et al.*, apresentou os valores do (R^2), de um modo geral, maior em relação aos demais modelos, para todas as condições estudadas. Pode-se

observar, que os modelos se mostraram adequados na representação dos dados experimentais. Contudo, apenas o coeficiente de determinação (R^2) não é suficiente para explicar o ajuste dos modelos. Portanto, outras análises se fazem necessárias para identificar qual melhor modelo. No modelo de Midili *et al.* o DQM e X_2 são menores quando comparado aos demais modelos.

Na Tabela 5 têm-se parâmetros do modelo de Midili *et al.*, em que os valores estão ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem por irradiação da semente da romã.

Tabela 5 - Parâmetros a, K, n e b obtidos no modelo de Midili *et al.* para a cinética de secagem por irradiação da semente da romã.

Parâmetros				
Potências	a	K	n	b
60	1,009301	0,067882	1,246620	-0,001312
80	1,005785	0,063255	1,334876	-0,002095
100	0,995797	0,104280	1,339055	-0,002567

Fonte: Autor (2025)

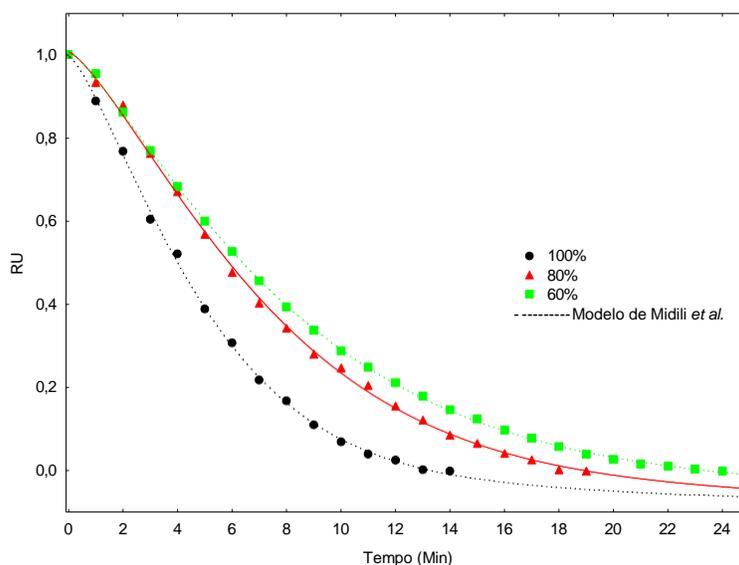
A análise das constantes do modelo mostrou que k e n variaram com a temperatura. Um valor elevado de "k" acelera o tempo necessário para secar as sementes de romã. Portanto, um valor mais alto de "k" é preferível, pois indica um processo de secagem mais eficiente. O parâmetro "n" representa o formato da curva de secagem, frequentemente chamado de fator de formato ou coeficiente de Page. Ele determina a rapidez com que a taxa de secagem diminui à medida que o teor de umidade do produto diminui. Quando "n" é maior que 1, isso indica uma taxa de secagem decrescente nos estágios finais da secagem (Kusuma *et al.*, 2023).

O parâmetro "a" representa o teor de umidade inicial do produto, ou seja, o teor de umidade presente no início do processo de secagem. Esse valor maior de "a" indica um teor de umidade inicial mais elevado do produto. Se o teor de umidade inicial for maior, mais umidade precisa ser removida durante o processo de secagem para atingir o teor de umidade

final desejado, o que significa que o processo pode ser mais demorado e consumir mais energia para remover essa umidade adicional.

A Figura 6 apresenta as curvas ajustadas com o modelo de Midili *et al.* aos dados experimentais da cinética de secagem da semente da romã nas potências de 60, 80 e 100 % (correspondendo a 780, 1040 e 1300 W, respectivamente), por irradiação.

Figura 6 - Valores experimentais da razão do teor de água estimados pelo modelo de Midili *et al.* para a secagem por irradiação da semente da romã.



Fonte: Autor (2025)

Os resultados dos experimentos de secagem de sementes de romã por irradiação revelaram variações na razão de umidade conforme os diferentes níveis de potência do micro-ondas e as massas das amostras. A perda de umidade acontece em diferentes fases: inicialmente, há uma rápida diminuição na taxa de umidade, seguida por uma aproximação mais lenta ao equilíbrio, o que sugere a remoção gradual da água ligada na amostra.

Os dados experimentais, ilustrados na Figura 3, mostram que a razão de umidade diminui mais rapidamente com potências mais altas de micro-ondas. Especificamente, a 100% (1300 W), o tempo necessário, de 14 min, para atingir o equilíbrio de umidade é significativamente menor em comparação as secagens a 1040 e 780 W, de 19 min e 24 min, respectivamente, utilizando a mesma massa nas amostras (10g) para as três potências. Esse fenômeno é explicado pela absorção aumentada de energia em potências mais elevadas de

micro-ondas, o que acelera a evaporação das moléculas de água presentes nas sementes de romã. Sendo assim, a potência a 1300 W mostrou-se mais eficaz para esse processo de secagem, conferindo um menor tempo e, conseqüentemente um consumo reduzido de energia.

Essas análises no estudo mostram a eficiência do uso de potências mais elevadas de micro-ondas para alcançar tempos de secagem mais curtos, o que é essencial para a otimização dos processos de secagem industrial. Uma comparação inversa entre a potência de micro-ondas e o tempo de secagem justifica a necessidade de ajustar os níveis de potência para atender a metas específicas de secagem.

3.3 CINÉTICA DE SECAGEM POR CONVECÇÃO (ESTUFA DE CIRCULAÇÃO DE AR)

3.3.1- Casca da Romã

A Tabela 6 apresenta os valores de coeficiente de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM) e qui-quadrado (χ^2) para cada modelo matemático empregado na adaptação dos dados da cinética de secagem por convecção em estufa de circulação de ar da casca da romã.

Tabela 6 - Ajustes dos modelos matemáticos utilizados no processo de secagem da casca da romã por convecção.

Modelo	Temperatura (°C)	R^2	DQM	χ^2
Henderson e Pabis	50	0,99954	0,010289	0,000106
	60	0,9996	0,009194	0,000085
	70	0,99906	0,014018	0,000197
Logarítimo	50	0,99956	0,010028	0,000101
	60	0,99974	0,007414	0,000055
	70	0,99935	0,011675	0,000136
Dois termos	50	0,99954	0,010289	0,000106
	60	0,9996	0,009194	0,000085

	70	0,99906	0,014018	0,000197
Exponencial de dois termos	50	0,99931	0,012586	0,000158
	60	0,99946	0,010647	0,000113
	70	0,99864	0,016843	0,000284
Wang e Sing	50	0,97385	0,076914	0,005916
	60	0,96854	0,080996	0,00656
	70	0,96859	0,080489	0,006479
Henderson e Pabis modificado	50	0,99954	0,010292	0,000106
	60	0,9996	0,009194	0,000085
	70	0,99906	0,01402	0,000197
Aproximação da difusão	50	0,99959	0,009729	0,000095
	60	0,99963	0,008892	0,000079
	70	0,99972	0,00761	0,000058
Midili <i>et al.</i>	50	0,99957	0,009912	0,000098
	60	0,99972	0,007743	0,000060
	70	0,99965	0,008571	0,000073
Newton	50	0,99938	0,011956	0,000143
	60	0,99952	0,010045	0,000101
	70	0,99874	0,016226	0,000263
Page	50	0,99954	0,010248	0,000105
	60	0,99964	0,00873	0,000076
	70	0,99961	0,009034	0,000082
Thompson	50	0,99938	0,011961	0,000143
	60	0,99952	0,010049	0,000101
	70	0,99874	0,016231	0,000263
Verna	50	0,99959	0,009729	0,000095
	60	0,99963	0,008882	0,000079
	70	0,99972	0,007623	0,000058

Fonte: Autor (2025)

Ao analisar os dados, o modelo selecionado com base no maior valor de coeficiente de determinação superior e nos menores valores de desvio quadrático médio e qui-quadrado

foi o de Verna. O resultado sugeriu que o modelo era apropriado para expressar a secagem convectiva da casca da romã

Na Tabela 7, tem-se parâmetros do modelo de Verna, em que os valores estão ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem por convecção em estufa de circulação de ar da casca da romã.

Tabela 7 - Parâmetros a, K e k1 obtidos no modelo de Verna para a cinética de secagem por convecção da casca da romã.

Parâmetros			
Temperaturas (°C)	a	K	k1
50	-0,020713	0,208923	0,008538
60	-0,013512	4,053696	0,011200
70	-5,05875	0,020223	0,018732

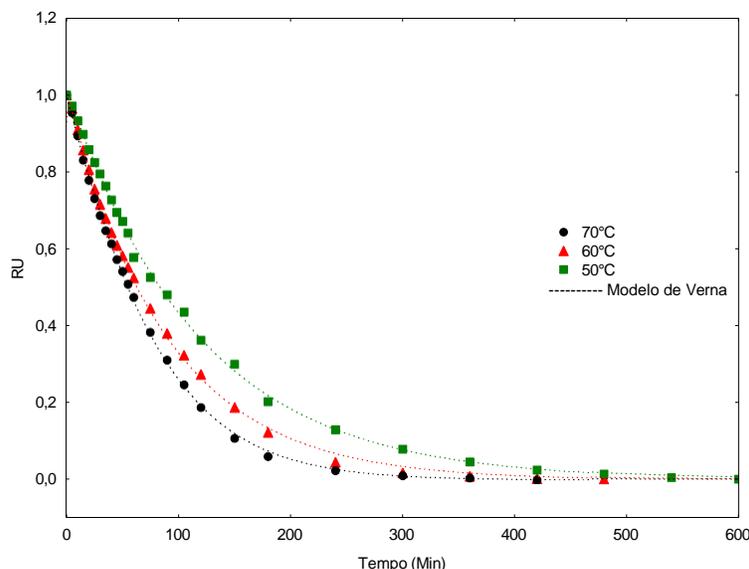
Fonte: Autor (2025)

A constante de secagem "k" apresentou um aumento entre 50 e 60 °C, sugerindo uma aceleração na taxa de secagem nessas faixas de temperatura. No entanto, a 70 °C, observou-se uma diminuição da constante de secagem, indicando uma redução na eficiência do processo à medida que a temperatura aumentava. O parâmetro "a", apresentou um comportamento aleatório, refletindo variações imprevisíveis que não seguem um padrão claro de alteração conforme as condições experimentais.

Foi observado que entre 50 e 60 °C houve um aumento no coeficiente de secagem k1, indicando que o processo de secagem se acelerou com o aumento da temperatura. A 70 °C, apresentou um valor ainda maior, sugerindo que a taxa de secagem continuou a aumentar, possivelmente devido à maior capacidade de evaporação da água em temperaturas elevadas. No entanto, esse aumento também pode indicar um potencial degradação ou alteração na estrutura do material a temperaturas mais altas, afetando a eficiência do processo de secagem.

A Figura 7 apresenta as curvas de secagem da casca da romã obtidas por convecção em estufa de circulação de ar e ajustadas pelo modelo de Verna nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Figura 7 - Valores experimentais da razão do teor de água estimados pelo modelo de Verna para a secagem por convecção da casca da romã.



Fonte: Autor (2025)

A análise dos resultados indica uma redução gradual do teor de água com o tempo, chegando a uma estabilização posteriormente. Pode-se observar que a secagem da casca da romã por convecção em estufa de circulação de ar obteve valores de razão de umidade bem próximos para as temperaturas de 60 e 70 °C. Dessa forma, visando otimizar tanto o tempo quanto o consumo de energia no processo de secagem, foi escolhido a temperatura de 60 °C como a melhor, alcançando um tempo de secagem de 370 min.

3.3.2 - Semente da Romã

A tabela 8 exibe os valores que se adequam à qualidade do ajuste para os três parâmetros estatísticos primários (R^2 , DQM e χ^2) entre os modelos examinados para

condições secagem convectiva em estufa. **Tabela 8** - Ajustes dos modelos matemáticos utilizados no processo de secagem da semente da romã por convecção.

Modelo	Temperatura (°C)	R ²	DQM	χ^2
Henderson e Pabis	50	0,99433	0,033863	0,001147
	60	0,99916	0,012705	0,000161
	70	0,99934	0,011413	0,000130
Logarítimo	50	0,99848	0,017552	0,000308
	60	0,99987	0,005069	0,000026
	70	0,99985	0,005511	0,000030
Dois termos	50	0,99433	0,033863	0,001147
	60	0,99916	0,012705	0,000161
	70	0,99934	0,011413	0,00013
Exponencial de dois termos	50	0,9927	0,038422	0,001476
	60	0,99898	0,013999	0,000196
	70	0,99926	0,012054	0,000145
Wang e Sing	50	0,99796	0,020313	0,000413
	60	0,9888	0,046208	0,002135
	70	0,98614	0,052148	0,002719
Henderson e Pabis modificado	50	0,99433	0,033863	0,001147
	60	0,99916	0,012705	0,000161
	70	0,99934	0,011413	0,00013
Aproximação da difusão	50	0,99921	0,012673	0,000161
	60	0,9997	0,00759	0,000058
	70	0,9998	0,006279	0,000039
Midili <i>et al.</i>	50	0,99954	0,009653	0,000093
	60	0,9999	0,004326	0,000019
	70	0,99991	0,004217	0,000018
Newton	50	0,99286	0,037997	0,001444
	60	0,99905	0,013474	0,000182

	70	0,99926	0,012054	0,000145
Page	50	0,99921	0,01263	0,000160
	60	0,99967	0,007911	0,000063
	70	0,9998	0,006348	0,000040
Thompson	50	0,99286	0,038001	0,001444
	60	0,99905	0,013478	0,000182
	70	0,99926	0,012058	0,000145
Verna	50	0,99921	0,012676	0,000161
	60	0,9997	0,007591	0,000058
	70	0,99926	0,012054	0,000145

Fonte: Autor (2025)

O valor de R^2 de todos os modelos estiveram acima de 0,9, indicando assim que todos puderam prever as características de secagem da semente de romã. O modelo de Midili *et al.* foi ideal para estudar o comportamento de secagem da semente de romã sob as condições aplicadas, obtendo o melhor ajuste aos dados experimentais com os maiores valores para R^2 e menores valores para DQM e χ^2 .

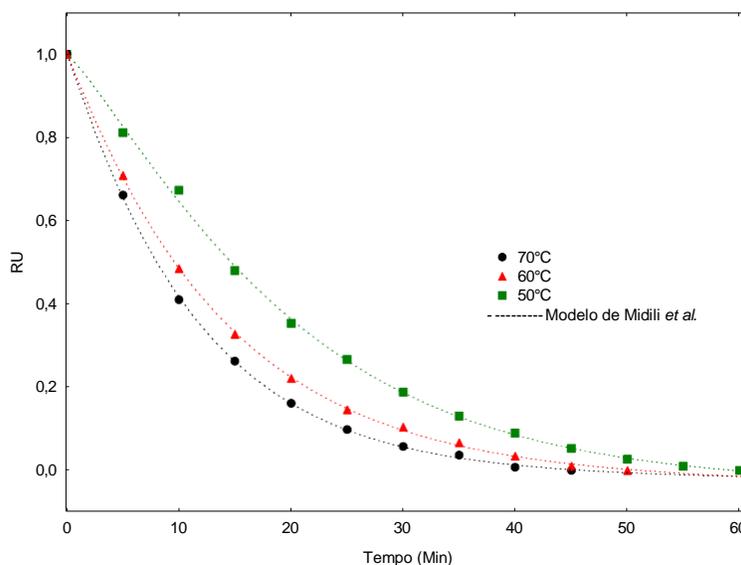
Tabela 9 - Parâmetros a, K, n e b obtidos no modelo de Midili *et al.* para a cinética de secagem por convecção da semente da romã.

Parâmetros				
Temperaturas	a	K	n	b
50	0,997069	0,026632	1,205625	-0,000428
60	1,001209	0,066707	1,030350	-0,000419
70	1,000999	0,078388	1,044120	-0,000301

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 9 mostra as constantes de secagem (k) e (b), bem como os coeficientes do modelo (a) e (n) e variáveis estatísticas de qualidade de ajuste. A constante de secagem (k) do modelo de Midilli *et al.* aumentou com o aumento dos níveis de radiação térmica.

Figura 8 - Valores experimentais da razão do teor de água estimados pelo modelo de Midili *et al.* para a secagem por convecção da semente da romã.



Fonte: Autor (2025)

A Figura 8 exibe o gráfico da evolução dos impactos convectivos na taxa de umidade das amostras. Observa-se que as amostras secas em estufa mostraram uma tendência de perda de umidade de forma decrescente com o aumento do tempo de secagem. Adicionalmente, o aumento da temperatura provocou uma diminuição no tempo necessário para a secagem. Portanto, tempo e temperatura tiveram influência significativa nas amostras secas em estufa, pois o mecanismo de remoção de umidade está associado a uma taxa de secagem mais elevada em função do fluxo de convecção. Ao analisar a cinética de secagem, foi designada a temperatura de 70 °C como a ideal, com um tempo de secagem de 45 min.

3.4 DIFUSIVIDADES EFETIVAS (D_{ef}) E COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2)

As Tabelas 10 e 11 apresentam as difusividades efetivas (D_{ef}) médias e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem para a casca e a semente da romã, respectivamente, utilizando dois métodos distintos: secagem por convecção em estufa de circulação de ar e secagem por irradiação em forno micro-ondas.

Tabela 10 - Difusividades efetivas (D_{ef}) médias e coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem da casca da romã por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	Temperatura (°C) / Potência (%)	D_{ef} (m ² /s)	R^2
Casca da Romã em Estufa	50	1,18E-10	0,8347
	60	2,97E-11	0,9846
	70	3,56E-11	0,9815
Casca da Romã em FMO	60	8,11E-10	0,9814
	80	9,69E-10	0,9921
	100	1,11E-09	0,9874

Fonte: Autor (2025)

Os valores de difusividade efetiva de umidade para a casca da romã foram calculados utilizando a equação (18). As amostras secas em estufa a temperaturas entre 50, 60, 70 °C apresentaram valores de D_{ef} variando de $1,18 \times 10^{-10}$ a $2,97 \times 10^{-11}$ m²/s e em forno micro-ondas a potências de 60-100% entre $8,11 \times 10^{-10}$ a $1,11 \times 10^{-09}$ m²/s. Tais valores encontrados estão dentro da faixa geral que variam de 10^{-8} a 10^{-12} m²/s para secagem de materiais alimentícios e agrícolas, conforme (Zogzas *et al.*, 1996)

Foi observado que a difusividade efetiva de umidade diminui com o aumento do teor de umidade, o que pode ser explicado pelas variações na cinética que impulsionam o movimento da umidade durante as secagens. No processo de secagem em estufa, as cascas de romã sofrem uma rápida redução de umidade por meio da difusão de líquido. Estes resultados confirmam uma ligação direta entre difusividade e a temperatura, indicando que o aumento da temperatura do ar resulta em um aumento de D_{ef} e uma redução no tempo de secagem. O mesmo ocorre para a secagem em forno micro-ondas, em que o fenômeno de cavitação provocado pela irradiação pode aumentar ainda mais essa pressão de vapor. Com isso, observou-se um aumento nos valores de D_{ef} com o aumento do teor de umidade, que diminui à medida que este é reduzido.

Tabela 11 - Difusividades efetivas (D_{ef}) médias e coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem da semente da romã por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	Temperatura (°C) / Potência (%)	D_{ef} (m ² /s)	R^2
Semente da	50	3,12E-09	0,9719
Romã em	60	4,42E-09	0,9877
Estufa	70	5,32E-09	0,9883
Semente da	60	7,22E-09	0,9610
Romã em	80	7,95-E09	0,9499
Estufa	100	1,19E-08	0,9575

Fonte: Autor (2024)

Nota-se que os valores de difusividade efetiva aumentaram linearmente com o aumento da temperatura do ar de secagem em estufa, variando de $3,12 \times 10^{-09}$ a $5,32 \times 10^{-09}$ m²/s para temperaturas de 50 a 70 °C, respectivamente. A explicação para isso é que a temperatura afeta a capacidade das moléculas de água de se moverem e evaporarem em um produto. Em temperaturas mais baixas, a resistência interna à difusão de água é maior, dificultando a evaporação. Em temperaturas mais altas, essa resistência é menor, facilitando a difusão e aumentando o valor de D_{ef} .

As Tabelas 12 e 13 apresentam a energia de ativação (E_a) e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem da casca e da semente da romã, respectivamente, tanto por convecção em estufa de circulação de ar quanto por irradiação em forno micro-ondas. A secagem por convecção foi realizada nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, enquanto para a secagem por micro-ondas as potências utilizadas foram 60, 80 e 100%. A energia de ativação (E_a) é um parâmetro importante que descreve a sensibilidade da taxa de secagem às variações de temperatura, sendo fundamental para a compreensão do mecanismo de secagem.

Tabela 12 – Energia de ativação (E_a) e coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem da casca da romã por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	E_a (kJ/mol)	R^2
Casca da Romã em Estufa	56,10	0,66
Casca da Romã em FMO	8,10	0,99

Fonte: Autor (2025)

Para a Energia de Ativação Zogzas *et al.*, (1996) ressaltaram que para produtos agrícolas os valores variam entre 12,7 a 110 kJ.mol⁻¹, confirmando assim que o resultado encontrado no presente estudo é satisfatório para estufa, de 56,10 kJ.mol⁻¹. Valor próximo, de 56,78 kJ/mol, foi encontrado por Animashaun *et al.*, (2024) em seus estudos sobre as variedades de tomate em forno de micro-ondas.

Durante o processo de secagem, valores mais baixos de E_a estão associados a uma maior difusividade da umidade (Mabasso *et al.*, 2024). Tal afirmação justifica o baixo valor da E_a encontrado para a casca de romã em forno de micro-ondas, que está relacionado à eficiente remoção de água proporcionada por esse método de secagem. Essa eficiência se deve à rápida penetração de energia nas camadas internas do material, resultando em uma desidratação uniforme e acelerada, o que favorece a alta difusividade da umidade e, conseqüentemente, reduz a energia de ativação necessária para o processo.

Tabela 13 – Energia de ativação (E_a) e coeficientes de determinação (R^2) obtidos na secagem da semente da romã por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	E_a (kJ/mol)	R^2
Semente da Romã em Estufa	24,58	0,98

Semente da Romã em FMO	12,7	0,99
---------------------------	------	------

Fonte: Autor (2025)

A energia de ativação (E_a) foi encontrado valores de 24,58 e 12,7 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para sementes de romã sob os vários parâmetros do processo de secagem investigados. Esses valores indicam a quantidade de energia necessária para iniciar o processo de remoção de água das sementes durante a secagem. Valores de E_a mais altos, como 24,58 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, podem estar associados a condições de secagem que requerem maior esforço energético, talvez devido a temperaturas mais baixas ou a menores taxas de fluxo de ar, enquanto valores mais baixos, como 12,7 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, sugerem que as condições foram mais favoráveis para a secagem, possivelmente em temperaturas mais altas ou com maior eficiência de remoção de umidade.

A Tabela 14 e 15 apresentam as propriedades termodinâmicas da casca e da semente da romã, respectivamente, obtidas por meio de dois métodos de secagem distintos: secagem por convecção em estufa de circulação de ar e secagem por irradiação em forno micro-ondas. Para a secagem por convecção, as temperaturas utilizadas foram 50, 60 e 70 °C. Já para a secagem por irradiação em micro-ondas, as potências aplicadas foram 60, 80 e 100%. As propriedades termodinâmicas avaliadas incluem entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Estes parâmetros são fundamentais para entender o comportamento da casca e da semente da romã durante o processo de secagem, bem como para otimizar as condições de secagem visando a conservação das propriedades nutricionais e funcionais do fruto.

Tabela 14 - Propriedades termodinâmicas da casca da romã obtidos na secagem por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	Temperatura	ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/mol/K)	ΔG (kJ/mol)
	(°C) / Potência (%)			
Casca da romã em estufa	50°C	53,4096	-0,43562	194,1818
	60°C	53,3264	-0,44736	202,3643
	70°C	53,2433	-0,44612	206,3277

Casca da	60%	5,3261	-0,41987	145,2070
romã em	80%	5,1598	-0,41888	153,0875
FMO	100%	4,9936	-0,41822	161,0506

Fonte: Autor (2025)

Os valores demonstram que a entalpia (ΔH) ocorre de forma inversamente proporcional às temperaturas e potências, diminuindo à medida que essas aumentam. Isso pode ser atribuído a mudanças nas forças de ligação entre a água e o produto. A entropia (ΔS) comportou-se de forma semelhante à entalpia, apresentando valores reduzidos com o aumento das temperaturas e das potências. O aumento da temperatura provoca vibração, rotação e movimento das moléculas de água, aumentando a difusividade e, conseqüentemente, diminuindo a entropia do processo, já que ocorre menor heterogeneidade molecular. O aumento da temperatura resulta em uma redução na variação de entropia da amostra devido à diminuição do teor de água durante a secagem, o que também dificulta a movimentação das moléculas de água dentro do produto. Valores negativos de variação de entropia indicam uma transformação exotérmica, ou seja, um processo que libera calor (Esmero *et al.*, 2025).

Para a energia de Gibbs livre investigada neste estudo, observou-se que foi positiva e aumentou nos dois métodos de secagem. A energia livre de Gibbs está ligada ao trabalho necessário para tornar os sítios de sorção disponíveis. Um valor positivo indica uma reação endergônica, implicando que energia adicional do ambiente é necessária para secar o produto. Essa tendência é esperada, porque esses valores resultam da não espontaneidade de processos (a pressão e temperatura constantes) que necessitam de aporte energético (processos endergônicos) (Souza *et al.*, 2019).

Tabela 15 - Propriedades termodinâmicas da semente da romã obtidos na secagem por convecção em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na secagem por irradiação em forno micro-ondas nas potências de 60, 80 e 100%.

Amostra	Temperatura (°C) / Potência (%)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/mol/K)	ΔG (kJ/mol)
Semente da romã em estufa	50	21,8995	-0,40841	153,8767
	60	21,8164	-0,40577	157,0003
	70	21,7333	-0,40449	160,5324
Semente da romã em FMO	60	9,9402	-0,4017	143,7654
	80	9,7739	-0,4014	151,5220
	100	9,6076	-0,3985	158,3069

Fonte: Autor (2025)

Para as entalpias referentes à secagem das sementes de romã, houve uma diminuição à medida que a temperatura do ar de secagem aumentou, indicando que é necessária uma menor quantidade de energia para realizar a secagem em condições de temperaturas elevadas.

Comportamento contrário é observado para a entropia em termos absolutos, onde são registrados menores valores absolutos em altas temperaturas. A tendência e os valores negativos observados para a entropia resultam em uma maior excitação das moléculas de água em condições de temperaturas elevadas.

Quando a entalpia diminui com o aumento da temperatura e a entropia aumenta, o sistema libera calor e a desordem molecular cresce. Isso indica um processo espontâneo e energeticamente favorável, como em reações exotérmicas. Em secagem, esse comportamento facilita a remoção de água, tornando a secagem mais eficiente a temperaturas elevadas.

Foi observado uma tendência crescente com o aumento da temperatura do ar de secagem nos valores da energia livre de Gibbs. Mabasso *et al.*, (2024) sugere que esse desempenho no processo de secagem não ocorreu espontaneamente, mas sim devido à diferença de pressão parcial do vapor de água causada pelo aquecimento do ar, o que força a saída da água do produto por meio do processo simultâneo de troca gasosa entre o produto e o ar circundante.

CONCLUSÃO

Os doze modelos aplicados proporcionaram bons ajustes aos dados de secagem das cascas e sementes de romã, com destaque para os modelos Midili *et al.* e Verna. As condições escolhidas ideais para a secagem em estufa foram 60 °C por 370 min para casca e 70°C por 45min para semente, e em FMO, 60% (780W) por 12 min para casca e 100% (1300W) por 14 min para semente.

O forno micro-ondas (FMO) apresentou uma secagem mais rápida e direta, com um equipamento mais acessível à população e com possibilidade de reprodução do processo. Portanto, a secagem da romã pelo método de irradiação, utilizando forno de micro-ondas, apresenta potencial para futuros trabalhos na elaboração de produtos alimentícios.

As difusividades efetivas das cascas e sementes aumentaram com o aumento da temperatura e da potência. A entalpia (ΔH) e a entropia (ΔS) foram inversamente proporcionais à temperatura e a potência, e a energia livre de Gibbs (ΔG) foi positiva, e aumentou com a temperatura e potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ANIMASHAUN, O. H.; SOBOWALE, S. S. Microwave exposure of tomato varieties before catalytic oven drying and its effect on physicochemical and bioactive components studied by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Food and Humanity**, v. 2, p. 100197, 1 maio 2024.

ARSLAN, A.; ALIBAŞ, İ. Assessing the effects of different drying methods and minimal processing on the sustainability of the organic food quality. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 94, p. 103681, 1 jun. 2024.

ATIA, A.; TEGGAR, M.; LAOUER, A. Performance of various solar dryer types integrating latent heat storage for drying agricultural products: An up-to-date review. **Journal of Energy Storage**, v. 102, p. 114048, 15 nov. 2024.

ESMERO, J. A. D.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; QUEIROZ, A. J. DE M.; PAIVA, Y. F.; MOURA, H. V.; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, L. P. F. R. DA; MATOS, J. D. P. DE; MORAES, M. S. DE; GONDIM, C. DE M.; GOMES, J. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of trapiá pulp[Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas da polpa de trapiá]. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 2, p. e279382, 1 jan. 2025.

KUSUMA, H. S.; IZZAH, D. N.; LINGGAJATI, I. W. L. Microwave-assisted drying of *Ocimum sanctum* leaves: Analysis of moisture content, drying kinetic model, and technoeconomics. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100337, 1 dez. 2023.

KUSUMA, H. S.; NASUTION, R. A.; PERMATASARI, D. Drying process on kaffir lime leaves using microwave: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different microwave powers and sizes of leaves. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100317, 1 dez. 2023.

LING, W.; XING, Y.; HONG, C.; ZHANG, B.; HU, J.; ZHAO, C.; WANG, Y.; FENG, L. Methods, mechanisms, models and tail gas emissions of convective drying in sludge: A review. **Science of The Total Environment**, v. 845, p. 157376, 1 nov. 2022.

MABASSO, G. A.; CABRAL, J. C. O.; BARBOSA, K. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. DE; ALMEIDA, A. B. DE. Drying kinetics, thermodynamic properties and physicochemical characteristics of Rue leaves. **Scientific Reports 2024 14:1**, v. 14, n. 1, p. 1–14, 24 jun. 2024.

OZAY-ARANCIOGLU, I.; BEKIROGLU, H.; KARADAG, A.; SAROGLU, O.; TEKIN-ÇAKMAK, Z. H.; KARASU, S. Effect of different drying methods on the bioactive, microstructural, and in-vitro bioaccessibility of bioactive compounds of the pomegranate arils. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e06221, 3 maio 2021.

SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J.; SILVA, G. M. DA; MONTEIRO, S. S.; ANDRÉ, A. M. M. C. N. Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties

of guava slices drying process. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 66, p. 102507, 1 dez. 2020.

SILVA, Á. G. F. DA; BEZERRA DA COSTA, F.; MARINHO DO NASCIMENTO, A.; BARROS SALES, G. N.; LEITE DA SILVA, J.; MARIA DE SOUSA SILVA NETA, A.; RIBEIRO, W. S.; IARLEY DA SILVA, T.; FEITOSA, B. F. Spondias purpurea L. (Anacardiaceae) fruits flours at different maturation stages: Drying kinetics, mathematical modelling, characterization and correlation analysis. **Heliyon**, v. 11, n. 2, p. e41832, 30 jan. 2025.

SOUZA, J. L. F.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; EGEEA, M. B.; CALIARI, M.; SILVA, M. A. P. DA. Thermodynamic and nutritional properties and drying kinetics of pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) mesocarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 655–661, 12 ago. 2019.

ZHAO, B.; ZHANG, C.; GUO, T.; WEI, Y. Punica granatum L. polysaccharides: A review on extraction, structural characteristics and bioactivities. **Carbohydrate Research**, v. 544, p. 109246, 1 out. 2024.

**ARTIGO 2 –ANALISES FISICO-QUIMICAS DAS FARINHAS DA CASCA E DA
SEMENTE DE ROMÃ UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM**

RESUMO

Punica granatum L., ou romã, é conhecida por seus benefícios à saúde, principalmente pelas propriedades antioxidantes. Um desafio atual é reduzir o desperdício de alimentos e aproveitar resíduos agroindustriais. Nesse contexto, os resíduos da romã têm potencial para gerar subprodutos valiosos, sendo ricos em proteínas. A farinha obtida desses resíduos pode ser utilizada na produção de alimentos funcionais. O objetivo deste trabalho foi avaliar as características físicas e físico-químicas dos produtos farináceos e do fruto in natura. Foram analisados amostra aleatória de 55 frutos, sendo mensurados: comprimento, largura, e peso integral do fruto, e depois dos frutos descascados, foram analisadas as cascas e sementes de forma individual. Quanto as farinhas, os resultados obtidos indicam que os diferentes métodos de secagem, utilizando estufa e forno de micro-ondas (FMO), têm impactos significativos nas características físico-químicas das cascas e sementes de romã. Ambos os métodos de secagem resultaram em alterações nas propriedades como teor de água, pH, acidez titulável, sólidos solúveis totais e concentração de proteínas. No entanto, as variações observadas entre os dois métodos foram mínimas, sugerindo que tanto a estufa quanto o FMO são eficazes para a secagem das cascas e sementes de romã, mantendo suas principais características físico-química.

Palavras-chave: Alimentos funcionais; análise físico-química, *Punica granatum* L.

ABSTRACT

Punica granatum L., or pomegranate, is known for its health benefits, mainly due to its antioxidant properties. A current challenge is to reduce food waste and take advantage of agro-industrial waste. In this context, pomegranate waste has the potential to generate valuable by-products, being rich in proteins. The flour obtained from this waste can be used in the production of functional foods. The objective of this study was to evaluate the physical and physicochemical characteristics of flour products and the fresh fruit. A random sample of 55 fruits was analyzed, measuring the length, width, and total weight of the fruit. After peeling the fruits, the peels and seeds were analyzed individually. Regarding the flours, the results obtained indicate that the different drying methods, using an oven and microwave oven (MWO), have significant impacts on the physicochemical characteristics of pomegranate peels and seeds. Both drying methods resulted in changes in properties such as water content, pH, titratable acidity, total soluble solids, and protein concentration. However, the variations observed between the two methods were minimal, suggesting that both the oven and FMO are effective for drying pomegranate peels and seeds, maintaining their main physicochemical characteristics.

Keywords: Functional foods; physical-chemical analysis, *Punica granatum* L.

1. INTRODUÇÃO

A romãzeira de nome científico *Punica granatum* L., pertence à família das punicáceas e é uma importante cultura hortícola. É rica em polifenóis, minerais e açúcares. Os polifenóis, principais fitoquímicos da planta, apresenta taninos hidrolisáveis (elagitaninos, galotaninos), taninos condensados (proantocianidinas) e flavonoides (flavonóis, antocianinas). Diferentes partes da planta, como suco, folhas, óleo de sementes, casca e flores, possuem compostos bioativos, como ácido ascórbico, antocianinas, ácido elágico, ferro e taninos. As folhas contêm punicafolina, punicalina e flavonoides como apigenina e luteolina (Mahmood *et al.*, 2021).

Na atualidade os consumidores estão cada vez mais buscando alimentos benéficos para a saúde. As frutas ricas em compostos bioativos e polifenóis são muito apreciadas por esse público, sendo utilizadas em suas dietas. Esse potencial das frutas como fontes de substâncias benéficas tem despertado o interesse da indústria alimentícia, que busca aproveitar essas propriedades no desenvolvimento de novos alimentos funcionais e produtos nutracêuticos, visando atender à demanda por opções mais saudáveis e voltadas ao bem-estar. (Cortina *et al.*, 2025).

Uma das formas de implementar alimentos funcionais na dieta é o uso de farinhas não convencionais, que são produtos em pó obtidos de fontes distintas dos cereais tradicionais, como trigo, milho ou arroz. Para fabricação de farinhas são utilizadas sementes, grãos, leguminosas, tubérculos, outras fontes vegetais como resíduos agroindustriais e até mesmo insetos. Elas representam alternativas versáteis na produção de alimentos, permitindo diversificar os ingredientes, aprimorar o valor nutricional e atender às necessidades de dietas específicas. Além disso, essas farinhas apresentam perfis distintos de sabor, texturas e propriedades nutricionais, oferecendo características únicas em comparação às farinhas convencionais. Essa forma de obtenção de produtos farináceos contribui não apenas para a inovação na formulação de alimentos, mas também para o desenvolvimento de produtos mais saudáveis e alinhados às tendências alimentares globais. (Díaz *et al.*, 2024)

O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar os resíduos *in natura* com farinhas elaboradas a partir de suas cascas e sementes, utilizando diferentes métodos de secagem: convecção via estufa de circulação e renovação de ar e irradiação por forno de micro-ondas. Para isso, foram determinadas as características físico-químicas da romã *in natura*, bem como

das farinhas produzidas a partir de suas cascas e sementes. Além disso, o estudo analisou a viabilidade dos diferentes métodos de secagem na produção de farinhas, considerando sua eficiência e impacto nas propriedades do material final.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Bioprocessos (LabBio) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), parte do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no campus de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

2.1 SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

As romãs foram colhidas em Princesa Isabel, PB, e transportadas em bolsas de papelão à temperatura ambiente até o laboratório de Bioprocessos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

No laboratório, as frutas foram lavadas em água corrente e desinfetadas com uma solução clorada de 200 ppm. Em seguida, foram descascadas manualmente, e as sementes tiveram a polpa removida manualmente com o auxílio de um pano para retirar toda a película.

2.2 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA

Para a avaliação biométrica, obteve-se uma amostra aleatória de 55 frutos, sendo mensurados: comprimento, largura, e peso individual do fruto; e depois do processo dos cortes, o peso individual das cascas, sementes e polpa. Nas avaliações das características de dimensões, foi utilizado um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm (Western® PRO DC-6), e o peso com uso de balança digital de bancada com precisão de 0,001 g (SHIMADZU®, modelo AY220).

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS E PRODUTOS FARINÁCEOS

Os resíduos *in natura* e os produtos farináceos foram submetidos à caracterização em triplicata, com o intuito de avaliar os parâmetros físico-químicos. O teor de água (TA) foi determinado pelo método gravimétrico após secagem em estufa de secagem a 105 °C, até massa constante, de acordo com metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Os sólidos solúveis totais (SST) foram determinados através da refratometria na escala °Brix. As leituras do °Brix foram realizadas utilizando o refratômetro digital (IAL, 2008). O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado através de medidas potenciométricas do líquido sobrenadante, em peagâmetro (IAL, 2008). A determinação do percentual do resíduo mineral fixo (RMF) ou cinzas foi realizada por incineração em forno mufla a 550 °C, até total queima da matéria orgânica, conforme metodologia descrita em IAL (2008). O método Kjeldahl (TEDESCO *et al.*, 1995) foi utilizado para determinação de proteína bruta (PB) das amostras *in natura* e do produto farináceo, e o fator de conversão utilizado foi de 1,005. A acidez total foi determinada através do método acidimétrico descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL,2008), usando solução de hidróxido de sódio 0,1M, com os resultados expressos em porcentagem de ácido cítrico. Para análise de cor foram analisados os parâmetros de cor foram determinados em espectrofotômetro portátil (FRU, WR 10QC, China) por leitura direta no sistema de cor CIELAB. Com as coordenadas L* (luminosidade); a*(transição da cor verde (-a*) para vermelho (+a*)); e b* (transição da cor azul (-b*) para a cor amarela (+b*)). Com os resultados de a* e b* será calculado os valores de croma (C*) (Equação 1), que representa a saturação ou intensidade de cor da amostra, sendo 0 = cor impura e 60 = para cor pura, e o ângulo de tonalidade (h°) (Equação 2).

$$C = \sqrt{(a')^2 + (b')^2} \quad (1)$$

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO BIOMÉTRICA DO FRUTO DA ROMÃ

A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização física do fruto da romã *in natura*, destacando parâmetros fundamentais para a análise biométrica. Os dados incluem a massa total da romã, sua largura e comprimento, proporcionando uma visão detalhada das dimensões e variabilidade dos frutos utilizados nas análises.

Tabela 1 - Caracterização biométrica do fruto da romã *in natura*.

Características	Valor	Valor	Média *
	Mínimo	Máximo	
Massa (g)	211,19	234,75	224,57±5,96
Largura (mm)	76,8	80,9	79,8±0,81
Comprimento (mm)	62,55	79,07	74,45±2,90
Massa da casca (g)	63,5	69,5	66,5±1,49
Massa da semente (g)	21,74	28,9	27,18±1,39
Massa da polpa (g)	117,83	137,5	130,75±3,86

*Desvio padrão

Fonte: Autor (2025)

Na Tabela 1, uma análise detalhada das massas das diferentes partes constituintes da romã *in natura*: cascas, sementes e polpa e do fruto integral.

Esses resultados fornecem uma base sólida para a caracterização física da romã, sendo necessários para qualquer estudo subsequente que envolva a qualidade e o processamento do fruto. A uniformidade relativa das medidas facilita a padronização dos métodos analíticos e garante que os resultados sejam representativos da amostra de romãs *in natura*.

Os valores apresentados na Tabela 1 oferecem uma visão detalhada e quantificada das partes componentes da romã, fornecendo dados importantes que podem ser utilizados para diversas finalidades industriais e científicas. A compreensão dessas massas é fundamental

para a otimização de processos de extração, formulação de produtos e aproveitamento integral do fruto

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SEMENTES E CASCAS DE ROMÃ

A Tabela 2 apresenta a composição físico-química das cascas da romã *in natura* e dos produtos farináceos obtidos por meio da secagem por convecção em estufa a 60 °C e 370 min e por irradiação utilizando um FMO com potência de 60% e 12 min. É possível analisar a influência dos dois métodos de secagem empregados nas cascas da romã em relação aos parâmetros estudados.

Tabela 2 - Parâmetros físico-químicos das cascas da romã *in natura* e dos produtos farináceos obtidos pelos diferentes métodos de secagem

Parâmetros	Casca	Farinha	
	<i>In natura</i>	Estufa	FMO
Teor de água (%)	58,86 ± 0,62 ^a	9,97 ± 0,04 ^c	9,81 ± 0,03 ^b
pH	3,91 ^a	3,76 ^b	3,80 ^b
Acidez titulável (% ac. cítrico) (bs)	4,94 ± 0,71 ^a	8,34 ± 0,15 ^c	7,25 ± 0,07 ^b
Sólidos solúveis totais (°Brix) (bs)	35,25 ± 1,22 ^a	20,92 ± 0,32 ^b	21,25 ± 0,64 ^b
Proteína Bruta (%) (bs)	-	3,71 ± 0,01 ^a	3,99 ± 0,24 ^a
Resíduo mineral fixo (%) (bs)	-	2,61 ± 0,06 ^a	2,49 ± 0,07 ^a

* Os valores são médias ± desvio padrão; Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas (P < 0,05) usando o teste HSD (diferença honestamente significativa) de Tukey.

Fonte: Autor (2025)

O teor de água é um parâmetro fundamental que afeta a estabilidade e a conservação dos produtos. Para a casca de romã *in natura* foi de aproximadamente 60%, indicando alta umidade; enquanto o das farinhas obtidas por secagem convectiva e por secagem por irradiação de micro-ondas foi de cerca de 10%, resultando em uma redução significativa. A ANVISA, através da portaria 354/1996, estabelece que o teor de água das farinhas não deve ultrapassar 15% (BRASIL, 1996). Confirmando que as farinhas estão dentro dos parâmetros previstos. É possível observar que as farinhas produzidas pelo método convectivo utilizando

estufa e por irradiação usando forno de micro-ondas apresentaram bons resultados de perda de água através dos processos de secagem utilizados. Com isso, constata-se que ambos os métodos de secagem empregados resultaram em farinhas com teor de água conforme os parâmetros estabelecidos.

Segundo Souza *et al.* (2008), o pH é um fator importante para limitar a capacidade de desenvolver microrganismos no alimento. De acordo com esse parâmetro, os alimentos podem ser classificados em: pouco ácidos (pH > 4,5), ácidos (4,5 a 4,0) e muito ácidos (<4,0). Com isso, os resultados da casca *in natura* e das farinhas apresentaram pH inferiores a 4, sendo assim considerados muito ácidos. Na pesquisa de Sarkar *et al.*, (2024) foi apresentado valores aproximados para a casca o *in natura* com pH de 3,01; secagem em estufa 3,41 e secagem de micro-ondas que foi apresentado o valor de 3,83. Valores bem próximos quando comparado com os resultados obtidos e comportamentos semelhantes, quando comparado com os métodos de secagem.

A acidez titulável mede a quantidade de ácidos presentes na casca, expressa como percentual de ácido cítrico. Acidez titulável foi considerado para base seca, o valor para o *in natura* foi de 4,94 e após a secagem, houve um aumento significativo para a farinha em estufa 8,34 e para farinha em micro-ondas apresentou o valor de 7,25. Esse aumento pode ser explicado pela concentração dos ácidos devido à remoção da água. A acidez titulável é importante para o sabor, a conservação e as propriedades funcionais dos produtos alimentícios.

O teor de sólidos solúveis totais, medidos em °Brix, representam o conteúdo de açúcares e outros solúveis na casca. A casca *in natura* apresenta 35,25 °Brix. Após a secagem, os valores diminuem para 20,92 °Brix na farinha obtida na estufa e 21,25 °Brix na farinha obtida no FMO, não apresentando diferenças significativas entre eles. Essa redução pode ser atribuída à perda ou transformação de componentes solúveis durante a secagem. O conteúdo de sólidos solúveis é importante para determinar o valor nutricional e o sabor dos produtos finais.

Em relação à proteína bruta, que é um indicador da qualidade nutricional dos produtos, foi observado que não houve diferenças significativas entre as farinhas secas em estufa (3,71%) e secas em forno de micro-ondas (3,99%). Valores próximos foram

encontrados por Muhammad *et al.*, (2023) na pesquisa do pó da casca de romã, em secagem em forno, com uma composição aproximada de 3,35 %.

O resíduo mineral fixo, ou teor de cinzas, representa o conteúdo de minerais na casca. Nas farinhas são indicativos importantes do teor mineral e compreende principalmente compostos inorgânicos como cálcio, fósforo, potássio, magnésio e sódio (Tsegay *et al.*, 2024). O teor de cinzas do estudo não variou significativamente com os métodos de secagem, porém obteve maior valor para a secagem feita em estufa.

Os resultados obtidos indicam que as análises e as características físico-químicas das cascas de romã não sofreram variações significativas entre os métodos de secagem utilizando estufa e micro-ondas. Essas análises são essenciais para o desenvolvimento e a otimização dos processos de secagem, bem como para a utilização eficiente das cascas da romã em produtos alimentícios e industriais. O conhecimento detalhado dos parâmetros físico-químicos obtidos neste estudo possibilita a produção de produtos de alta qualidade, capazes de atender às rigorosas exigências nutricionais e sensoriais dos consumidores. Compreender como os diferentes métodos de secagem afetam as propriedades das cascas permite ajustar os processos para maximizar a retenção de nutrientes e compostos bioativos, garantindo assim um produto final superior em termos de valor nutricional e funcionalidade.

Na Tabela 3 estão dispostos os valores dos parâmetros físico-químicos das sementes de romã *in natura* e dos produtos farináceos obtidos pelos métodos de secagem por convecção via estufa e por irradiação usando FMO.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos das sementes de romã *in natura* e dos produtos farináceos obtidos pelos diferentes métodos de secagem.

Parâmetros	Semente	Farinha	
	<i>In natura</i>	Estufa	FMO
Teor de água (%)	44,01 ± 0,21 ^a	8,66 ± 0,15 ^b	5,09 ± 0,06 ^c
pH	4,92 ± 0,03 ^a	5,12 ± 0,01 ^b	4,68 ± 0,01 ^c
Acidez titulável (% ac. cítrico)(bs)	0,60 ± 0,01 ^a	0,49 ± 0,04 ^b	0,80 ± 0,02 ^c
Sólidos solúveis totais (°Brix) (bs)	9,23 ± 0,52 ^a	6,06 ± 0,31 ^b	5,79 ± 0,53 ^b
Proteína Bruta (%) (bs)	-	9,44 ± 0,59 ^a	10,03 ± 0,28 ^b

Resíduo mineral fixo (%)_(bs)	-	1,94 ± 0,05 ^b	1,52 ± 0,99 ^a
------------------------------------------------	---	--------------------------	--------------------------

** Os valores são médias ± desvio padrão; Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas (P < 0,05) usando o teste HSD (diferença honestamente significativa) de Tukey.

Fonte: Autor (2025)

O teor de água das sementes de romã *in natura* foi de 44,01%, refletindo uma alta umidade natural. Após a secagem, esse valor reduz-se significativamente para 8,66% na farinha obtida na estufa e 5,09% na farinha obtida no FMO; observa-se que o comportamento do teor de água em FMO resulta em uma umidade menor, o que pode ser benéfico para a conservação e a vida útil do produto final, prevenindo a atividade microbiana e a deterioração. Wanderley *et al.*, (2023) , apresentou 36,60% para semente *in natura* e para estufa a 70°C foi de 3,73%; teor de água máximo para farinhas recomendado pela legislação vigente para farinhas (Brasil, 2012), que é de 15,0%.

O pH das sementes de romã *in natura* foi de 4,92, levemente ácido. Após a secagem, observa-se um aumento no pH para 5,12 na farinha obtida na estufa, enquanto na farinha no FMO o pH diminui para 4,68. Essas variações no pH podem influenciar a estabilidade e a funcionalidade dos produtos finais, sendo relevante para diferentes aplicações alimentícias.

A acidez titulável da semente foi expressa em base seca, o valor encontrado para o *in natura* foi de 0,60 e da estufa apresentou o valor de 0,49 e do micro-ondas foi de 0,80; foi encontrado um valor bem próximo para a semente *in natura* no trabalho de Ataíde *et al.*, (2018) sobre colheita do fruto no semiárido, obtendo 0,72 utilizando a romã adquirida na feira agroecológica.

Os sólidos solúveis totais apresentaram valores para o *in natura* de 9,23. Após a secagem houve uma redução significativa, apresentando os valores de 6,06 para estufa e de 5,79 para o micro-ondas; os sólidos solúveis foram calculados em base seca. A diminuição nos sólidos solúveis pode melhorar a estabilidade do produto, facilitando o seu armazenamento e aumentando sua vida útil, sem comprometer substancialmente o valor nutricional.

Em relação à proteína bruta, observaram-se diferenças significativas entre os valores obtidos nos diferentes métodos de secagem.; Nieuwenhove *et al.* (2019) no estudo comparativo de sementes de romã e Jacaranda *mimosifolia*, observou o valor de 10,10% para

a farinha da semente da romã, um valor aproximado ao encontrado no presente estudo. Conforme Brasil, 2012 RDC nº 54, de 12 de novembro de 2012, a farinha da semente pode ser considerada com fonte de proteínas, por apresentar o valor acima de 6%.

O resíduo mineral fixo para a farinha de estufa foi de 1,94 e para a farinha de micro-ondas foi de 1,52; na pesquisa sobre as composições da semente da romã, secas em estufa a 70°C, de Abiola *et al.*, (2018) foram encontrados valores aproximados ao presente estudo, de 1,55. A farinha de micro-ondas e estufa variou pouco entre elas. Essa diferença pode estar associada ao teor de água, já que uma farinha com menor quantidade de água contém menos água livre, o que acaba resultando em uma maior concentração de minerais nas amostras.

Os resultados indicam que as características físico-químicas das sementes de romã apresentaram variações significativas em função dos métodos de secagem utilizados. Apesar disso, foi observada uma concentração da maioria dos constituintes nas farinhas obtidas, o que pode ser atribuído à redução do teor de água proporcionada pelo processo de secagem, quando comparado aos valores obtidos para o material *in natura*. Esse efeito destaca o impacto da remoção da umidade na concentração dos nutrientes e demais componentes presentes no produto final.

3.3 COR

A cor é uma aparência essencial e atributo sensorial que afeta a aceitabilidade e palatabilidade do consumidor. Como essas cores são afetadas pelo processamento térmico, como a torrefação, o grau de torrefação é um fator de controle crucial na formação da cor. Os dados visualizados da mudança de cor de acordo com a temperatura e o tempo de torrefação em sementes de romã fornecem informações valiosas para otimizar o processo de torrefação, garantindo a qualidade visual e sensorial do produto final, além de contribuir para o desenvolvimento de métodos de processamento mais precisos e eficientes (Yoon *et al.*, 2024).

A Tabela 4 exibe os parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*) de amostras de farinhas obtidas de sementes e cascas, submetidas a dois métodos de secagem: irradiação em forno micro-ondas e convecção em estufa. A análise de cor é fundamental para avaliar a qualidade e a aceitação do produto final, sendo um dos critérios essenciais para a aceitabilidade dos

alimentos. Dessa forma, a cor influencia diretamente as impressões dos consumidores, pois está associada a expectativas de frescor e sabor do produto.

Tabela 4 - Parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , C^* e h^*) de farinhas obtidas de sementes e cascas, submetidas a dois métodos de secagem: em forno micro-ondas e em estufa.

Amostra das farinhas	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*
Semente - FMO	$38,99 \pm 0,12^a$	$8,69 \pm 0,08^a$	$20,87 \pm 0,35^a$	$22,61 \pm 0,35^a$	$67,40 \pm 0,0^a$
Semente - estufa	$37,28 \pm 0,08^b$	$7,57 \pm 0,03^b$	$20,67 \pm 0,19^a$	$22,01 \pm 0,18^a$	$69,88 \pm 0,0^b$
Casca - FMO	$31,03 \pm 0,26^a$	$10,43 \pm 0,16^a$	$33,66 \pm 0,36^a$	$25,52 \pm 0,19^a$	$69,13 \pm 0,0^a$
Casca - estufa	$35,01 \pm 0,04^b$	$9,09 \pm 0,07^b$	$23,85 \pm 0,18^b$	$35,24 \pm 0,29^b$	$72,78 \pm 0,01^b$

Os valores são apresentados como média \pm desvio padrão. Letras diferentes ao lado dos valores indicam diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$). L^* = luminosidade, a^* = vermelhidão, b^* = amarelo, C^* = crhoma, h^* = ângulo matiz

Fonte: Autor (2024)

Houve uma diferença significativa ($P \leq 0,05$) entre as amostras das farinhas da semente em forno micro-ondas e estufa para o parâmetro L^* . Quanto maior o valor L^* , mais clara a amostra. Para a casca, o parâmetro L^* foi maior para a farinha obtida pela secagem em estufa, indicando uma luminosidade maior (mais próxima de 100). Enquanto os valores L mais baixos para secagem em forno micro-ondas indicaram que ocorreu um escurecimento durante o aquecimento.

A vermelhidão (a^*) indica a intensidade de vermelho das amostras no espectro vermelho-verde (Sobowale *et al.*, 2024) Todas as amostras apresentaram valores positivos de a^* , indicando uma tendência para o vermelho, sendo dominante sobre o verde. As cascas, especialmente, mostraram valores mais altos (casca - FMO com $a^* = 10,43$).

Todas as amostras têm valores positivos de b^* , indicando uma forte presença de amarelo. Algumas alterações nos parâmetros de cor possivelmente estão associadas à reação de Maillard, que é uma reação não enzimática que depende da temperatura entre açúcares redutores e os grupos amino de aminoácidos ou proteínas, resultando na formação de pigmentos marrons (melanoidinas) e à redução do valor nutricional (Guimarães *et al.*, 2020). Portanto, isso pode explicar um valor de b^* maior da amostra de farinha de casca submetida ao forno micro-ondas, sugerindo que esteja relacionada a uma maior eficiência da reação de Maillard nessas condições de aquecimento.

Ao analisar a cor de um produto alimentício, a saturação de croma (C^*) é um aspecto relevante. Esse quantifica a intensidade da pureza da cor (Silva *et al.*, 2023). Os valores de croma (C^*) variaram de 22,01 a 35,24, indicando uma saturação baixa, o que sugere que as farinhas apresentaram cores mais neutras e menos intensas para a percepção humana. O croma (C^*), que representa a intensidade da cor, foi mais alto nas cascas, refletindo uma cor mais vibrante e saturada. A casca submetida a secagem em estufa, em particular, apresentou o valor mais elevado de C^* de 35,24, sugerindo uma coloração mais intensa em comparação com as sementes.

O ângulo de matiz (h^*) é o atributo qualitativo que diferencia uma cor de outra. Esse ângulo é essencial para a percepção e aceitação por indivíduos com visão de cores média (Onipe *et al.*, 2024). Todas as amostras estão na faixa dos 67 a 73°, indicando que está entre a faixa de amarelo-verde, próximo ao limite entre o amarelo e o verde. A farinha de casca - estufa apresentou o maior valor de $h^* = 72,78 \pm 0,01$, apontando para uma tonalidade mais amarela-esverdeada.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os diferentes métodos de secagem, utilizando estufa e forno de micro-ondas (FMO), têm impactos significativos nas características físico-químicas das cascas e sementes de romã. Ambos os métodos de secagem apresentaram alterações nas propriedades como teor de água, pH, acidez titulável, sólidos solúveis totais e concentração de proteínas, embora as variações entre eles tenham sido mínimas.

As farinhas de sementes e cascas de romã secas por estufa e forno de micro-ondas apresentaram diferenças significativas em luminosidade, saturação e tonalidade.

A secagem resultou em produtos mais concentrados em nutrientes, com vantagens para a estabilidade e vida útil. Estes resultados demonstram que as cascas e sementes de romã, quando devidamente processadas, têm grande potencial para aplicações alimentícias e industriais, com excelentes propriedades nutricionais e funcionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABIOLA, T.; LK, F.; DO, A. Proximate Composition, Phytochemical Analysis and in vivo Antioxidant Activity of Pomegranate Seeds (*Punica granatum*) in Female Albino Mice. **Biochemistry & Pharmacology: Open Access**, v. 07, n. 02, 2018.

ATAÍDE, E. M.; SILVA, M. DE S.; BASTOS, D. C.; SOUZA, J. M. A. Qualidade pós-colheita de romã comercializada no Semiárido pernambucano. 2018.

BATISTA ZONTA, J.; FONTES ARAUJO, E.; FONTES ARAUJO, R.; SANTOS DIAS, L. A. DIFERENTES TIPOS DE SECAGEM: EFEITOS NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE PINHÃO MANSO . **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, p. 721–731, 2011.

GUIMARÃES, R. M.; IDA, E. I.; FALCÃO, H. G.; REZENDE, T. A. M. DE; SILVA, J. DE S.; ALVES, C. C. F.; SILVA, M. A. P. DA; EGEEA, M. B. Evaluating technological quality of okara flours obtained by different drying processes. **LWT**, v. 123, p. 109062, 1 abr. 2020.

MAHMOOD, M. S.; ASHRAF, A.; ALI, S.; SIDDIQUE, A. B.; ASAD, F.; ABBAS, R. Z.; SIDDIQUE, F.; ASLAM, A.; ASLAM, R.; RAFIQUE, A. Portrayal of *Punica granatum* L. peel extract through High Performance Liquid Chromatography and antimicrobial activity evaluation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e244435, 20 ago. 2021.

MUHAMMAD, A.; DAYISOYLU, K. S.; PEI, J.; KHAN, M. R.; SALMAN, M.; AHMAD, R.; ULLAH, H.; NOOR, G. R. Compositional analysis of natural pomegranate peel powder dried by different methods and nutritional and sensory evaluation of cookies fortified with pomegranate peel powder. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1118156, 2023.

NIEUWENHOVE, C. P. VAN; MOYANO, A.; CASTRO-GÓMEZ, P.; FONTECHA, J.; SÁEZ, G.; ZÁRATE, G.; PIZARRO, P. L. Comparative study of pomegranate and jacaranda seeds as functional components for the conjugated linolenic acid enrichment of yogurt. **LWT**, v. 111, p. 401–407, 1 ago. 2019.

ONIPE, O. O.; MATSHISEVHE, M. M.; RAMASHIA, S. E.; MASHAU, M. E. Physicochemical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) flour supplemented with *Parinari curatellifolia* flour. **Scientific African**, v. 23, p. e02092, 1 mar. 2024.

RODRÍGUEZ-CORTINA, A.; HERNÁNDEZ-CARRIÓN, M. Amazonian fruits in Colombia: Exploring bioactive compounds and their promising role in functional food innovation. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 137, p. 106878, 1 jan. 2025.

SILVA, E. T. DE V.; QUEIROZ, A. J. M. DE; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; MOURA, H. V.; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, A. P. DE F.; CAVALCANTI, C. F.; GREGÓRIO, M. G.; GALDINO, P. O.; GOMES, J. P. Dynamic modelling of degradation kinetics of phenolic compounds, phenolic profiles, mineral content, and overall antioxidant capacity of germinated peanut flours. **LWT**, v. 183, p. 114927, 15 jun. 2023.

SOBOWALE, S. S.; BAMIDELE, O. P.; ADEBO, J. A. Physicochemical, functional, and antinutritional properties of fermented Bambara groundnut and sorghum flours at different times. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100729, 1 jun. 2024.

SOUZA, J. M. L. DE; SILVA NEGREIROS, J. R. DA; SOUZA ÁLVARES, V. DE; LEITE, F. M. N.; SOUZA, M. L. DE; REIS, F. S.; FELISBERTO, F. Á. V. Variabilidade físico-química da farinha de mandioca. **Food Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 907–912, 2008.

TSEGAY, N.; ADMASSU, H.; ZEGALE, B.; GOSU, A. Nutritional and functional potentials of wheat, cowpea, and yam composite flours on bread formulations: Effect of blending ratio and baking parameters. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101294, 1 dez. 2024.

WANDERLEY, R. DE O. S. *et al.* The Temperature Influence on Drying Kinetics and Physico-Chemical Properties of Pomegranate Peels and Seeds. **Foods**, v. 12, n. 2, 1 jan. 2023.

YOON, S.; JEONG, H.; JO, S. M.; HONG, S. J.; PARK, H.; BAN, Y.; YOUN, M. Y.; SHIN, E. C. Physicochemical and chemosensory properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) seeds under various oven-roasting conditions. **Food Chemistry**, v. 446, p. 138907, 15 jul. 2024.

CONCLUSÕES GERAIS

Os estudos conduzidos demonstraram o potencial do uso de métodos de secagem, irradiação e convecção, para o processamento das cascas e sementes de romã, destacando o impacto das condições operacionais nas características físico-químicas e nutricionais dos produtos obtidos. A aplicação de doze modelos matemáticos aos dados de secagem permitiu identificar os modelos de Midili et al. e Verna como os mais adequados para descrever o comportamento da secagem.

Secagem por irradiação em forno de micro-ondas (FMO) apresentou ser uma alternativa mais rápida e acessível. As análises termodinâmicas indicaram que a difusividade efetiva aumentou com a temperatura e potência, enquanto a entalpia (ΔH) e entropia (ΔS) foram inversamente proporcionais a essas variáveis. A energia livre de Gibbs (ΔG) apresentou valores positivos e crescentes, reforçando a viabilidade energética do processo.

As farinhas obtidas a partir das cascas e sementes secas apresentaram diferenças significativas em cor, teor de umidade e composição nutricional, destacando-se pela estabilidade e potencial de aplicação na indústria alimentícia.

Os métodos de secagem em estufa e forno de micro-ondas (FMO) impactaram significativamente as características físico-químicas das cascas e sementes de romã, alterando propriedades como teor de água, pH, acidez titulável, sólidos solúveis totais e concentração de proteínas, embora com diferenças mínimas entre os processos.

As farinhas obtidas apresentaram variações na coloração, incluindo luminosidade, saturação e tonalidade, além de uma maior concentração de nutrientes, resultando em produtos mais estáveis e com maior vida útil. Esses resultados evidenciam o potencial das cascas e sementes de romã para aplicações alimentícias e industriais, reforçando seu valor nutricional e funcional, além de promoverem o aproveitamento sustentável desses subprodutos agroindustriais.

REFERÊNCIAS GERAL:

ABIOLA, T.; LK, F.; DO, A. Proximate Composition, Phytochemical Analysis and in vivo Antioxidant Activity of Pomegranate Seeds (*Punica granatum*) in Female Albino Mice. **Biochemistry & Pharmacology: Open Access**, v. 07, n. 02, 2018.

AMBAWAT, SHOBHIT; SHARMA, A.; AMBAWAT, SUMAN; SAINI, R. K.; RUSTAGI, S.; PANDISELVAM, R. Mathematical modeling of blanch-assisted drying of drumstick leaves (*Moringa oleifera*) in convective hot air system. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 55, p. 102886, 1 out. 2024.

ANIMASHAUN, O. H.; SOBOWALE, S. S. Microwave exposure of tomato varieties before catalytic oven drying and its effect on physicochemical and bioactive components studied by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Food and Humanity**, v. 2, p. 100197, 1 maio 2024.

APALIYA, M. T.; KAWA, E.; OSAE, R.; ALOLGA, R. N.; AIDOO, P.; MENSAH, L. A.; SACEY AIKINS, A. S.; WILSON, C. L. Effect of different drying methods on the rehydration kinetics, physiochemical and functional properties of unripe plantain (*Musa parasidiaca*) flour. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100610, 1 jun. 2024.

ARAÚJO, D. G. DE; EIDAM, T.; BORSATO, A. V.; RAUPP, D. DA S. Processamento de produto farináceo a partir de beterrabas submetidas à secagem estacionária. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 207–214, 2011.

ARSLAN, A.; ALIBAŞ, İ. Assessing the effects of different drying methods and minimal processing on the sustainability of the organic food quality. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 94, p. 103681, 1 jun. 2024.

ATAÍDE, E. M.; SILVA, M. DE S.; BASTOS, D. C.; SOUZA, J. M. A. Qualidade pós-colheita de romã comercializada no Semiárido pernambucano. 2018.

ATIA, A.; TEGGAR, M.; LAOUER, A. Performance of various solar dryer types integrating latent heat storage for drying agricultural products: An up-to-date review. **Journal of Energy Storage**, v. 102, p. 114048, 15 nov. 2024.

BATISTA ZONTA, J.; FONTES ARAUJO, E.; FONTES ARAUJO, R.; SANTOS DIAS, L. A. DIFERENTES TIPOS DE SECAGEM: EFEITOS NA QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE PINHÃO MANSO . **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, p. 721–731, 2011.

BERTOLO, M. R. V.; MARTINS, V. C. A.; PLEPIS, A. M. G.; BOGUSZ, S. Utilization of pomegranate peel waste: Natural deep eutectic solvents as a green strategy to recover valuable phenolic compounds. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, p. 129471, 10 dez. 2021.

CANGUSSU, L. B.; COSTA, A. L. R.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. DE. Chemical characterization and the bioaccessibility of bioactive compounds from seriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp and by-products flours. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, v. 31, p. 100404, 1 maio 2024.

CIURZYŃSKA, A.; JANOWICZ, M.; KARWACKA, M.; GALUS, S.; KOWALSKA, J.; GAŃKO, K. The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. **Applied Sciences** **2022**, Vol. 12, Page 10588, v. 12, n. 20, p. 10588, 20 out. 2022.

EMÍLIO, P. C. F.; ISABEL NOGUEIRA, R.; CHRISTIAN WILBERG, V. **Secagem e desidratação**Embrapa, 9 dez. 2021.

ESMERO, J. A. D.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; QUEIROZ, A. J. DE M.; PAIVA, Y. F.; MOURA, H. V.; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, L. P. F. R. DA; MATOS, J. D. P. DE; MORAES, M. S. DE; GONDIM, C. DE M.; GOMES, J. P. Drying kinetics and thermodynamic properties of trapiá pulp[Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas da polpa de trapiá]. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 2, p. e279382, 1 jan. 2025.

FERREIRA, C. S.; CRISTINA DE LIMA, E.; BARRETO, M.; FEIJÓ, S. **Aproveitamento integral e não convencional da banana verde inativada em forno micro-ondas para elaboração de farinha**Brazilian Journal of Food Research. [s.l: s.n.].

GE, M.; CHEN, G.; LIU, W.; LIU, C. Study of heat and mass transfer during drying process of maize grain pile based on computed tomography. **Biosystems Engineering**, v. 248, p. 82–96, 1 dez. 2024.

GEROMEL, L. B.; FREITAS, I. R. APLICAÇÃO DA ENERGIA DE MICRO-ONDAS PARA SECAGEM DA BANANA NANICA (*Musa acuminata* 'Dwarf Cavendish') SUBMETIDA AO PROCESSO DE OSMOSE. **Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332**, v. 12, n. 1, p. 1–10, 15 jun. 2020.

GÓMEZ-DE LA CRUZ, F. J.; PALOMAR-TORRES, A.; PÉREZ-LATORRE, F. J.; CRUZ-PERAGÓN, F. Convective drying of mango stone for use as biomass. **Environmental Research**, v. 227, p. 115742, 15 jun. 2023.

GUIMARÃES, R. M.; IDA, E. I.; FALCÃO, H. G.; REZENDE, T. A. M. DE; SILVA, J. DE S.; ALVES, C. C. F.; SILVA, M. A. P. DA; EGEA, M. B. Evaluating technological quality of okara flours obtained by different drying processes. **LWT**, v. 123, p. 109062, 1 abr. 2020.

JAYARATHNE, P. S. I. U.; DHARMADASA, R. M.; ABEYSINGHE, D. C.; WEERAWARNA, S. W. A. Changes of physicochemical parameters, bioactive compounds & antioxidant capacity of four different cultivars of *Punica granatum* (L.) at four distinct maturity stages. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100640, 1 jun. 2024.

KARA, C.; DOYMAZ, I. Thin Layer Drying Kinetics of By-Products from Pomegranate Juice Processing. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 5, p. 480–487, 1 out. 2015.

KOMESU, A.; OLIVEIRA, J.; MOREIRA, D. K. T.; NETO, J. M.; PENTEADO, E. D.; MARTINS, L. H. DA S. Case study 3: fruit and vegetable waste valorization in North and Northeast regions of Brazil. **Fruit and Vegetable Waste Utilization and Sustainability**, p. 269–284, 1 jan. 2023.

KUSUMA, H. S.; IZZAH, D. N.; LINGGAJATI, I. W. L. Microwave-assisted drying of *Ocimum sanctum* leaves: Analysis of moisture content, drying kinetic model, and technoeconomics. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100337, 1 dez. 2023.

KUSUMA, H. S.; NASUTION, R. A.; PERMATASARI, D. Drying process on kaffir lime leaves using microwave: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different microwave powers and sizes of leaves. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100317, 1 dez. 2023.

LING, W.; XING, Y.; HONG, C.; ZHANG, B.; HU, J.; ZHAO, C.; WANG, Y.; FENG, L. Methods, mechanisms, models and tail gas emissions of convective drying in sludge: A review. **Science of The Total Environment**, v. 845, p. 157376, 1 nov. 2022.

LOPES, K. P.; BRUNO, R. D. L. A.; BRUNO, G. B.; AZEREDO, G. A. DE. COMPORTAMENTO DE SEMENTES DE ROMÃ (*Punica granatum* L.) SUBMETIDAS À FERMENTAÇÃO E SECAGEM. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 369–372, ago. 2001.

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, 1 jun. 2023.

MABASSO, G. A.; CABRAL, J. C. O.; BARBOSA, K. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. DE; ALMEIDA, A. B. DE. Drying kinetics, thermodynamic properties and physicochemical characteristics of Rue leaves. **Scientific Reports 2024 14:1**, v. 14, n. 1, p. 1–14, 24 jun. 2024.

MAGNO, H.; BRENNECKE, K.; MARIA, L.; BERTIPAGLIA, A.; HENRIQUE, P.; DIAN, M.; DE, H. A.; FILHO, L. Comparações de metodologias para pré-secagem de amostras em forno micro-ondas. 2016.

MAHMOOD, M. S.; ASHRAF, A.; ALI, S.; SIDDIQUE, A. B.; ASAD, F.; ABBAS, R. Z.; SIDDIQUE, F.; ASLAM, A.; ASLAM, R.; RAFIQUE, A. Portrayal of *Punica granatum* L. peel extract through High Performance Liquid Chromatography and antimicrobial activity evaluation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e244435, 20 ago. 2021.

MAPHETU, N.; UNUOFIN, J. O.; MASUKU, N. P.; OLISAH, C.; LEBELO, S. L. Medicinal uses, pharmacological activities, phytochemistry, and the molecular mechanisms of *Punica granatum* L. (pomegranate) plant extracts: A review. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 153, p. 113256, 1 set. 2022.

MARCANTE, N. C.; MELLO PRADO, R. DE; CAMACHO, M. A.; ROSSET, J. S.; ECCO, M.; SAVAN, P. A. L. Determinação da matéria seca e teores de macronutrientes em folhas de frutíferas usando diferentes métodos de secagem. **Ciência Rural**, v. 40, n. 11, p. 2398–2401, 2010.

MORAES, F. P.; COLLA, L. M. ALIMENTOS FUNCIONAIS E NUTRACÊUTICOS: DEFINIÇÕES, LEGISLAÇÃO E BENEFÍCIOS À SAÚDE. Functional foods and nutraceuticals: definition, legislation and health benefits. **Revista Eletrônica de Farmácia**, v. 3, n. 2, p. 109–122, 2006.

MUHAMMAD, A.; DAYISOYLU, K. S.; PEI, J.; KHAN, M. R.; SALMAN, M.; AHMAD, R.; ULLAH, H.; NOOR, G. R. Compositional analysis of natural pomegranate peel powder dried by different methods and nutritional and sensory evaluation of cookies fortified with pomegranate peel powder. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1118156, 2023.

NEO, Y. T.; CHIA, W. Y.; LIM, S. S.; NGAN, C. L.; KURNIAWAN, T. A.; CHEW, K. W. Smart systems in producing algae-based protein to improve functional food ingredients industries. **Food Research International**, v. 165, p. 112480, 1 mar. 2023.

NIEUWENHOVE, C. P. VAN; MOYANO, A.; CASTRO-GÓMEZ, P.; FONTECHA, J.; SÁEZ, G.; ZÁRATE, G.; PIZARRO, P. L. Comparative study of pomegranate and jacaranda seeds as functional components for the conjugated linolenic acid enrichment of yogurt. **LWT**, v. 111, p. 401–407, 1 ago. 2019.

ONIPE, O. O.; MATSHISEVHE, M. M.; RAMASHIA, S. E.; MASHAU, M. E. Physicochemical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) flour supplemented with *Parinari curatellifolia* flour. **Scientific African**, v. 23, p. e02092, 1 mar. 2024.

OZAY-ARANCIOGLU, I.; BEKIROGLU, H.; KARADAG, A.; SAROGLU, O.; TEKIN-ÇAKMAK, Z. H.; KARASU, S. Effect of different drying methods on the bioactive, microstructural, and in-vitro bioaccessibility of bioactive compounds of the pomegranate arils. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e06221, 3 maio 2021.

PANIGRAHI, P. *et al.* A randomized synbiotic trial to prevent sepsis among infants in rural India. **Nature** 2017 548:7668, v. 548, n. 7668, p. 407–412, 16 ago. 2017.

PRATES, L. L.; RODRÍGUEZ ESPINOSA, M. E.; FENG, X.; TOSTA, M.; HE, J.; YU, P. Impact of processing methods (dry-heating, autoclaving, and (microwave irradiation) on protein-related molecular structure spectral feature and protein nutritive value of cool-seasoned oat varieties in ruminant system in western Canada. **Animal Feed Science and Technology**, v. 304, p. 115736, 1 out. 2023.

RAYMANN, F. S.; PARISE, M. R. ESTUDO DA SECAGEM DE SOJA E FEIJÃO UTILIZANDO RADIAÇÃO INFRAVERMELHA E ESTUFA DE CIRCULAÇÃO DE AR. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 3, n. 2, p. áginas 81-89, 22 ago. 2011.

RODRÍGUEZ-CORTINA, A.; HERNÁNDEZ-CARRIÓN, M. Amazonian fruits in Colombia: Exploring bioactive compounds and their promising role in functional food innovation. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 137, p. 106878, 1 jan. 2025.

ROMANO, K. R.; DIAS BARTOLOMEU ABADIO FINCO, F.; ROSENTHAL, A.; VINICIUS ALVES FINCO, M.; DELIZA, R. Willingness to pay more for value-added pomegranate juice (*Punica granatum* L.): An open-ended contingent valuation. **Food Research International**, v. 89, p. 359–364, 1 nov. 2016.

SABRINA PEREIRA DE ARAÚJO, C.; HÉLIO ALVES DE ANDRADE, F.; OLIVEIRA GALDINO, P.; SOCORRO DE CALDAS PINTO, M. DO; PARA CORRESPONDÊNCIA, A. Desidratação de batata-doce para fabricação de farinha. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 11, n. 4, p. 33–41, 11 abr. 2016.

SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J.; SILVA, G. M. DA; MONTEIRO, S. S.; ANDRÉ, A. M. M. C. N. Effect of ultrasound pre-treatment on the kinetics and thermodynamic properties of guava slices drying process. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 66, p. 102507, 1 dez. 2020.

SANTOS, R. F. Aproveitamento de frutas nativas para elaboração de farinhas e incorporação em biscoitos tipo cookies. 31 ago. 2018.

SARKAR, A.; HAQUE, M. A.; ALAM, M. Unlocking the potential of pomegranate peels as a valuable source of bioactive compounds through effective drying strategies. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100622, 1 jun. 2024.

SBRUZZI FIEBIG, M.; REGINA MENDES ANDRADE, D.; JOSÉ DE OLIVEIRA MINDELO, L.; SANTOS DE GOIS, J.; LUNA, A. S.; AFONSO PROVENZI, M.; LUIZ ESTEVES MAGALHÃES, W.; MIOTTO, M.; VIEIRA HELM, C.; SCHWINDEN PRUDENCIO, E. Pinhão potential and their parts (failures, shells, and almonds) in the elaboration of yogurts containing acai pulp: physicochemical, nutritional, and functional properties, antimicrobial activity, and multi-elemental profile. *Food Research International*, v. 192, p. 114813, 1 set. 2024.

SHARSHIR, S. W.; JOSEPH, A.; PENG, G.; KANDEAL, A. W.; ABDULLAH, A. S.; ABDELAZIZ, G. B.; EDREIS, E. M. A.; YUAN, Z. Recent efforts in developing agricultural product drying processes using solar energy. **Solar Energy**, v. 257, p. 137–154, 1 jun. 2023.

SHIMIZU, G. D.; PAULA, J. C. B. DE; NEVES, C. S. V. J.; PACHECO, C. DE A. Quality of pomegranate peel cultivar Valenciana as determined by different drying methods. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, p. e-431, 16 mar. 2020.

SILVA, Á. G. F. DA; BEZERRA DA COSTA, F.; MARINHO DO NASCIMENTO, A.; BARROS SALES, G. N.; LEITE DA SILVA, J.; MARIA DE SOUSA SILVA NETA, A.; RIBEIRO, W. S.; IARLEY DA SILVA, T.; FEITOSA, B. F. *Spondias purpurea* L. (Anacardiaceae) fruits flours at different maturation stages: Drying kinetics, mathematical

modelling, characterization and correlation analysis. **Heliyon**, v. 11, n. 2, p. e41832, 30 jan. 2025.

SILVA, E. T. DE V.; QUEIROZ, A. J. M. DE; FIGUEIRÊDO, R. M. F. DE; MOURA, H. V.; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, A. P. DE F.; CAVALCANTI, C. F.; GREGÓRIO, M. G.; GALDINO, P. O.; GOMES, J. P. Dynamic modelling of degradation kinetics of phenolic compounds, phenolic profiles, mineral content, and overall antioxidant capacity of germinated peanut flours. **LWT**, v. 183, p. 114927, 15 jun. 2023.

SILVA, V. S. DA; ORLANDELLI, R. C. **DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTOS FUNCIONAIS NOS ÚLTIMOS ANOS: UMA REVISÃO**. Disponível em: <<https://revista.uninga.br/uninga/article/view/1110/1978>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SOBOWALE, S. S.; BAMIDELE, O. P.; ADEBO, J. A. Physicochemical, functional, and antinutritional properties of fermented Bambara groundnut and sorghum flours at different times. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100729, 1 jun. 2024.

SOBOWALE, S. S.; OTOLOWO, D. T.; KAYODE, O. T.; AGBAWODIKE, J. I. Effect of germination and solid-state fermentation on the chemical, functional and nutritional composition of pigeon pea flour and the sensory properties of the resultant cookies. **Food Chemistry Advances**, v. 5, p. 100837, 1 dez. 2024.

SOUZA, J. L. F.; OLIVEIRA, D. E. C.; PLÁCIDO, G. R.; EGEEA, M. B.; CALIARI, M.; SILVA, M. A. P. DA. Thermodynamic and nutritional properties and drying kinetics of pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) mesocarp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 655–661, 12 ago. 2019.

SOUZA, J. M. L. DE; SILVA NEGREIROS, J. R. DA; SOUZA ÁLVARES, V. DE; LEITE, F. M. N.; SOUZA, M. L. DE; REIS, F. S.; FELISBERTO, F. Á. V. Variabilidade físico-química da farinha de mandioca. **Food Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 907–912, 2008.

TEDESCO, M. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. UFRGS, 1995.

TELES, T. B.; LUIZ, M. R.; TOMAZ, J. L. F.; ALMEIDA, M. M. DE; SOUZA, N. C. DE; LIMA, C. V. A. DE; OLIVEIRA, T. DA S. Avaliação do processo de secagem de resíduo de malte. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 2, p. 7698–7712, 16 fev. 2023.

TREJO-DÍAZ, G. N.; MORALES-SÁNCHEZ, E.; MARTÍNEZ-MALDONADO, M. Á.; TREJO-DÍAZ, G. N.; MORALES-SÁNCHEZ, E.; MARTÍNEZ-MALDONADO, M. Á. Efecto de la adición de harinas no convencionales y reducción del contenido de sodio en productos reestructurados de macabil (*Albula vulpes*). **CienciaUAT**, v. 18, n. 2, p. 122–135, 1 nov. 2024.

TSEGAY, N.; ADMASSU, H.; ZEGALE, B.; GOSU, A. Nutritional and functional potentials of wheat, cowpea, and yam composite flours on bread formulations: Effect of blending ratio and baking parameters. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101294, 1 dez. 2024.

VICTORIA OBAYOMI, O.; FOLAKEMI OLANIRAN, A.; OLUGBEMIGA OWA, S. Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review. **Journal of Functional Foods**, v. 119, p. 106337, 1 ago. 2024.

WANDERLEY, R. DE O. S. *et al.* The Temperature Influence on Drying Kinetics and Physico-Chemical Properties of Pomegranate Peels and Seeds. **Foods**, v. 12, n. 2, 1 jan. 2023.

YOON, S.; JEONG, H.; JO, S. M.; HONG, S. J.; PARK, H.; BAN, Y.; YOUN, M. Y.; SHIN, E. C. Physicochemical and chemosensory properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) seeds under various oven-roasting conditions. **Food Chemistry**, v. 446, p. 138907, 15 jul. 2024.

ZHAO, B.; ZHANG, C.; GUO, T.; WEI, Y. *Punica granatum* L. polysaccharides: A review on extraction, structural characteristics and bioactivities. **Carbohydrate Research**, v. 544, p. 109246, 1 out. 2024.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p. 2225–2253, 1996.

ANEXO A- Processo de obtenção do produto farináceo da casca da romã por secagem via micro-ondas



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2024 019316 4

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - PB

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 05055128000176

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: AV. APRIGIO VELOSO, 882 - UNIVERSITÁRIO

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429900

País: Brasil

Telefone: (83) 2011601

Fax: (83) 21011601

Email: nitt@ufcg.edu.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): PROCESSO DE OBTENÇÃO DO PRODUTO FARINÁCEO DA CASCA DA ROMÃ POR SECAGEM VIA MICRO-ONDAS

Resumo: A presente invenção compreende o processo de secagem de resíduos do fruto da romã (*Punica granatum* L.). O processo é constituído pela secagem de resíduos provenientes da casca da romã com o objetivo de obter um produto farináceo utilizando um forno micro-ondas. A invenção tem potencial aplicabilidade na área de alimentos facilitando sua utilização na preparação e elaboração de diversos alimentos.

Figura a publicar: 1

1/1

Resumo**PROCESSO DE OBTENÇÃO DO PRODUTO FARINÁCEO DA CASCA DA ROMÃ POR SECAGEM VIA MICRO-ONDAS**

A presente invenção compreende o processo de secagem de resíduos do fruto da romã (*Punica granatum* L.). O processo é constituído pela secagem de resíduos provenientes da casca da romã com o objetivo de obter um produto farináceo utilizando um forno micro-ondas. A invenção tem potencial aplicabilidade na área de alimentos facilitando sua utilização na preparação e elaboração de diversos alimentos.