



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JOÃO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA

**SECAGEM DE BANANA VERDE PRÉ-TRATADA ASSISTIDA POR RADIAÇÃO
ULTRAVIOLETA DO TIPO C (UV-C): DESIGN DE UM NOVO SECADOR
CONVECTIVO ESTUDADO VIA CFD COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Recife
2024

JOÃO HENRIQUE FERANANDES DA SILVA

**SECAGEM DE BANANA VERDE PRÉ-TRATADA ASSISTIDA POR RADIAÇÃO
ULTRAVIOLETA DO TIPO C (UV-C): DESIGN DE UM NOVO SECADOR
CONVECTIVO ESTUDADO VIA CFD COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadores: Profa. Dra. Patrícia Moreira Azoubel e Dr. Mohand Benachour.
Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Araújo Honorato.

Recife
2024

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S586s Silva, João Henrique Fernandes da.
Secagem de banana verde pré-tratada assistida por radiação ultravioleta do tipo C (UV-C): design de um novo secador convectivo estudado via CFD com validação experimental / João Henrique Fernandes da Silva, 2024.
79 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Moreira Azoubel.
Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Araújo Honorato.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2024.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia Química. 2. Ácido acético. 3. CFD. 4. Compostos lignocelulósicos. 5. Radiação ultravioleta. 6. UV-C. 7. Ultrassom. I. Azoubel, Patrícia Moreira (Orientadora). II. Benachour, Mohand (Orientador). III. Honorato, Fernanda Araújo (Coorientadora). IV. Título.

660.2 CDD (22. Ed.)

UFPE

BCTG / 2024 - 126

JOÃO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA

**SECAGEM DE BANANA VERDE PRÉ-TRATADA ASSISTIDA POR RADIAÇÃO
ULTRAVIOLETA DO TIPO C (UV-C): DESIGN DE UM NOVO SECADOR
CONVECTIVO ESTUDADO VIA CFD COM VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em: 17 / 06 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Marcos Francisco da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Profa. Dra. Yêda Madeiros Bastos de Almeida (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

João Belo da Silva (in memoriam).

Já são 16 anos de saudade.

Também quero lembrar as mais de
700 mil vítimas que morreram na
pandemia de COVID-19.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca negar seu amparo e consolo nos momentos de dificuldade, dando esperança para enfrentar a tempestade e alcançar a bonança.

A minha mãe, Maria Ivaneide Fernandes da Silva, que com muita persistência, batalha e coragem me deu todo suporte, carinho e amor para que esta etapa pudesse ser concretizada em minha vida. Obrigado, mãe! Te amo.

A minha esposa, Laiany Paes Almeida Fernandes, que me deu amor e consolo em muitas horas de necessidade, além de muita alegria e companheirismo. Obrigado pela paciência de sempre, que é fundamental numa etapa tão estressante da vida acadêmica. Te amo muito.

Aos meus irmãos, Izabella Fernandes da Silva Soares e Vinícius Fernandes da Silva, que sempre me apoiaram e encorajaram, ajudando sempre que possível, cada um à sua maneira. Eu agradeço demais. A minha família como um todo, tios, tias, primos e primas, que sempre me ajudaram de alguma maneira, permitindo que esse sonho, e tantos outros, fosse alcançado.

Aos verdadeiros amigos, sejam os mais antigos ou os mais novos, que tem um papel fundamental nessa trajetória acadêmica, que traz consigo muita solidão e distanciamento das pessoas que amamos. Aos amigos de trabalho da UFRPE de Belo Jardim (UABJ), da Uninassau Paulista, do laboratório de Engenharia de Alimentos (LabEA/DEQ/UFPE). Meu muito obrigado por estarem comigo.

Aos meus orientadores, Mohand Benachour e Patrícia Moreira Azoubel, e minha coorientadora Fernanda Araújo Honorato, que me conduziram de forma primorosa para que eu pudesse concluir este trabalho. Agradeço pelos ensinamentos, atenção, conselhos e apoio, que foi sempre presente. Por vocês, um carinho enorme.

Agradeço a CAPES, destacando aqui a importância dos órgãos de fomento no auxílio do pesquisador durante uma pesquisa. O Brasil, como um país riquíssimo e de grande potencial que precisa investir muito mais em ciência, precisa entender a importância de se investir neste setor para o desenvolvimento de uma nação.

Por fim, agradeço a todos e todas que fizeram parte desse trabalho direta ou indiretamente. Técnicos administrativos, coordenação, colegas de grupo de pesquisa, enfim. Obrigado a todos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar o uso de ácido acético e ultrassom como pré-tratamento na secagem convectiva assistida por radiação UV-C na degradação de compostos lignocelulósicos superficiais em fatias de banana verde. Para isso, um secador convectivo foi idealizado por fluidodinâmica computacional (CFD), construído e avaliado experimentalmente. A secagem foi analisada em termos da cinética de secagem, modelada empiricamente, bem como pelos coeficientes de difusividade efetiva (D_{ef}). As fatias de banana foram avaliadas quanto aos parâmetros de cor e quanto a sua morfologia superficial. Os experimentos foram realizados seguindo um planejamento fatorial 2^3 , que avaliou os efeitos potência da radiação UV-C, tempo de pré-tratamento com ultrassom e ácido acético sobre as variáveis dependentes (tempo de secagem da amostra até o teor de umidade de 25%, $t_{x25\%}$, tempo de secagem até o teor de umidade de equilíbrio, t_{xe} , e os parâmetros de cor. A simulação do secador se deu em regime permanente e as equações de conservação de massa, energia e *momentum* resolvidas numericamente via fluidodinâmica computacional (CFD). Os resultados da simulação via CFD foram validados experimentalmente e obtendo-se um erro máximo de 5,34% para os perfis de temperatura e 2,14% para velocidade de saída, em valores absolutos. A janela de quartzo se confirmou como a principal fonte de dissipação de calor do secador, acarretando uma temperatura média de secagem de 52,42°C. A cinética de secagem foi melhor representada pelo modelo Exponencial de Dois Termos, apresentando valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,9998 e erro percentual máximo de 0,726%. O planejamento fatorial não revelou diferenças significativas quanto ao $t_{x25\%}$. Já em relação ao t_{xe} e os parâmetros de cor houve diferenças significativas. A aplicação da radiação UV-C provavelmente degradou os compostos lignocelulósicos e sua aplicação com os pré-tratamentos teve um efeito sinérgico. Os pré-tratamentos reduziram as discrepâncias de cor ao longo da superfície das amostras, homogeneizando-a, enquanto a aplicação da radiação UV-C provocou uma coloração mais intensa nas fatias, tornando-as de cor amarelo-amarronzadas. A análise por microscopia eletrônica de varredura evidenciou a potencial degradação superficial de glicosídeos e aminoácidos aromáticos e os efeitos sobre a morfologia superficial das fatias.

Palavras-chave: ácido acético; CFD; compostos lignocelulósicos; radiação ultravioleta; UV-C; ultrassom.

ABSTRACT

This work aimed to study the use of acetic acid and ultrasound as pre-treatment in convective drying assisted by UV-C radiation in the degradation of surface lignocellulosic compounds in green banana slices. To achieve this, a convective dryer was designed using computational fluid dynamics (CFD), constructed and evaluated experimentally. Drying was analyzed in terms of drying kinetics, modeled empirically, as well as effective diffusivity coefficients (D_{ef}). The banana slices were evaluated for color parameters and surface morphology. The experiments were carried out following a 2^3 factorial design, which evaluated the effects of UV-C radiation power, ultrasound pre-treatment time and acetic acid on the dependent variables (sample drying time to 25% moisture content, $t_{x25\%}$, drying time until the equilibrium moisture content, t_{xe} , and color parameters). The dryer simulation took place in a steady state and the mass, energy and momentum conservation equations were solved numerically via computational fluid dynamics (CFD). The CFD simulation results were experimentally validated, obtaining a maximum error of 5.34% for the temperature profiles and 2.14% for the exit velocity, in absolute values. The quartz window was confirmed as the main one. source of heat dissipation from the dryer, resulting in an average drying temperature of 52.42°C. The drying kinetics were best represented by the Two-Term Exponential model, presenting coefficient of determination (R^2) values greater than 0.9998 and error. maximum percentage of 0.726%. The factorial design revealed no significant differences regarding $t_{x25\%}$. Regarding t_{xe} and color parameters, there were significant differences. The application of UV-C radiation probably degraded the lignocellulosic compounds and its application with pretreatments had a synergistic effect. Pre-treatments reduced color discrepancies along the surface of the samples, homogenizing it, while the application of UV-C radiation caused a more intense color in the slices, turning them yellow-brown in color. Scanning electron microscopy analysis highlighted the potential surface degradation of glycosides and aromatic amino acids and the effects on the surface morphology of the slices.

Keywords: acetic acid; CFD; lignocellulosic compounds; ultraviolet radiation; UV-C; ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Curvas típicas de secagem. a) Perfil de concentração ao longo do tempo. b) Taxa de secagem em função do tempo.	5
Figura 2 -	Quebra do composto lignoceluloso em seus constituintes.	6
Figura 3 -	Subdivisões da região da radiação ultravioleta.	9
Figura 4 -	Inativação celular em função do comprimento de onda exposto da radiação UV e do comprimento de onda operado numa lâmpada de mercúrio.	10
Figura 5 -	Malha estruturada com distribuição de espaçamento iguais em x e y (A); malha estruturada como distribuição de espaçamentos contínuos, porém diferentes para x e y (B).	16
Figura 6 -	Visualização da aplicação da malha Body-fitted e a mudança de coordenadas.	17
Figura 7 -	Geração de malha não-estruturada e a Triangulação de Delaunay.	18
Figura 8 -	Representação de malha estruturada e não estruturada para o método de volumes finitos (símbolos completos denotam vértices de elementos e símbolos abertos no centro dos volumes de controle denotam nós computacionais).	20
Figura 9 -	Esquema de corte das bananas. 1 – Corte das bananas em fatias; 2 – Padronização das fatias; 3 – Fatia padronizada.	21
Figura 10 -	a) Esquema do secador convectivo acoplado com radiação ultravioleta do tipo C e imagens reais b) das fatias, c) do arranjo, d) visão geral, e) visão da saída e f) escudo de radiação.	24
Figura 11 -	Aparato do experimento de secagem convectiva.	28
Figura 12 -	Etapas do processo de simulação via CFD.	29
Figura 13 -	Malha estruturada e não estruturada aplicada no modelo geométrico. Vista isométrica do plano de simetria (YZ) e vista plana do plano de simetria (YZ).	30
Figura 14 -	Fluxo de calor nas paredes externas (a) e o perfil de temperatura do secador (b). Vista isométrica do plano de simetria (YZ).	34
Figura 15 -	Comparativo entre os dados experimentais e preditos nos pontos de análise térmica.	35
Figura 16 -	Linhas de corrente de interesse e temperatura da primeira camada de ar logo acima das faces das fatias de banana. Vista isométrica do plano de simetria (YZ).	36

Figura 17 -	Perfil de velocidade (a), linhas de corrente na entrada (b) e zonas de pressão (c) dentro do secador. Vista do plano YZ.	37
Figura 18 -	Comportamento do coeficiente de difusão efetiva (Def) durante as secagens.	38
Figura 19 -	Taxa de secagem em função da umidade em base seca.	40
Figura 20 -	Modelos ajustados para os dados experimentais de secagem até 25% de umidade em base úmida. a) todos os experimentos, b) sem radiação UV-C, c) com radiação UV-C (exceto o ponto central), d) com aplicação de ultrassom, e) com aplicação de ácido acético e f) com aplicação isolada de cada tratamento.	43
Figura 21 -	Gráficos de Pareto dos Efeitos Padronizados para a) tXe, b) L, c) *a e d) *b.	44
Figura 22 -	Imagens das fatias de banana em cada ensaio estudado. Abaixo de cada imagem encontra-se a coloração média das fatias na escala RGB.	47
Figura 23 -	Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras secas não tratadas (a), com aplicação de 30 min de pré-tratamento com de ácido acético (b) e (c) uma potência de 72 W de radiação UV-C.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Equações de Navier-Stokes para fenômenos de transporte em geometria cartesiana.	13
Tabela 2 -	Matriz do planejamento fatorial para definir as melhores condições de secagem.	22
Tabela 3 -	Modelos empíricos utilizados para ajuste aos dados experimentais.	27
Tabela 4 -	Equações para o número de Nusselt de acordo com a geometria associada de acordo com o valor do Ra encontrado.	31
Tabela 5 -	Valores de Rayleigh e Nusselt para determinação dos respectivos coeficientes de convecção (h) para cada material.	32
Tabela 6 -	Tabela 7 - Difusividade efetiva dos experimentos de secagem realizados.	38
Tabela 7 -	Difusividade efetiva obtida para cada cinética através do método de Levenberg–Marquardt.	39
Tabela 8 -	Tabela 9 – Parâmetros dos modelos empíricos ajustados.	42
Tabela 9 -	Parâmetros de cor das fatias de banana secas.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL.....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	BANANA.....	4
2.2	FRUTAS SECAS	5
2.2.1	Cinética de secagem	5
2.3	APLICAÇÃO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS NA DEGRADAÇÃO DE COMPOSTOS LIGNOCELULÓSICOS.....	7
2.4	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	10
2.4.1	Radiação UV-C: Ação germicida	11
2.4.2	Efeito da radiação UV sobre compostos lignocelulósicos	12
2.5	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	15
2.5.1	Geração da malha.....	16
2.5.1.1	<i>Malha estruturada.....</i>	16
2.5.1.2	<i>Malha Body-fitted.....</i>	18
2.5.1.3	<i>Malha não-estruturada</i>	19
2.5.2	Método dos volumes finitos - MVF.....	20
2.5.3	Uso de CFD no estudo e construção de secadores	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	MATÉRIA-PRIMA	23
3.2	PLANEJAMENTO FATORIAL	24
3.3	PRÉ-TRATAMENTO COM ULTRASSOM E ÁCIDO ACÉTICO	24
3.4	APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	25
3.5	SECAGEM.....	25
3.5.1	Descrição do secador	25
3.5.2	Cinética de secagem	28
3.5.3	Análise de cor e microscopia eletrônica de varredura (MEV)	30
3.6	SIMULAÇÃO DO SECADOR VIA CFD: geometria, malha e <i>solver</i>	31
3.6.1	Determinação dos coeficientes de convecção	33
3.6.2	Validação experimental da simulação via CFD	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35

4.1	SIMULAÇÃO VIA CFD E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	35
4.2	DIFUSIVIDADE EFETIVA E TAXA DE SECAGEM	39
4.3	MODELAGEM EMPÍRICA E COLORIMETRIA.....	43
4.4	ANÁLISE MORFOLÓGICA SUPERFÍCIE DAS FATIAS	51
5	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	55
5.1	CONCLUSÃO	55
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A – PATENTE PUBLICADA DO SECADOR.....	67

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quarto maior produtor de banana do mundo, com produção estabilizada acima de 6,6 milhões de toneladas por ano, segundo Kist e Beling (2023). Entretanto, um problema que assola a produção de frutas é a perda pós-colheita, que podia atingir até 50% da produção em 2015, segundo Leite *et al.* (2015), e que atualmente pode chegar a 60%, segundo o relatório “*Food Waste Index Report 2024*”, feito pelo *Environment Programme* da Organização das Nações Unidas (ONU). Esse paralelo demonstra que, mesmo após nove anos, o desperdício de alimentos não retroagiu, evidenciando a necessidade de tecnologias que propiciem sua redução. Pensando nisso, o aprimoramento das técnicas de conservação, juntamente com a adoção de tecnologias que agreguem valor ao produto, continuam sendo alternativas para reduzir as perdas e aumentar a lucratividade.

A secagem é um dos métodos de conservação mais antigos que a humanidade tem conhecimento. A remoção do conteúdo de água das frutas reduz a atividade de água, o que minimiza mudanças químicas e físicas, responsáveis pela deterioração do alimento. Outra vantagem está na redução dos custos de transporte e estocagem devido a redução do peso e do volume (Ameri, Hanini e Boumahdi, 2020; Aral e Beşe, 2016). Uma das formas de avaliar e melhorar o processo de secagem se dá através das curvas de secagem, que têm uma grande importância do ponto de vista de engenharia, tecnologia e inovação de processos, uma vez que possibilitam sua otimização, dimensionamento de novos equipamentos e a realização de estimativas do tempo de secagem e dos gastos energéticos.

Buscando otimização, diversos pré-tratamentos para o processo de secagem têm sido aplicados visando a melhoria do processo de secagem como, por exemplo, a aplicação de ultrassom, que já é bem documentada (Wang, Xiao e Ye, 2019; Silva *et al.*, 2020), e o uso de soluções de ácidos orgânicos (Chiewchan, Praphraiphetch e Devahastin, 2010; Abd El-Wahhab *et al.*, 2023). Contudo, a aplicação de ácidos orgânicos como pré-tratamento ainda é pouco explorada, principalmente se considerado para melhoria da transferência de massa através da ação desses ácidos sobre compostos lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina) superficiais. Por meio da hidrólise e da solubilização desses compostos, o enrijecimento da camada superficial da fruta durante a secagem poderia ser minimizado, melhorando a difusão (Tomás-Pejó *et al.*, 2011).

Ainda visando a melhoria do processo de secagem, a aplicação da radiação ultravioleta do tipo C (UV-C) surge como uma inovação para melhorar a transferência de massa, além da sua já conhecida ação como germicida. Devido a sua característica ionizante, estudos envolvendo a radiação UV-C como sanitizante na indústria de alimentos (Fenoglio, Ferrario, Schenk e Guerrero, 2019; Huang e Chen, 2020) e agente catalítico de compostos lignocelulósicos na indústria de madeira, papel e celulose (Cogulet Blanchet e Landry, 2016; Mattonai, Watanabe, Shiono e Ribechini, 2019) vem aumentando ao longo dos anos, sendo seu potencial fotodegradativo ainda pouco explorado na secagem de alimentos.

A aplicação dessa tecnologia durante o processo de secagem gera novas necessidades em termos de equipamento e, assim, o estudo dos fenômenos de transporte na criação desses novos equipamentos passa a ser fundamental. Uma técnica que tem sido utilizada com afincos nos últimos anos para o entendimento preditivo dos fenômenos de transporte é a fluidodinâmica computacional (CFD) (Amanlou e Zomorodian, 2010; Aktaş, Sözen, Amini e Khanlari, 2017; Amjad, Chen, e Ambrose, 2024; Zhao, Qian, Xu, Zhao, Sun, e Yu, 2024). Esta técnica utiliza o método dos volumes finitos para dividir o domínio computacional, oriundo da geometria real, em elementos infinitesimais nos quais as equações de conservação são resolvidas (Silva *et al.*, 2020).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo estudar o uso de ácido acético e ultrassom como pré-tratamento na secagem convectiva assistida por radiação UV-C na potencial degradação de compostos lignocelulósicos superficiais em fatias de banana verde. Para isso, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Idealizar e construir um secador convectivo acoplado a radiação UV-C;
- Estudar via CFD as condições de operações do secador e validá-lo experimentalmente;
- Avaliar o efeito dos tratamentos através de um planejamento fatorial 2^3 sobre o tempo de secagem até obtenção do teor de umidade de 25%, tempo até o teor de umidade de equilíbrio e parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*);

- Estudar a difusividade efetiva da cinética de secagem e modelar as curvas empiricamente;
- Estudar o efeito dos tratamentos sobre o aspecto das amostras e da morfologia superficial pela potencial degradação dos compostos lignocelulósicos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção aborda a importância da banana num contexto regional, nacional e internacional, além de esclarecer os conceitos relacionados a secagem de frutas, pré-tratamentos, ação da radiação ultravioleta e seus possíveis efeitos sobre os compostos estruturais das frutas (celulose, hemicelulose, lignina).

2.1 BANANA

De acordo com os dados oficiais mais recentes da *Food and Agriculture Organization* – FAO (2022), o Brasil é o quarto maior produtor de banana do mundo, produzindo 6,854 milhões de toneladas em 2022, e responsável pelo consumo de quase 100% de sua produção. Nesse ranking, o país fica atrás de Índia (34,528 milhões de toneladas), China (11,776 milhões de toneladas) e Indonésia (9,245 milhões de toneladas). As regiões Sudeste e Nordeste são as maiores produtoras nacionais de banana fresca, respectivamente (Kist e Beling, 2023).

Com relação ao comércio externo, segundo o sistema Agrostat (<https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>) do Ministério da Agricultura (MAPA), o Brasil exportou 56,261 mil toneladas de banana em 2023. Destaca-se a região Sul (38,788 mil toneladas), que tem o estado de Santa Catarina como maior exportador da região e do Brasil (27,413 mil toneladas), seguida da região Nordeste (15,133 mil toneladas), que tem o Ceará (11,368 mil toneladas) e o Rio Grande do Norte (3,714 mil toneladas) como os principais exportadores da região, movimentando um total de US\$25,154 milhões (aproximadamente R\$128,788 milhões).

O cenário, mostrado até aqui, evidencia a importância econômica da banana para o país e para região Nordeste, seja na exportação ou na produção interna (principalmente). Entretanto, Leite *et al.* (2015), já citavam um problema que assola a produção de frutas, que é a perda pós-colheita, indicando que poderia chegar até 50% da produção. Em dados mais atuais, o relatório “*Food Waste Index Report 2024*”, feito pelo *Environment Programme* da Organização das Nações Unidas (ONU), indica que esse valor pode chegar a 60%. Pensando nisso, o aprimoramento das técnicas de conservação, bem como a adoção de tecnologias que agreguem valor ao produto, tornam-se alternativas para reduzir as perdas e aumentar a lucratividade.

2.2 FRUTAS SECAS

A secagem é um dos métodos de preservação mais antigos que a humanidade tem conhecimento. A remoção do conteúdo de água das frutas reduz a atividade de água, o que minimiza mudanças químicas e físicas responsáveis pela deterioração do alimento, já que inibe o crescimento microbiano e reduz a atividade de enzimas deteriorantes. Outra vantagem está na redução dos custos de transporte e estocagem devido a redução do peso e do volume (Ameri, Hanini e Boumahdi, 2020; Aral e Beşe, 2016).

Além disso, a busca por uma vida saudável tem impulsionado o consumo de frutas secas ao redor do mundo, por ser um lanche alternativo aos biscoitos salgados ou açucarados (Chang, Alasalvar e Shahidi, 2016). Esse aumento no consumo, associado, principalmente, à maior ingestão de nutrientes e de compostos bioativos, se deve também ao aperfeiçoamento das tecnologias envolvidas no processo de secagem, tornando-as mais seguras e mais escaláveis, permitindo o fornecimento desse produto aos mercados que possuem limitações sazonais na produção de frutas (Akman *et al.*, 2019; Jeszka-Skowron *et al.*, 2017).

Para muitas culturas de frutas, a sazonalidade não é uma questão que afete a produção brasileira, pelo contrário, é uma vantagem para agricultura do país frente aos demais, uma vez que suas dimensões, diversidade climática e tecnologia agrícola permitem a produção contínua de muitos tipos de frutas o ano todo, como manga, uva, morango etc., o que qualifica o Brasil a exportar produtos, como a banana, para os mercados que sofrem com as limitações sazonais.

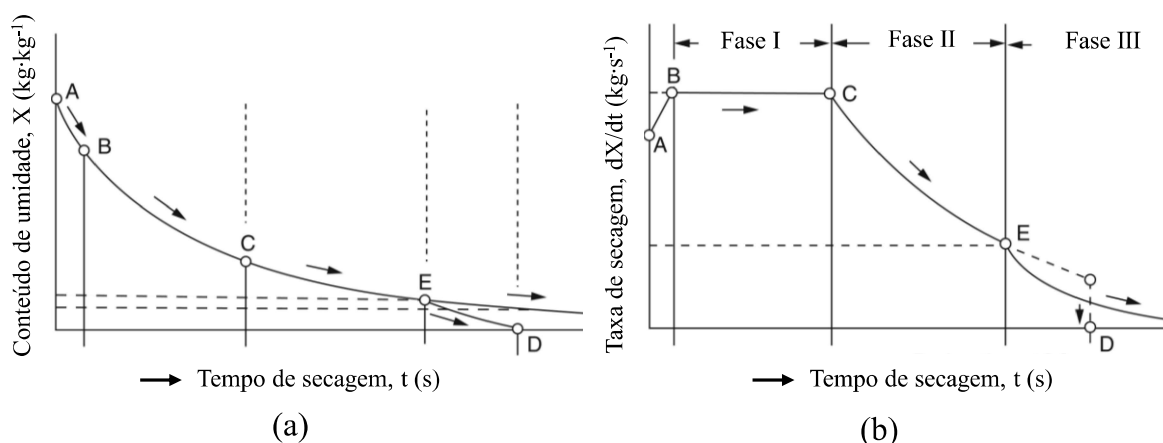
2.2.1 Cinética de secagem

A busca pela melhoria dos processos de secagem passa pelo estudo cinético, que permite o seu entendimento e possibilita sua otimização. Os perfis típicos de concentração (Figura 1.a), de característica notadamente exponencial, e taxa de secagem (Figura 1.b) atribuídos à secagem convectiva de um material sólido e úmido são mostrados na Figura 1.

Quando a superfície úmida do fruto entra em contato com o ar quente, forma-se uma fina camada de umidade livre que recobre inicialmente toda a superfície havendo, então, um gradiente de concentração de umidade suficiente entre o ar, a superfície e o interior do material. Nesse momento, a taxa de transferência de massa

é constante e igual à vaporização (controlado pela difusão) na superfície (Fase I). Ao final do período de taxa constante, no ponto C, a superfície não está mais saturada. Nessa condição, com a umidade interna do produto caindo, a transferência de massa começa a ser regida por forças capilares, que encontram resistência na superfície seca, reduzindo a taxa de secagem gradualmente ao longo do tempo (Fase II, segmento CE). Com o início da Fase III, a taxa de secagem passa a ser controlada pelo gradiente de concentração nas camadas mais internas do material. Nesse ponto, calor transferido do pelo ar quente possui papel de destaque. À medida que a profundidade das camadas úmidas dentro do material aumenta e a condutividade térmica das camadas subjacentes do material seco são muito baixas, a taxa de secagem é controlada pelos fenômenos de condução de calor (Babalís, Papanicolaou e Belessiotis, 2017).

Figura 1 – Curvas típicas de secagem. a) Perfil de concentração ao longo do tempo. b) Taxa de secagem em função do tempo



Fonte: Babalis, Papanicolaou e Belessiotis (2017).

Para otimizar a secagem de alimentos, através do dimensionamento de equipamentos, estimativas do tempo, redução de gastos energéticos etc., as curvas cinéticas são fundamentais do ponto de vista tecnológico e de inovação na engenharia. Portanto, esse processo continua sendo explorado até os dias atuais (Li *et al.*, 2019; Mewa *et al.*, 2019; Wu, Zhang e Li, 2019; W. Jin *et al.*, 2024).

Diversos pré-tratamentos têm sido aplicados visando a melhoria do processo de secagem, como por exemplo micro-ondas, radiação ultravioleta (UV), plasma frio, desidratação osmótica, ultrassom, entre outros. Dentre eles, a aplicação de ultrassom vem sendo amplamente estudada nos últimos anos (Dias da Silva *et al.*, 2016; Tao *et*

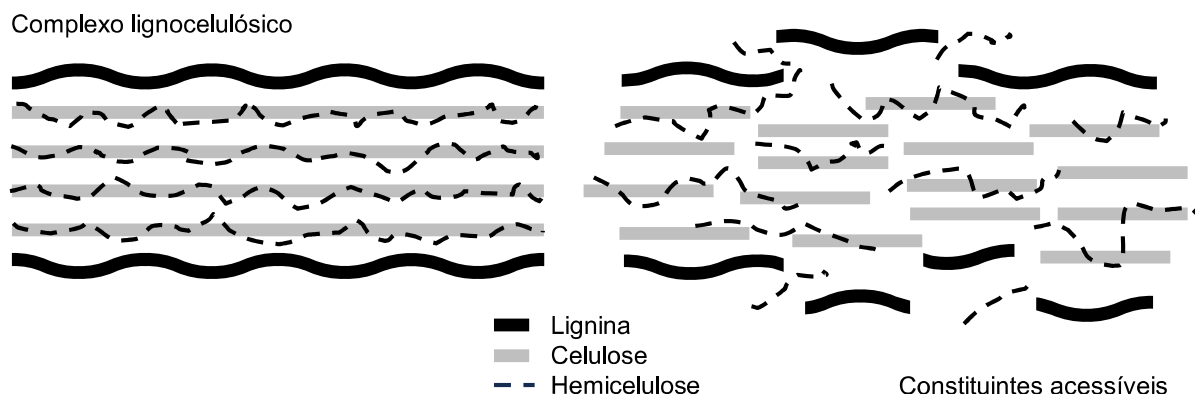
al., 2016; Corrêa *et al.*, 2017; Horuz, Jaafar e Maskan, 2017; Magalhães *et al.*, 2017; Oladejo *et al.*, 2017; Jin, Zhang e Shi, 2018; Cao *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018). Não obstante, a aplicação de ácidos orgânicos, como ácido acético, em pré-tratamentos ao processo de secagem ainda é pouco explorada, principalmente visando a melhoria da transferência de massa através da ação desses ácidos sobre compostos lignocelulósicos superficiais, por meio da hidrólise e da solubilização, que poderia minimizar o enrijecimento da camada superficial da fruta durante a secagem, melhorando a difusão (Tomás-Pejó *et al.*, 2011).

Diversos estudos têm sido realizados buscando otimizar o processo de secagem de banana, indicando sua importância industrial devido ao alto índice de consumo *per capita*. Azoubel *et al.* (2010) já analisavam em seu estudo a otimização da cinética de secagem de fatias de banana Pacovan através da aplicação de ondas ultrassônicas. Zhou *et al.* (2022) avaliaram a implicação de vácuo pulsado sobre a cinética de secagem de banana conforme a maturação ocorresse. Pinheiro *et al.* (2023) buscaram prever a difusividade efetiva na secagem de maçã e banana através da cinética de secagem. Sun *et al.* (2024) realizaram análises experimentais de um sistema de secagem por bomba de calor fechada com CO₂ combinado com desumidificação rotativa para secagem de rodela de banana. Mawire *et al.* (2024) avaliaram experimentalmente a secagem de fatias de banana em um novo secador solar indireto. Como é possível notar, o estudo da secagem através da cinética é de suma importância para otimização e na predição das propriedades para aplicações industriais.

2.3 APLICAÇÃO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS NA DEGRADAÇÃO DE COMPOSTOS LIGNOCELULÓSICOS

Compostos lignocelulósicos são estruturas vegetais complexas formadas por celulose, hemicelulose e lignina. A associação e a estruturação formada por esses polímeros conferem ao material resistência mecânica e química, dificultando processos que visam os constituintes desses polímeros por meio da sua degradação (Figura 2), como é o caso de setores baseados na conversão de biomassa lignocelulósica, oriunda do reaproveitamento de resíduos florestais, agrícolas e alimentícios, em químicos e biocombustíveis (Okur e Eslek Koyuncu, 2020; Raman e Gnansounou, 2014).

Figura 2 – Quebra do composto lignoceluloso em seus constituintes



Fonte: O autor (2024), baseado em Okur e Eslek Koyuncu (2020).

A celulose é uma estrutura polimérica linear e cristalina formada por glicose (An *et al.*, 2020). Hemicelulose é um polímero, formado por açúcares de cinco e seis carbonos, que rodeia a celulose e se ramifica profundamente na estrutura da parede da célula vegetal, fortalecendo tais estruturas (Syafrika e Matsumura, 2018). Já a lignina pode ser descrita como uma rede polimérica hidrofóbica de fenilpropileno que proporciona resistência química e biológica à estrutura vegetal (Okur e Eslek Koyuncu, 2020; Syafrika e Matsumura, 2018).

Tecnologias que buscam a substituição do petróleo e de açúcares, ditos de primeira geração, na produção de combustíveis e produtos químicos, como a biorrefinaria, têm estudado e utilizado resíduos da indústria agrícola e florestal (biomassa lignocelulósica de baixo valor agregado) para esse fim (Palamae *et al.*, 2017; Raman e Gnansounou, 2014; Zhao *et al.*, 2018). Entretanto, a complexidade e resistência degradativa da biomassa lignocelulósica tem sido uma barreira nesses processos, o que vem impulsionando pesquisas diversas que buscam a degradação de tal estrutura visando acesso aos constituintes estruturais dessa biomassa, removendo essa barreira à métodos que despolimerizam toda essa estrutura (Kalogiannis *et al.*, 2020).

O uso de ácidos orgânicos no processo de quebra estrutural da biomassa lignocelulósica, inspirado pela indústria de papel e celulose, se dá pela facilidade desses ácidos de degradar a lignina e solubilizar a hemicelulose em temperaturas brandas (Araújo Padilha *et al.*, 2020). Araújo Padilha *et al.* (2020) buscaram em seu estudo agregar valor ao bagaço de caju, por meio de um pré-tratamento com ácido acético para quebra da estrutura e acesso aos constituintes fermentescíveis, visando

produzir etanol celulósico (biocombustível) e lignina para utilização em cosméticos com função de proteção solar (proteção contra raios UV-A e UV-B).

Lyu *et al.* (2021) estudaram o fracionamento da palha de milho através de um pré-tratamento combinado de ácido peracético e ácido maleico, visando enriquecer o resíduo sólido pós-tratamento com constituintes fermentescíveis através de degradação da biomassa lignocelulósica, potencializando, assim, sua utilização como fonte renovável para produção de biocombustíveis. Sahu e Pramanik (2018) avaliaram diferentes ácidos orgânicos (lático, oxálico, cítrico e maleico) como pré-tratamento de resíduos de descaroçadores de algodão para serem utilizados como matéria-prima para produção de bioetanol.

Embora a motivação inicial para esses estudos tenha vindo da indústria de papel, buscando maior acessibilidade a celulose, bem como de setores que buscam fontes de energia renováveis, a quebra do complexo lignocelulósico, ou uso de ácidos orgânicos, também desperta interesse em outras áreas.

A secagem de alimentos tem sido estudada e aprimorada há séculos, com diversos métodos testados: secagem assistida por ultrassom (Mou e Chen, 2021), secagem a vácuo assistida por micro-ondas (Zhou *et al.*, 2021), secagem por infravermelho (Huang *et al.*, 2021), secagem com pré-tratamento ultrassônico (Zhao *et al.*, 2021), etc. Dentre essas diferentes linhas de pesquisa, há também outras que forma um paralelo entre a secagem de alimentos e o uso de técnicas que busquem alterar a organização estrutural de vegetais.

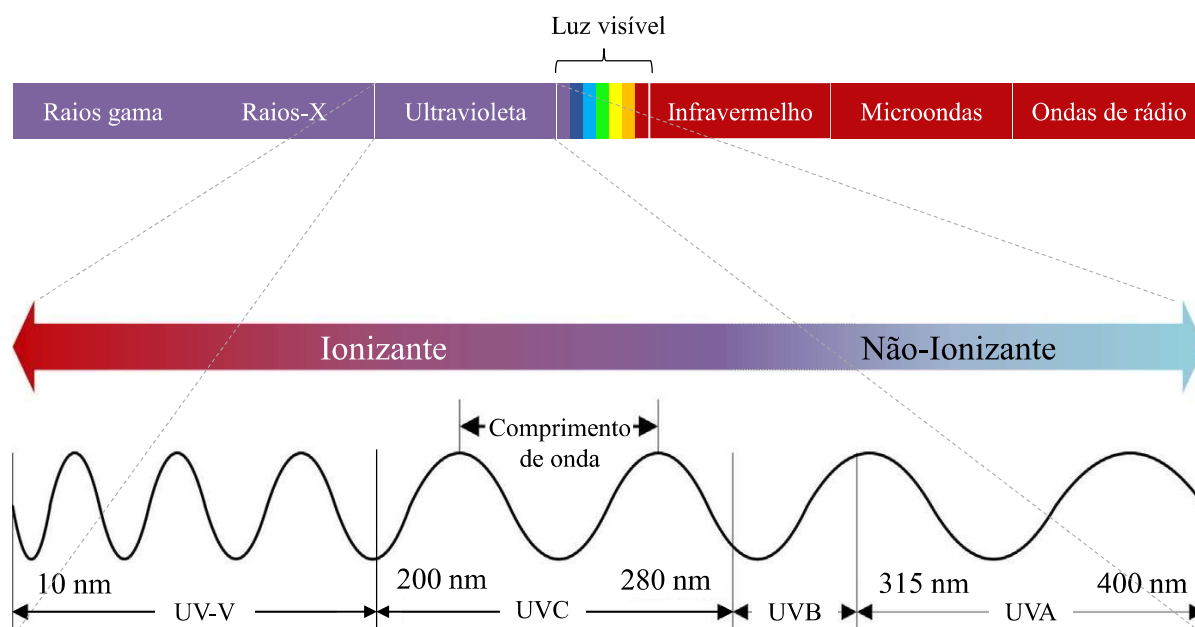
Chiewchan, Prapthraiphetch e Devahastin (2010) aplicaram ácido acético em repolho e cebolinha, como pré-tratamento à secagem convectiva, e analisaram a forma como o ácido afetou a topologia dos vegetais. Os autores constataram que a aplicação do ácido resulta numa alteração topológica significativa na superfície dos vegetais analisados. Hiranvarachat, Devahastin e Chiewchan (2011) analisaram o efeito de diferentes pré-tratamentos ácidos com ácido cítrico sobre algumas características físico-químicas de cenoura durante a secagem, como encolhimento, capacidade de retenção, mudanças na cor etc. Neste trabalho, os autores identificaram que, para cenoura, o branqueamento em ebulição com ácido cítrico foi efetivo na otimização e melhoria da secagem, reduzindo o tempo e preservando características físico-químicas de interesse. Já o trabalho realizado por (Zhao *et al.*, 2017) apresenta o ácido acético como um pré-tratamento que promove o aumento na dureza em fatias de batata cozidas.

A literatura apresentada até aqui reforça o potencial da utilização de ácidos na melhoria do processo de secagem, mas também revela quão desconhecida é a forma como esses ácidos agem como pré-tratamentos em diferentes processos. Outra tecnologia que vem sendo estudada para a quebra do complexo lignocelulósico, que poderia beneficiar o processo se secagem juntamente com a aplicação de ácido, é o uso de radiação ultravioleta, que apresenta características que propiciam a degradação desses compostos.

2.4 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A radiação ultravioleta (UV) é emitida em uma região do espectro eletromagnético que está entre os raios-X e a faixa da radiação visível, ou seja, entre 10 e 400 nm. A literatura subdivide a região da radiação UV em quatro partes: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm), UV-C (200-280 nm) e UV-vácuo (10-200 nm), conforme Figura 3. A radiação UV é comumente dita como sendo não ionizante, entretanto, nos comprimentos de onda mais curtos (UV-C), ou seja, de maior energia, ocorre ionização (Hinds *et al.*, 2019; Sandle, 2013).

Figura 3 – Subdivisões da região da radiação ultravioleta



Fonte: Hinds *et al.* (2019) e Murray e Holbert (2020).

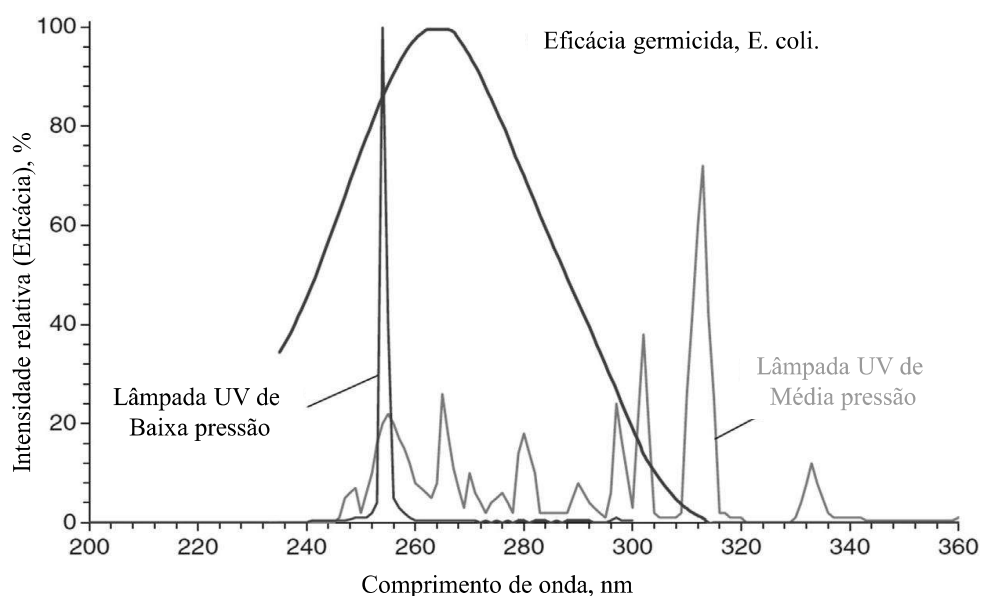
Devido a essa característica ionizante, estudos envolvendo a radiação UV-C como sanitizante na indústria de alimentos e agente catalítico de compostos lignocelulósicos vem aumentando ao longo dos anos.

2.4.1 Radiação UV-C: Ação germicida

A grande parte dos microrganismos é susceptível a danos provocados pela radiação UV, exceto as bactérias fotossintetizantes. Dentre os tipos de radiação UV, a UV-C é a de maior energia, uma vez que possui o menor comprimento de onda e, conseqüentemente, maior frequência. O efeito da radiação UV-C sobre os microrganismos envolve reações fotoquímicas, que podem ser iniciadas através de dois mecanismos: reações diretas e fotossensibilizantes. O primeiro caso ocorre quando um fóton de luz é absorvido por alguma molécula. Nesse cenário, a absorção do fóton afeta as ligações O–H, C–C, C–H, C–N, N–H e S–S. No caso das reações fotossensibilizantes, o que ocorre é interação do fóton de luz com o oxigênio (fotoxidação) em seu estado fundamental, que passa para o estado excitado (Antonio-Gutiérrez *et al.*, 2019).

O efeito germicida provocado pela exposição à radiação UV-C é uma função do comprimento de onda, atingindo seu pico de absorção em 257,3 nm (Figura 4). Em torno desse comprimento de onda, ocorre o favorecimento das reações fotoquímicas, inativando processos de crescimento e reprodução dos microrganismos devido à quebra das ligações no DNA (Turtoi e Borda, 2013).

Figura 4 - Inativação celular em função do comprimento de onda exposto da radiação UV e do comprimento de onda operado numa lâmpada de mercúrio



Fonte: Adaptado de Koutchma, Popović e Green (2019).

Com relação a aplicação em alimentos, a literatura tem se mantido rica e atualizada quanto ao tema, avaliando diferentes matrizes alimentares, sejam elas sólidas, líquidas ou pastosas. Para exemplificar, estudos recentes continuam avaliando o efeito germicida da radiação UV-C em alimentos: em caquis secos (Gündüz e Korkmaz, 2019), mosto de vinho (Diesler *et al.*, 2019), água saborizada de oxicoco (Gopisetty *et al.*, 2019), suco de tangerina (Fenoglio *et al.*, 2019), mirtilo, tomate e alface (Huang e Chen, 2020), tahine (Al-Nabulsi *et al.*, 2020). Aplicações de radiação UV-C em banana são inexistentes na literatura.

2.4.2 Efeito da radiação UV sobre compostos lignocelulósicos

A fotodegradação de compostos lignocelulósicos através da radiação ultravioleta tem sido explorada na degradação de madeira, uma vez que a exposição a esse tipo de radiação provoca mudanças na cor e perda de propriedades mecânicas, sendo então relevantes em muitos campos, como ciências de materiais e construção (Mattonai *et al.*, 2019). Esses compostos são capazes de absorver a radiação em curtos comprimentos de onda, porém, a fotossensibilidade é diferente para cada componente (Cogulet, Blanchet e Landry, 2016).

A celulose, hemicelulose e lignina são os três principais compostos lignocelulósicos presentes na parede celular das plantas, sendo responsáveis por 40-60%, 20-40% e 10-25% da biomassa, respectivamente (Jin *et al.*, 2017). (Cogulet, Blanchet e Landry (2016) estudaram a degradação através da radiação UV-A desses componentes e seus derivados. Os autores revelam que a lignina foi a mais susceptível à degradação, sendo então mais fotossensível a esse tipo de radiação, seguida pela hemicelulose e celulose. A degradação desses compostos também foi estudada por Varga *et al.* (2017), avaliando a dependência térmica do processo fotodegradativo usando radiação UV (31% UV-A, 24% UV-B e 25% UV-C).

Entretanto, a radiação UV geralmente não é empregada como processo único, talvez por não aplicarem a radiação UV ionizante (UV-C) de forma seletiva, como Varga *et al.* (2017) e Li *et al.* (2021). O que ocorre muitas vezes é a associação com outros métodos para potencializar o efeito degradativo, já que muitos estudos (Ahmad e Pant, 2018; Liu *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2018, 2020) utilizam radiação UV não-ionizante (UVA-A, UV-B, UV-vis), usando desde fotocatalizadores até ácidos de Lewis (M'Arimi *et al.*, 2020; Navakoteswara Rao *et al.*, 2021).

Considerando o efeito sobre os componentes estruturais dos vegetais (celulose, hemicelulose e lignina), pode-se imaginar que a matriz vegetal em que esses componentes estão organizados pode influenciar no efeito fotodegradativo da radiação UV, podendo ser uma função, por exemplo, da complexidade do arranjo estrutural do objeto estudado, como é o caso quando comparamos a madeira (arranjo estrutural complexo) com um alimento (arranjo estrutural simples). Nesse cenário, imaginar que a aplicação da radiação UV numa matriz alimentar (fruta) durante o processo de secagem pode melhorar a transferência de massa se torna razoável.

Boa parte dessa razoabilidade pode ser explicada por uma tecnologia também não térmica já amplamente explorada na área de secagem que é a aplicação de ultrassom para melhorar a transferência de massa (Dias da Silva *et al.*, 2016; Tao *et al.*, 2016; Corrêa *et al.*, 2017; Horuz, Jaafar e Maskan, 2017; Magalhães *et al.*, 2017; Oladejo *et al.*, 2017; Jin, Zhang e Shi, 2018; Cao *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018) e que também é aplicada para degradar os compostos lignocelulósicos (M'Arimi *et al.*, 2020). Essa técnica utiliza a vibração molecular produzida pelo som para causar o colapso estrutural da fruta através da cavitação, o que provoca a formação de microcanais, aumentando a difusão. A incidência da radiação UV sobre a fruta pode ter um efeito semelhante a este, devido aos mecanismos de transição eletrônica, que também podem provocar o colapso da estrutura através da perda de propriedades mecânicas causadas pela fotodegradação dos compostos lignocelulósicos, podendo também gerar microcanais que podem beneficiar a transferência de massa.

A fruta da bananeira, objeto de estudo no presente trabalho, apresenta em torno de $4,0 \pm 0,6\%$ de celulose, $4,4 \pm 2,2\%$ de hemicelulose e $4,2 \pm 0,6\%$ de lignina (Velásquez-Arredondo *et al.*, 2010). Esses níveis podem ser consideráveis para o efeito fotodegradativo que ocorre na superfície do alimento, podendo melhorar a transferência de massa devido ao que foi explicado até aqui.

Köse e Erentürk (2010) e Phimphilai, Maimamuang e Phimphilai (2014) aplicaram radiação UV na secagem de vegetais comestíveis, – Visco (*Viscum album* L.) e Longan (*Dimocarpus longan* 'Daw'), respectivamente. No primeiro trabalho, os autores avaliaram o efeito da radiação UV durante a secagem convectiva e constataram uma melhora na taxa de secagem, porém, não revelam ou discutem uma causa para esse ocorrido. Já o segundo estudo, importante, porém limitado, procurou entender um pouco do que ocorre ao se aplicar radiação UV, como pré-tratamento à secagem, através de microscopia eletrônica. Os autores afirmam que a melhoria do

processo de secagem se deu pela formação de camadas mais profundas na superfície do fruto, aumentando a taxa de evaporação. Como é possível notar, os trabalhos que estudaram o tema são limitados e pouco conclusivos.

Um review feito por Onwude *et al.* (2017), intitulado “*Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies*”, aborda, em uma de suas seções, o efeito da radiação UV combinado com secagem convectiva. Esses autores afirmam que, até a publicação do artigo, só havia dois trabalhos relacionados a este tema, que são o trabalho de Köse e Erentürk (2010) e de Phimphilai, Maimamuang e Phimphila (2014). Destes, apenas o trabalho de Köse e Erentürk (2010) aplica a radiação UV durante o processo de secagem. Nenhum desses trabalhos avalia o impacto da radiação UV sobre a qualidade dos alimentos. Esses dois trabalhos continuam sendo os únicos desta natureza até a presente data.

Braga *et al.* (2019) avaliaram o efeito da radiação UV-pulsada como pré-tratamento a secagem convectiva de manga (*Mangifera indica* L.), utilizando uma lâmpada que emitia 30% da sua radiação como radiação ultravioleta, principalmente na faixa de 310 – 400 nm. Os autores afirmam que, até a publicação daquele artigo, nenhum trabalho da literatura disponível relatou os efeitos da radiação UV-pulsada sobre a secagem de alimentos, de modo que seu trabalho seria o primeiro a avaliar e discutir os esses efeitos sobre os parâmetros de secagem e qualidade de uma fruta seca. Os autores afirmam que o pré-tratamento com radiação UV-pulsada reduziu o teor de umidade inicial das amostras, mas não influenciou a difusão aparente e nem reduziu o tempo de secagem. Em relação aos parâmetros de qualidade avaliados, afirmam que, utilizando doses de 3,6 a 10,8 J/cm², as concentrações de vitamina C e carotenoides foram de 10 a 40% superiores aos valores obtidos para amostras não tratadas. Com relação as vitaminas (B1, B3 e B5), observou-se um aumento de 10 a 25% utilizando dosagens compreendidas entre 3,6 e 7,2 J/cm². Já a vitamina B6 foi altamente afetada pela radiação UV devido a sua fotossensibilidade, degradando-se em pelo menos 40%. Doses de radiação superiores a 10,8 J/cm² degradaram totalmente o conteúdo de vitaminas e carotenoides. Esse estudo é importante, uma vez demonstra que aplicar radiação UV pode preservar alguns compostos nutricionais dos alimentos.

2.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Com o desenvolvimento tecnológico da capacidade de processamento, a modelagem e simulação dos processos que envolvem os fenômenos de transporte puderam ser aprofundadas pelo que foi chamado de Fluidodinâmica Computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Através dessa técnica, novos equipamentos podem ser prototipados e estudados com um baixo custo.

A Fluidodinâmica Computacional é uma técnica que resolve problemas de fenômenos de transporte em uma determinada geometria (domínio computacional), resolvendo numericamente o conjunto de equações conservativas do transporte de quantidade de movimento, massa e energia na forma de calor (Tabela 1). Com isso, é possível prever diferentes perfis de propriedades envolvidas no processo (concentração, temperatura, velocidade etc.) (Augusto *et al.*, 2011).

Tabela 1 – Equações de Navier-Stokes para fenômenos de transporte em geometria cartesiana.

Conservação da massa (Lei da continuidade)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (2.1)$$

Conservação de quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton do movimento)

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{zx} \right] + \rho g_x \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left[\frac{\partial}{\partial y} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{zy} \right] + \rho g_y \quad (2.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] + \rho g_z \quad (2.4)$$

Conservação da energia (Primeiro Princípio da Termodinâmica)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (2.5)$$

Numa simulação via Fluidodinâmica Computacional, as variáveis de processo e a geometria de interesse são discretizadas num domínio computacional e, através dessa discretização, as equações podem ser resolvidas numericamente. Existem diferentes métodos de discretização, dos quais se pode citar como mais utilizados o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF) (Tu *et al.*, 2018c). Neste trabalho, o Método dos Volumes Finitos será descrito de forma mais detalhada, uma vez que é largamente utilizado em CFD em problemas tridimensionais. Mas antes, será dado um destaque sobre a geração da malha (discretização da geometria).

2.5.1 Geração da malha

A geração da malha, obtida a partir de uma geometria de domínio, é uma etapa fundamental do pré-processamento. Isso se deve ao fato dela influenciar os resultados numéricos, afetando a convergência da solução, principalmente em regiões com condições extremas de operação (altas tensões de cisalhamento, gradientes elevados etc.), que requerem um maior refinamento de malha, ou seja, maior concentração de elementos discretizados.

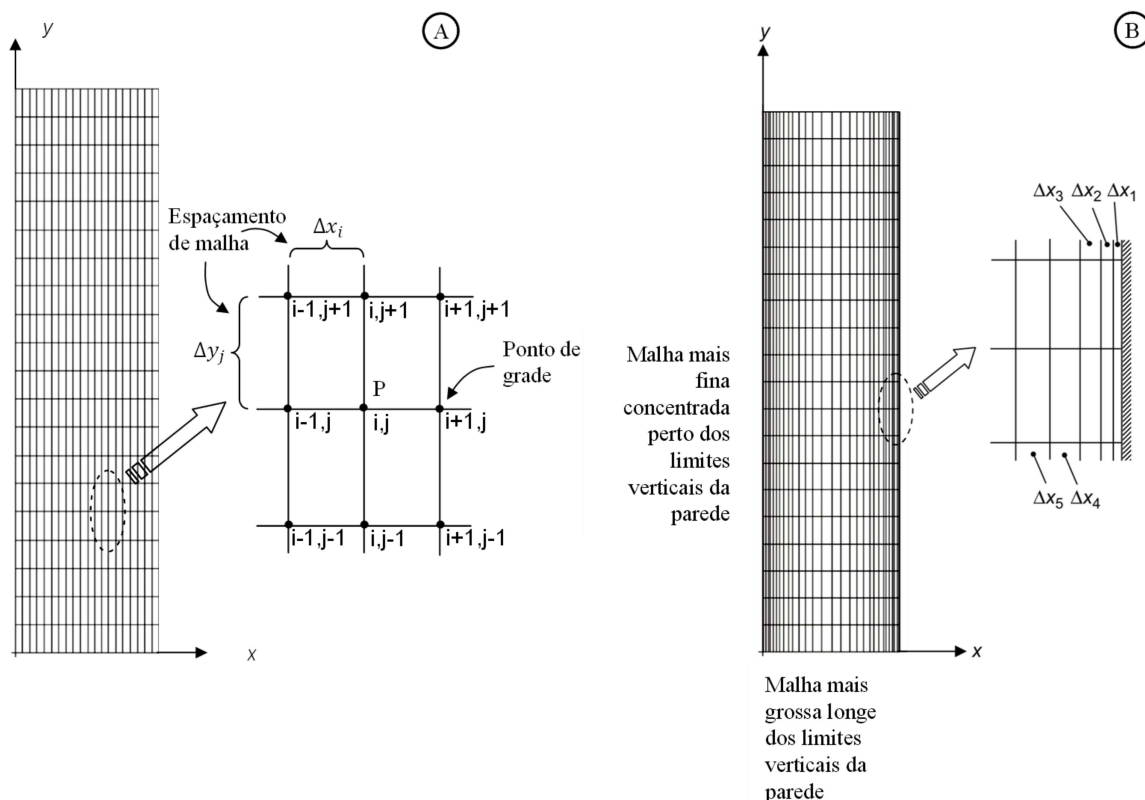
Devido ao seu impacto nos resultados e na convergência da solução, a geração de malha constitui uma área de estudo em desenvolvimento no mundo. Uma malha é um arranjo discreto de pontos que sobrepõem a geometria (domínio), através do qual ocorre uma subdivisão, gerando assim um conjunto de elementos que formam uma malha. Espera-se que, numa geração ideal da malha, todos os detalhes da região de interesse sejam capturados. Devido a esse fato, o tipo de malha escolhido influencia na forma como ela descreve a geometria. De forma simples, podemos dividir os tipos de malha em estruturada e não estruturada (Tu *et al.*, 2018a).

2.5.1.1 Malha estruturada

A malha estruturada (Figura 5) é o tipo mais simples, na qual os pontos de malha gerados são uniformemente espaçados. Considere um ponto P (i, j) no espaço cartesiano discreto, em que o índice “i” e “j” conotam, respectivamente, a localização do ponto nos eixos x e y (Figura 5.a). Querendo se distanciar do ponto P, os pontos adjacentes se darão aumentando ou reduzindo um ou os dois índices pela unidade, alocando assim valores discretizados aos espaçamentos de malha (Δx_i e Δy_j). Sendo

assim, os demais pontos no plano XY podem ser obtidos de forma incremental, obtendo-se então uma malha que recobre todo o domínio estudado (Tu *et al.*, 2018a).

Figura 5 – Malha estruturada com distribuição de espaçamento iguais em x e y (A); malha estruturada como distribuição de espaçamentos contínuos, porém diferentes para x e y (B)



Fonte: Adaptado de (Tu *et al.*, 2018a).

A depender do problema, podemos gerar uma malha com espaçamentos desiguais de Δx_i ou Δy_j , uma vez que se pode optar por concentrações de malha maiores em regiões de gradientes maiores, ou menores, em situações de custo computacional elevado ou em regiões menos importantes. Este arranjo variado é denominado de malha esticada ou concentrada (Figura 5.b). As considerações feitas até aqui podem ser estendidas para três dimensões, de modo a acrescentar o índice “k” para os valores na coordenada “z”, o que levará a um espaçamento Δz_k (Tu *et al.*, 2018a).

A Figura 5 representa uma forma ideal da aplicação de malhas estruturadas em domínios retilíneos. Entretanto, se houvesse um segmento curvo, por exemplo de 90°, a aplicação da malha estruturada resultaria em aproximações grosseiras,

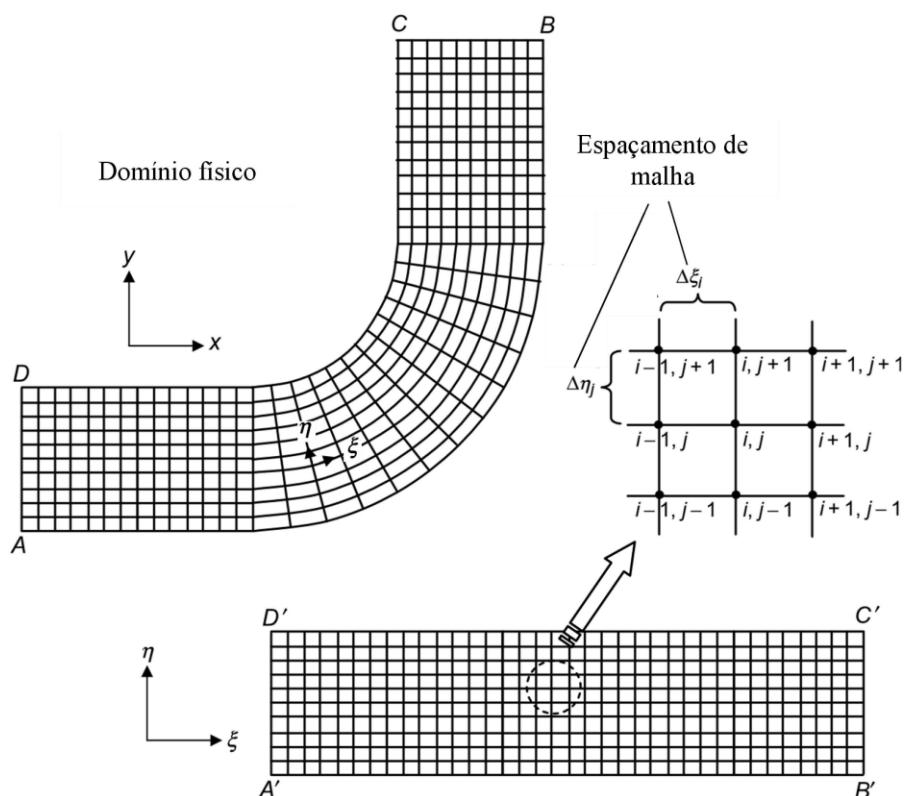
gerando serrilhados em regiões curvas. Essas aproximações acarretam erros na solução numérica.

Para melhorar a representatividade deste método num sistema curvilíneo, minimizando erros, é necessário um refino de malha por vezes desnecessário e desproporcional ao problema, tendo como consequência maiores gastos computacionais de armazenamento e processamento. Isso evidencia a limitação das malhas cartesianas em geometrias curvilíneas (Tu *et al.*, 2018a). Diante disto, e sabendo as limitações da malha estruturada, a Malha Ajustada ao Corpo, do inglês *Body-fitted Mesh*, se torna uma alternativa viável para a situação descrita.

2.5.1.2 Malha *Body-fitted*

Aplicar a malha *Body-fitted* numa geometria curva de 90° requer que se considere que as paredes do conduto calhem com as linhas η , correspondente à direção y (Figura 6). Ao percorrer agora a direção x , observa-se valores referentes à ξ , ou seja, a localização geográfica no domínio discreto de um ponto qualquer (i, j) do plano XY será (ξ_i, η_j) no novo domínio computacional. Aqui, equações a serem resolvidas são expressas em “coordenadas curvilíneas”, ou seja, são convertidas de (x, y) para (ξ, η) (Tu *et al.*, 2018a).

Figura 6 – Visualização da aplicação da malha *Body-fitted* e a mudança de coordenadas



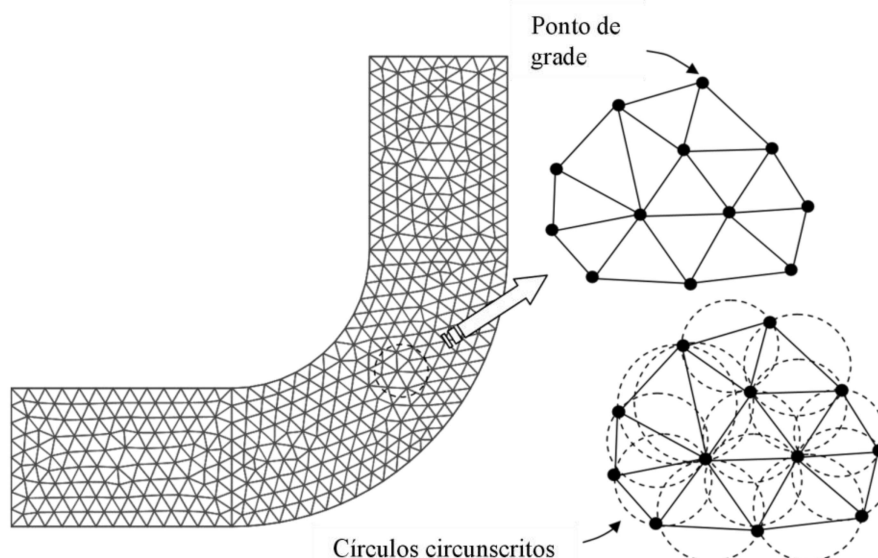
Fonte: Adaptado de (Tu *et al.*, 2018a).

2.5.1.3 Malha não-estruturada

Seguindo o exemplo da geometria curva de um conduto a 90°, o preenchimento interior de uma geometria num domínio discreto poderia ser feito a partir de uma malha não-estruturada, além do uso da malha *Body-fitted*. Na Figura 7, os domínios geométricos não aparentam ter regularidade em sua distribuição, o que realmente pode ser observado. Isso basicamente caracteriza uma malha não-estruturada.

Neste caso de superposição de malha, as células não apresentam uma estruturação uniforme ao longo do domínio, ou seja, não há uma equivalência de coordenadas que correspondam às curvilíneas (ξ , η), como no caso da malha *Body-fitted*. A formação do domínio discreto com malhas não-estruturadas triangulares (2D) e tetraédricas (3D) são largamente utilizadas e aceitas, porque oferecem um alto nível de representação da curvatura em regiões limites, concebendo melhor as regiões mais importantes da geometria, onde se requer um maior refino de malha. A geração desse tipo de malha faz uso da Triangulação de Delaunay, como pode ser visto na Figura 7 (Tu *et al.*, 2018a).

Figura 7 – Geração de malha não-estruturada e a Triangulação de Delaunay



Fonte: Adaptado de (Tu *et al.*, 2018a).

2.5.2 Método dos volumes finitos - MVF

Neste método, o domínio é subdividido em uma quantidade finita de volumes de controle a partir da prerrogativa de que as propriedades relevantes são efetivamente conservadas. Em cada volume de controle, um centroide, onde se calcula os valores de cada variável de interesse por integração, é formado e a partir disto se faz uso de interpolação para calcular os valores de cada propriedade estudada, ao longo da superfície do volume de controle. Desta forma, uma equação algébrica pode ser formulada singularmente para cada volume de controle (Tu *et al.*, 2018b).

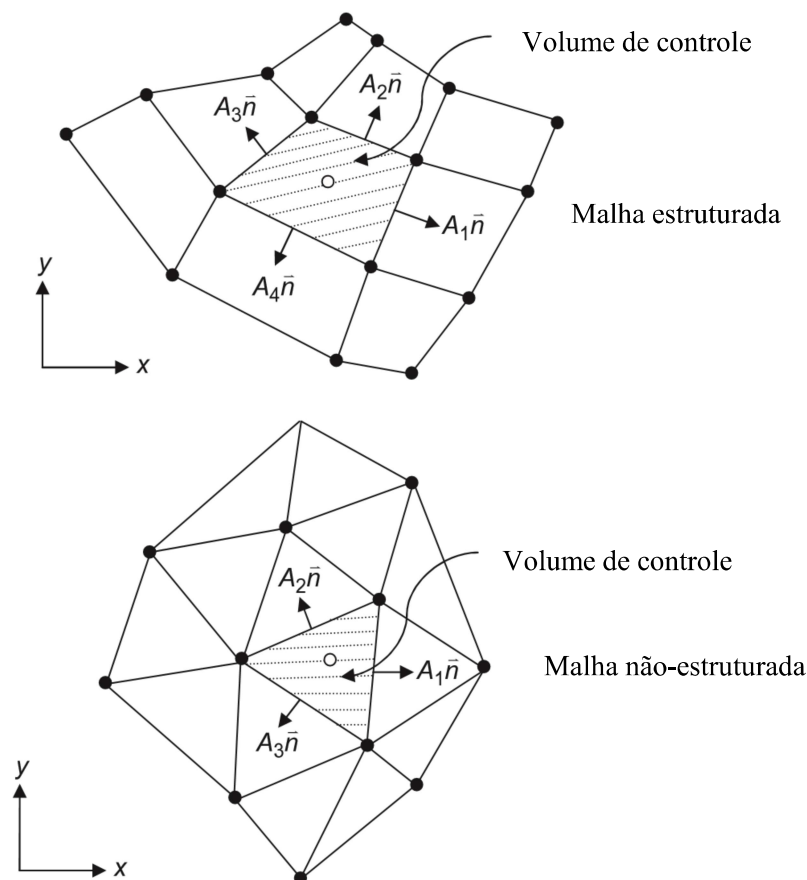
O método dos volumes finitos apresenta maior versatilidade, diferindo-se de outros métodos, como o de diferenças finitas: não há aqui a existência de uma exigência quanto ao tipo de malha utilizada, ou seja, não somente malhas estruturadas, mas também não-estruturadas que, como já discutido antes, apresentam maior vantagem quanto à sobreposição da malha sobre a geometria. Entretanto, vale ressaltar uma desvantagem deste método ao comparar com o método de diferenças finitas: aproximar as resoluções das equações diferenciais de alta ordem (maiores que segunda ordem) é mais complexa em 3D, uma vez que aqui já são exigidos dois requisitos de aproximação, que são a integração e interpolação. Mas o método oferece mais vantagens do que contrapartidas, como: maior flexibilidade a

geometrias e o fato do método não necessitar da aplicação de transformadas nas equações devido ao sistema de coordenadas, como em malhas *Body-fitted* (Tu *et al.*, 2018b).

Para tornar o método intuitivo, considere a representação da Figura 8, na qual observa-se uma malha estruturada (quadrilateral) e não-estruturada (trilateral) no plano 2D feita para discretizarmos as equações diferenciais parciais (Tu *et al.*, 2018b).

Como o MVF é baseado na integração do volume de controle, e este volume é delimitado por suas superfícies, há implicação direta sobre a discretização das derivadas de primeira e segunda ordem para ϕ (variável estudada do fluido). Neste caso, as áreas superficiais na direção normal ($\vec{n}$) do volume de controle são resolvidas direcionalmente para cada coordenada cartesiana, produzindo as áreas projetadas A_i^x e A_i^y das direções x e y, em respectivo (Figura 8) (Tu *et al.*, 2018b).

Figura 8 – Representação de malha estruturada e não estruturada para o método de volumes finitos (símbolos completos denotam vértices de elementos e símbolos abertos no centro dos volumes de controle denotam nós computacionais).



Fonte: Adaptado de (Tu *et al.*, 2018b).

2.5.3 Uso de CFD no estudo e construção de secadores

Ao longo dos anos, pesquisas que fazem uso de técnicas numéricas têm sido realizadas devido ao fato de ser possível prototipar novos equipamentos ou condições de operação com um baixo custo e relativa precisão. Dentre essas técnicas, o CFD tem sido amplamente utilizado no estudo de operação e simulação de secadores quanto aos fenômenos de transporte, sendo este um tema ainda muito atual em diversos setores, inclusive na engenharia química e de alimentos.

Cârlescu *et al.* (2017) utilizaram CFD em seu estudo para simular os fenômenos de transferência de calor e massa durante a secagem de damasco. Malekjani *et al.* (2018) abordaram em seu estudo os avanços quanto à simulação do processo de secagem de alimentos através de fluidodinâmica computacional, evidenciando o poder da ferramenta e os resultados confiáveis da técnica. Jubaer *et al.* (2019) trazem em seu estudo a análise do efeito de modelos de turbulência no processo de secagem por spray em contracorrente realizada via CFD, revelando as consequências do uso bem como pontos de otimização. Fernandes da Silva *et al.* (2020) estudaram o perfil de temperatura de uma fatia de melão em secador convectivo, que permitiu a definição de melhores condições de operação do equipamento. Jubaer *et al.* (2020) realizaram um estudo de baixo custo com simulação via CFD do processo de secagem por *spray drying*, evidenciando como o processo pode ser predito e otimizado. Rani *et al.* (2023) estudaram o processo de secagem de abacaxi usando um secador solar misto inovador através da simulação via CFD dos fenômenos de transferência de calor e massa. Tu *et al.* (2023) investigaram o processo de secagem de partículas úmidas em um secador de leito fluidizado através de simulação via CFD e validações experimentais dos resultados. Reineking *et al.* (2024) analisaram a secagem convectiva de cavacos de madeira usando simulação via CFD com modelos parametrizados de partículas único. Liang *et al.* (2024) usaram CFD para simular o processo de secagem com ciclone de autorrotação simulando partículas em alta velocidade e sua transferência de calor. Como é possível notar, diversos estudos foram e são realizados quanto o uso de CFD para predição dos fenômenos de transporte na projeção ou idealização de novos secadores ou modos de operação mais eficientes, demonstrando-se assim a atualidade e relevância do tema.

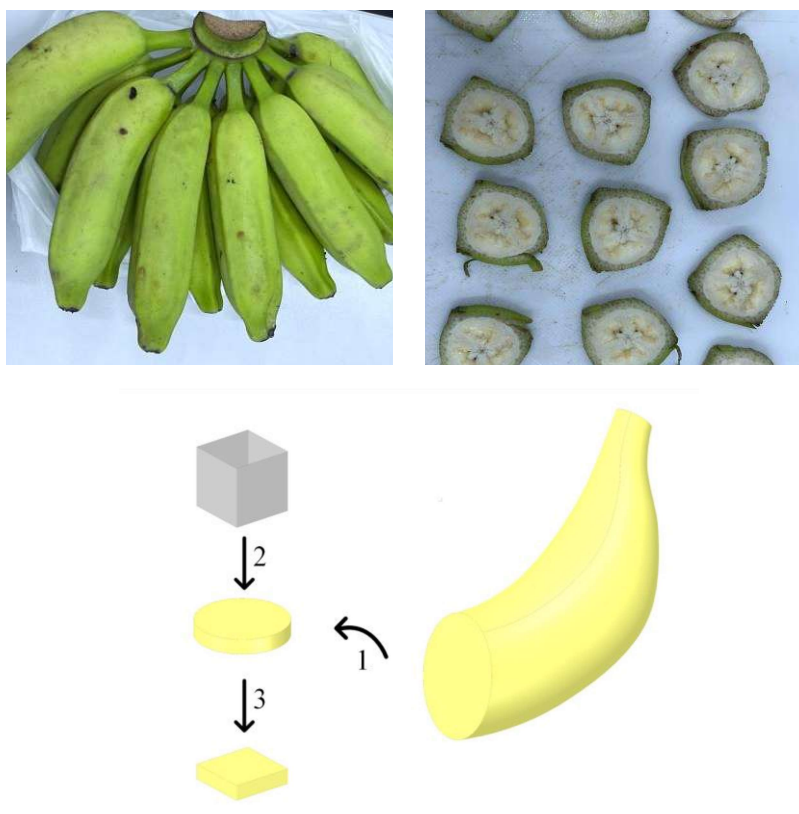
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consistiu na aplicação de pré-tratamentos (ultrassom e ácido acético) à secagem convectiva de banana verde assistida por radiação ultravioleta do tipo C em um secador idealizado e construído para esse fim. As condições para secagem foram estudadas de acordo com um planejamento fatorial 2^3 . A seguir, são descritas as etapas do processo metodológico.

3.1 MATÉRIA-PRIMA

A variedade de banana (*Musa* spp.) escolhida para este trabalho foi a “Prata”, e foi adquirida no mercado local (Recife – PE). O grau de maturação utilizado para os experimentos foi inferido através do teor de sólidos solúveis totais, e o limite definido foi inferior a 17 °Brix, caracterizando-a como banana verde ou não madura. A forma de corte das fatias foi feita como descrito na Figura 9, buscando padronizar as dimensões das fatias (2,0 x 2,0 x 0,5 cm) e assim minimizar os erros aleatórios.

Figura 9 – Esquema de corte das bananas. 1 – Corte das bananas em fatias; 2 – Padronização das fatias; 3 – Fatia padronizada.



Fonte: O autor (2024).

3.2 PLANEJAMENTO FATORIAL

Os experimentos de secagem convectiva assistida por radiação ultravioleta do tipo C (radiação UV-C) foram realizados de acordo com a Tabela 2. Um planejamento fatorial 2^3 foi aplicado, sendo avaliadas as variáveis independentes: Potência da radiação UV-C (P), pré-tratamento com ultrassom (U) 25 kHz e tempo de pré-tratamento com ácido acético 2% m/m (t). Como variáveis dependentes, avaliou-se o tempo de secagem até a obtenção do teor de umidade de 25% em base úmida ($t_{x25\%}$), que é a umidade mínima característica a partir da qual pode se considerar um produto como seco, segundo a legislação brasileira, e o tempo de secagem até o equilíbrio dinâmico ou teor de umidade de equilíbrio (t_{xe}).

Tabela 2 – Matriz do planejamento fatorial para definir as melhores condições de secagem.

Ensaio	P (W)	U (min)	t (min)	Codificação
1	0	0	0	0P0U0t
2	72	0	0	72P0U0t
3	0	30	0	0P30U0t
4	72	30	0	72P30U0t
5	0	0	30	0P0U30t
6	72	0	30	72P0U30t
7	0	30	30	0P30U30t
8	72	30	30	72P30U30t
9	36	15	15	36P15U15t
10	36	15	15	36P15U15t
11	36	15	15	36P15U15t

Fonte: O autor (2024).

3.3 PRÉ-TRATAMENTO COM ULTRASSOM E ÁCIDO ACÉTICO

Quanto à aplicação de ultrassom, as amostras foram pesadas e colocadas em béqueres de 100 mL, contendo água destilada. O conjunto foi levado para um banho ultrassônico, sem agitação mecânica e temperatura de aproximadamente 25°C. A relação (amostra):(água destilada) utilizada foi de 1:4 em massa. A frequência de ultrassom utilizada foi de 25 kHz, conforme encontrado na literatura para frutas (Fernandes *et al.*, 2008). O tempo de aplicação do ultrassom pode ser observado na Tabela 2. As amostras foram retiradas da água destilada, colocadas em papel absorvente durante 10 segundos para remoção do excesso de solução em cada face maior (2,0 cm x 2,0 cm).

Para o ácido acético, as amostras de banana foram mergulhadas em um béquer de 100 mL contendo uma solução 2% m/m (Chiewchan, Praphraiphetch e Devahastin, 2010; Hiranvarachat, Devahastin e Chiewchan, 2011; Zhao *et al.*, 2017) de ácido acético numa proporção de 1:4, referente ao peso da amostra e o peso de água destilada dentro do béquer, respectivamente, durante o tempo especificado na Tabela 2. Após os tempos pré-determinados, as amostras foram retiradas da solução de ácido e colocadas em papel absorvente durante 10 segundos para remoção do excesso de água em cada face maior (2,0 x 2,0 cm) (Fernandes *et al.* 2008).

Nos ensaios em que os dois pré-tratamentos foram aplicados, inicialmente, as amostras foram submetidas a aplicação do ultrassom, conforme processo já descrito. Ao remover o excesso de água oriundo do pré-tratamento por ultrassom, as amostras foram mergulhadas na solução de ácido acético pelo tempo pré-definido.

3.4 APLICAÇÃO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

As lâmpadas de radiação UV OSRAM HNS L 36 W 2G11 – uma lâmpada (36 W) ou duas (72W), com emissão de comprimento de onda entre 200 e 280 nm (com predominância de 254 nm), foram mantidas a uma distância de 10 cm em relação às amostras. A escolha da distância faz referência ao trabalho realizado por Köse e Erentürk (2010), com alteração para buscar um aumento a eficiência. A outra potência (72 W) foi escolhida para manter equidistância aos demais níveis deste fator, permitindo, assim, avaliar a tendência do efeito causado em diferentes potências (0, 36 e 72 W), conforme Tabela 2. A secagem ocorreu assistida com radiação UV-C durante todo o processo.

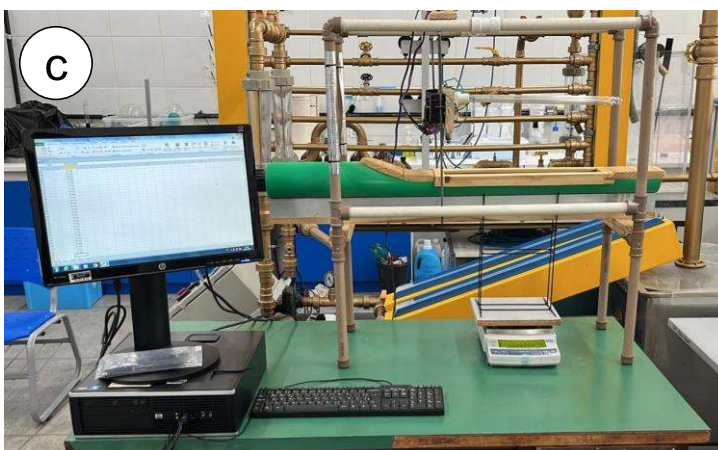
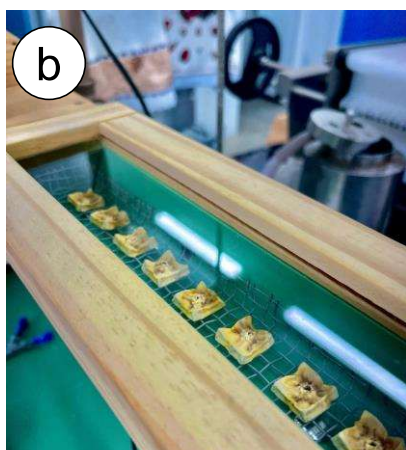
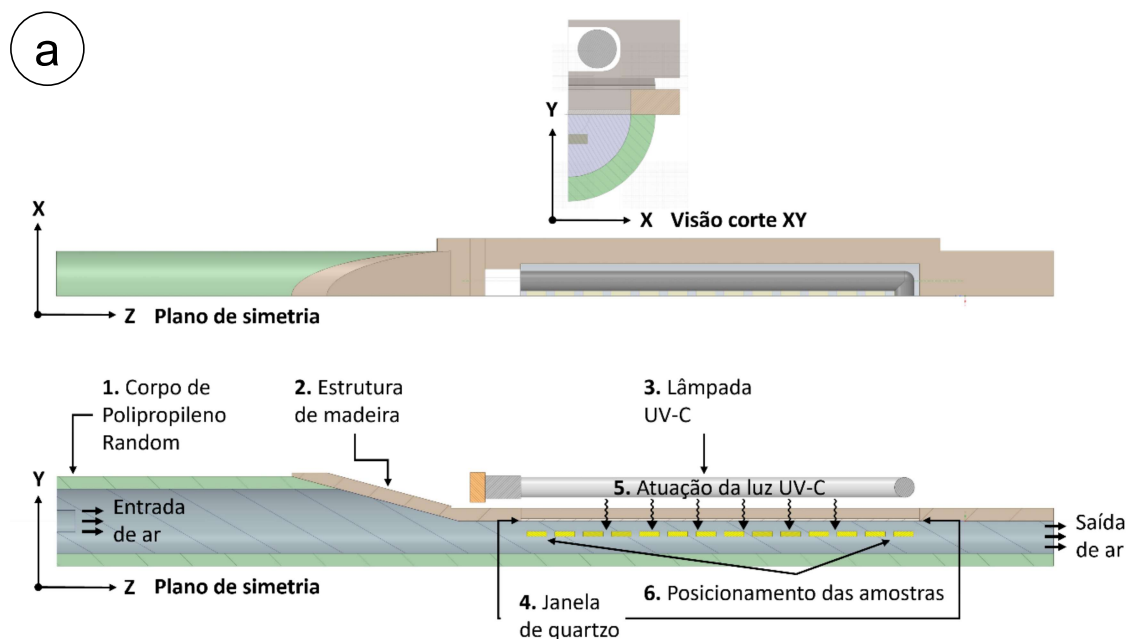
3.5 SECAGEM

O processo de secagem se deu em equipamento construído para aplicação. Sendo assim, aqui são descritas as características de construção e materiais utilizados.

3.5.1 Descrição do secador

A estrutura secador é composta por quatro partes principais: (1) corpo principal do secador feito de Polipropileno Copolímero Random, (2) tampa de madeira, (3) lâmpada ultravioleta do tipo C e (4) janela de quartzo (Figura 10).

Figura 10 – a) Esquema do secador convectivo acoplado com radiação ultravioleta do tipo C e imagens reais b) das fatias, c) do arranjo, d) visão geral, e) visão da saída e f) escudo de radiação



Fonte: O autor (2024).

O Polipropileno Copolímero *Random* (PPR) (1) com 15 mm de espessura de parede e 90 mm de diâmetro foi idealizado como uma alternativa de baixo custo ao aço inox, geralmente utilizado em equipamentos de secagem. Os principais benefícios da utilização do PPR são o fato de ser um material atóxico e reciclável, livre de corrosão e incrustações, além de isolamento térmico e resistência a impactos. Também não é classificado como material perigoso segundo a Norma NBR-10004 (classificação de resíduos sólidos) e a ONU. E, por não ser considerado tóxico, não se faz necessária, portanto, a rotulagem de risco conforme regulamentação da UE (União Europeia). O PPR é uma resina poliolefínica derivada do petróleo. É o resultado de complexos processos químicos que, em seu último estágio de copolimerização, gera o Copolímero Randômico ou Aleatório, ou seja, seu encadeamento de polímeros não segue qualquer sequenciação.

A madeira de *Pinus* (2) *elliottii Engelm.* Pinaceae foi utilizada devido ao baixo custo e seu fácil manuseio para construção do equipamento. A utilização de um material de fácil moldagem permitiu que peças mais complexas pudessem ser feitas sem a necessidade de processos complicados de soldagem ou usinagem. A madeira também funciona como isolante térmico, que é uma propriedade fundamental no projeto de um secador.

Lâmpadas Osram® HNS L 36W 2G11 foram utilizadas para irradiação de radiação UV-C (5) sobre as amostras. As lâmpadas (3) foram instaladas a 10 cm de distância das amostras (6), de forma externa ao secador, permitindo que sua operação fosse realizada em torno da temperatura ambiente. O arranjo da lâmpada se deu de forma paralela à maior superfície exposta das amostras, permitindo a máxima eficiência e absorção da radiação UV-C pelas amostras (5), garantido uma maior possibilidade de degradação dos compostos lignocelulósicos.

Como a potência irradiada recebida pela amostra é inversamente proporcional ao quadrado da distância, 10 cm foi a medida encontrada como inicialmente satisfatória para a aplicação, contados a partir do centro da lâmpada (5) até a superfície superior da posição das amostras (6). Ou seja, a menor distância entre a fonte de radiação e a superfície exposta mais próxima da lâmpada, de maior área superficial.

A janela feita de vidro de quartzo (SiO_2) (4) com 3 mm de espessura e 99,995% de pureza da marca Actquartzo® foi idealizada para permitir a máxima passagem da radiação UV-C para dentro do secador, além de evitar que o fluxo interno de ar fosse

perturbado, garantido uma melhor eficiência nos efeitos convectivos durante a secagem e reduzindo ainda possíveis perdas de carga. O vidro de quartzo apresenta excelente transmissibilidade à radiação UV-C, garantindo sua incidência mesmo sendo aplicada de forma externa ao equipamento. O quartzo tem uma condutividade térmica relativamente alta para o tipo de material; o estudo térmico realizado demonstra como o quartzo influencia a remoção de calor do interior ao exterior, contudo, considerada apropriada nos níveis analisados.

Em suma, o PPR funciona como estrutura principal do secador, inicialmente um círculo e, após um declive de 15°, um semicírculo (meia circunferência). A madeira serve como parte selante e de fácil moldagem, contém a dilatação do PPR, por ser um material mais rígido, e evita que as potenciais dilatações do PPR alterem a estrutura e o alinhamento do secador. No caso do quartzo, a madeira serve como moldura para ele e, como o quartzo possui um baixo coeficiente de expansão térmica, a madeira garante o encaixe no secador e o posicionamento fixo da janela de quartzo, servindo de passagem para a radiação UV-C e como abertura para adição das amostras dentro do secador.

O fluxo de ar é horizontal, paralelo ao posicionamento das amostras e da lâmpada UV-C e perpendicular a direção de atuação da radiação UV-C. Esse arranjo entre a atuação da radiação UV-C e as amostras permite maior eficiência, uma vez que possibilita a exposição da maior área superficial das amostras, o que seria dificultado em arranjos verticais ou inclinados. Esse secador resultou em uma publicação de patente (BR 102024000966-5 A2), conforme Anexo I.

3.5.2 Cinética de secagem

A pesagem das amostras se deu a cada 1 minuto, controlado automaticamente pela balança semi-analítica e enviado para uma planilha. Posteriormente, esses dados foram utilizados para determinar o teores de umidade inicial no tempo $t=0$ (X_0), de umidade de equilíbrio (X_e) e de umidade no tempo (X_t) das amostras, bem como o adimensional de umidade (X_θ), que foi determinada através da Equação 3.1 e utilizada para modelar empiricamente as curvas cinéticas. A secagem convectiva foi realizada a uma temperatura de entrada de 60 °C e velocidade de entrada do ar 4,3 m/s.

$$X_\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Sendo X_θ a unidade adimensionalizada, X_t o teor de umidade média no tempo t (kg água/kg massa seca), X_e o teor de umidade de equilíbrio (kg água/kg massa seca), X_0 o teor de umidade inicial da amostra (kg água/kg massa seca).

Para o ajuste aos dados experimentais, de três modelos empíricos (Başlar, Kılıçlı e Yalınkılıç, 2015), amplamente utilizados na literatura de cinética de secagem de alimentos, foram testados (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos empíricos utilizados para ajuste aos dados experimentais.

Modelo	Equação	(N°)
Exponencial de Dois termos (DT)	$X_\theta = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-wt)$	Eq. 3.2
Henderson e Pabis (HP)	$X_\theta = a \cdot \exp(-kt)$	Eq. 3.3
Page (Pg)	$X_\theta = \exp(-kt^n)$	Eq. 3.4

Fonte: O autor (2024). a , k , b , n e w são parâmetros dos modelos a serem ajustados.

Os ajustes dos parâmetros dos modelos foram realizados no *Software Statistica* v.10.0 por meio do método de estimativa não-linear de *Levenberg–Marquardt*. A determinação do erro percentual entre os valores observados e previstos pelos modelos empíricos foi feita de acordo com a Equação 3.5.

$$E (\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_0 - V_P}{V_0} \right|_i 100 \quad \text{Eq. 3.5}$$

Sendo V_P o valor previsto, V_0 o valor observado e N o número de pontos da curva.

Usando os dados do adimensional de umidade (X_θ), a difusividade efetiva (m^2/s) foi determinada pela 2ª Lei de Fick (Crank, 1975), de acordo com a Equação 3.6.

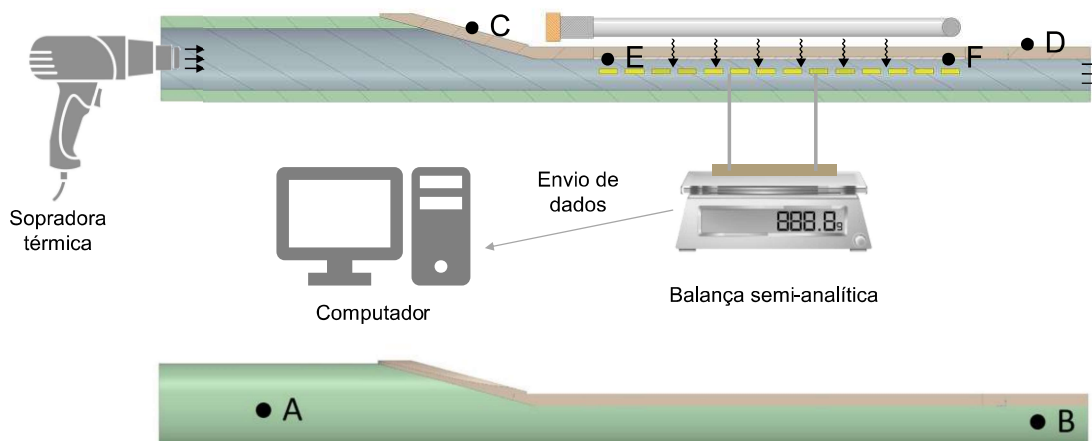
$$X_\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad \text{Eq. 3.6}$$

Sendo: D_{ef} a difusividade efetiva ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), t o tempo (s) e L a meia espessura da amostra (m).

O valor da D_{ef} foi estimado por meio do recurso Atingir Meta, do Software Microsoft Excel para tempos de secagem pré-determinados (1, 5, 10, 15, 25, 50, 100, 150 e 200 min), utilizando 1000 termos da série. Esses resultados são comparados com a D_{ef} encontrada para cada cinética por meio do método de estimativa não linear de *Levenberg–Marquardt* usando os primeiros cinco termos da série.

Um aparato foi montado (Figura 11) para realização da cinética de secagem, consistindo no secador, uma balança semi-analítica (Shimadzu UW4200H), um computador e uma sopradora térmica (DeWalt D26414 2000W).

Figura 11 - Aparato do experimento de secagem convectiva



Fonte: O autor (2024).

A balança foi conectada ao computador e a pesagem das amostras durante o processo de secagem foi feita a cada 1 minuto e o peso foi enviado ao computador. Os pontos indicados na Figura 11 (A, B, C, D, E e F) foram os locais onde medições de temperatura foram realizadas para posterior validação do estudo térmico. Os dados coletados foram utilizados no estudo cinético.

3.5.3 Análise de cor e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A cor foi determinada a partir das imagens digitais capturadas do plano superior, usando uma câmera de 12MP (3024 x 4032 pixels) com abertura $f/1.6$, em câmera de fundo padrão e equipada com luz branca. O *software Image J*. foi utilizado para o tratamento das imagens digitais. Um *plug-in* para conversão de espaço de cores converteu as cores do sistema RGB para CIELab (L , a^* e b^*) (Silva *et al.*, 2022).

A diferença total de cor (TCD) foi determinado utilizando a seguinte equação:

$$TCD = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{Eq. 3.7}$$

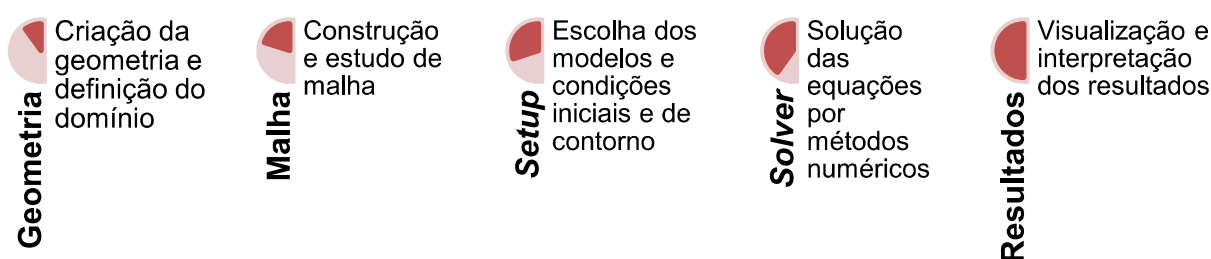
Sendo L_0 , a_0^* e b_0^* os valores de referência (amostras controle).

Para a análise por microscopia eletrônica de varredura, foi utilizado um equipamento da HITACH® modelo TM4000 com feixe de elétrons que variou de 5 a 10kV e zoom que variou de x100 a x400. Não foi necessário o preparo de amostras.

3.6 SIMULAÇÃO DO SECADOR VIA CFD: geometria, malha e *solver*

A simulação via CFD se deu em 5 (cinco) etapas, conforme a Figura 12. Cada uma dessas etapas foi feita no ambiente *Ansys® Workbench* versão 17.0, que reúne os programas necessários para criação da geometria (SCDM), construção da malha (*Meshing ICEM CFD*), *setup* e *solver* (*Fluent*) e análise dos resultados (*CFD-post*).

Figura 12 - Etapas do processo de simulação via CFD



Fonte: O autor (2024).

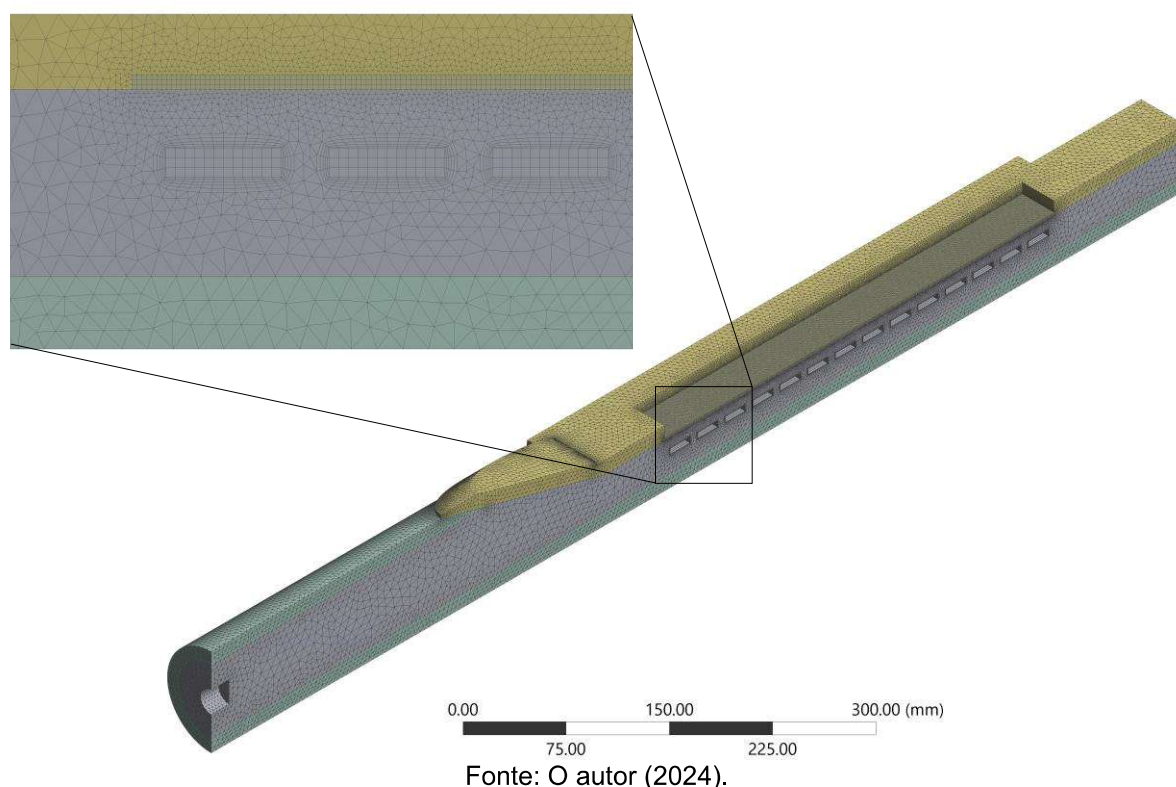
Para simular os fenômenos de transporte (*momentum* e energia) na geometria do secador (Figura 11), uma malha do tipo estruturada (hexaedros) foi aplicada nas geometrias mais regulares, como a janela de quartzo, e não estruturada (tetraedros e prismas) para regiões que apresentassem curvas ou quinas, como as partes de madeira e de PPR (Figura 13).

Os nós dos elementos de malha foram gerados pelo método *Dropped*, que não cria nós entre os vértices dos elementos de malha. A malha não estruturada foi obtida através da Triangulação de Delaunay (Ansys Help, 2017; Tu, Yeoh, Liu, 2018). Para a geração da geometria, da malha e a resolução, foi utilizado o *Software Ansys 17.0*. Ao todo, foram 1.170.541 de elementos de malha e a qualidade desses elementos foi avaliada através do *Skewness*, que é uma medida do grau de distorção dos elementos geométricos que varia de 0 a 1, sendo 0 (zero) o elemento sem distorções e 1 (um) o elemento completamente distorcido.

Um estudo paramétrico foi realizado para otimizar a malha, de modo a obter o menor valor para o máximo possível de *Skewness*. Nesse estudo de malha, a variação do *Relevance* foi feita, que é um parâmetro do *software* para o grau de refinamento

da malha, sendo 0 (zero) a malha mais grosseira (menos precisa) e 100 (cem) a malha mais fina (mais precisa). A relação entre *Skewness* e *Relevance* foi utilizada para encontrar o ponto ótimo de *Relevance* (maior precisão) e o menor *Skewness* (menor deformação do elemento). Após o teste, o valor 20 para *Relevance* obteve o menor valor máximo para o *Skewness*, representando o melhor equilíbrio entre o custo computacional e a precisão dos resultados. A média do *Skewness* dos elementos obtida após o estudo paramétrico foi 0,2148 ($\pm 0,1328$), com o valor mínimo encontrado de $1,681 \cdot 10^{-7}$ e máximo de 0,878.

Figura 13 – Malha estruturada e não estruturada aplicada no modelo geométrico. Vista isométrica do plano de simetria (YZ) e vista plana do plano de simetria (YZ)



Quanto a parte de projeto do secador, a inclinação da zona de transição feita no secador no ponto C da Figura 11 se deu com base em outro estudo paramétrico, que levou em consideração a perda de carga (diferença entre a pressão de entrada e a de saída) em função da inclinação da redução. Esse estudo resultou num ângulo de 15° , garantindo assim um mínimo de perda de carga.

Para a resolução das equações dos fenômenos de transporte no domínio computacional, utilizou-se o método dos volumes finitos. Já para turbulência interna do escoamento, considerou-se *medium intensity* (5%) e *Eddy viscosity* (10), valores

de parâmetros recomendados para quando não há informação da turbulência na entrada (Ansys Help, 2017) e o modelo utilizado foi o SST $k - \omega$ (Tzempelikos *et al.*, 2015; Sajjadi *et al.*, 2017; Defraeye e Radu, 2017; Silva *et al.*, 2020). O regime de escoamento utilizado, devido às baixas velocidades, foi o subsônico. Considerou-se que as soluções convergiram quando o resíduo normalizado (RMS) fosse menor que 1×10^{-5} .

3.6.1 Determinação dos coeficientes de convecção

Para simulação térmica da operação do secador, uma simulação estacionária foi realizada e, para tal, os coeficientes de convecção globais foram determinados para cada material, de acordo com as equações a seguir.

$$h = \frac{k}{L_c} Nu \quad \text{Eq. 3.8}$$

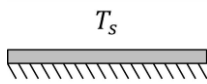
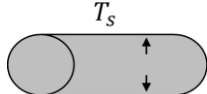
Sendo h o coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), k a condutividade térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), L_c o comprimento característico (m) e Nu o número de Nusselt.

O Nu foi determinado a partir da Tabela 4. O número de Rayleigh (Ra) foi determinado utilizando a equação a seguir.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad \text{Eq. 3.9}$$

Sendo g a gravidade (m/s^2), β o coeficiente de expansão volumétrica ($1/\text{K}$), T_s a temperatura da superfície ($^\circ\text{C}$), T_∞ temperatura do fluido suficientemente distante da superfície ($^\circ\text{C}$), Pr o número de Prandtl e ν a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

Tabela 4 - Equações para o número de Nusselt de acordo com a geometria associada de acordo com o valor do Ra encontrado.

Geometria associada	Comprimento característico L_c	Equação empírica	(Nº)
	As/p	$Nu = 0,54Ra^{1/4}$	Eq. 3.10
	D	$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$	Eq. 3.11

Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

Para o cálculo, as seguintes considerações foram feitas:

- a) As propriedades são constantes ao longo do material;
- b) Os feitos de radiação térmica são desprezíveis;
- c) A transição de 15° não causa um efeito significativo na convecção natural;
- d) A dilatação térmica dos materiais é desprezível na temperatura estudada.

As propriedades foram calculadas na temperatura de película, $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ e T_s foi calculado com base na temperatura média entre os dois pontos de cada material do secador (Figura 11). Com base nas equações utilizadas, os coeficientes de convecção foram determinados para cada material (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de Rayleigh e Nusselt para determinação dos respectivos coeficientes de convecção (h) para cada material.

Variável	Material		
	PPR	Madeira	Quartzo
Ra	$9,69 \cdot 10^5$	$2,61 \cdot 10^4$	$3,74 \cdot 10^4$
Nu	14,45	6,86	7,51
h (W/m ² ·K)	4,218	6,423	6,632

Fonte: O autor (2024).

Os dados obtidos na tabela acima foram utilizados na simulação via CFD para obtenção das condições internas de operação do secador, a fim de entender seu funcionamento e seus perfis de velocidade e temperatura.

3.6.2 Validação experimental da simulação via CFD

Para a validação experimental do estudo térmico via CFD, pontos específicos (dois pontos de cada material) do secador foram adotados para medição da temperatura e posterior comparação com o valor encontrado pela simulação. Os pontos A, B, C, D, E e F podem ser visualizados na Figura 11. Pode-se observar também o posicionamento das fatias de banana (14 ao todo, representadas por traços amarelos) dentro do secador, estando exatamente abaixo da janela de quartzo, que permitiu a passagem da radiação UV-C. A validação se deu também quanto a velocidade de operação, tendo como parâmetro avaliado a velocidade de saída no ponto mais central. Para fins de validação, considerou-se um erro inferior a 10% como aceitável para as condições de operação e para o processo (secagem).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados na ordem de execução, começando com a parte de simulação computacional e validação experimental, passando pela cinética e modelagem empírica e finalizando com a análise de cor e microscopia.

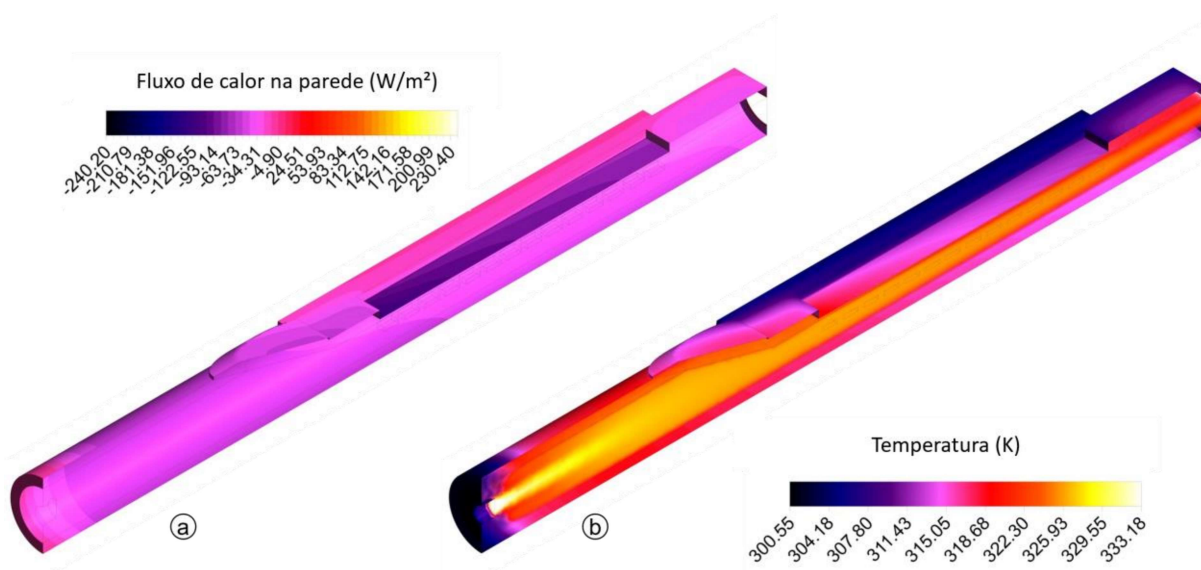
4.1 SIMULAÇÃO VIA CFD E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Os resultados obtidos a partir do estudo térmico por meio de fluidodinâmica computacional (CFD) permitiu entender o funcionamento interno do secador, seus fluxos de calor, escoamento e temperatura. Isso permitirá a melhoria do equipamento e otimização do processo em trabalhos posteriores.

Na Figura 14a é possível verificar o fluxo de calor das paredes externas do secador para o ar ambiente, com valores negativos (perda de calor para o ar) médios para a superfície do PPR ($-48,53 \text{ W/m}^2$), da madeira ($-25,89 \text{ W/m}^2$) e da janela de quartzo ($-89,25 \text{ W/m}^2$). Pode-se destacar uma zona na entrada do secador que retira calor da parte interna por convecção, uma vez que o ar, na temperatura ambiente, entra no secador nesta região. Isso faz com que o fluxo de calor na parede externa do PPR nessa mesma região tenha uma intensidade menor de fluxo de calor ($-7,81 \text{ W/m}^2$), representando uma região mais fria e que influencia o equilíbrio térmico do secador para uma temperatura menor de equilíbrio.

Outro ponto a ser destacado na Figura 14a é uma zona na parte inicial da janela de quartzo. Como o quartzo tem uma condutividade térmica superior aos demais materiais, era esperado que, nessa região, o fluxo de calor possuisse uma intensidade maior, de modo que, a partir desse ponto, os gradientes de temperatura são reduzidos. Na Figura 14b, está o perfil de temperatura do secador. Os resultados vistos corroboram os encontrados anteriormente, sendo ainda mais perceptível o efeito da janela de quartzo nos gradientes de temperatura, uma vez que o fluxo de calor nessa região é significativamente mais negativo (Figura 14a) do que em outras regiões, provocando uma queda na temperatura média a partir desse ponto.

Figura 14 – Fluxo de calor nas paredes externas (a) e o perfil de temperatura do secador (b). Vista isométrica do plano de simetria (YZ).



Fonte: O autor (2024).

O perfil de temperatura visto na Figura 14 foi validado através dos pontos de medição de temperatura (Figura 11). Na Tabela 6 estão os resultados nominais encontrados e o erro percentual para o comparativo entre o valor predito e experimental da temperatura em Kelvin e Celsius. A menor diferença obtida foi 1,84% em Celsius (ou 0,25% em Kelvin). Resultados similares foram encontrados por Mutabilwa e Nwaigwe (2020), que avaliaram experimentalmente a secagem de banana utilizando coletor solar de dupla passagem e os fenômenos de transporte utilizando fluidodinâmica computacional. Ao validarem seu modelo com dados experimentais, os autores obtiveram erros nos perfis de temperatura entre de 0,2 (0,06%) e 9,3 (2,5%) K quando comparado com os dados experimentais.

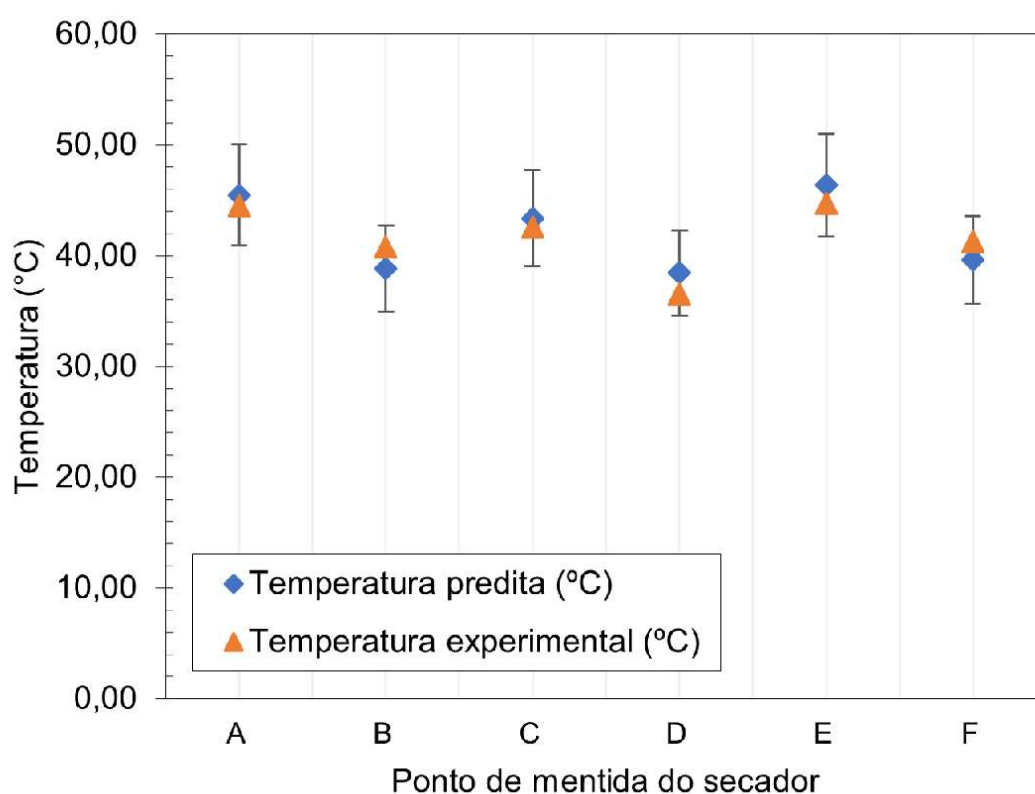
Tabela 6 - Validação experimental da temperatura nos respectivos pontos de medição.

Ponto	Tp (K)	Te (K)	Tp (°C)	Te (°C)	DT (°C ou K)	DTP (K)	DTP (°C)
A	318,62	317,65	45,47	44,50	0,97	0,31%	2,18%
B	311,96	313,95	38,81	40,80	-1,99	-0,63%	-4,88%
C	316,54	315,75	43,39	42,60	0,79	0,25%	1,84%
D	311,60	309,65	38,45	36,50	1,95	0,63%	5,34%
E	319,51	317,85	46,36	44,70	1,66	0,52%	3,71%
F	312,74	314,45	39,59	41,30	-1,71	-0,54%	-4,13%

Fonte: O autor (2024). Tp – Temperatura predita, Te – Temperatura experimental, DT – Diferença de temperatura e DTP – Diferença de temperatura percentual.

Os resultados para a temperatura predita e experimental constam na Figura 15 e o erro entre o comparativo se manteve inferior a 10%, sendo o erro máximo 5,34%, em Celsius (ou 0,63% em K), encontrado no ponto D, o que faz total sentido, uma vez que ele é o último ponto ao longo do secador, podendo assim acumular mais erros devido a transmissão de calor na direção longitudinal. As barras de erro que são mostradas na figura são uma margem de 10%, para mais ou para menos, assumida neste trabalho como aceitável.

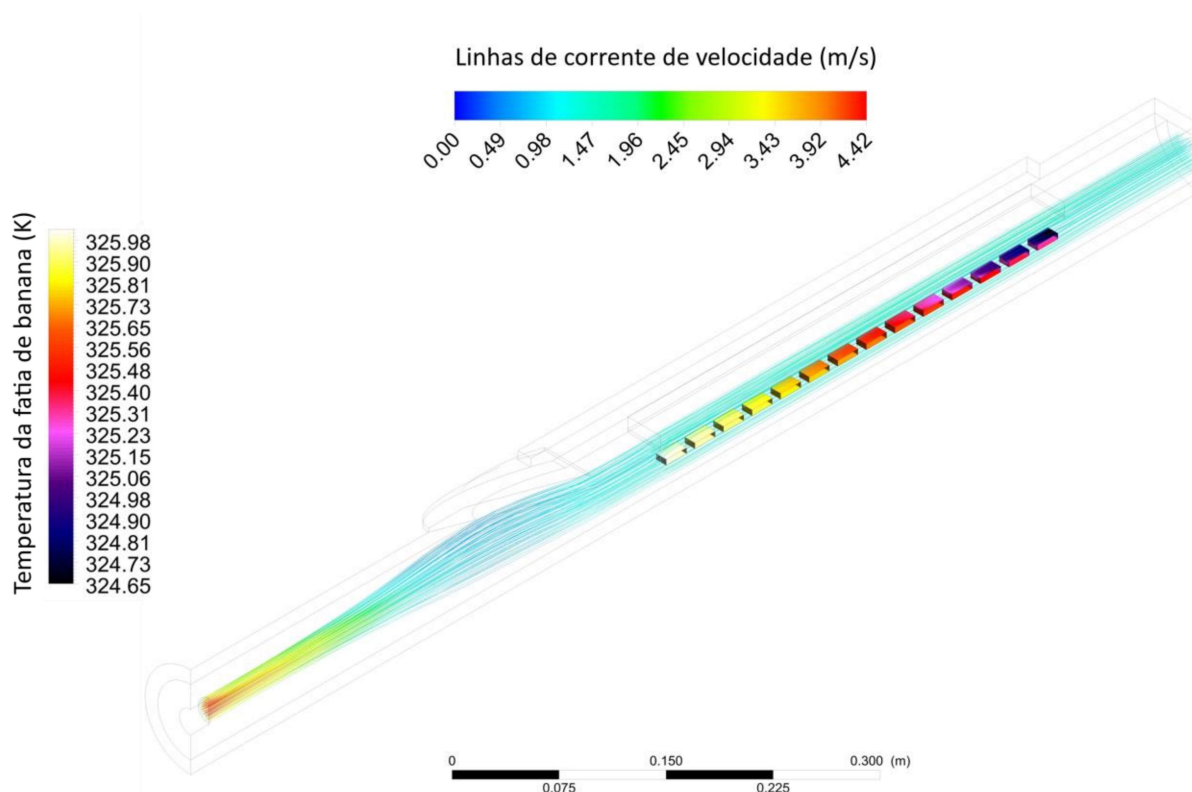
Figura 15 – Comparativo entre os dados experimentais e preditos nos pontos de análise térmica



Fonte: O autor (2024).

A queda na temperatura ao longo do secador a partir da janela de quartzo pode ser confirmada através da Figura 16, onde constam as linhas de correntes de velocidade centrais do secador e a temperatura na primeira camada de ar acima das fatias de banana. É possível notar a queda da temperatura conforme se distancia da entrada do secador, o que era esperado, porém, sendo intensificado pela janela de quartzo. A temperatura média da primeira camada de ar acima das fatias de banana foi de 52,42 °C (325,57 K), sendo ela a temperatura em que a secagem ocorre.

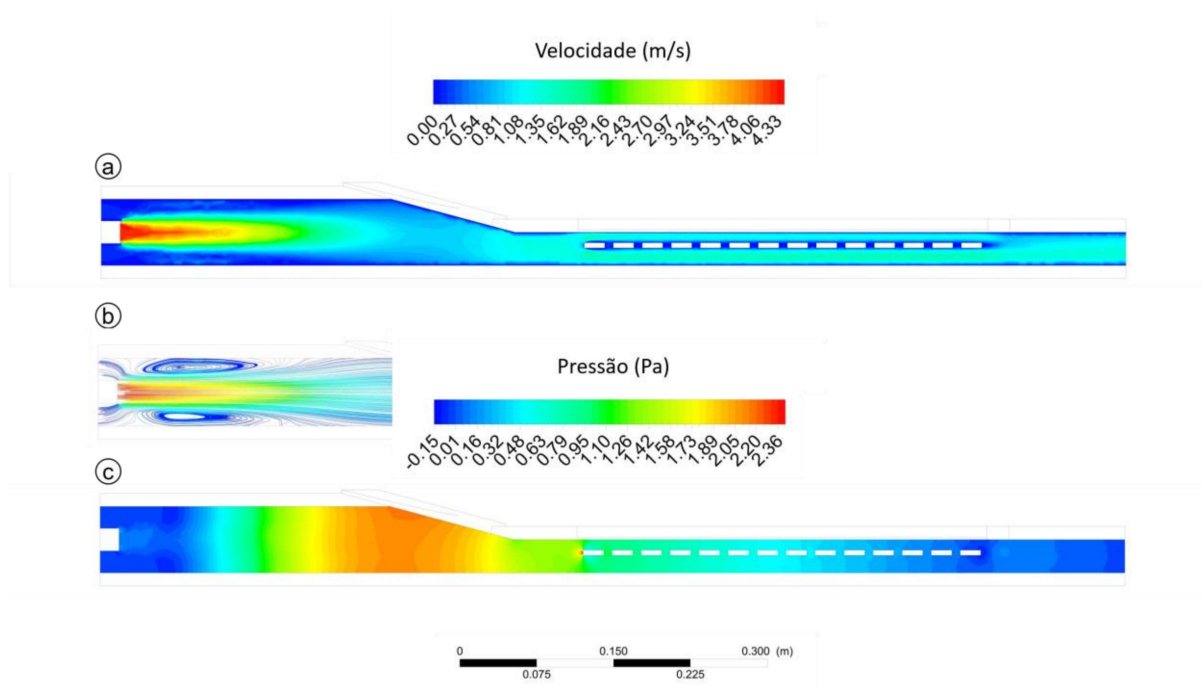
Figura 16 – Linhas de corrente de interesse e temperatura da primeira camada de ar logo acima das faces das fatias de banana. Vista isométrica do plano de simetria (YZ)



Fonte: O autor (2024).

Como a estrutura do secador possui um declive de 15° a partir da entrada, que é uma transição entre a entrada circular para o recorte semicircular na região das amostras, notam-se duas consequências principais: um aumento da pressão logo após a região de entrada e um pequeno aumento da velocidade a partir da região de transição, conforme pode ser observado na Figura 17a. A velocidade na região das fatias ficou na faixa de 1,35 a 1,62 m/s. Na saída do secador, a velocidade na região central da saída foi de 1,39 m/s, muito próximo da velocidade experimental medida (1,42 m/s), caracterizando um erro de -2,11%. Aktaş *et al.* (2017), que fizeram análise experimental e simulação CFD de secador infravermelho de damasco, também encontraram resultados similares comparando os dados experimentais e simulados de velocidade.

Figura 17 – Perfil de velocidade (a), linhas de corrente na entrada (b) e zonas de pressão (c) dentro do secador. Vista do plano YZ



Fonte: O autor (2024).

O aumento da pressão na região de transição do secador provoca alguns vórtices vistos através das linhas de corrente observados na Figura 17b. O aumento de pressão observado na região de transição na Figura 17c se deve a redução da área da seção transversal de escoamento. Parte do ar que não consegue passar retorna e forma o vórtice observado numa região de baixa pressão na entrada, que puxa o ar externo a temperatura ambiente (resfriando as paredes da entrada) e que se mistura ao ar quente da sopradora, explicando, assim, os resultados vistos na Figura 14.

4.2 DIFUSIVIDADE EFETIVA E TAXA DE SECAGEM

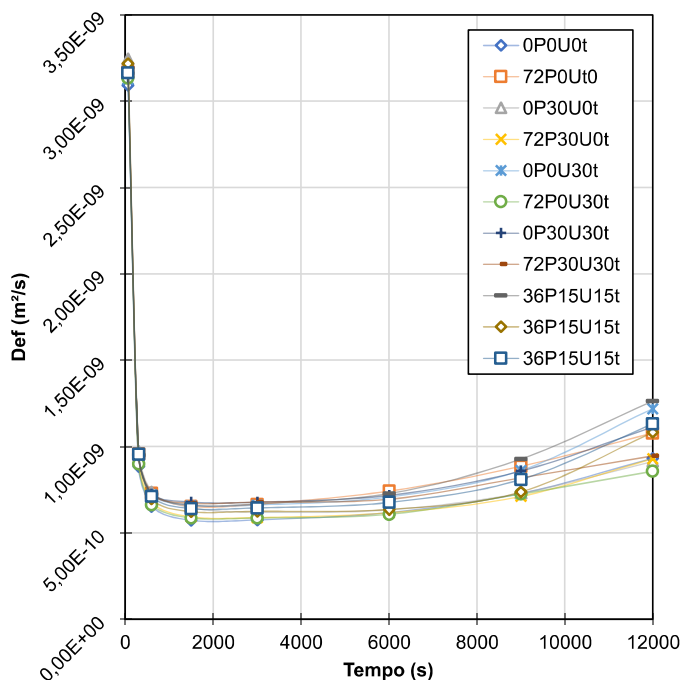
Na Tabela 7 estão os dados de difusividade efetiva das secagens para cada experimento realizado. Para fins de comparação, os experimentos foram comparados até os 200 minutos (12000 segundos) de secagem, uma vez que o experimento que atinge mais rapidamente a umidade de equilíbrio o faz em 209 min (Tabela 9). Esse tempo de comparação é suficiente para demonstrar o comportamento da difusão durante o processo de secagem.

Tabela 7 - Difusividade efetiva dos experimentos de secagem realizados

t (s)	D_{ef}							
	60	300	600	1500	3000	6000	9000	12000
0P0U0t	3,09E-09	8,85E-10	6,53E-10	5,73E-10	5,75E-10	6,18E-10	7,29E-10	9,32E-10
72P0U0t	3,17E-09	9,57E-10	7,30E-10	6,53E-10	6,65E-10	7,42E-10	8,85E-10	1,08E-09
0P30U0t	3,25E-09	9,74E-10	7,38E-10	6,47E-10	6,21E-10	6,35E-10	7,31E-10	9,15E-10
72P30U0t	3,15E-09	9,18E-10	6,78E-10	5,94E-10	5,89E-10	6,17E-10	7,12E-10	9,30E-10
0P0U30t	3,13E-09	9,44E-10	7,21E-10	6,60E-10	6,61E-10	7,08E-10	8,62E-10	1,22E-09
72P0U30t	3,13E-09	8,99E-10	6,64E-10	5,87E-10	5,86E-10	6,08E-10	7,25E-10	8,57E-10
0P30U30t	3,14E-09	9,45E-10	7,26E-10	6,80E-10	6,79E-10	7,18E-10	8,59E-10	1,11E-09
72P30U30t	3,19E-09	9,46E-10	7,21E-10	6,71E-10	6,78E-10	6,94E-10	8,19E-10	9,45E-10
36P15U15t	3,16E-09	9,52E-10	7,28E-10	6,60E-10	6,67E-10	7,27E-10	9,27E-10	1,26E-09
36P15U15t	3,22E-09	9,58E-10	6,97E-10	6,23E-10	6,25E-10	6,36E-10	7,38E-10	1,08E-09
36P15U15t	3,16E-09	9,56E-10	7,12E-10	6,40E-10	6,45E-10	6,76E-10	8,10E-10	1,13E-09

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 18, podemos notar, com mais clareza, que todas as cinéticas de secagem realizadas apresentaram o mesmo comportamento e a mesma ordem de grandeza para a D_{ef} durante cada experimento.

Figura 18 – Comportamento do coeficiente de difusão efetiva (D_{ef}) durante as secagens

Fonte: O autor (2024).

Nos primeiros minutos da secagem, os valores para a D_{ef} ficaram na ordem de $10^{-9} m^2/s$, valores superiores aos encontrados posteriormente, conforme a Tabela 7 e Figura 18. Crank (1975), quando propôs as soluções da 2ª Lei de Fick, fez algumas

suposições importantes. A principal consideração foi que, durante o período de taxa decrescente, a Def é constante, ou seja, a umidade se distribui uniformemente em relação ao espaço. Essa consideração faz com que suas soluções para placa plana infinita, cilindro ou esfera não se aplicam no início e no final da secagem, uma vez que esses dois momentos não são regidos pelo mecanismo de difusão. Dessa forma, quando se usa a Equação 3.6 como um modelo ajustável aos dados experimentais para encontrar a Def, os resultados podem ser sub ou superdimensionados, uma vez que o ajuste não é satisfatório. Isso fica evidente quando se compara os dados da Tabela 8 com os da Tabela 7.

Tabela 8 - Difusividade efetiva obtida para cada cinética através do método de *Levenberg–Marquardt*

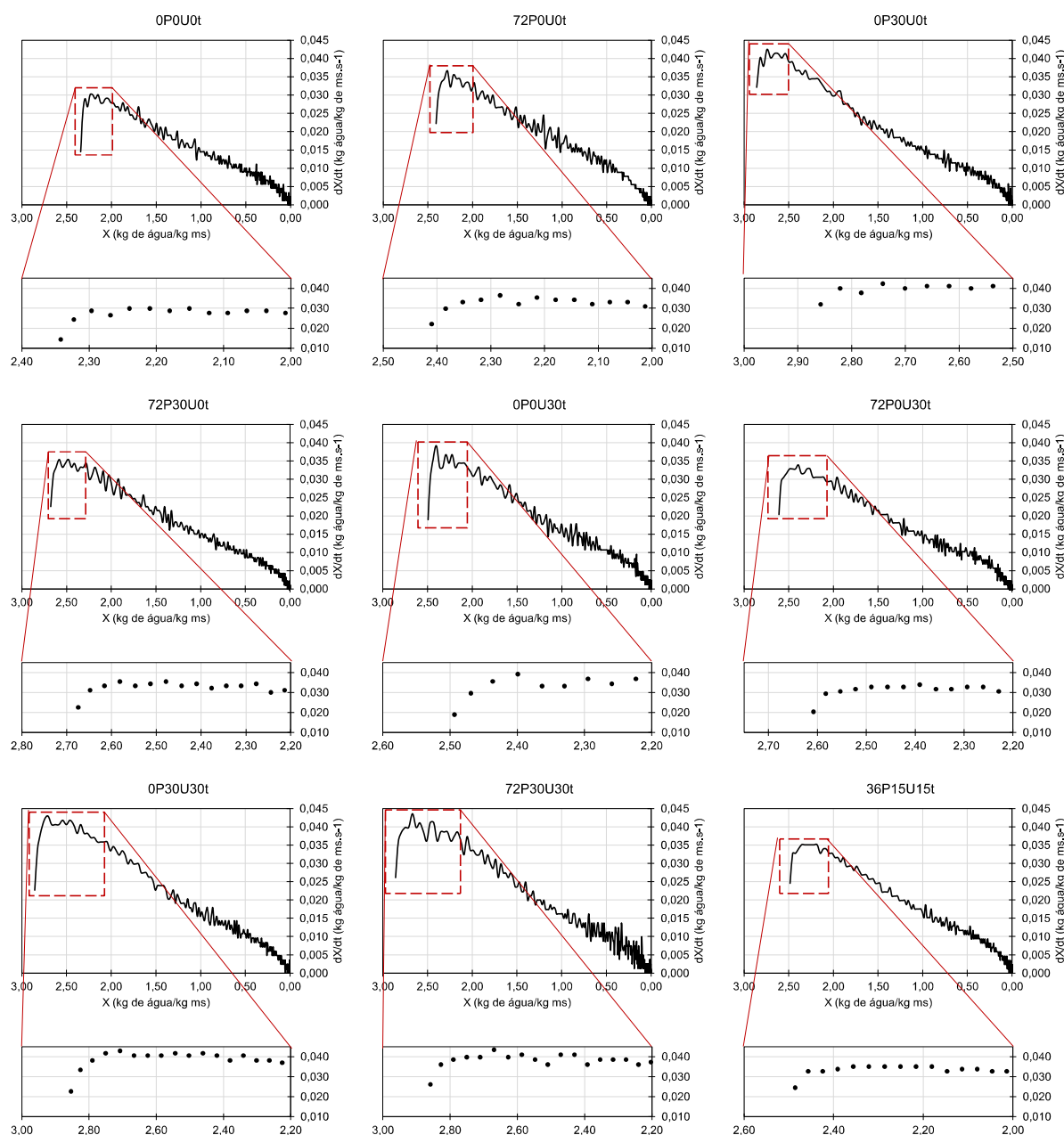
Ensaio	Def	R ²
0P0U0t	2,69E-08	0,93511
72P0U0t	3,11E-08	0,93388
0P30U0t	2,93E-08	0,95512
72P30U0t	2,77E-08	0,94337
0P0U30t	3,07E-08	0,94120
72P0U30t	2,73E-08	0,94210
0P30U30t	3,21E-08	0,94511
72P30U30t	3,16E-08	0,94783
36P15U15t	3,12E-08	0,93779
36P15U15t	2,87E-08	0,94775
36P15U15t	3,02E-08	0,94402

Fonte: O autor (2024).

A comparação entre os resultados das duas tabelas demonstra que considerar a difusividade efetiva como constante em relação ao espaço, num tempo específico, satisfaz bem as considerações feitas para concepção do modelo fenomenológico. Observando a parte hachurada da Tabela 7, percebe-se facilmente o que a consideração de difusividade efetiva constante durante o período de taxa decrescente é válida (de 600 a 6000 segundos). Entretanto, considerá-la constante em relação ao espaço ao longo de todo o tempo é um equívoco, cometido com frequência, que este trabalho evidencia. Muitas vezes, mesmo sabendo dessa limitação do modelo, a comunidade científica ainda a usa, muitas vezes por falta do arranjo experimental adequado para capturar com precisão os períodos da cinética de secagem ou também pela dificuldade de medir experimentalmente. Devidamente montado o aparato para este experimento, os três períodos da cinética puderam ser observados, com

destaque para o período de taxa constante e decrescente, nas curvas características exibidas na Figura 19, que descreve a taxa de secagem em função do tempo.

Figura 19 – Taxa de secagem em função da umidade em base seca



Fonte: O autor (2024).

Em cada uma das curvas da Figura 19, nota-se o padrão encontrado na Figura 1.b. Para cada gráfico, uma ampliação do período de taxa constante é destacado para melhor demonstrar esse período. Essas curvas são fundamentais para observar em que período a resolução da segunda lei de Fick, resolvida por Crank, se aplica,

fazendo, assim, o uso correto do modelo e preservando as condições para as quais o modelo fenomenológico foi desenvolvido.

4.3 MODELAGEM EMPÍRICA E COLORIMETRIA

Na Tabela 9 estão os parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais para os modelos Exponencial de Dois Termos (DT), Henderson e Pabis (HP) e Page (Pg). Todos apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, com um R^2 superior a 0,997 e erros percentuais inferiores a 4%. Entretanto, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o DT, com valores de R^2 maiores que 0,9998 e erro percentual máximo de 0,726%. Diversos pesquisadores também reportaram bons ajustes utilizando esse modelo. Omolola, Jideani e Kapila. (2015) observaram que o modelo Exponencial de Dois Termos apresentou um bom ajuste para os dados cinéticos da secagem de banana pré-tratada com uma solução de ácido cítrico de 4% (m/m) nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Monicka *et al.* (2023) reportaram que, para a secagem solar de banana ao ar livre, o modelo DT foi o que demonstrou maior eficácia na modelagem da cinética de secagem.

A pesagem *in line* das amostras durante o processo de secagem resultou em um conjunto de dados suficiente para o bom ajuste dos modelos, e o baixo erro obtido corrobora isso (Tabela 9). O ajuste dos modelos aos dados experimentais pode ser visto na Figura 20. Na Figura 20a é possível ver todas as curvas ajustadas para os dados experimentais, inclusive as repetições do ponto central. A partir dela, os demais gráficos trazem um vislumbre dos possíveis efeitos, conforme os experimentos são realizados. Na Figura 20b está a comparação entre os experimentos na ausência de radiação UV-C. Nela, é possível supor que, conforme os pré-tratamentos são aplicados, as curvas cinéticas se tornam mais rápidas, até o ponto em que os experimentos 0P0U30t e 0P30U30t praticamente se sobrepõem.

Não seria possível supor o mesmo no caso da Figura 20c, uma vez que as curvas mais acentuadas (rápidas) são os experimentos 72P0U0t e 72P30U30t. Na Figura 20d, observa-se a comparação de todos os experimentos em que o ultrassom foi aplicado (com exceção das repetições do ponto central). Aqui, a principal indicação é a de que o efeito conjunto do pré-tratamento com ultrassom e ácido acético seria sinérgico, com os experimentos 0P30U30t e 72P30U30t representando as curvas mais rápidas. A mesma colocação seria possível na Figura 20e, mas, agora, considerando que todos os experimentos possuem a aplicação de ácido acético como

pré-tratamento. A Figura 20f traz a comparação isolada de cada condição estudada. Com ela, seria possível acreditar que os tratamentos trariam resultados consideráveis, uma vez que a aplicação dos pré-tratamentos e da radiação UV-C pareciam melhorar a cinética, reduzindo o tempo de secagem, até o ponto das curvas 72P0U0t e 0P0U30t se apresentarem como as mais promissoras.

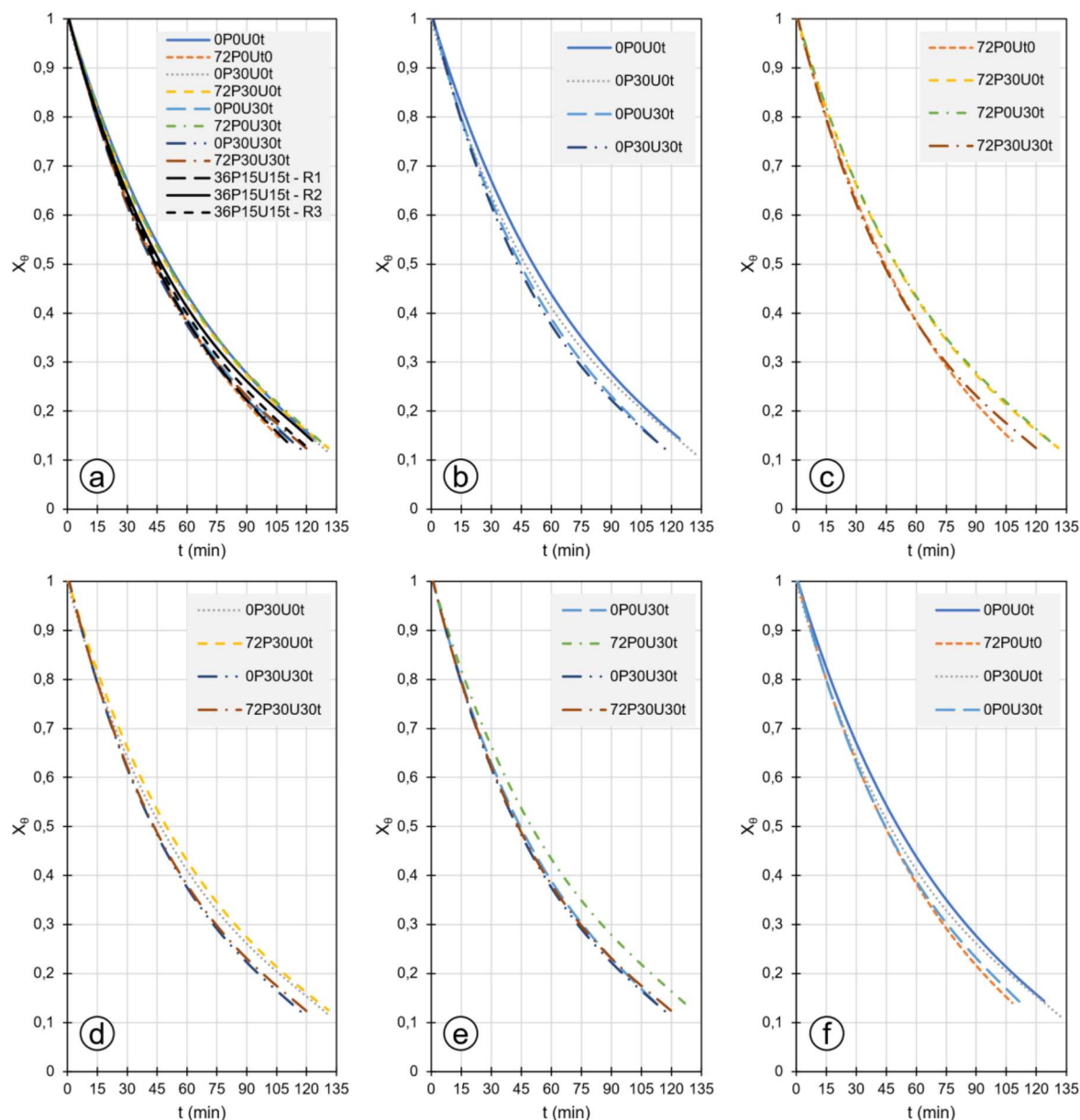
Entretanto, a análise do planejamento fatorial não mostrou resultados significativamente diferentes entre os tratamentos com relação ao $t_{x25\%}$, máximo valor do teor de umidade requisitada para caracterização de produto seco sendo a legislação brasileira, embora as curvas apresentem indícios que pedem uma melhor investigação em trabalhos futuros.

Tabela 9 – Parâmetros dos modelos empíricos ajustados.

Parâmetros												
Modelo	OP0U0t	72P0U0t	OP30U0t	72P30U0t	OP0U30t	72P0U30t	OP30U30t	72P30U30t	36P15U15t	36P15U15t	36P15U15t	36P15U15t
DT	a	-0,00615	1,02812	0,99720	-0,00165	-0,00043	1,01165	1,01604	-0,00003	1,01380	1,00809	1,01056
	k	-0,01674	0,01481	0,01471	-0,02388	-0,03862	0,01401	0,01648	-0,05464	0,01559	0,01488	0,01531
	b	1,01714	-0,02025	-0,00005	1,00979	1,01243	-0,00023	-0,00015	1,01430	-0,00309	-0,00001	-0,00053
	w	0,01340	-0,01119	-0,04930	0,01394	0,01577	-0,03903	-0,04381	0,01625	-0,02428	-0,06344	-0,03454
	R²	0,99997	0,99998	0,99982	0,99998	0,99990	0,99995	0,99989	0,99988	0,99996	0,99987	0,99993
E%	0,181%	0,189%	0,726%	0,230%	0,499%	0,297%	0,494%	0,594%	0,210%	0,550%	0,415%	
HP	a	1,02681	1,02806	1,00421	1,02038	1,02221	1,02131	1,02331	1,01982	1,02597	1,01271	1,02064
	k	0,01451	0,01677	0,01506	0,01467	0,01638	0,01452	0,01691	0,01654	0,01669	0,01511	0,01593
	R²	0,99841	0,99784	0,99909	0,99883	0,99886	0,99885	0,99925	0,99941	0,99831	0,99949	0,99886
E%	2,778%	3,318%	2,584%	2,707%	2,509%	2,543%	2,251%	2,013%	3,099%	1,615%	2,730%	
Pg	k	0,00995	0,01117	0,01394	0,01105	0,01235	0,01095	0,01300	0,01331	0,01168	0,01304	0,01215
	n	1,08221	1,09184	1,01727	1,06136	1,06250	1,06091	1,05750	1,04716	1,07993	1,03181	1,05944
	R²	0,99950	0,99938	0,99918	0,99951	0,99941	0,99942	0,99957	0,99960	0,99941	0,99958	0,99944
E%	1,552%	1,766%	2,367%	1,751%	1,781%	1,855%	1,662%	1,661%	1,867%	1,420%	1,921%	
txe (min)	240	235	243	236	209	281	227	234	211	210	212	

Fonte: O autor (2024).

Figura 20 – Modelos ajustados para os dados experimentais de secagem até 25% de umidade em base úmida. a) todos os experimentos, experimentos b) sem radiação UV-C, c) com radiação UV-C (exceto o ponto central), d) com aplicação de ultrassom, e) com aplicação de ácido acético e f) com aplicação isolada de cada tratamento

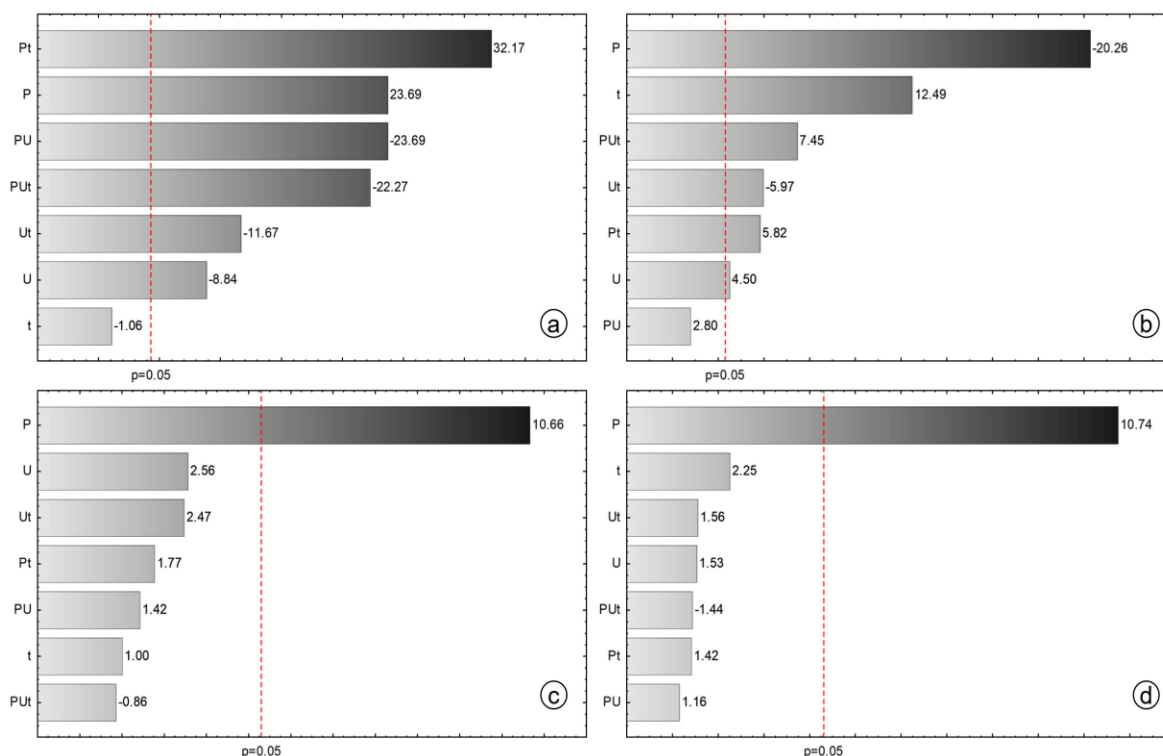


Fonte: O autor (2024).

Já para o tempo até o teor de umidade de equilíbrio, t_{xe} (Tabela 9), e os parâmetros de cor (L , a^* , e b^*), há diferenças significativas para os diferentes tratamentos. Na Figura 21a, nota-se que o único parâmetro irrelevante para o t_{xe} é o tempo de aplicação no ácido acético (t). Já o efeito de segunda ordem entre a potência da radiação UV-C (P) e o pré-tratamento com ácido acético (t) foi altamente

significativo na variável em questão. Note-se que os quatro principais efeitos significativos envolvem a atuação da radiação UV-C (Pt, P, PU e PUt), seguido pelo ultrassom como o efeito mais relevante (Ut e U).

Figura 21 – Gráficos de Pareto dos Efeitos Padronizados para a) t_{xe}, b) L, c) *a e d) *b



Fonte: O autor (2024).

No caso dos efeitos Pt e P, o valor positivo dos efeitos normalizados do gráfico de Pareto revelam que, aumentando os níveis desses fatores do menor para o maior, ocorre um aumento do t_{xe}, representando um efeito antagônico no caso de Pt. A degradação de carboidratos devido a atuação da radiação UV-C e/ou tratamento ácido, através da quebra das ligações glicosídicas, como será discutido mais a frente, pode ter provocado um ressecamento na superfície das fatias de banana, criando uma barreira para a transferência de massa por difusão do interior para o exterior da fruta.

Já nos efeitos PU, PUt, Ut e U, aumentar os níveis dos fatores do menor para o maior provoca o inverso (efeito sinérgico), ou seja, a diminuição do tempo até o teor de umidade de equilíbrio. Já se sabe, por extensa literatura sobre o tema, que a aplicação de ultrassom na secagem de frutas provoca uma redução do tempo secagem até a umidade de equilíbrio. Wang, Xiao e Ye (2019) analisaram o pré-tratamento com ultrassom de frequência 20 kHz na secagem de kiwis a 65 °C. Os pesquisadores observaram que o pré-tratamento com ultrassom reduziu o tempo de

secagem em 16,7% (10 minutos de ultrassom) e 25,0% (20 e 30 minutos de ultrassom). Silva *et al.* (2020) estudaram a influência do ultrassom (25 kHz) na secagem de melão a 60 °C e obtiveram uma redução no tempo de secagem de 16,6% (10 minutos de ultrassom) e 33,3% (20 e 30 minutos de ultrassom).

O que este trabalho evidencia é que a incrementação do ultrassom (U) com o tratamento ácido (t) gerou um efeito de segunda ordem (Ut) 32% superior ao efeito de primeira ordem (U). A mesma análise pode ser feita ao incrementar o ultrassom com aplicação da radiação UV-C (PU) e radiação UV-C juntamente com o pré-tratamento ácido (PUt), que resultou em um efeito de segunda e terceira ordem (PUt), respectivamente, mais que 150% superior ao efeito de primeira ordem (U).

Forouzanfar *et al.* (2020), que estudaram a secagem de cogumelos aplicando radiação ultravioleta do tipo B (radiação UV-B), observaram que a secagem de cogumelos pré-tratados com radiação UV-B foi mais rápida, devido a remoção mais efetiva de água na superfície do alimento. Os autores justificam essa melhora devido ao aumento do diâmetro dos poros da parede celular sem prejuízos aos tubos capilares no interior das amostras, melhorando a saída de água e reduzindo o tempo de secagem. Embora os autores não tenham utilizado radiação UV-C, tampouco aplicaram a radiação ultravioleta durante a secagem, um efeito similar pode ter sido encontrado neste estudo.

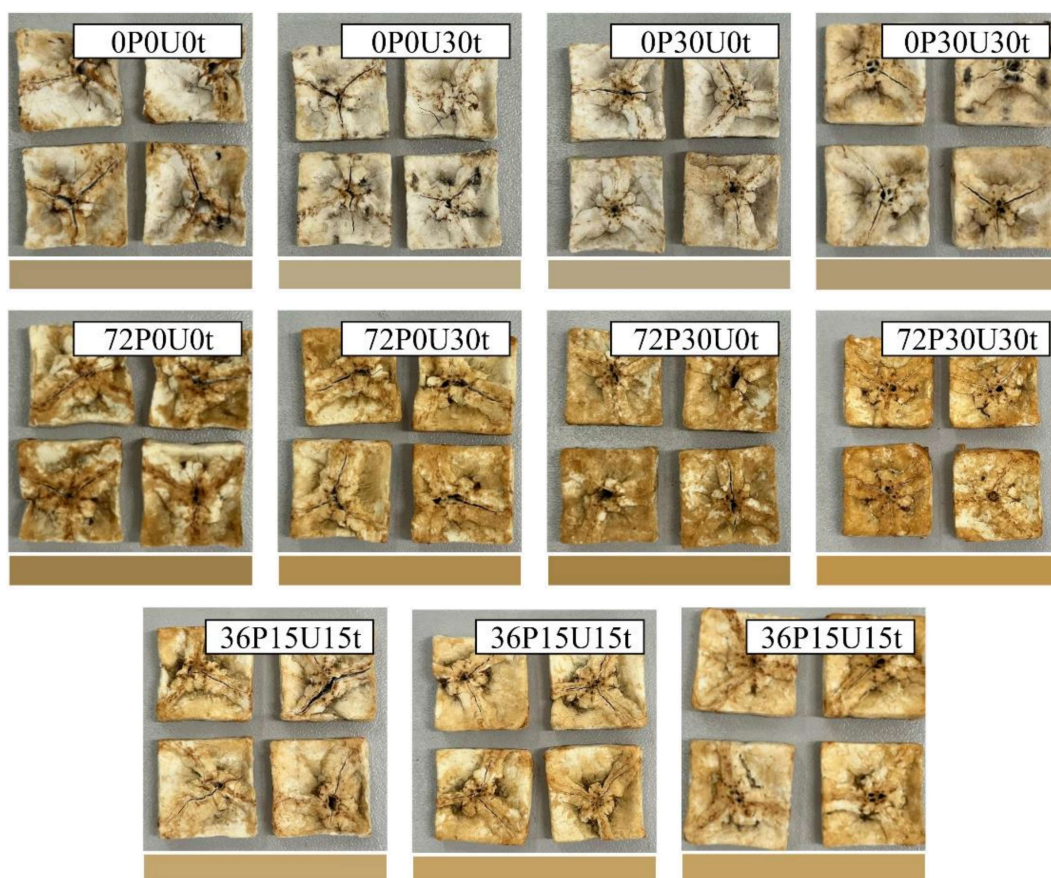
O parâmetro de cor L^* (Figura 21b) também foi afetado pelos diferentes tratamentos, sendo a potência da radiação UV-C o mais relevante, com o efeito normalizado negativo, indicando que ocorre a redução do valor da luminosidade conforme aumenta-se a potência. Gómez *et al.* (2010), ao analisarem a influência da radiação ultravioleta sobre parâmetros de cor de fatias de maçã, perceberam que as amostras expostas à radiação ultravioleta apresentaram menores valores de luminosidade em comparação com as amostras controle e, quanto maior o tempo de exposição à radiação ultravioleta, menor era o valor da luminosidade da amostra. Percebeu-se a mesma conclusão no efeito de interação entre o pré-tratamento com ultrassom e ácido acético (Ut), mas com menos intensidade. Já o tempo no ácido acético (t), também significativo, provoca o inverso. Aumentar o tempo de pré-tratamento com ácido aumenta o valor do parâmetro L^* . O uso do pré-tratamento com ácido acético pode ter protegido as amostras do escurecimento enzimático, inibindo, assim, a ação de enzimas como a polifenoloxidase e a peroxidase, as quais são responsáveis pelo escurecimento de vegetais. De acordo com Zhou *et al.* (2019), os

ácidos orgânicos são empregados na indústria de alimentos como forma de inibir o escurecimento enzimático. Resultados semelhantes foram encontrados por Doymaz (2020), que estudou a secagem de kiwis a 50 °C, 55 °C, 60 °C e 70 °C, e utilizou como pré-tratamento uma solução de ácido cítrico 1% (m/m). As amostras de kiwis que foram pré-tratadas com a solução de ácido cítrico apresentaram maiores valores de luminosidade em comparação com as amostras que não receberam o pré-tratamento. Observa-se o mesmo para os efeitos PUt, Pt e U.

Para os parâmetros a^* (Figura 21c) e b^* (Figura 21d), o único fator relevante foi a potência (P), em ambos os casos, com o valor do efeito normalizado positivo, ou seja, quanto maior a potência, maior o valor dos parâmetros a^* e b^* . Zhang *et al.* (2021) estudaram a influência da radiação ultravioleta pulsada na secagem de cogumelos e observaram que as amostras que foram submetidas ao tratamento apresentaram maiores valores dos parâmetros a^* e b^* em comparação às amostras controle. A diminuição do valor da luminosidade (L) e aumento do parâmetro a^* podem ser um indicativo da ocorrência de reações de escurecimento oxidativo (Goupy *et al.*, 1995; Gómez *et al.*, 2010).

O aspecto das amostras secas após os experimentos é mostrado na Figura 22. Observa-se que as amostras que não sofreram aplicação de radiação UV-C apresentaram um aspecto mais claro, em contraste com as amostras secas com assistência da radiação UV-C, que apresentam um aspecto mais escuro. Possivelmente, a exposição das amostras à radiação ultravioleta favorece a formação de reações de escurecimento oxidativo (Gómez *et al.*, 2010). Vale destacar que os experimentos 0P0U0t e 72P0U0t apresentam regiões pontuais de coloração acentuadamente mais escura e, conforme desloca-se da esquerda para a direita na Figura 22, observa-se que a aplicação dos pré-tratamentos, seja ultrassom ou ácido acético, resulta uma homogeneização da coloração na superfície. Isso, provavelmente, se deve a inibição de enzimas oxidativas presentes na superfície da banana por conta da ação do tratamento ácido e do ultrassom (Jang e Moon, 2011; Zhou *et al.*, 2019).

Figura 22 – Imagens das fatias de banana em cada ensaio estudado. Abaixo de cada imagem encontra-se a coloração média das fatias na escala RGB



Fonte: O autor (2024).

Os resultados exibidos nos gráficos de Pareto (Figura 21) e a constatação visual na Figura 22 podem ser ainda mais corroborados pelos dados de colorimetria feitos em quadruplicata (Tabela 10).

Tabela 10 - Parâmetros de cor das fatias de banana secas

Ensaio	Parâmetro			
	L*	a*	b*	TCD
0P0U0t	62,39±3,71 ^{abcd}	1,34±0,78 ^{bc}	23,01±2,32 ^{cd}	0,00±0,00 ^e
72P0U0t	54,66±4,40 ^c	4,56±1,29 ^a	33,48±0,54 ^a	16,17±3,45 ^{ab}
0P30U0t	67,85±4,18 ^b	0,27±0,81 ^b	19,03±2,13 ^c	5,69±1,53 ^c
72P30U0t	56,76±3,59 ^{cd}	5,72±0,93 ^{ad}	37,13±0,81 ^{ab}	18,04±2,37 ^{ad}
0P0U30t	69,64±1,82 ^a	-0,66±0,28 ^b	19,73±1,53 ^c	5,34±1,79 ^c
72P0U30t	60,73±2,16 ^{bcd}	5,13±1,44 ^a	38,64±1,08 ^{be}	17,61±1,86 ^{ad}
0P30U30t	65,41±3,21 ^{ab}	1,52±0,76 ^{bc}	24,85±2,06 ^d	4,23±0,71 ^{ce}
72P30U30t	63,9±5,10 ^{abd}	7,86±2,15 ^d	42,90±1,93 ^e	22,24±3,00 ^d
36P15U15t - R1	69,21±1,82 ^a	3,51±0,50 ^{ac}	32,81±2,72 ^a	11,62±2,57 ^b
36P15U15t - R2	69,03±1,82 ^a	3,76±0,60 ^{ac}	36,04±1,88 ^{ab}	14,60±1,73 ^{ab}
36P15U15t - R3	68,25±2,24 ^{ab}	4,81±0,55 ^a	36,88±2,34 ^{ab}	15,50±2,21 ^{ab}

Fonte: O autor (2024).

Quanto ao parâmetro L^* , percebe-se que o ensaio padrão (0P0U0t) não se diferenciou estatisticamente das demais amostras ao nível de 5% de significância. Isso provavelmente se deve ao contraste entre zonas mais claras e escuras ou amareladas, o que faz com que a média fique semelhante à das demais, quanto ao parâmetro em questão. Observa-se que os experimentos que contêm aplicação de radiação UV-C são justamente os que apresentam os menores valores de L^* e são semelhantes estatisticamente. Resultados semelhantes foram relatados por Gómez *et al.* (2010), que estudaram a influência da radiação ultravioleta nos parâmetros de cor de fatias de maçã, reportando que as amostras que foram submetidas ao tratamento com radiação ultravioleta apresentaram menores valores de luminosidade (L^*) em comparação com as amostras que não receberam o tratamento. Entretanto, ao comparar os experimentos sem aplicação de radiação UV-C, o que se nota é que o valor de L^* aumenta com a aplicação dos pré-tratamentos, corroborando a análise do gráfico de Pareto, sendo esses experimentos estatisticamente semelhantes.

Os parâmetros a^* e b^* foram extremamente sensíveis à potência da radiação UV-C. Isso é observado quando se nota que os experimentos sem a aplicação de radiação ultravioleta são estatisticamente iguais, havendo apenas algumas diferenças de grupos devido aos efeitos de segunda e terceira ordem (interação entre os fatores). Essa sensibilidade fica ainda mais evidente quando ao observar a Diferença de Cor Total (TCD), com o mesmo comportamento quanto a sensibilidade à radiação UV-C e, novamente, havendo apenas algumas diferenças dentro dos grupos devido aos efeitos de interação entre os fatores.

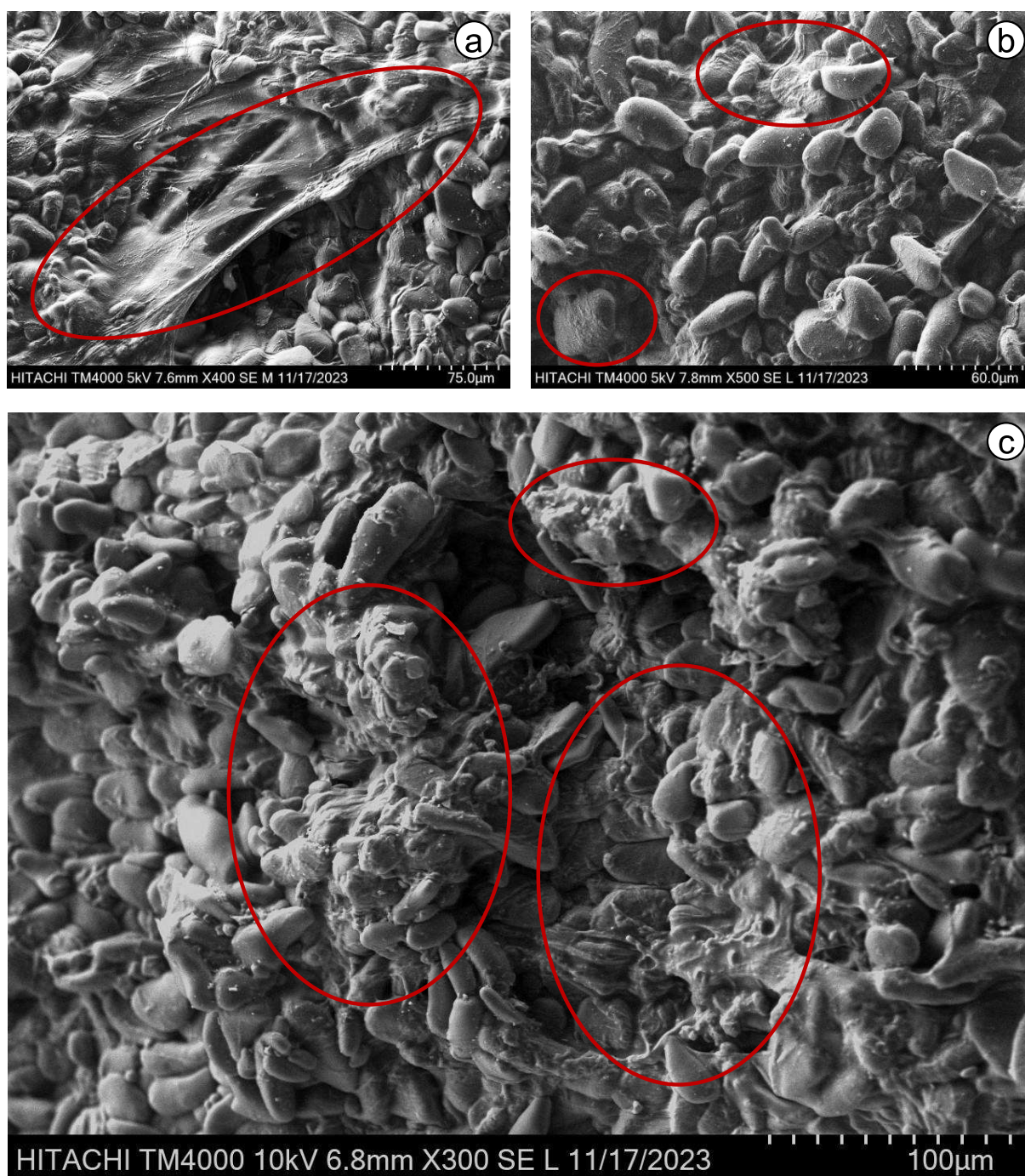
Resultados similares foram encontrados na literatura. O tratamento com radiação ultravioleta resultou nos maiores valores de Diferença de Cor Total (TCD) entre todos os tratamentos realizados no estudo conduzido por Zhang *et al.* (2011). Os pesquisadores compararam tratamentos térmicos com radiação ultravioleta e alta pressão quanto aos parâmetros de qualidade de suco de melancia e perceberam que, quanto maior era a potência da radiação ultravioleta, maior era o valor da Diferença Total de Cor (TCD).

4.4 ANÁLISE MORFOLÓGICA SUPERFÍCIE DAS FATIAS

Os impactos da aplicação de radiação UV-C e dos pré-tratamentos nos parâmetros avaliados (cinética e colorimetria) decorrem dos efeitos dessas variáveis na superfície da banana. Na Figura 23 estão imagens de microscopia eletrônica de

varredura (MEV) da superfície da banana nas principais condições de interesse deste estudo.

Figura 23 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras secas não tratadas (a), com aplicação de 30 min de pré-tratamento com de ácido acético (b) e (c) uma potência de 72 W de radiação UV-C



Fonte: O autor (2024).

Na Figura 23a está a superfície da banana verde sem pré-tratamento ou secagem assistida por radiação UV-C. Observa-se a presença de uma estrutura

oriunda de um líquido ligamentoso (seiva), característico de bananas verdes, que se manteve firme como uma película após a secagem. Já na Figura 23b, é possível verificar que essa estrutura de película ainda se mantém sobre a superfície dos grânulos de amido em algumas regiões, porém, sem sua característica estrutural inicial após o tratamento por 30 min com ácido acético, provavelmente devido a hidrólise ácida ou solubilidade das substâncias contidas na seiva.

A Figura 23c mostra a superfície da banana após a aplicação de radiação UV-C. Observa-se que a superfície como um todo apresenta um aspecto mais quebradiço, em relação a Figura 23a e 23b, indicando a quebra total da estrutura ligamentosa da superfície da banana. Pothavorn *et al.* (2010), estudando composições fitoquímicas da seiva de algumas bananas, identificaram a presença de diversos glicosídeos e aminoácidos fenólicos que, segundo os autores, se relacionam com atividades biológicas da planta. A presença desses compostos na seiva (Figura 23a) pode justificar o efeito degradativo causado pela radiação UV-C visto na Figura 23c. Bhat e Karim (2009) fizeram uma revisão sobre o impacto da irradiação sobre o amido e relataram o potencial fotodegradativo da radiação ultravioleta sobre esse composto através da clivagem das ligações glicosídicas, provocada pela formação de radicais livres, acarretando uma despolimerização oxidativa. O efeito descrito por esses autores pode elucidar a degradação vista, ou seja, a quebra da estrutura polimérica dos glicosídeos presentes na seiva. Além disso, esse mesmo mecanismo talvez tenha provocado a degradação de resíduos de aminoácidos, também presentes na seiva, pela quebra das ligações peptídicas. Hollósy (2002), que estudou os efeitos da radiação ultravioleta nas células vegetais, reportou a capacidade fotolítica da radiação ultravioleta sobre aminoácidos aromáticos e grupos dissulfetos (no caso de proteínas ou cadeias peptídicas).

As imagens por MEV não evidenciaram, morfológicamente, a degradação dos compostos lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina) em camadas mais profundas das fatias de banana, entretanto, demonstram claramente um efeito degradativo sobre os compostos destacados anteriormente (glicosídeos e aminoácidos aromáticos), presentes na superfície das fatias. Há duas explicações plausíveis para este resultado.

Primeiro, a baixa concentração desses compostos na banana. De acordo com Velásquez-Arredondo, Ruiz-Colorado e Oliveira (2010), o fruto da bananeira apresenta em torno de $4,0 \pm 0,6\%$ de celulose, $4,4 \pm 2,2\%$ de hemicelulose e $4,2 \pm 0,6\%$

de lignina. Assim, é possível que essa quantidade tenha sido insuficiente para causar um impacto mais profundo na microestrutura da banana após a aplicação da radiação UV-C e/ou aplicação do pré-tratamento ácido.

Segundo, tem o efeito da direção das fibras das fatias de banana durante a aplicação da radiação UV-C e do pré-tratamento ácido. Como aplicação da radiação UV-C e do pré-tratamento com ácido acético busca degradar os compostos lignocelulósicos através da fotodegradação ou hidrólise das ligações que estruturam esses compostos, como as ligações glicosídicas, seria ideal que essas ligações estivessem expostas ao máximo a esses tratamentos, através de um corte radial das fatias da banana. Entretanto, a forma que as fatias de banana foram cortadas (transversalmente) neste estudo, para maior padronização e aproveitamento, talvez não tenha favorecido esse objetivo, evitando assim o efeito mais expressivo da técnica sobre a secagem. Kuo e Hu (1991) estudaram o efeito da fotodegradação por radiação UV de superfícies transversais e radiais de madeira (*Pinus resinosa* Ait.) e, ao analisarem os resultados por MEV e por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), perceberam que seções transversais foram degradadas de forma preferencial em determinadas regiões. Já as seções radiais apresentaram uma taxa maior de degradação. Isso evidencia o efeito da direção das fibras sobre o efeito degradativo da radiação UV em compostos lignocelulósicos.

5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

5.1 CONCLUSÃO

Os objetivos deste estudo foram alcançados. Foi possível idealizar e construir um secador convectivo acoplado à radiação UV-C, cuja operação foi demonstrada na aplicação da tecnologia sem grandes prejuízos ao equilíbrio térmico. A simulação via CFD das condições de operação do secador foi realizada e validada experimentalmente, descrevendo satisfatoriamente os fenômenos de transporte avaliados, com um erro máximo nos perfis de temperatura inferiores a 5,34% (em °C) ou 0,63% (em K), e um erro de 2,14% nos perfis de velocidade, em valores absolutos.

Além disso, o estudo avaliou o efeito dos tratamentos através de um planejamento fatorial 2^3 sobre o tempo de secagem até o teor de umidade de 25% (base úmida), até o teor de umidade de equilíbrio e parâmetros de cor (L , a^* , e b^*). Não houve diferenças significativas no tempo de secagem necessário para atingir a umidade de 25% (base úmida) entre os tratamentos. Para atingir o teor de umidade de equilíbrio (t_{xe}), o tempo de pré-tratamento com ácido acético foi irrelevante estatisticamente, enquanto os outros fatores apresentaram efeitos normalizados que influenciaram o t_{xe} positivamente ou negativamente. As amostras submetidas à radiação UV-C mostraram redução nos valores de luminosidade (L) com o aumento da potência da lâmpada, enquanto o ácido acético teve o efeito inverso. Parâmetros a^* , b^* e a Diferença de Cor Total (TCD) foram sensíveis à aplicação da radiação UV-C, apresentando maiores valores.

A difusividade efetiva da secagem foi estudada e sua cinética modelada empiricamente, com o modelo Exponencial de Dois Termos representando melhor os dados, atingindo um R^2 maior que 0,9998 e um erro percentual máximo inferior a 0,8%.

Finalmente, o efeito dos tratamentos sobre o aspecto das amostras e a morfologia superficial foi investigado, indicando que a radiação UV-C provavelmente tem um efeito fotodegradativo sobre os compostos da seiva nas fatias de banana verde, sem muita penetração nas camadas internas.

Em resumo, este estudo atingiu seus objetivos ao construir e validar um secador convectivo com radiação UV-C, avaliar os efeitos dos tratamentos nas condições de secagem e parâmetros de cor, modelar a cinética de secagem e estudar a degradação dos compostos lignocelulósicos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados encontrados quanto a secagem convectiva de banana verde assistida por radiação ultravioleta do tipo C, avaliados os pré-tratamentos com ultrassom (25kHz) e ácido acético (2% p/p), e o secador desenvolvido neste trabalho, algumas sugestões quanto ao experimento e quanto ao secador são feitas a seguir.

a. Quanto ao experimento:

- i. Utilizar outras matrizes alimentares para avaliação do efeito da radiação UV-C sobre a secagem convectiva;
- ii. Confirmar a degradação dos compostos por meio de imagem hiperespectral por infravermelho próximo (HIS-NIR).
- iii. Testar outras frequências de ultrassom como pré-tratamento, o que poderia acarretar capilares maiores e consequente exposição dos compostos lignocelulósicos durante a secagem;
- iv. Aproximar mais as lâmpadas UV-C das amostras, intensificando assim o efeito da radiação UV-C. Sugestão: 5 cm.

b. Quanto ao equipamento (Secador):

- i. Desenvolver uma barra estabilizadora mais eficiente para conectar a balança com a bandeja de amostras internas do secador, garantindo mais estabilidade na pesagem cinética;
- ii. Revestir o interior do secador com manta térmica reflexiva para trazer incidência da radiação UV-C na face interior das fatias (não expostas diretamente as lâmpadas de UV-C);
- iii. Acoplar uma sopradora mais potente para testes de velocidade e temperatura mais abrangentes.

REFERÊNCIAS

- ABD EL-WAHAB, G. G., SAYED, H. A., ABDELHAMID, M. A., ZAGHLOOL, A., NASR, A., NAGIB, A. TAHA, I. M. Effect of Pre-Treatments on the Qualities of Banana Dried by Two Different Drying Methods. **Sustainability**, 15(20), 15112, 2023.
- AHMAD, E., & PANT, K. K. (2018). Lignin conversion: A key to the concept of lignocellulosic biomass-based integrated biorefinery. In **Waste Biorefinery: Potential and Perspectives**. Elsevier B.V., 2018.
- AKMAN, P. K., UYSAL, E., OZKAYA, G. U., TORNUK, F., & DURAK, M. Z. (2019). Development of probiotic carrier dried apples for consumption as snack food with the impregnation of *Lactobacillus paracasei*. **Lwt**, 103, 60–68, 2019.
- AKTAŞ, M., SÖZEN, A., AMINI, A., & KHANLARI, A. Experimental analysis and CFD simulation of infrared apricot dryer with heat recovery. **Drying technology**, 35(6), 766-783, 2017.
- AL-NABULSI, A. A., OSAILI, T. M., OLAIMAT, A. N., ALMASRI, W. E., AYYASH, M., AL-HOLY, M. A., JARADAT, Z. W., OBAID, R. S., & HOLLEY, R. A. Inactivation of *Salmonella* spp. in tahini using plant essential oil extracts. **Food Microbiology**, 86, 103338, 2020.
- AMANLOU, Y., & ZOMORODIAN, A. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. **Journal of food engineering**, 101(1), 8-15, 2010.
- AMERI, B., HANINI, S., & BOUMAHDI, M. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. **Renewable Energy**, 147, 1107–1119, 2020.
- AMJAD, W., CHEN, Z., & AMBROSE, R. P. K. (2024). Design assessment of grain inverters in cross-flow grain dryer via CFD-DEM numerical simulation. **Biosystems Engineering**, 239, 147-157, 2024.
- AN, S., LI, W., XUE, F., LI, X., XIA, Y., LIU, Q., CHEN, L., JAMEEL, H., & CHANG, H. MIN. (2020). Effect of removing hemicellulose and lignin synchronously under mild conditions on enzymatic hydrolysis of corn stover. **Fuel Processing Technology**, 204, 2020.
- ANSYS Fluent, v. 17, ANSYS Inc, Canonsburg, PA, USA; 2017. Available from: <https://www.ansys.com/>, 2017.
- ANTONIO-GUTIÉRREZ, O. T., LÓPEZ-DÍAZ, A. S., LÓPEZ-MALO, A., PALOU, E., & RAMÍREZ-CORONA, N. (2019). UV-C Light for Processing Beverages: Principles, Applications, and Future Trends. In **Processing and Sustainability of Beverages** (pp. 205–234). Elsevier. 2019.
- ARAL, S., & BEŞE, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, 210, 577–584, 2016.

ARAL, S., & BEŞE, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, 210, 577–584, 2016.

AUGUSTO, P. E. D., PINHEIRO, T. F., & CRISTIANINI, M. (2011). Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na avaliação de tratamentos térmicos de bebidas em garrafas. **Brazilian Journal of Food Technology**, 13(04), 260–270, 2011.

AZOUBEL, Patrícia Moreira *et al.* Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, v. 97, n. 2, p. 194-198, 2010.

BABALIS, S., PAPANICOLAOU, E., & BELESSIOTIS, V. (2017). Fundamental Mathematical Relations of Solar Drying Systems. **Solar Drying Technology**. V. 15, 89–175, 2017.

BAŞLAR, M., KILIÇLI, M., & YALINKILIÇ, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. **Ultrasonics Sonochemistry**, 27, 495–502, 2015.

BHAT, R., & KARIM, A. A. (2009). Impact of radiation processing on starch. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, 8(2), 44-58, 2009.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., & LIGHTFOOT, E. N. (2004). Transport Phenomena. **In Transport Phenomena**. JohnWiley & Sons, LTC, 2004.

BRAGA, T. R., SILVA, E. O., RODRIGUES, S., & FERNANDES, F. A. N. (2019). Drying of mangoes (*Mangifera indica* L.) applying pulsed UV light as pretreatment. **Food and Bioproducts Processing**, 114, 95–102, 2019.

CAO, X., ZHANG, M., MUJUMDAR, A. S., ZHONG, Q., & WANG, Z. (2018). Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. **Ultrasonics Sonochemistry**, 40, 333–340, 2018.

CÂRLESCU, Petru-Marian *et al.* CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. **LWT-Food Science and Technology**, v. 85, p. 479-486, 2017.

CARVALHO, C. DE, KIST, B. B., & BELING, R. R. (2019). Anuário brasileiro de horti&fruti 2020 (R. R. Beling, Ed.). Editora Gazeta Santa Cruz, 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática, 4ª Edição. Porto Alegre, RS: Editora McGrawHill, 2012.

CHANG, S. K., ALASALVAR, C., & SHAHIDI, F. (2016). Review of dried fruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health benefits. **Journal of Functional Foods**, 21, 113–132, 2016.

CHIEWCHAN, N., PRAPHRAIPHETCH, C., & DEVAHASTIN, S. (2010). Effect of pretreatment on surface topographical features of vegetables during drying. **Journal of Food Engineering**, 101(1), 41–48, 2010.

COGULET, A., BLANCHET, P., & LANDRY, V. (2016). Wood degradation under UV irradiation: A lignin characterization. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, 158, 184-191, 2016.

CORRÊA, J. L. G., RASIA, M. C., MULET, A., & CÁRCEL, J. A. (2017). Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 41, 284–291, 2017.

CRANK, J. The diffusion equations. **In: The mathematics of diffusion**. 2. ed. London: Oxford University Press, 1975.

DE ARAÚJO PADILHA, C. E., DA COSTA NOGUEIRA, C., OLIVEIRA FILHO, M. A., DE SANTANA SOUZA, D. F., DE OLIVEIRA, J. A., & DOS SANTOS, E. S. (2020). Valorization of cashew apple bagasse using acetic acid pretreatment: Production of cellulosic ethanol and lignin for their use as sunscreen ingredients. **Process Biochemistry**, 91(November), 23–33, 2020.

DEFRAEYE T, RADU A. Convective drying of fruit: A deeperlook at the air-material interface by conjugate modeling. **Int J Heat Mass Trans.**2017;108(Part B):1610–22, 2017.

DIAS DA SILVA, G., BARROS, Z. M. P., DE MEDEIROS, R. A. B., DE CARVALHO, C. B. O., RUPERT BRANDÃO, S. C., & AZOUBEL, P. M. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, 74, 114–119, 2016.

DIESLER, K., GOLOMBEK, P., KROMM, L., SCHARFENBERGER-SCHMEER, M., DURNER, D., SCHMARR, H. G., STAHL, M. R., BRIVIBA, K., & FISCHER, U. (2019). UV-C treatment of grape must: Microbial inactivation, toxicological considerations and influence on chemical and sensory properties of white wine. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 52(April 2018), 291–304, 2019.

DOYMAZ, I. (2020). Impact of citric acid on the drying characteristics of kiwifruit slices. **Acta Scientiarum Technology**, [s.l.], v. 42, n. 1, p. 1-11, 2020.

ELMASRY, G., & SUN, D. W. (2010). Principles of Hyperspectral Imaging Technology. **In Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control**, 2010.

FARIAS, S. M. DE O. C. (2016). Avaliação da secagem em diferentes temperaturas sobre o teor de licopeno, carotenoides totais, compostos fenólicos e propriedades tecnológicas do resíduo sólido do beneficiamento da goiaba (*psidium guajava*). Tese (Doutorado) - Florianópolis, SC: UFSC.

FENOGLIO, D., FERRARIO, M., SCHENK, M., & GUERRERO, S. (2019). UV-C light inactivation of single and composite microbial populations in tangerine-orange juice blend. Evaluation of some physicochemical parameters. **Food and Bioproducts Processing**, 117, 149–159, 2019.

FENOGLIO, D., FERRARIO, M., SCHENK, M., & GUERRERO, S. (2019). UV-C light inactivation of single and composite microbial populations in tangerine-orange juice blend. Evaluation of some physicochemical parameters. **Food and bioproducts processing**, 117, 149-159, 2019.

FERNANDES DA SILVA, João Henrique et al. Effect of ultrasonic pretreatment on melon drying and computational fluid dynamic modelling of thermal profile. **Food Technology and Biotechnology**, v. 58, n. 4, p. 381-390, 2020.

FOROUZANFAR, A., HOJJATI, M., NOSHAD, M., SZUMNY, A.J. (2020) Influence of UV-B Pretreatments on Kinetics of Convective Hot Air Drying and Physical Parameters of Mushrooms (*Agaricus bisporus*). **Agriculture**, 10, 371., 2020.

GÓMEZ, P. L., ALZAMORA, S. M., CASTRO, M. A., SALVATORI, D. M. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior. **Journal of Food Engineering**, Volume 98, Issue 1, Pages 60-70, 2010.

GOPISETTY, V. V. S., PATRAS, A., PENDYALA, B., KILONZO-NTHENGE, A., RAVI, R., POKHAREL, B., ZHANG, L., SI, H., & SASGES, M. (2019). UV C irradiation as an alternative treatment technique: Study of its effect on microbial inactivation, cytotoxicity, and sensory properties in cranberry-flavored water. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 52(May 2018), 66–74, 2019.

GOUPY, P., AMIOT, M.J., RICHARD-FORGET, F., DUPRAT, F., AUBERT, S., NICOLAS, J., (1995). Enzymatic browning of model solutions and apple phenolic substrates by apple polyphenoloxidase. **Journal of Food Science** 60, 497–501, 1995.

GÜNDÜZ, G. T., & KORKMAZ, A. (2019). UV-C treatment for the inhibition of molds isolated from dried persimmons (*Diospyros kaki* L.) and modelling of UV-C inactivation kinetics. **LWT**, 115(July), 108451, 2019.

HINDS, L. M., O'DONNELL, C. P., AKHTER, M., & TIWARI, B. K. (2019). Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 56(October 2018), 102153, 2019.

HIRANVARACHAT, B., DEVAHASTIN, S., & CHIEWCHAN, N. (2011). Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying. **Food and Bioproducts Processing**, 89(2), 116–127, 2011.

HOLLÓSY, F. (2002). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. **Micron**, 33(2), 179-197, 2002.

HORUZ, E., JAAFAR, H. J., & MASKAN, M. (2017). Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air–microwave hybrid oven. **Drying Technology**, 35(7), 849–859, 2017.

HUANG, D., YANG, P., TANG, X., LUO, L., & SUNDEN, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. **Trends in Food Science and Technology**, 110(October 2020), 765–777, 2021.

HUANG, R., & CHEN, H. (2020). Use of 254 nm ultraviolet light for decontamination of fresh produce and wash water. **Food Control**, 109(October 2019), 106926, 2020.

JANG, J. H., & MOON, K. D. (2011). Inhibition of polyphenol oxidase and peroxidase activities on fresh-cut apple by simultaneous treatment of ultrasound and ascorbic acid. **Food chemistry**, 124(2), 444-449, 2011.

JESZKA-SKOWRON, M., ZGOŁA-GRZEŚKOWIAK, A., STANISZ, E., & WAŚKIEWICZ, A. (2017). Potential health benefits and quality of dried fruits: Goji fruits, cranberries and raisins. **Food Chemistry**, 221, 228–236, 2017.

JIN, W., ZHANG, M., & MUJUMDAR, A. S. (2024). A High-Efficiency Radio-Frequency-Assisted Hot-Air Drying Method for the Production of Restructured Bitter Melon and Apple Chips. **Foods**, 13(2), 197, 2024.

JIN, W., ZHANG, M., & SHI, W. (2018). Evaluation of ultrasound pretreatment and drying methods on selected quality attributes of bitter melon (*Momordica charantia* L.). **Drying Technology**, 0(0), 1–10, 2018.

JIN, X., CHEN, X., SHI, C., LI, M., GUAN, Y., YU, C. Y., YAMADA, T., SACKS, E. J., & PENG, J. (2017). Determination of hemicellulose, cellulose and lignin content using visible and near infrared spectroscopy in *Miscanthus sinensis*. **Bioresource Technology**, 241, 603–609, 2017.

JUBAER, Hasan et al. Computationally inexpensive simulation of agglomeration in spray drying while preserving structure related information using CFD. **Powder technology**, v. 372, p. 372-393, 2020.

JUBAER, Hasan et al. On the effect of turbulence models on CFD simulations of a counter-current spray drying process. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 141, p. 592-607, 2019.

KALOGIANNIS, K. G., KARNAOURI, A., MICHAİLOF, C., TZİKA, A. M., ASİMAKOPOULOU, G., TOPAKAS, E., & LAPPAS, A. A. (2020). OxiOrganosolv: A novel acid free oxidative organosolv fractionation for lignocellulose fine sugar streams. **Bioresource Technology**, 313(March), 123599, 2020.

KÖSE, B., & ERENTÜRK, S. (2010). Drying characteristics of mistletoe (*Viscum album* L.) in convective and UV combined convective type dryers. **Industrial Crops and Products**, 32(3), 394–399, 2010.

KOUTCHMA, T., POPOVIĆ, V., & GREEN, A. (2019). Overview of Ultraviolet (UV) LEDs Technology for Applications in Food Production. **In Ultraviolet LED Technology for Food Applications** (pp. 1–23). Elsevier, 2019.

KUO, M., & HU, N. (1991). Ultrastructural Changes of Photodegradation of Wood Surfaces Exposed to UV. **Holzforschung**, 45(5), 347–353, 1991.

LASKAR, Abdullah Ahmad *et al.* Mathematical modeling and regression analysis using MATLAB for optimization of microwave drying efficiency of banana. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 46, p. 102157, 2023.

LEITE, A. L. M. P., DA SILVA, F. S., PORTO, A. G., PIASSON, D., & DOS SANTOS, P. (2015). Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 45(2), 155–162, 2015.

LI, M., CHEN, Y., WANG, X., CHENG, S., LIU, F., & HUANG, L. (2019). Determination of drying kinetics and quality changes of *Panax quinquefolium* L. dried in hot-blast air. **LWT**, 2019.

LI, W., CAO, J., YANG, J., WANG, Z., & YANG, Y. (2021). Production and characterization of lignocellulosic fractions from sisal waste. **Industrial Crops and Products**, 160(November 2020), 113109, 2021.

LIANG, Yanan *et al.* CFD-DEM simulation of cyclone self-rotation drying: Particle high-speed self-rotation and heat transfer. **Energy**, v. 290, p. 130277, 2024.

LIU, X., DUAN, X., WEI, W., WANG, S., & NI, B. J. (2019). Photocatalytic conversion of lignocellulosic biomass to valuable products. **Green Chemistry**, 21(16), 4266–4289, 2019.

LYU, Q., CHEN, X., ZHANG, Y., YU, H., HAN, L., & XIAO, W. (2021). One-pot fractionation of corn stover with peracetic acid and maleic acid. **Bioresource Technology**, 320(PA), 124306, 2021.

M'ARIMI, M. M., MECHA, C. A., KIPROP, A. K., & RAMKAT, R. (2020). Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production: Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 121, 109669. 2020.

MAGALHÃES, M. L., CARTAXO, S. J. M., GALLÃO, M. I., GARCÍA-PÉREZ, J. V., CÁRCEL, J. A., RODRIGUES, S., & FERNANDES, F. A. N. (2017). Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, 215, 72–77, 2017.

MALEKJANI, Narjes; JAFARI, Seid Mahdi. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. **Trends in food science & technology**, v. 78, p. 206-223, 2018.

MATTONAI, M., WATANABE, A., SHIONO, A., & RIBECHINI, E. (2019). Degradation of wood by UV light: A study by EGA-MS and Py-GC/MS with on line irradiation system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 139, 224-232, 2019.

MAWIRE, Ashmore *et al.* An experimental evaluation of drying banana slices using a novel indirect solar dryer under variable conditions. **Heliyon**, v. 10, n. 7, 2024.

MEWA, E. A., OKOTH, M. W., KUNYANGA, C. N., & RUGIRI, M. N. (2019). Experimental evaluation of beef drying kinetics in a solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, 2019.

- MONICKA, A. A., KUMAR, D., SOLOMON, A. B., S. DEVEKUMARI M. (2023). Mathematical Modelling of Banana Slices in Natural Convection Indirect Solar Dryer. **E3S Web of Conferences**. 455, 2023.
- MOU, X., & CHEN, Z. (2021). Study on the ultrasound-assisted drying process of deformable porous materials. **Journal of Food Engineering**, 306(April), 110612, 2021.
- MURRAY, R. L., & HOLBERT, K. E. (2020). Biological Effects of Radiation. In Nuclear Energy (Vol. 9, Issue 7, pp. 161–176). Elsevier., 2020.
- MUTABILWA, P. X., & NWAIGWE, K. N. (2020). Experimental evaluation of drying of banana using a double-pass solar collector (DPSC) and theoretical analysis using a CFD model. **Cogent Engineering**, 7(1), 1789363, 2020.
- NAVAKOTESWARA RAO, V., MALU, T. J., CHERALATHAN, K. K., SAKAR, M., PITCHAIMUTHU, S., RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, V., MAMATHA KUMARI, M., & SHANKAR, M. V. (2021). Light-driven transformation of biomass into chemicals using photocatalysts – Vistas and challenges. **Journal of Environmental Management**, 284, 2020.
- OKUR, M., & ESLEK KOYUNCU, D. D. (2020). Investigation of pretreatment parameters in the delignification of paddy husks with deep eutectic solvents. **Biomass and Bioenergy**, 142(September), 105811, 2020.
- OLADEJO, A. O., MA, H., QU, W., ZHOU, C., WU, B., YANG, X., & ONWUDE, D. I. (2017). Effects of ultrasound pretreatments on the kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of sweet potato (*Ipomea batatas*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 43, 7–17, 2017.
- OMOLOLA, A. O., JIDEANI, A. I. O., KAPILA, P. F. (2015). Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. Luvhele. Bulg. **J. Agric. Sci.**, 21: 342–348, 2015.
- ONWUDE, D. I., HASHIM, N., JANIUS, R., ABDAN, K., CHEN, G., & OLADEJO, A. O. (2017). Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 43(May), 223–238, 2017.
- PALAMAE, S., DECHATIWONGSE, P., CHORIT, W., CHISTI, Y., & PRASERTSAN, P. (2017). Cellulose and hemicellulose recovery from oil palm empty fruit bunch (EFB) fibers and production of sugars from the fibers. In **Carbohydrate Polymers** (Vol. 155). Elsevier Ltd, 2017.
- PHIMPHILAI, S., MAIMAMUANG, S., & PHIMPHILAI, K. (2014). Application of ultraviolet radiation in the drying process of longan (*Dimocarpus longan* 'Daw'). **Acta Horticulturae**, 1029, 385–392, 2014.
- PINHEIRO, MN Coelho; CASTRO, Luis MMN. Effective moisture diffusivity prediction in two Portuguese fruit cultivars (Bravo de Esmolfe apple and Madeira banana) using drying kinetics data. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 2023.

POTHAVORN, P., KITDAMRONGSONT, K., SWANGPOL, S., WONGNIAM, S., ATAWONGSA, K., SVASTI, J., & SOMANA, J. (2010). Sap phytochemical compositions of some bananas in Thailand. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 58(15), 8782-8787, 2010.

RAMAN, J. K., & GNANSOUNOU, E. (2014). Ethanol and lignin production from Brazilian empty fruit bunch biomass. **Bioresource Technology**, 172, 241–248, 2014.

RANI, Poonam; TRIPATHY, P. P. CFD coupled heat and mass transfer simulation of pineapple drying process using mixed-mode solar dryers integrated with flat plate and finned collector. **Renewable Energy**, v. 217, p. 119210, 2023.

REINEKING, Lucas et al. Convective drying of wood chips: accelerating coupled DEM-CFD simulations with parametrized reduced single particle models. **Particuology**, v. 84, p. 158-167, 2024.

SAHU, S., & PRAMANIK, K. (2018). Evaluation and Optimization of Organic Acid Pretreatment of Cotton Gin Waste for Enzymatic Hydrolysis and Bioethanol Production. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 186(4), 1047–1060, 2018.

SAJJADI B, ASGHARZADEHAHMADI S, ASAITHAMBI P, RAMANAAA, PARTHASARATHY R. Investigation of mass transfer in-tensification under power ultrasound irradiation using 3Dcomputational simulation: A comparative analysis. **Ultra-son Sonochem**. V. 34: 504-18, 2017.

SANDLE, T. (2013). Other methods of sterilisation. **Sterility, Sterilisation and Sterility Assurance for Pharmaceuticals**, 157–170, 2013.

SILVA, J. H. F. DA., SILVA NETO, J. S DA., SILVA, E. S. DA., CAVALCANTI, D. E. DE S., AZOUBEL, P. M., BENACHOUR, M. (2020). Effect of Ultrasonic Pretreatment on Melon Drying and Computational Fluid Dynamic Modelling of Thermal Profile. **Food Technol Biotechnol**. ;58(4):381-390, 2020.

SILVA, T. H. L., MONTEIRO, R. L., SALVADOR, A. A., LAURINDO, J. B., & CARCIOFI, B. A. M. (2022). Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. **Food Control**, 137, 108898, 2022.

SUN, Zhili *et al*. Experimental analysis of a CO2 closed heat pump drying system combined with rotary dehumidification for drying banana slices drying. **International Journal of Refrigeration**, 2024.

SYAFTIKA, N., & MATSUMURA, Y. (2018). Comparative study of hydrothermal pretreatment for rice straw and its corresponding mixture of cellulose, xylan, and lignin. **Bioresource Technology**, 255, 1–6, 2018.

TAO, Y., WANG, P., WANG, Y., KADAM, S. U., HAN, Y., WANG, J., & ZHOU, J. (2016). Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. **Ultrasonics Sonochemistry**, 31, 310–318, 2016.

- TOMÁS-PEJÓ, E., ALVIRA, P., BALLESTEROS, M., & NEGRO, M. J. (2011). Pretreatment Technologies for Lignocellulose-to-Bioethanol Conversion. In **Biofuels** (pp. 149–176). Elsevier., 2011.
- TU, J., YEOH, G.-H., & LIU, C. (2018a). CFD Mesh Generation: A Practical Guideline. Em **Computational Fluid Dynamics** (p. 125–154). Elsevier. 2018a.
- TU, J., YEOH, G.-H., & LIU, C. (2018b). CFD Techniques: The Basics. Em **Computational Fluid Dynamics** (p. 155–210). Elsevier. 2018b.
- TU, J., YEOH, G.-H., & LIU, C. (2018c). Introduction. Em **Computational Fluid Dynamics** (p. 1–31). Elsevier. 2018c.
- TU, Qiuya; MA, Zhiyang; WANG, Haigang. Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement. **Chemical Engineering Journal**, v. 452, p. 139200, 2023.
- TURTOI, M., & BORDA, D. (2013). Ultraviolet light efficacy for microbial inactivation on fruit juices, nectars and apple cider. **Journal of Agroalimentary Processes and Technologies.**, 2013.
- TZEMPELIKOS DA, MITRAKOS D, VOUIROS AP, BARDAKAS AV, FILI-OS AE, MARGARIS DP. Numerical modeling of heat and masstransfer during convective drying of cylindrical quince slic-es. **J Food Eng.** 156:10–21, 2015.
- VARGA, D., TOLVAJ, L., TSUCHIKAWA, S., BEJO, L., & PREKLET, E. (2017). Temperature dependence of wood photodegradation monitored by infrared spectroscopy. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 348, 219–225, 2017.
- VELÁSQUEZ-ARREDONDO, H. I.; RUIZ-COLORADO, A. A.; OLIVEIRA, S. DE. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: **Energy analysis**. *Energy*, v. 35, n. 7, p. 3081–3087, 2010.
- WANG, J.; XIAO, H.W.; YE, J. H. (2019). Ultrasound Pretreatment to Enhance Drying Kinetics of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) Slices: Pros and Cons. **Food Bioprocess Technology**, [s.l.], v. 12, p. 865–876, 2019.
- WANG, L., XU, B., WEI, B., & ZENG, R. (2018). Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. **Ultrasonics Sonochemistry**, 40, 619–628, 2019.
- WU, X. FEI, ZHANG, M., & LI, Z. (2019). Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris*. **LWT**, 2019.
- WU, X., FAN, X., XIE, S., LIN, J., CHENG, J., ZHANG, Q., CHEN, L., & WANG, Y. (2018). Solar energy-driven lignin-first approach to full utilization of lignocellulosic biomass under mild conditions. **Nature Catalysis**, 1(10), 772–780, 2018.

WU, X., LUO, N., XIE, S., ZHANG, H., ZHANG, Q., WANG, F., & WANG, Y. (2020). Photocatalytic transformations of lignocellulosic biomass into chemicals. **Chemical Society Reviews**, 49(17), 6198–6223, 2020.

ZHANG, C., TRIERWEILER, B., LI, W., BUTZ, P., XU, Y., RÜFER, C. E., MA, Y., ZHAO, X. (2011). Comparison of thermal, ultraviolet-c, and high pressure treatments on quality parameters of watermelon juice, **Food Chemistry**, Volume 126, Issue 1, Pages 254-260, 2011.

ZHANG, J., YAGOUB, A.E.A., SUN, Y., S MUJUMDAR, A., MA, H., WAHIA, H. AND ZHOU, C. (2021), Intensive pulsed light pretreatment combined with controlled temperature and humidity for convection drying to reduce browning and improve quality of dried shiitake mushrooms. **J Sci Food Agric**, 101: 5608-5617. 2021.

ZHAO, W., SHEHZAD, H., YAN, S., LI, J., & WANG, Q. (2017). Acetic acid pretreatment improves the hardness of cooked potato slices. **Food Chemistry**, 228, 204–210. 2017.

ZHAO, X., WEN, J., CHEN, H., & LIU, D. (2018). The fate of lignin during atmospheric acetic acid pretreatment of sugarcane bagasse and the impacts on cellulose enzymatic hydrolyzability for bioethanol production. **Renewable Energy**, 128, 200–209. 2018.

ZHAO, Y., QIAN, S., XU, S., ZHAO, X., SUN, B., & YU, J. (2024). Modeling of contact thermal resistance in lateral capillary tube-suction line heat exchangers with experimental validation and investigation. **Applied Thermal Engineering**, 238, 122040, 2024.

ZHAO, Y., ZHU, H., XU, J., ZHUANG, W., ZHENG, B., LO, Y. M., HUANG, Z., & TIAN, Y. (2021). Microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: Effects of ultrasonic pretreatment on color, antioxidant activity, and rehydration capacity. **LWT**, 111603, 2021.

ZHOU, L., LIAO, T., LIU, W., ZOU, L., LIU, C., TEREFE, N. S. (2019). Inhibitory effects of organic acids on polyphenol oxidase: From model systems to food systems. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s.l.], v. 60, p. 3594-3621, 2019.

ZHOU, Y.-H., STANISZEWSKA, I., LIU, Z.-L., ZIELINSKA, D., XIAO, H.-W., PAN, Z., NOWAK, K. W., & ZIELINSKA, M. (2021). Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity. **LWT**, 146(April), 111464, 2021.

ZHOU, Yu-Hao *et al.* Pulsed vacuum drying of banana: Effects of ripeness on drying kinetics and physicochemical properties and related mechanism. **LWT**, v. 161, p. 113362, 2022.

APÊNDICE A – PATENTE PUBLICADA DO SECADOR



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial



(21) BR 102024000966-5 A2

(22) Data do Depósito: 17/01/2024

(43) Data da Publicação Nacional:
30/04/2024

(54) **Título:** SECADOR CONVECTIVO DE FRUTAS E VEGETAIS ASSISTIDO POR LUZ ULTRAVIOLETA DO TIPO C (UV-C)

(51) **Int. Cl.:** A23L 3/40; A23L 3/54; H05B 6/00.

(52) **CPC:** A23L 3/40; A23L 3/54; H05B 6/00.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

(72) **Inventor(es):** JOÃO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA; PATRÍCIA MOREIRA AZOUBEL; MOHAND BENACHOUR; FERNANDA ARAÚJO HONORATO.

(57) **Resumo:** SECADOR CONVECTIVO DE FRUTAS E VEGETAIS ASSISTIDO POR LUZ ULTRAVIOLETA DO TIPO C (UV-C). A presente invenção refere-se ao desenvolvimento de um secador convectivo com aplicação de luz ultravioleta do tipo C (luz UV-C) integrada ao processo de secagem para uso na produção de vegetais secos. O objetivo é melhorar a taxa de remoção de água durante o processo de secagem, especialmente para alimentos ricos em substâncias vegetais específicas, como compostos lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina). Para fazer isso, a invenção utiliza luz UV-C de forma a ajudar na quebra dessas substâncias durante o processo de secagem, facilitando a saída da água. O problema que esta invenção resolve é como aplicar de forma eficaz a luz UV-C em secadores, considerando que as condições de secagem podem limitar a utilização dessa tecnologia. O dispositivo criado para isso inclui uma lâmpada UV-C que fica do lado de fora do secador, separada por uma janela de vidro de quartzo. Essa janela permite que a luz UV-C passe do lado de fora para o interior do secador com o mínimo de perda de energia. A lâmpada é posicionada de modo a atingir diretamente a maior superfície possível (...).

