

**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

**ESTUDO DO EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO ULTRASSÔNICO NA SECAGEM:
MODELAGEM VIA CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UMA FATIA DE
MELÃO**

Recife
2018

JOÃO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA

**ESTUDO DO EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO ULTRASSÔNICO NA SECAGEM:
MODELAGEM VIA CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UMA FATIA DE
MELÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de pesquisa: Processos Químicos Industriais

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Patrícia Moreira Azoubel.

Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586e Silva, João Henrique Fernandes da.
Estudo do efeito do pré-tratamento ultrassônico na secagem: modelagem via CFD da transferência de calor em uma fatia de melão / João Henrique Fernandes da Silva. – 2018.
70 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Moreira Azoubel.
Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2018.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Química. 2. CFD. 3. Melão. 4. Secagem. 5. Transferência de calor e massa. 6. Ultrassom. I. Azoubel, Patrícia Moreira. (Orientadora). II. Benachour, Mohand. (Coorientador). III. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-365

JOÃO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA

**ESTUDO DO EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO ULTRASSÔNICO NA SECAGEM:
MODELAGEM VIA CFD DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UMA FATIA DE
MELÃO**

Linha de pesquisa: Processos químicos industriais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 10 de agosto de 2018 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof.^a DSc. Patrícia Moreira Azoubel (Orientadora) – DEQ/UFPE

Prof. DSc. Mohand Benachour (Co-Orientador) – DEQ/UFPE

Prof. DSc. Luiz Stragevitch (Examinador interno) – DEQ/UFPE

Prof. DSc. Leandro Danielski (Examinador interno) – DEQ/UFPE

Prof. DSc. Thibério Pinho Costa Souza (Examinador externo) – UAG/UFRPE

*Ao Meu Pai, João Belo da Silva (in
memoria), Que Partiu 10 Ano Atrás,
Deixando Muitas Lembranças. Dedico A
Você Essa Vitória.*

Que Saudade Pai!

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.

Aos meus irmãos, Izabella Fernandes da Silva e Vinícius Fernandes da Silva, que sempre me apoiaram e encorajaram, ajudando-me 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. São vários, mas em especial: Alessandro, Alisson, Anderson, Alex, Bruna, Daniele, Dona Fátima, Edilene, Eduardo, Fiama, George, Íris, João Pedro, Joanna, Jorge, Milene, Pâmela, Pedro, Ronald, Sabino, Sarah, Thaíris, Thibério, Vinícius, Vilma... Obrigado. Também tenho que destacar aqui uma amizade diferenciada, um pouco mais além, um sentimento diferente e difícil de se explicar, agradeço a minha namorada, Laiany, que mesmo não tendo participado dessa etapa desde o início, esteve sempre presente de alguma forma. Eu te agradeço demais.

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

Agradeço aos órgãos de fomento, CNPq e CAPES, destacando aqui a importância desses órgãos para o 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

Devido à sua importância econômica e fragilidade com relação à preservação *in natura*, estudar e avaliar processos de conservação para garantir estabilidade do melão (*Cucumis melo* L.) até sua utilização para consumo torna-se imprescindível do ponto de vista econômico e da segurança alimentar. O presente trabalho teve como objetivo geral analisar, experimentalmente, diferentes sistemas de secagem, com e sem aplicação de ultrassom (US) como pré-tratamento, quanto à transferência de calor e massa, simulando numericamente a transferência de calor empregando a fluidodinâmica computacional (CFD). A matéria-prima, previamente selecionada foi fatiada em retângulos (5,0 cm x 3,0 cm) de 0,5 cm de espessura. As fatias de melão foram levadas para um banho ultrassônico por 10 (US10), 20 (US20) e 30 (US30) minutos numa frequência de 25 kHz. A perda de água média (PA_m) e o ganho de sólidos médio (GS_m) foram avaliados. A secagem convectiva das amostras com e sem pré-tratamento ultrassônico foi feita nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de 2,0 m·s⁻¹. Os coeficientes de difusividade efetiva foram calculados por meio do modelo difusivo baseado na Lei de Fick. Os dados experimentais de secagem foram modelados empiricamente por meio dos modelos de Page, Henderson e Pabis e Dois termos. O fluxo de ar no secador e a distribuição de temperatura, tanto no secador quanto na fatia de melão, foi simulado via CFD. A simulação no secador mostrou que o fluxo de ar no centro oferece menor variação da velocidade e a temperatura foi numericamente uniforme ao longo do secador, se dando a secagem do melão nesta região central. O tempo de secagem foi efetivamente reduzido, variando de 25% (US20 e US30 a 50°C) a 40% (US20 e US30 a 70°C), mostrando um efeito positivamente sinérgico conforme a temperatura foi elevada. Dos modelos empíricos testados, o modelo de Page e Dois termos obtiveram $R^2 > 0,999$; contudo, o erro percentual mostrou que o modelo Dois termos teve melhor ajuste, variando de 0,22 a 2,31%. Os coeficientes de difusividade variaram de $2,47 \cdot 10^{-9}$ (50°C) a $4,50 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (70°C). A PA_m e GS_m variaram de -1,19% ($\pm 0,17\%$) a -2,65% ($\pm 0,09\%$) e -1,61% ($\pm 0,02\%$) a -2,30% ($\pm 0,01\%$), respectivamente. A modelagem da transferência de calor via CFD mostrou que a distribuição de temperatura ao longo da fatia de melão foi representativa, apresentando resultados similares ao encontrados na literatura para geometria estudada para diversas frutas.

Palavras-chave: CFD. Melão. Secagem. Transferência de calor e massa. Ultrassom.

ABSTRACT

Due to its economic importance and fragility in relation to *in natura* preservation, studying and evaluating conservation processes to guarantee the stability of the melon (*Cucumis melo* L.) until its use for consumption becomes essential from the economic point of view and food security. The present work had the general objective of analyzing, experimentally, different drying systems, with and without the application of ultrasound (US) as pre-treatment, for heat transfer and mass, simulating numerically the heat transfer using computational fluid dynamics (CFD). The previously selected raw material was sliced into rectangles (5.0 cm x 3.0 cm) of 0.5 cm thickness. The melon slices were taken to an ultrasonic bath for 10 (US10), 20 (US20) and 30 (US30) minutes at a frequency of 25 kHz. The average water loss (WL_m) and the average solids gain (SG_m) were evaluated. The convective drying of the samples with and without ultrasonic pretreatment was done at temperatures of 50, 60 and 70°C and air velocity of 2.0 m·s⁻¹. The coefficients of effective diffusivity were calculated by means of the diffusive model based on the Law of Fick. Experimental drying data were modeled empirically through the models of Page, Henderson and Pabis and Two terms. The air flow in the dryer and the temperature distribution, both in the dryer and in the melon slice, was simulated via CFD. The simulation in the dryer showed that the air flow in the center offers lower speed variation and the temperature was numerically uniform throughout the dryer, giving the melon drying in this central region. The drying time was effectively reduced, ranging from 25% (US20 and US30 at 50°C) to 40% (US20 and US30 at 70°C), showing a positively synergistic effect as the temperature was raised. From the empirical models tested, the Page and Two terms model obtained $R^2 > 0.999$; however, the percentage error showed that the Two terms model had a better fit, ranging from 0.22 to 2.31%. The diffusivity coefficients ranged from $2.47 \cdot 10^{-9}$ (50°C) to $4.50 \cdot 10^{-9}$ m²·s⁻¹ (70°C). The WL_m and SG_m ranged from -1.19% ($\pm 0.17\%$) to -2.65% ($\pm 0.09\%$) and -1.61% ($\pm 0.02\%$) to -2.30% ($\pm 0.01\%$), respectively. The modeling of heat transfer via CFD showed that the temperature distribution along the melon slice was representative, presenting results similar to those found in literature for geometry studied for various fruits.

Keywords: CFD. Drying. Heat and mass transfer. Melon. Ultrasound.

Lista de Figuras

Figura 1	- Curvas típicas de secagem. (a) evolução do teor de umidade; (b) taxa de secagem; (c) evolução da temperatura do produto.....	21
Figura 2	- Propagação das ondas sonoras.....	24
Figura 3	- Pré-tratamento ultrassônico aplicado à desidratação de melão. (A) região com células inchadas; (B) região com formação de microcanais.....	24
Figura 4	- Imagem de microscopia eletrônica de maçãs tratadas com ultrassom comparando com o tratamento sem ultrassom (A), aplicando 10 (B), 20 (C) e 30 (D) minutos de exposição as ondas ultrassônicas.....	25
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).....	28
Figura 6	- Visualização da aplicação da malha Boddy-fitted e a mudança de coordenadas.....	29
Figura 7	- Geração de malha não-estruturada e a Triangulação de Delaunay.....	30
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)	32
Figura 9	- Linhas de Corrente (“a” e “b”), isobáricas (“c” e “d”) e isotermas (“e” e “f”) para $U = 0,05$ m/s (superiores) e $U = 0,1$ m/s (inferiores).....	33
Figura 10	- Esquema de secagem (direita) e gráficos de distribuição de temperatura (esquerda) em diferentes tempos de secagem.....	34
Figura 11	- Esquema de secagem e distribuição de temperatura durante a secagem (a, b e c)	34
Figura 12	- Utilização da CFD para análise da velocidade do fluxo de ar em diferentes sistemas de secagem.....	35
Figura 13	- Esquema de secagem, domínio computacional, gráficos de distribuição do conteúdo de umidade e temperatura dentro da fatia de marmelo.....	36
Figura 14	- Esquema de secagem e condições de contorno (esquerda) e gráficos da distribuição de umidade relativa expressa em termos da atividade de água e temperatura (direita).....	37
Figura 15	- Procedimento de Corte: remoção das cúpulas (1), divisão em três fatias (2), remoção da casca e da região mais amadurecida (3), molde de corte (4), prisma com base de trapézio isósceles (5), resultado do corte pelo molde (6), melão de formato retangular (7)	40

Figura 16	- Secador de leito fixo.....	42
Figura 17	- Etapas do processamento via CFD.....	44
Figura 18	- Esquema 1: Geometria (A) do secador utilizada na simulação; Representação das regiões de densidade de malha no plano XY (B) e zoom da região inferior central da geometria (C) para detalhamento da densidade de geometria local. Caso: malha não-estruturada	45
Figura 19	- Esquema 2: Representação geométrica do aparato utilizado para simulação. Fatia de melão (A) e corpo do secador simplificado (B).....	46
Figura 20	- Representação das zonas de malha estruturada e não-estruturada utilizadas no plano XY; A – Zona não-estruturada mais densa no entorno do objeto de estudo (melão), B – Zona de malha estruturada utilizada no objeto de estudo e C – Zona de malha menos densa, representando o meio fluido externo (ar de secagem)	47
Figura 21	- Perfil de velocidade nos planos XY (A) e YZ (B). Linhas de corrente dentro do secador (streamlines) (C).....	48
Figura 22	- Zonas de pressão dentro do secador no plano XY (A) e YZ (B).....	49
Figura 23	- Cinética de secagem a 50°C (A), 60°C (B) e 70°C (C) para os diferentes tratamentos: SU (Δ), US10 (\circ), US20 (\diamond), US30 (\times)	50
Figura 24	- Percentual de redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura para os diferentes tratamentos.....	51
Figura 25	- Modelagem empírica dos dados experimentais. As linhas contínuas representam o modelo melhor ajustado (Dois-termos) para as diferentes temperaturas, T = 50 (\blacklozenge), T = 60 (\blacksquare) e T = 70 (\blacktriangle) °C.....	53
Figura 26	- Dependência da difusividade com o inverso da temperatura. SU (\diamond), US10 (\square), US20 (Δ) e US30 (\times)	56
Figura 27	- Perfil temperatura na fatia de melão (US20/60°C). Condição da fatia 30 min (A), após 60 min (B) e após 90 min (C).....	59
Figura 28	- Linhas de corrente nos planos XY (A) e YZ (B). Pressão relativa nos planos XY (C) e YZ (D).....	60

Lista de Tabelas

Tabela 1	- Exportações da olericultura Brasileira em 2016.....	17
Tabela 2	- Modelos empíricos para evolução temporal da concentração de água em distintas geometrias.....	23
Tabela 3	- Equações de Navier-Stokes para fenômenos de transporte em geometria cartesiana.....	26
Tabela 4	- Propriedades térmicas estimadas para simulação.....	43
Tabela 5	- Modelos empíricos utilizados para ajuste aos dados experimentais.....	43
Tabela 6	- Parâmetros para criação do Mesh do secador (Esquema 1)	44
Tabela 7	- Parâmetros para criação do Mesh para o sistema simplificado secador-melão (Esquema 2)	45
Tabela 8	- Principais configurações realizadas no setup.....	47
Tabela 9	- Parâmetros de ajuste dos modelos aos dados experimentais e os erros percentuais, E (%)	52
Tabela 10	- Difusividade efetiva para cada condição explorada.....	55
Tabela 11	- Perda e água (PA) e ganho de sólidos (GS)	57
Tabela 12	- Propriedades utilizadas na simulação do perfil de temperatura a 60°C.	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

CFD	Computational Fluid Dynamics
DO	Desidratação Osmótica
DT	Modelo Dois Termos
FID	Secagem via infravermelho distante
GS	Ganho de sólidos
HAD	Secagem por ar quente
HP	Modelo Henderson e Pabis
IW – IR	Secagem por radiação infravermelha de onda intermediária
LFU	Ultrassom de baixa frequência
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
PA	Perda de Água
PG	Modelo de Page
RFHAD	Secagem por ar quente assistida por radiofrequência
SU	Tratamento sem aplicação de ultrassom
US	Tratamento com ultrassom
US10	Tratamento com 10 minutos de ultrassom
US20	Tratamento com 20 minutos de ultrassom
US30	Tratamento com 30 minutos de ultrassom
VC	Tratamento com Aplicação de vácuo

Lista de Símbolos

A_i^j	Área superficial, sendo “i” a superfície “i” e “j” o plano da superfície
C_p	Capacidade calorífica específica a pressão constante
ρ	Densidade
D_{ef}	Difusividade efetiva
E_a	Energia de ativação
g_i	Gravidade da direção “i” (x, y ou z)
\vec{n}	Vetor normal à superfície
v_i	Velocidade na direção “i” (x, y ou z)
X_θ	Umidade adimensional (umidade adimensionalizada)
A	Constante de secagem
a, k, w, n	Parâmetros dos modelos empíricos
E_0	Conteúdo inicial de água
E_t	Conteúdo de água no tempo t
E	Erro
k_p	Condutividade térmica
M_0	Massa inicial do produto
m_{s0}	Massa seca inicial
m_{st}	Massa seca no tempo t
∂	Operador diferencial parcial
p	Pressão
Φ	Propriedade a ser estudada
R	Constante dos gases
R^2	Coefficiente de determinação
T	Temperatura
τ_{ij}	Tensor no plano “i” e fluxo na direção “j”
V	Volume
V_O	Valores observados
V_P	Valores preditos
X	Umidade
X_f	Umidade final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	O MELÃO: CARACTERÍSTICAS E IMPORTÂNCIA COMERCIAL.....	17
2.2	FRUTAS SECAS: UMA VISÃO SOBRE O MERCADO EXTERNO.....	18
2.3	SECAGEM.....	20
2.3.1	Cinética de secagem.....	21
2.3.2	Pré-tratamento ultrassônico.....	23
2.4	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).....	25
2.4.1	Geração da malha.....	26
2.4.1.1	<i>Malha estruturada.....</i>	27
2.4.1.2	<i>Malha Boddy-fitted.....</i>	29
2.4.1.3	<i>Malha não-estruturada.....</i>	30
2.4.2	Método dos volumes finitos.....	31
2.5	ESTADO DA ARTE.....	32
2.5.1	Fluidodinâmica computacional aplicada à alimentos.....	32
2.5.2	Aplicação de ultrassom como pré-tratamento em alimentos.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	MATÉRIA-PRIMA.....	40
3.2	PRÉ-TRATAMENTO ULTRASSÔNICO.....	41
3.3	CINÉTICA DE SECAGEM, MODELAGEM MATEMÁTICA E EMPÍRICA E ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	41
3.4	SIMULAÇÃO VIA CFD.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1	MODELAGEM DO SECADOR.....	48
4.2	CINÉTICA DE SECAGEM.....	49
4.3	MODELAGEM EMPÍRICA DA CINÉTICA EXPERIMENTAL.....	52
4.4	TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM TERMOS DA (D_{ef}).....	55
4.5	TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM TERMOS DE PERDA DE ÁGUA (PA) E GANHO DE SÓLIDOS (GS).....	57

4.6	SIMULAÇÃO VIA CFD DO PERFIL DE TEMPERATURA EM UMA FATIA DE MELÃO.....	58
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	61
5.1	CONCLUSÕES.....	61
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DO MODELO DT EM CADA CONDIÇÃO ESTUDA DE TEMPERATURA (70, 60 E 50°C)	70

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a olericultura assume um papel de grande importância no cenário social e econômico, uma vez que o setor provê alimentos, gera empregos e, conseqüentemente, renda (GOMES *et al.*, 2016). Dentre as olerícolas cultivadas no país, destaca-se o meloeiro (*Cucumis melo*), que é uma cucurbitácea de clima tropical (DALASTRA *et al.*, 2016).

Por conceber um dos maiores crescimentos em exportação, o melão possui ampla importância econômica para o Brasil. Na última safra, 250 mil toneladas foram exportadas, movimentando US\$ 210 milhões, o que faz dessa hortaliça frutícola a mais exportada em volume pelo Brasil (CARVALHO, 2017a, 2017b). Na Região semiárida do Nordeste Brasileiro, essa importância é ainda mais evidenciada, já que nela se concentra o maior percentual de produção doméstica e, portanto, é responsável pela geração de muitos empregos (AROCHA *et al.*, 2016; DALASTRA *et al.*, 2016).

Devido à sua importância econômica e fragilidade com relação à preservação *in natura*, estudar e avaliar processos de conservação para garantir estabilidade dessa olerícola até sua utilização para consumo, torna-se imprescindível do ponto de vista econômico e da segurança alimentar. A secagem é um dos mais tradicionais processos de conservação de alimentos sendo largamente utilizada por reduzir o teor de água, conseqüentemente a atividade de água, inibindo ou reduzindo o crescimento microbiano e reações enzimáticas, aumentando o tempo de conservação sem o auxílio de aditivos (VILELA; ARTUR, 2008; CÂRLESCU *et al.*, 2017).

A remoção de água durante a secagem convectiva envolve transferência simultânea de calor e massa entre o alimento e o meio externo. Avaliar os fenômenos intrínsecos à secagem, utilizando modelos baseados na Teoria da Difusão Líquida pode acarretar num distanciamento entre os resultados simulados e experimentais, uma vez que esta não leva em consideração o efeito da capilaridade e desconsidera ao mesmo tempo os efeitos de transporte de calor e massa de um corpo para o meio externo, além de assumir que os meios entram em equilíbrio térmico com o ar de forma instantânea (PIAIA, 2009).

Estudos atuais apresentam dificuldades quanto aos mecanismos relacionados com o calor convectivo e troca de massa do fluido turbulento através da camada limite durante um processo de secagem. Devido a isto, a distribuição de umidade, qualidade dos alimentos e as conseqüências de condições operacionais mais complexas na cinética de secagem acabam, por vezes, inexplorada. Sendo assim, uma melhor compreensão dos fenômenos físicos, com auxílio de ferramentas preditivas acerca do processo de secagem de alimentos por convecção, é necessária na busca pela otimização destes (DEFRAEYE; RADU, 2017).

Baseado nos mecanismos de transporte considerados durante a secagem, os modelos podem ser divididos em dois grandes grupos: no primeiro, a difusão é considerada, bem como a convecção pelo fluxo de Darcy, que explica o fluxo de água e considera o efeito da capilaridade. No segundo, o transporte de água no produto é dado pela lei de Fick, considerando o coeficiente de difusão efetiva (TZEMPELIKOS *et al.*, 2015).

Dada a dificuldade de controlar experimentalmente alguns parâmetros do processo de secagem, a modelagem torna-se uma ferramenta muito conveniente e importante, contribuindo para a compreensão dos fenômenos de transporte de calor e massa (DARABI *et al.*, 2015).

A simulação numérica que vem sendo amplamente aplicada é a fluidodinâmica computacional, CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*), que é uma técnica de resolução numérica para as equações de fenômenos de transporte baseadas nos princípios de conservação da massa, energia e movimento, sendo capaz de resolver equações não-lineares. Essa técnica vem sendo aplicada na indústria de alimentos para tentar resolver problemas de engenharia, em processos como esterilização, refrigeração e secagem (PIAIA, 2009; AUGUSTO; PINHEIRO; CRISTIANINI, 2011).

1.1 OBJETIVO GERAL

Considerando a importância do processo de secagem como um método de conservação dos alimentos, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar, experimentalmente, diferentes sistemas de secagem do melão, com e sem aplicação de ultrassom como pré-tratamento, quanto à transferência de calor e massa, simulando numericamente a transferência de calor empregando a fluidodinâmica computacional (CFD).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, buscou-se:

- Estudar a cinética de secagem do melão em diferentes condições de secagem, analisando o efeito da aplicação do pré-tratamento ultrassônico;
- Determinar o coeficiente de difusividade em todas as condições experimentais;
- Analisar os efeitos em utilizar ultrassom como pré-tratamento da secagem convectiva sobre os modelos propostos;
- Modelar os perfis de temperatura durante a secagem da fatia de melão via CFD.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O entendimento a fundo dos principais elementos quanto às características morfológicas e comerciais do melão, assim como as definições e conceitos acerca do processo de secagem deste, é de fundamental importância para contemplação dos objetivos desse trabalho.

2.1 O MELÃO: CARACTERÍSTICAS E IMPORTÂNCIA COMERCIAL

As cucurbitáceas consistem em cerca de 1/5 de todos os vegetais vendidos no Brasil. Espécie da família das cucurbitáceas e de clima tropical, o melão (*Cucumis melo* L.) é uma olerícola oriunda do Irã e Noroeste da Índia (DALASTRA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2016).

De acordo com os descritores morfológicos publicados no D.O.U pelo MAPA, as olerícolas com maior importância socioeconômica no Brasil são: abóbora (*Cucurbita* spp.), alface (*Lactuca sativa*), alho (*Allium sativum*), cebola (*Allium cepa*), cenoura (*Dacus carota*), ervilha (*Pisum sativum*), estévia (*Stevia rebaudiana*), melancia (*Citrullus lanatus*), melão (*Cucumis melo*), morango (*Fragaria* spp.), pimentão/pimenta (*Capsicum* spp.), quiabo (*Abelmoschus esculentus*) e tomate (*Solanum lycopersicum*) (GOMES *et al.*, 2016). Dentre estas, a que mais se destaca quanto à exportação é o melão, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Exportações da olericultura Brasileira em 2016.

Produto	kg
Melão	224.688.423
Melancia	67.437.489
Mandioca	48.991.014
Cebola	21.818.839
Batata-doce	20.236.729
Milho-doce	13.268.264
Cenoura	12.126.200
Tomate	9.999.931
Ervilha	6.057.117
Cascas	4.780.435
Condimentos/Temperos	3.028.000
Batata-inglesa	2.679.725
Sementes diversas	1.666.193
Beterraba	724.333
Mostarda	682.266
Outros	4.613.225
Total	442.798.183

Fonte: Carvalho (2017b).

Devido à sua importância econômica, o melão é uma cultura altamente relevante para o Brasil e, principalmente, para o Nordeste, tendo um valor comercial elevado tanto para o mercado interno quanto externo (CÂMARA *et al.*, 2007). Além da relevância econômica, há outro fator que faz do cultivo dessa olerícola algo expressivo, sua importância social. A cultura do melão traz grande geração de empregos de forma direta e indireta, uma vez que o manejo desta requer alta demanda de mão de obra (DALASTRA *et al.*, 2016).

Embora a cultura possa ser desenvolvida em qualquer parte do país, o meloeiro tem sua produção nacional concentrada na região semiárida do Nordeste Brasileiro, que abrange os estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia e Pernambuco (PELIZZA *et al.*, 2013). A região produz, de acordo com o Anuário Brasileiro de Fruticultura (CARVALHO, 2017a), cerca de 90% da produção Nacional de melão e aproximadamente de 87% da produção doméstica está concentrada nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, que produziram juntos aproximadamente 450 mil toneladas em 2016 (AROUCHA *et al.*, 2016; CARVALHO, 2017a).

O melão amarelo merece destaque e em 2015 foram exportadas aproximadamente 224 mil toneladas, o que movimentou cerca de US\$ 154 milhões. Já em 2016, a quantidade exportada foi bem próxima a 225 mil toneladas (um aumento de 0,42%), chegando a movimentar cerca de US\$ 149 milhões (uma queda de 3,6%) (AZEVEDO *et al.*, 2016; CARVALHO, 2017a). A redução em valor de exportação entre os anos de 2015 e 2016 estão provavelmente relacionados com a desvalorização do real frente ao dólar, além de flutuações dos preços de mercado da olerícola.

2.2 FRUTAS SECAS: UMA VISÃO SOBRE O MERCADO EXTERNO

Já ficou clara a importância da utilização sinérgica de outras tecnologias na melhoria de processos industriais, neste caso secagem. Entretanto, trazer melhorias a um setor não o torna totalmente viável; sendo assim, entender e compreender os mercados potenciais tornam-se um trabalho importante do ponto de vista da otimização de processos industriais. Nesta seção, buscou-se mostrar o potencial mercadológico, e pouco explorado por nosso país, das frutas secas num cenário internacional.

De acordo com o estudo realizado pelo Centro para a Promoção de Importações de países em desenvolvimento – CBI, órgão que pertence à *Netherlands Enterprise Agency* e é financiado pelo Ministério das Relações Exteriores (*Ministry of Foreign Affairs*) da Holanda, o mercado finlandês apresenta grande interesse em aumentar sua variedade de mercadorias. O mercado interno possui dezenas de produtos feitos com frutas secas, ou mix com nozes. Neste mercado, as frutas secas são relativamente desconhecidas como lanches rápidos ou como

ingrediente na preparação de outros alimentos, o que mostra sua potencialidade. As frutas secas estão inseridas numa categoria de produtos saudáveis, setor que tem apresentado crescimento substancial nos últimos anos em todo o mundo. O estudo ressalta o alto valor agregado dos produtos secos, a exemplo os liofilizados, e promove a utilização de tecnologias que reduzam o preço final do produto, tornando-o competitivo (CBI - MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS, 2013).

A ApexBrasil, Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos, realizou um estudo sobre as oportunidades comerciais para frutas brasileiras nos Estados Unidos da América, incluindo o setor de frutas secas. A agência, por meio de reuniões com importadores e distribuidores, relata o interesse destes em receber frutas secas. O estudo afirma que o mercado de *snacking* abre espaço tanto para frutas secas quanto castanhas e frisa que as empresas brasileiras de frutas deveriam se atentar a estas oportunidades e se prepararem para entrar nesse mercado, se equipando tecnologicamente (MACHADO; ALBUQUERQUE, 2014).

Outro estudo realizado pelo CBI, intitulado “*Exporting dried fruit to the United Kingdom*”, afirma que um dos maiores impulsionadores do consumo de frutas secas no Reino Unido, maior mercado desse produto no mundo, com mais de 11% do total das importações mundiais e 50% do total das importações europeias, é o fato de tais produtos não possuírem aditivos, serem naturais e apresentarem baixo teor de açúcar. O estudo apresenta ainda alguns produtos de forte tendência nesse mercado de frutas secas: ameixas, maçãs, frutas tropicais e as chamadas superfrutas. Em crescimento constante, o volume de importações para o Reino Unido tem oferecido muitas oportunidades, principalmente para fornecedores de países em desenvolvimento, representando uma ótima oportunidade para o Brasil. As importações somaram mais 440 milhões de euros em 2015 (CBI - MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS, 2016).

Sobre o mercado chinês, a Apex-Brasil descreve em sua investigação sobre a consciência da população chinesa em relação à saúde e o consumo de frutas de alta qualidade, que incluem as frescas. A China registrou em 2015 um consumo total de US\$ 1,7 bilhão em frutas secas. O estudo faz uma projeção do consumo de frutas secas, que se mantém crescente numa previsão que se estende até 2019, atingindo um valor em torno de US\$ 2 bilhões. Entretanto, revela-se que a China possui as principais empresas de frutas secas, representando uma barreira à entrada de empresas brasileiras, o que as força a investirem em tecnologias que reduzam os custos industriais, tornando seus preços mais competitivos (APEX-BRASIL, 2017).

Segundo o *Foreign Agricultural Service*, órgão do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a Polônia, com uma população de quase 40 milhões, é o maior mercado de alimentos e bebidas da Europa Central e Oriental, tendo cada vez mais interesse em obter ingredientes processados, como nozes, peixes e frutos do mar, frutas secas, saborizantes e aromatizantes, adoçantes, aditivos alimentares, entre outros produtos. De modo geral, o mercado polonês tem buscado ativamente insumos de alta qualidade para aplicação na indústria de alimentos processados (FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE - USDA, 2018).

Estes estudos, embora pontuais, são de mercados potenciais e representativos no ramo de frutas secas e demonstram o forte espaço comercial que pode ser conquistado pelos produtores de frutas brasileiros, que podem ganhar mercado investindo em tecnologias para tornar seus preços mais competitivos com a redução dos custos industriais.

2.3 SECAGEM

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de frutas; contudo, a perda de produtos *in natura* ainda é um dado preocupante, chegando a 50%. Esse alto índice de desperdício está relacionado com as perdas pós-colheita, provavelmente devido à ausência de tecnologias viáveis de conservação, além de problemas no transporte e armazenamento (LEITE *et al.*, 2015).

Sendo umas das técnicas de conservação de alimentos mais antiga, o processo de secagem oferece grandes vantagens quando comparada a outros métodos de conservação de longos períodos como, por exemplo, a refrigeração, esterilização ou tratamentos químicos, uma vez que ela demanda operações mais simples e de menor custo (FARIAS, 2016).

O princípio acerca do processo de secagem se faz pela remoção de umidade de um produto sólido através da evaporação ou sublimação (no caso da liofilização) da água livre presente, a partir do fornecimento de energia (seja na forma de calor ou trabalho). Dentre as técnicas de secagem, pode-se destacar a secagem por ar quente e seco, por liofilização, microondas e por condução (contato direto) (PIAIA, 2009).

A secagem de alimentos proporciona o desenvolvimento de novos produtos e ingredientes, além de agregar valor, facilitar a cadeia de transporte e ser eficaz na inibição ou inativação de microrganismos, melhorando assim a estabilidade produto durante o armazenamento (FARIAS, 2016).

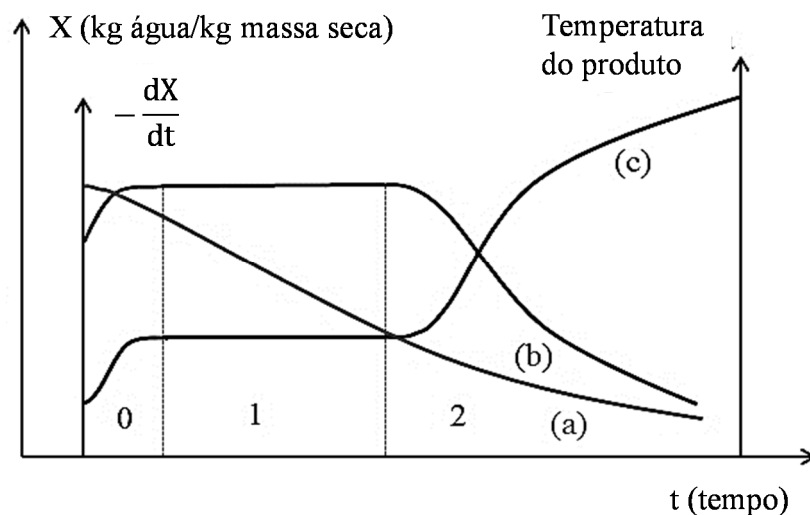
Sendo assim, considerando a importância e potencial da olericultura no Brasil, em especial o melão por sua representatividade econômica, o entendimento e melhoria de processos

e tecnologias de conservação de alimentos é essencial para garantir a qualidade, segurança alimentar e a agregar valor aos produtos brasileiros.

2.3.1 Cinética de secagem

As curvas oriundas da cinética de secagem podem ser divididas em períodos baseados em suas características quanto à taxa de secagem e transferência simultânea de calor e massa (Figura 1). No período 0, também denominado período de acomodação, o calor introduzido aumenta a temperatura e pressão de vapor da água (até que a transferência de calor e massa sejam equivalentes). O período 1 é caracterizado pelo transporte de água a uma taxa constante (transferência de calor e massa equivalentes), desde que as condições de fluxo de ar sejam fixas. Já no período 2, onde o transporte de água (transferência de massa) começa a ter mais resistência devido à formação de uma camada seca sobre a superfície do alimento, o processo de secagem ocorre mais lentamente, caracterizando uma taxa decrescente de secagem (AIRES, 2016; FARIAS, 2016).

Figura 1 - Curvas típicas de secagem. (a) evolução do teor de umidade; (b) taxa de secagem; (c) evolução da temperatura do produto.



Fonte: Aires (2016).

As curvas de secagem têm uma grande importância do ponto de vista de engenharia, tecnologia e inovação de processos, uma vez que possibilitam o desenvolvimento de tais processos, o dimensionamento de novos equipamentos, a realização de estimativas do tempo de secagem e os gastos energéticos (FARIAS, 2016).

O período de taxa decrescente é controlado pelo mecanismo de difusão líquida e descrito pela 2ª Lei de Fick. As soluções analíticas para a 2ª Lei de Fick, para diversas condições iniciais e diferentes formas geométricas, foram apresentadas por Crank (1975). Para coordenadas retangulares, a equação de difusão é a Equação 2.1.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

Sendo: X a umidade do produto, t o tempo e D_{ef} a difusividade efetiva da água.

Assumindo a forma geométrica de uma placa plana infinita, onde a transferência de umidade durante a secagem é predominantemente unidirecional, a equação acima se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

Quando o coeficiente de difusão D_{ef} é considerado constante, a umidade inicial X_0 é distribuída uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas à transferência de massa. A umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio X_e do produto. Considerando o encolhimento do material durante a secagem desprezível, a Equação (2.2) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Com as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$\begin{array}{lll} X = X_0 & t = 0 & (0 < y < L) \\ X = X_e & y = L & (t > 0) \\ \frac{\partial X}{\partial y} = 0 & y = 0 & (t > 0) \end{array}$$

A solução analítica da Lei de Fick para uma placa plana infinita dada por Crank (1975) é:

$$X_\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right) \quad (2.4)$$

Sendo: X_θ a umidade adimensionalizada, X_t a umidade média no tempo t (kg água/kg massa seca), X_e a umidade de equilíbrio (kg água/kg massa seca), X_0 a umidade inicial da amostra (kg água/kg massa seca), D_{ef} a difusividade efetiva ($m^2 \cdot s^{-1}$), t o tempo (s) e L a meia espessura (m). Soluções similares foram obtidas por Crank (1975) para cilindros infinitos e esferas, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos empíricos para evolução temporal da umidade de água em distintas geometrias.

Cilindro infinito	$X_\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp\left(-\frac{\mu_n^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right)$	(2.5)
Esfera	$X_\theta = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{R_p^2}\right)$	(2.6)

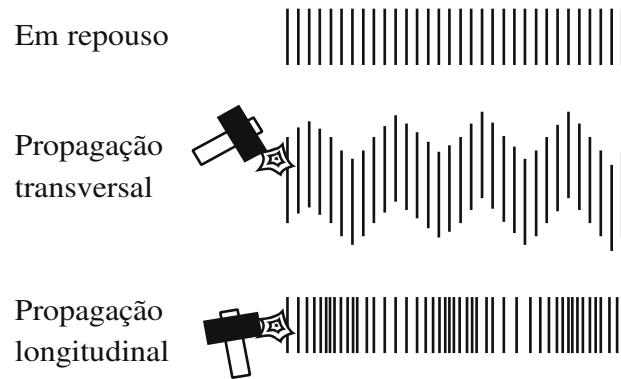
μ_n : Raiz da equação (cilindro infinito), R_p : Raio da partícula

2.3.2 Pré-tratamento ultrassônico

Dita como uma oscilação da matéria, as ondas sonoras se propagam de forma mecânica, ou seja, necessitam de um meio em contato para tal. As ondas sonoras possuem denominações diferentes a depender do tipo de material que estas se alastram, sendo denominadas “elásticas”, quando propagam-se em sólidos, e “acústicas”, quando em fluidos (MUSIELAK; MIERZWA; KROEHNKE, 2016).

A forma de transmissão destas ondas também varia, ou seja, quando elásticas ou acústicas. A primeira pode ser transferida como ondas transversais, que causam tensão de cisalhamento variável, ou longitudinais, que causam contração e dilatação intermitente. Já as ondas acústicas oferecem apenas um tipo de transmissão, a longitudinal (Figura 2). A frequência das ondas sonoras representa o número de oscilações desta por segundo. Por esta medida, as ondas sonoras podem ser divididas em 4 tipos: infrassom (1 Hz – 16 kHz), acústicas (16 – 20 kHz), ultrassom (20 kHz – 1 GHz) e híper sons (acima de 1 GHz). As ondas acústicas são as perceptíveis ao ouvido humano (MUSIELAK; MIERZWA; KROEHNKE, 2016; POWLES *et al.*, 2018).

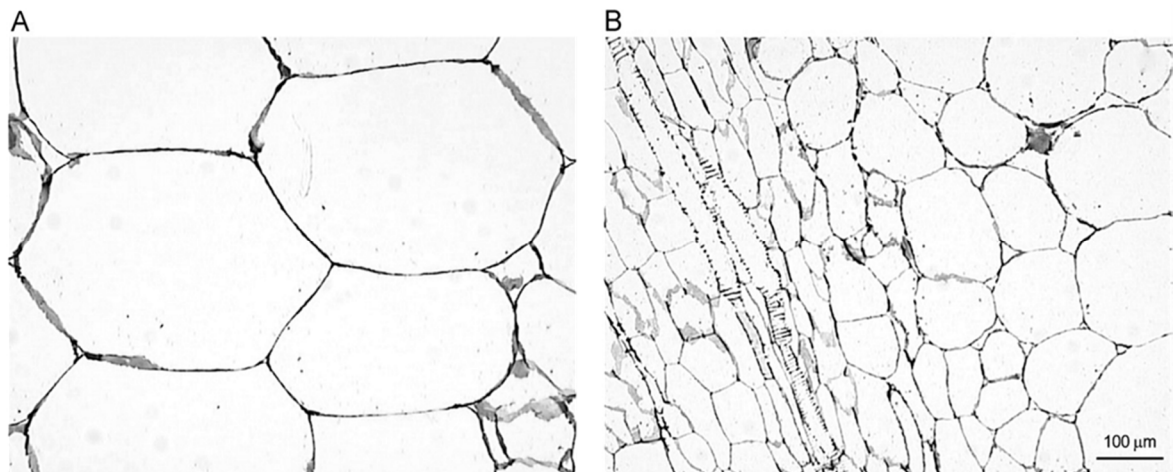
Figura 2 - Propagação das ondas sonoras.



Fonte: Adaptado de Powles *et al.* (2018).

As ondas produzidas por ultrassom causam compressões e expansões intermitentes sobre estrutura do vegetal (Figura 3.A). Esse efeito, conhecido como efeito “esponja”, envolve mecanismos mecânicos que podem superar a tensão superficial que mantém a água ligada dentro dos capilares da fruta e, devido a esse mecanismo, há a formação de microcanais (Figura 3.B) que podem se tornar canais preferenciais para o transporte de água do interior para o meio externo, facilitando a secagem (FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2008).

Figura 3 – Pré-tratamento ultrassônico aplicado à desidratação de melão. (A) região com células inchadas; (B) região com formação de microcanais.

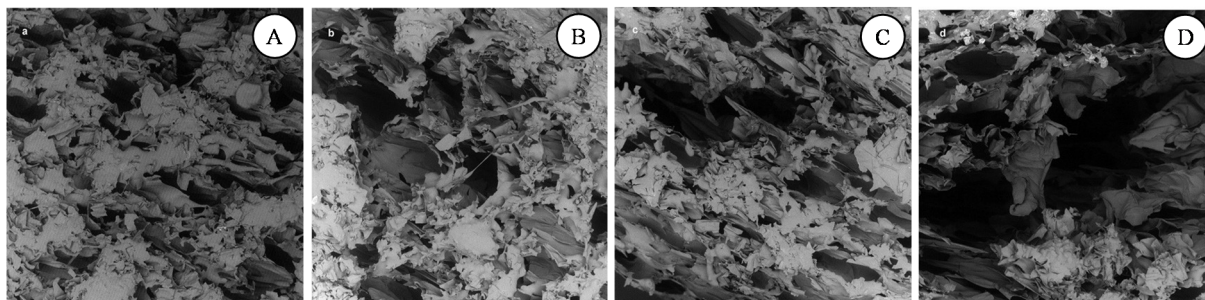


Fonte: Fernandes, Gallão e Rodrigues (2008).

Ainda é possível observar na literatura trabalhos que evidenciam o efeito da aplicação de ultrassom na microestrutura do produto. A exemplo, Nowacka *et al.* (2012) investigaram o efeito da aplicação de 10, 20 e 30 minutos de ultrassom em maçãs e mostraram o efeito desta

aplicação na estrutura da fruta (Figura 4). Nota-se que a maior exposição ao ultrassom causa uma reestruturação caótica da microestrutura, formando microcanais extracelulares.

Figura 4 - Imagem de microscopia eletrônica de maçãs tratadas com ultrassom comparando com o tratamento sem ultrassom (A), aplicando 10 (B), 20 (C) e 30 (D) minutos de exposição às ondas ultrassônicas.



Fonte: Nowacka *et al.* (2012).

Sendo o mecanismo principal causado pelo uso do ultrassom, a cavitação acústica domina os efeitos tensoativos num sistema líquido, ou seja, age na criação, disseminação e colapso repentino das bolhas presentes no material (EKEZIE; CHENG; SUN, 2018). Num alimento sólido, com alto teor de umidade, a taxa de transferência de massa (transporte de água) pode ser aumentada se, na fase líquida (água livre), a cavitação for causada, reduzindo o tempo de secagem (BAŞLAR *et al.*, 2016). Beck *et al.* (2014) investigaram o comportamento de um alimento sintético, composto por água, celulose, amido e frutose, frente à aplicação de diferentes condições no uso do pré-tratamento ultrassônico no ar, determinando a influência dos níveis de energia, umidade relativa, temperaturas de secagem e velocidade do fluxo de ar. Os autores concluíram que o tempo de secagem foi reduzido significativamente, além de conservar melhor as características sensoriais e nutricionais do alimento.

2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Com a concepção de computadores mais robustos e consequente desenvolvimento na área de modelagem e simulação de processos, os fenômenos de transporte puderam ser estudados de uma forma não antes abordada, surgindo assim uma área de estudo denominada Dinâmica de Fluidos Computacionais, Fluidodinâmica Computacional, ou CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) (PIAIA, 2009).

A fluidodinâmica computacional (CFD) pode ser definida como uma técnica numérica aplicada à resolução de problemas relacionados aos fenômenos de transporte numa dada geometria. Essa técnica simula e resolve numericamente as equações conservativas do

transporte de massa, calor e quantidade de movimento (Tabela 3), que se baseiam nos princípios de conservação da massa, energia e quantidade de movimento, por meio de modelos de discretização nos domínios do tempo e espaço baseados em tais princípios. A resolução destes problemas utilizando CFD proporciona a predição de perfis de concentração, velocidade e temperatura em diferentes regimes, inclusive em regime turbulento, dentre outras informações (PIAIA, 2009; AUGUSTO; PINHEIRO; CRISTIANINI, 2011).

Tabela 3 - Equações de Navier-Stokes para fenômenos de transporte em geometria cartesiana.

Conservação da massa (Lei da continuidade)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (2.7)$$

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

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial x} \tau_{zx} \right] + \rho g_x \quad (2.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left[\frac{\partial}{\partial y} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{zy} \right] + \rho g_y \quad (2.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right] + \rho g_z \quad (2.10)$$

Conservação da energia (Primeiro Princípio da Termodinâmica)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (2.11)$$

Fonte: Bird, Stewart e Lightfoot (2004).

O entendimento de um fenômeno físico se inicia com a determinação das variáveis que influenciam este fenômeno. Num processo de modelagem computacional, além de conhecer os fatores determinantes ante um fenômeno, se faz necessário utilizar a metodologia adequada para obter as soluções para o modelo. Dentre os métodos de discretização mais utilizados estão o Método dos Volumes Finitos (MVF), Método das Diferenças Finitas (MDF) e Método dos Elementos Finitos (MEF) (TU; YEOH; LIU, 2018a).

2.4.1. Geração da malha

Após a definição de uma geometria de domínio, a geração da malha é uma das principais etapas do pré-processamento, uma vez que, numericamente, a malha pode afetar os resultados,

já que a malha específica para o problema físico trará consequências à solução computacional. Em regiões de alta tensão de cisalhamento, gradientes elevados de temperatura, concentração e velocidade, pressupõem uma maior concentração de malha, pois trará melhor resolução aos resultados. A qualidade da malha tem consequências diretas na convergência da solução numérica, estabilidade e resultado computacional.

De acordo com Tu, Yeoh e Liu (2018b), uma malha consiste de um arranjo de um número discreto de pontos sobrepondo toda a geometria do domínio. Através da subdivisão deste domínio, um número menor de malha ou células de grade podem ser geradas.

De modo geral, espera-se que todo o domínio seja discretizado, ou seja, uma condição necessária para a resolução do problema físico de forma adequada e satisfatória, que captura todos os detalhes da região de fluxo. Devido às implicações da malha sobre os resultados, garantir atenção sobre a malha representar bem ou não o seu problema torna-se fundamental e, devido a esta importância, a geração de malha continua sendo uma área de pesquisa e desenvolvimento ativa (TU; YEOH; LIU, 2018b). Sendo assim, o tipo de malha a ser utilizada é de suma importância. As malhas podem ser divididas, de forma simplificada, em estruturadas e não-estruturadas.

2.4.1.1 Malha estruturada

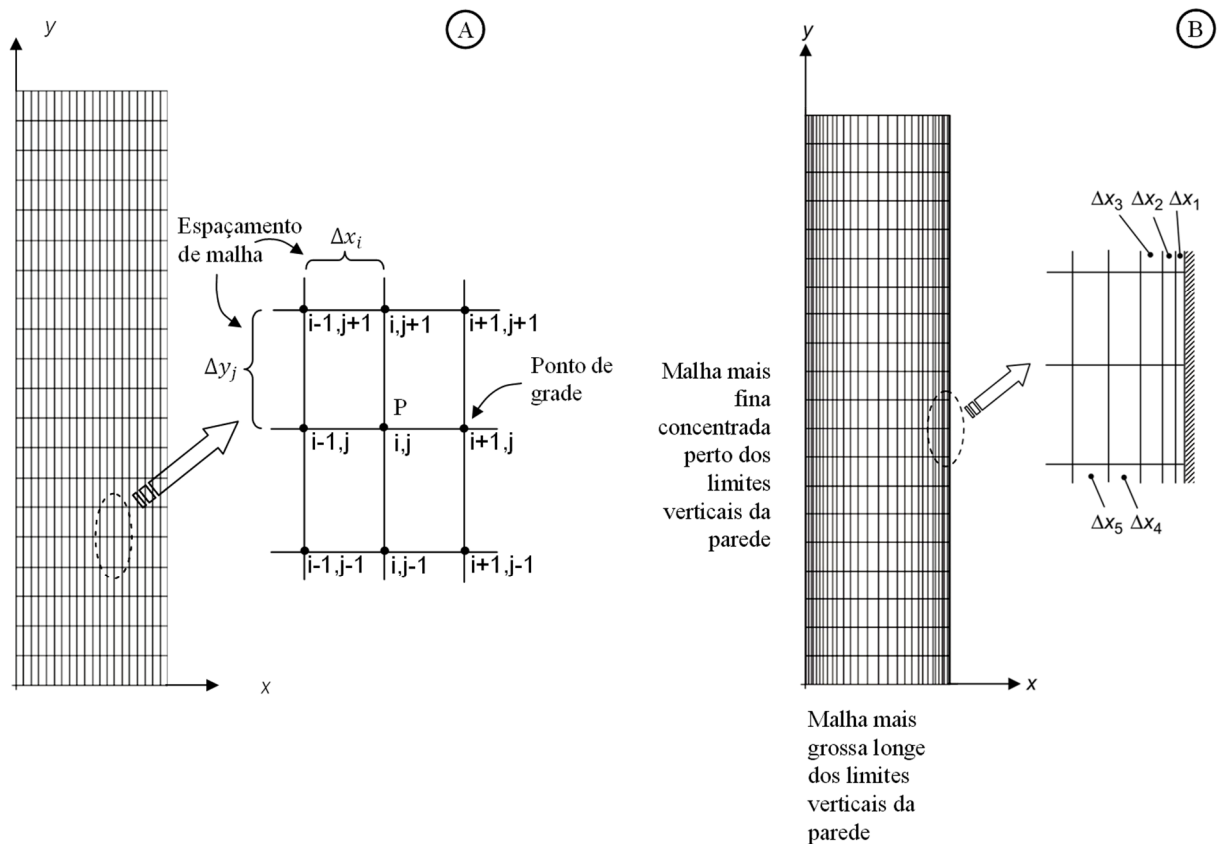
Dentre os tipos de malhas, a estruturada é a mais simples, uma vez que os pontos de malha gerados são uniformemente espaçados ao longo de toda malha gerada. Para ilustrar de forma didática a forma como esse tipo de malha é formada, considere um fluido escoando por meio de um conduto retangular (Figura 5.A), onde tem-se uma visão ampliada da malha discretizada no plano XY e pode-se verificar a distribuição dos pontos discretos de forma uniforme.

Neste caso, uma malha bidimensional, tomando como referência um ponto P (i, j) no espaço cartesiano discreto, o índice “ i ” e “ j ” conotam, respectivamente, a localização do ponto nos eixos x e y . Com essa visualização, e 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; YEOH; LIU, 2018b).

No caso de pontos de malha que possuem espaçamentos distintos de Δx_i ou Δy_j é possível gerar uma malha com espaçamentos desiguais em x ou y . A depender do problema, isto pode ser desejável, uma vez que pode-se optar por concentrações de malha maiores, em

regiões de maiores gradientes, 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; YEOH; LIU, 2018b).

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, Yeoh e Liu (2018b).

Considere um domínio fluido que escoia num segmento curvo de 90° . Neste caso, aplicar uma malha cartesiana estruturalmente organizada, como o exemplo da Figura 5, implica em tolerar algumas aproximações grosseiras, gerando um serrilhado nas partes curvas que se assemelham a escadas.

Tais limitações na representação do domínio discreto podem acarretar em erros nas soluções numéricas. Para melhorar a representatividade deste método num sistema curvilíneo, objetivando a redução dos erros, é necessário um refino de malha por vezes desnecessário e desproporcional ao problema, o que oferece maiores gastos computacionais de armazenamento e processamento. O que se pode discorrer, diante das ponderações até aqui feitas, é a

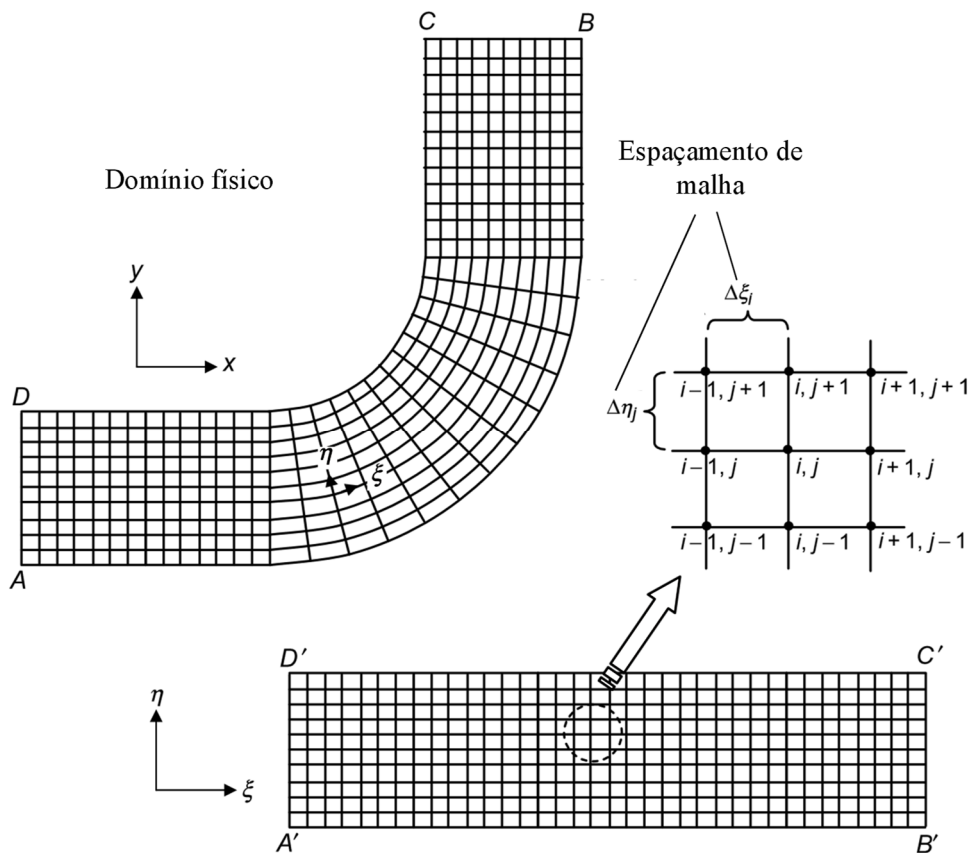
notoriedade da limitação em malhas cartesianas, uma vez que não lidam bem com a complexidade de geometrias que oferecem curvaturas (TU; YEOH; LIU, 2018b).

2.4.1.2 Malha Body-fitted

Diante disto, e sabendo as limitações da malha estruturada, a Malha Ajustada ao Corpo, do ingles *Body-fitted Mesh*, se torna uma alternativa viável para o exemplo apresentado anteriormente.

Aplicar este tipo de malha 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 $x = x(\xi_i, \eta_j)$ e $y = y(\xi_i, \eta_j)$ no novo domínio computacional. Como se faz necessário resolver as equações do novo domínio criado pela geometria, as equações a serem resolvidas são expressas em “coordenadas curvilíneas”, em resumo, são transformadas de (x, y) para (ξ, η) (TU; YEOH; LIU, 2018b).

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



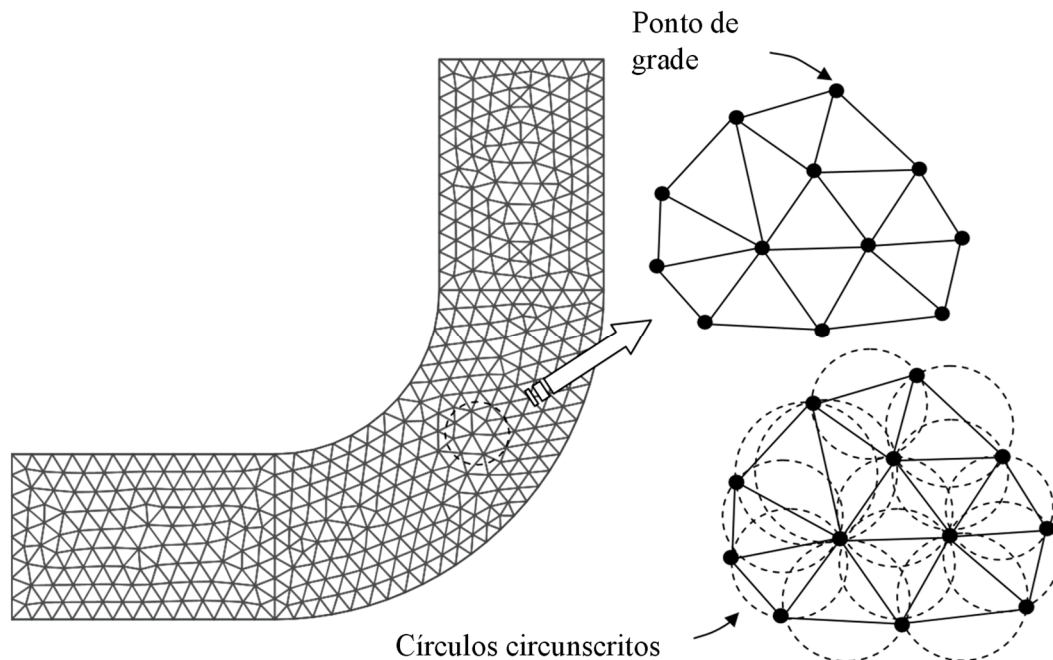
Fonte: Adaptado de Tu, Yeoh e Liu (2018b).

2.4.1.3 Malha não-estruturada

Seguindo ainda com 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.

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 mais 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; YEOH; LIU, 2018b).

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



Fonte: Modificado de Tu, Yeoh e Liu (2018a).

2.4.2 Método dos volumes finitos

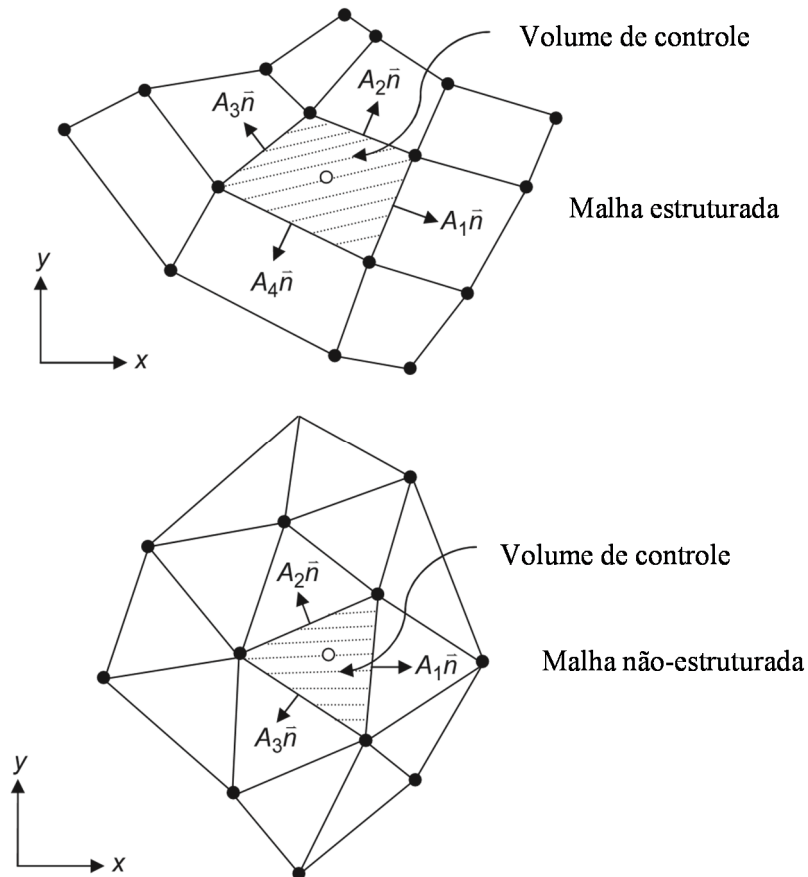
Em sua essência, o método dos volumes finitos resolve as equações de conservação no espaço físico discretizando sua forma integral. Neste método, o domínio é subdividido em uma quantidade finita de volumes de controle a partir da prerrogativa de que as propriedades relevantes são efetivamente conservadas. Em cada volume de controle, um centroide, onde se calcula os valores de cada variável de interesse, 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; YEOH; LIU, 2018c).

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 em malhas *Body-fitted* (TU; YEOH; LIU, 2018c).

De início, é necessário haver uma malha numérica para discretizar o domínio do fluxo e, como visto, o método dos volumes finitos (MVF) oferece maior flexibilidade, podendo ser usada uma malha estruturada ou não. Para tornar o método intuitivo, considere a representação da Figura 8, onde observa-se uma malha estruturada (quadrilateral) e não-estruturada (trilateral) no plano 2D feita para discretizarmos as equações diferenciais parciais (TU; YEOH; LIU, 2018c).

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 resolvidos 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; YEOH; LIU, 2018c).

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, Yeoh e Liu (2018b).

2.5 ESTADO DA ARTE

Esta sessão se destina a dar noção ao leitor de como está o estado da arte com relação a esta obra, exemplificando a atual situação do tema com trabalhos da literatura recente;

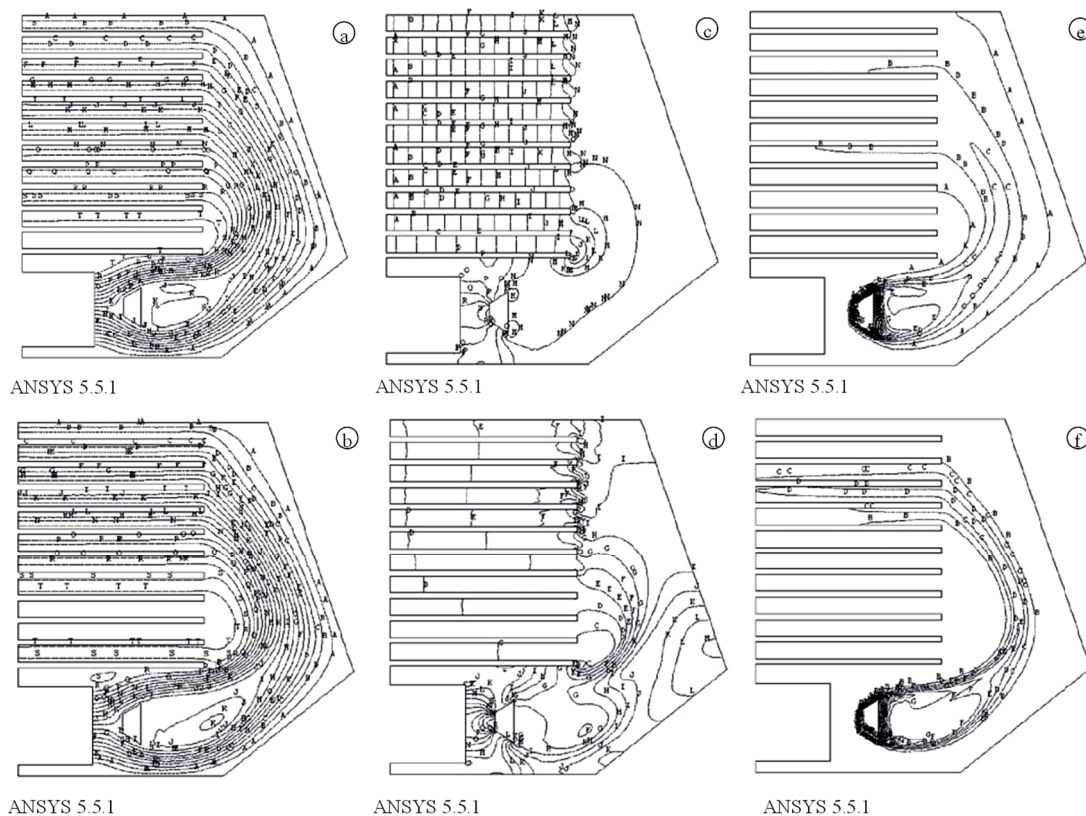
2.5.1 Fluidodinâmica computacional aplicada a alimentos

Há décadas, a fluidodinâmica computacional (CFD) vem sendo utilizada como uma ferramenta de análise de processos que envolvem os fenômenos de transporte (transferência de calor, massa e quantidade de movimento).

Em seu trabalho, Vilela e Artur (2008) apresentam uma análise sobre a cinética de secagem do açafão para diferentes condições de processo (323 K a 0,05 m/s e 316 K a 0,1 m/s). Para análise da cinética, os autores verificaram a influência da casca, do tipo de corte, da

temperatura e da velocidade do ar nos tempos de secagem. Para determinação das melhores condições operacionais para o processo, o pacote computacional da Ansys® CFD foi utilizado (Figura 9) para resolver as equações de Navier-Stokes e do balanço de energia. Para tal, os autores fizeram as seguintes considerações: regime permanente, simulação bidimensional no plano de simetria, propriedades constantes, escoamento incompressível, escoamento em plano de simetria e sem geração interna de calor. Os autores ressaltam que o uso da CFD foi importante para determinar as melhores condições quanto à velocidade e temperatura na superfície do produto.

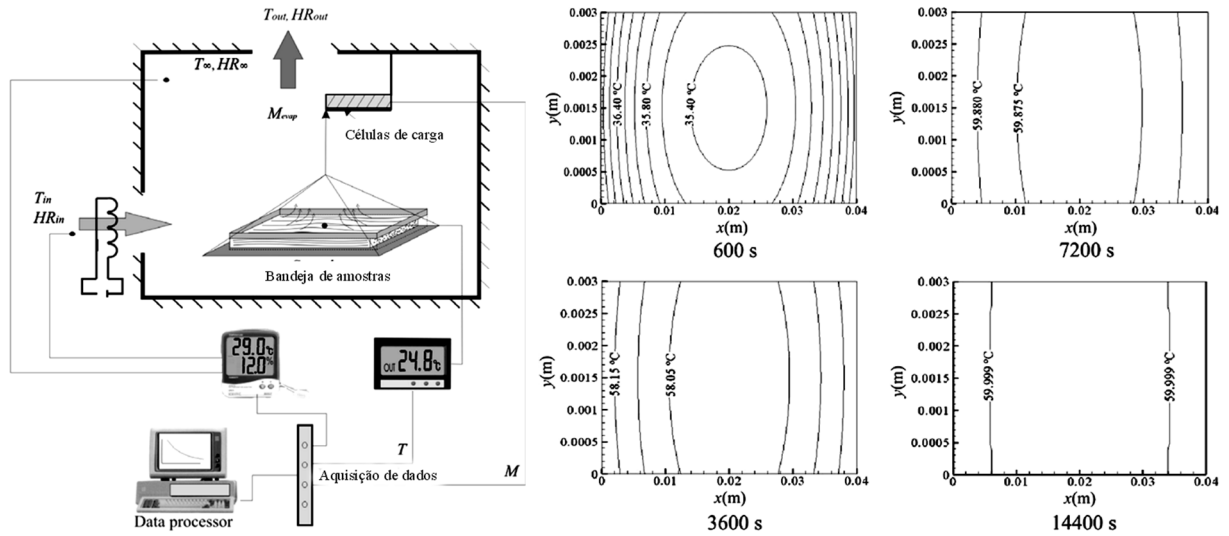
Figura 9 – Linhas de Corrente (“a” e “b”), isobáricas (“c” e “d”) e isotermas (“e” e “f”) para $U = 0,05$ m/s (superiores) e $U = 0,1$ m/s (inferiores).



Fonte: Vilela e Artur (2008).

Villa-Corrales *et al.* (2010) realizaram um estudo numérico em 2D e experimental sobre a cinética de secagem em fatias de manga Ataulfo, avaliando diferentes parâmetros, como diferentes espessuras, temperatura do ar de secagem e difusão da massa de água. O modelo matemático proposto pelos autores para calcular a distribuição de temperatura e umidade da fatia é baseado na Segunda Lei de Fick e Lei de Fourier e foi resolvido utilizando o método dos Volumes Finitos. O modelo encontrado descreveu satisfatoriamente os perfis de temperatura (Figura 10).

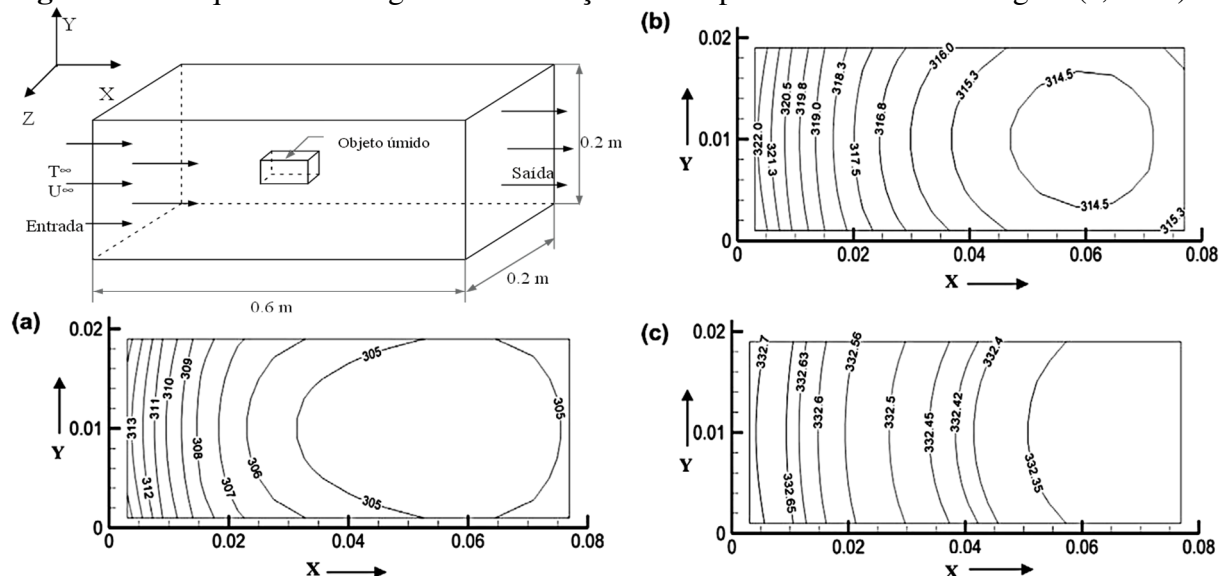
Figura 10 – Esquema de secagem (direita) e gráficos de distribuição de temperatura (esquerda) em diferentes tempos de secagem.



Fonte: Villa-Corrales *et al.* (2010).

Chandra Mohan e Talukdar (2010) investigaram numericamente o comportamento de um objeto úmido retangular durante uma secagem convectiva, resolvendo as equações de transferência de calor e massa para um modelo 3D. Os autores buscaram prever distribuição de temperatura (Figura 11) e massa para o processo de secagem por convecção. Os parâmetros necessários à solução numérica foram calculados via CFD, fazendo uma analogia entre a camada limite de temperatura e de concentração, e a resolução das equações discretas foi o método dos Volumes Finitos. Os resultados demonstraram que o modelo teve seu ajuste realizado de forma satisfatória.

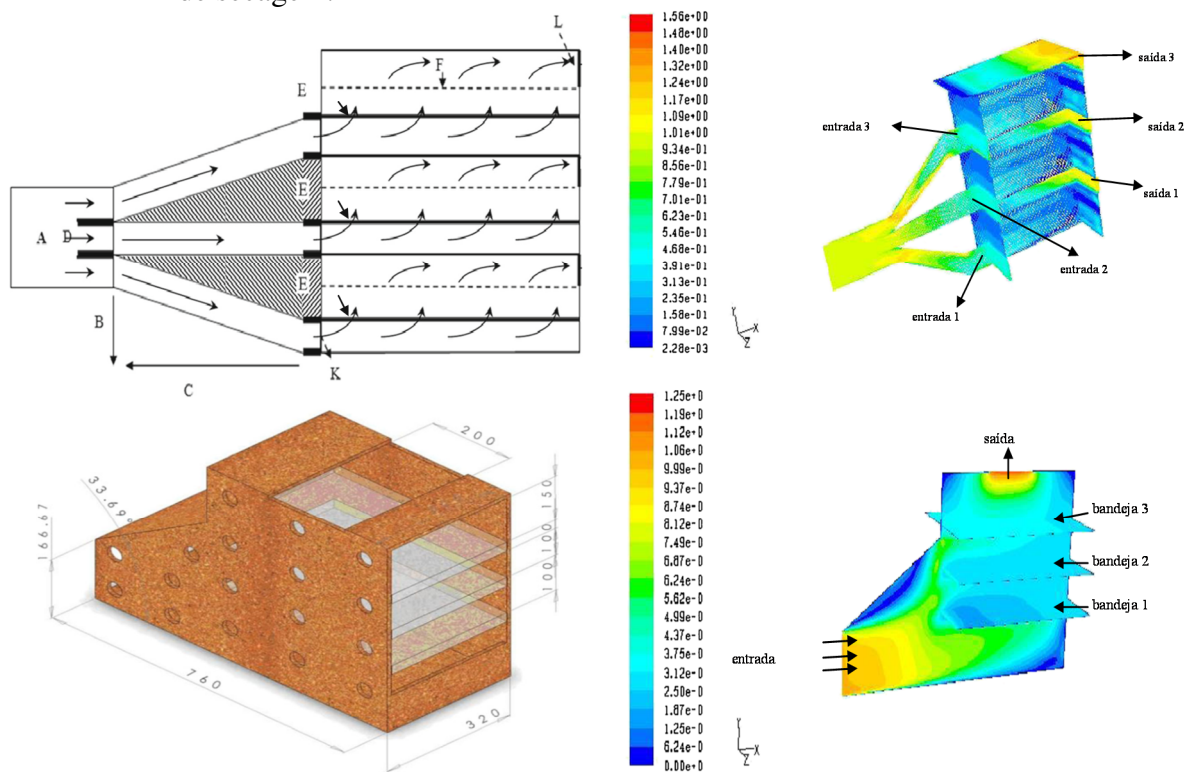
Figura 11 – Esquema de secagem e distribuição de temperatura durante a secagem (a, b e c).



Fonte: Chandra Mohan e Talukdar (2010).

Darabi *et al.* (2015) utilizaram a fluidodinâmica computacional para testar diferentes geometrias tridimensionais de um secador de gabinete com três bandejas, analisando em qual das conformações o fluxo de ar (Figura 12) e a distribuição de temperatura eram mais adequados para secagem de frutas, uma vez que esse tipo de secador pode ter como desvantagem a não uniformidade desejada para umidade do produto final. Os autores ressaltam o poder de análise CFD para sistemas de secagem. Os resultados calculados para queda de pressão das bandejas de frutas e da porosidade, utilizando o modelo $k - \epsilon$ padrão, se mostraram muito precisos. A introdução de uma rede de alumínio acima das bandejas provocou um efeito positivo na uniformização da velocidade do ar nas mesmas.

Figura 12 – Utilização da CFD para análise da velocidade do fluxo de ar em diferentes sistemas de secagem.

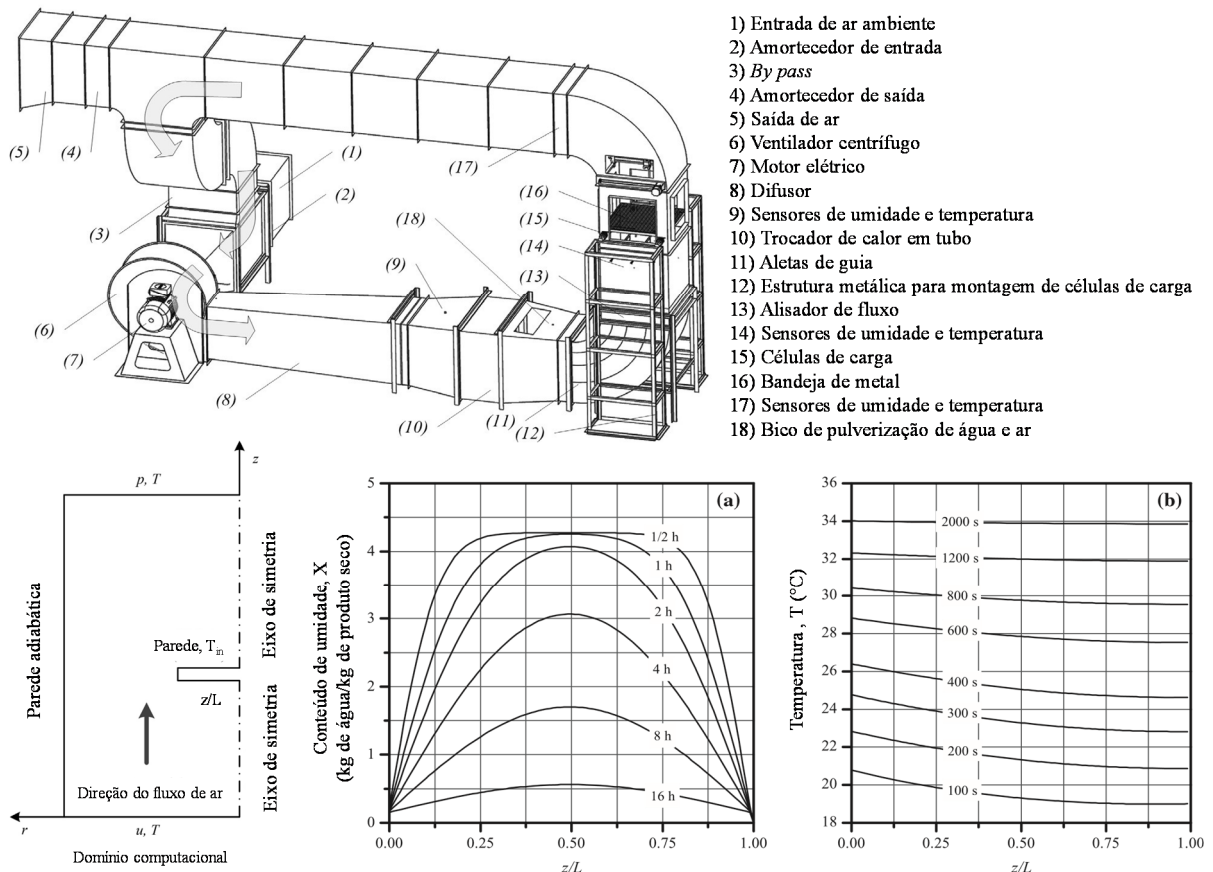


Fonte: Darabi *et al.* (2015)

Tzempelikos *et al.* (2015) desenvolveram um modelo numérico para transferência não estável de calor e massa durante a secagem convectiva de fatias cilíndricas de marmelo. Para determinação dos coeficientes necessários à modelagem, os autores utilizaram CFD a partir de cálculos que consideraram o fluxo turbulento ao redor das fatias. Os mecanismos mais complexos do transporte de água no produto foram substituídos pela difusão simples de Fick. Devido à esta ponderação, o modelo recebeu uma correção com um fator de 0,4. Os autores, ao compararem os dados adquiridos experimentalmente para variadas condições de temperatura e

fluxo de ar, afirmam que o modelo simplificado de Fick baseado em difusão é suficiente para descrever os efeitos da transferência de calor e massa com um mínimo de ajuste (Figura 13). Sendo assim, o modelo é considerado robusto, com um custo computacional trivial para computadores modernos e apropriado para prever um processo de secagem.

Figura 13 – Esquema de secagem, domínio computacional, gráficos de distribuição do conteúdo de umidade e temperatura dentro da fatia de marmelo.

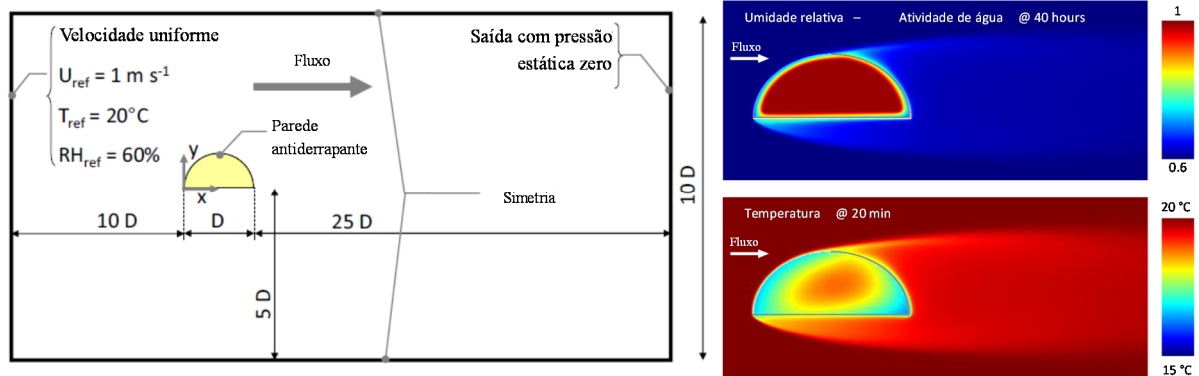


Fonte: Tzempelikos *et al.* (2015).

Defraeye e Radu (2017) buscaram uma melhor compreensão física quanto aos processos de secagem convectiva de frutas por meio da aplicação e análise de modelos conjugados para transferência de calor e massa, usando a modelagem para ter uma visão da relação entre a cinética de secagem e a troca convectiva, tanto de calor e massa, entre o produto e o meio externo (fluxo turbulento de ar). Ao realizar a modelagem, os autores verificaram a presença de coeficientes convectivos de transferência negativos, indicando pontos de reidratação. Também foi demonstrado que a modelagem isotérmica não deve ser considerada, até mesmo em condições próximas a este estado (por exemplo, baixas temperaturas). Além disso, verificou-se que a radiação térmica influencia visivelmente a taxa de secagem. Os autores concluem que o processo de modelagem, que usou a CFD (Figura 14) para resolver as equações de conservação,

ajuda a determinar a complexidade do processo, facilitando a ação e otimização por parte de tecnólogos da área de secagem na elaboração de seus modelos.

Figura 14 – Esquema de secagem e condições de contorno (esquerda) e gráficos da distribuição de umidade relativa expressa em termos da atividade de água e temperatura (direita).



Fonte: Defraeye e Radu (2017).

Wang e Yao (2017) ponderaram que os estudos publicados aplicavam fundamentalmente modelos baseados em difusão para descrever a cinética de secagem, que demandam cálculos complexos como a solução das equações diferenciais para determinação da função de difusividade. Observado isto, propuseram a aplicação da *Reaction Engineering Approach* (REA), que é uma escolha mais simples quando comparada com as abordagens complexas peculiares, podendo ser implementada de forma agrupada em CFD. Os autores validaram sua aplicação realizando a secagem de feijão de mungo e obtiveram bons ajustes aos modelos (R^2 superior a 0,991 e RMSE inferior a 0,003).

2.5.2 Aplicação de ultrassom como pré-tratamento em alimentos

A aplicação de ondas ultrassônicas na secagem de alimentos vem ganhando cada vez mais espaço, uma vez que a técnica oferece vantagens sinérgicas às tecnologias convencionais de secagem.

Dias da Silva *et al.* (2016) avaliaram em seu estudo o uso do ultrassom (US), desidratação osmótica (DO) e vácuo (VC) como pré-tratamento à secagem convectiva de melão, além de avaliarem seus efeitos sobre a qualidade do produto. De acordo com os autores, as amostras secas que utilizaram US e (US+VC) como pré-tratamento e obtiveram um aumento da taxa de secagem, ou seja, reduziram o tempo de secagem em 12,8% para ambos os tratamentos. Por fim, concluem que a aplicação das técnicas de pré-tratamento, tanto US quanto

US+VC, oferecem uma melhoria na eficiência da secagem, representando uma alternativa para à secagem convencional e aplicável em termos industriais

Tao *et al.* (2016) estudaram o efeito da aplicação de ondas ultrassônicas (US) como pré-tratamento (5 e 10 minutos de exposição) na cinética de secagem, transferência de massa e propriedade de qualidade (conteúdo fenólico e avaliação da atividade antioxidante, teor total de clorofilas, conteúdo de 1-desoxinojirimicina (DNJ), teor de ácido γ -aminobutírico (GABA), cor e consumo de energia) nas folhas de amoreira. Com relação ao efeito do US, este afetou o peso inicial das folhas após o procedimento e melhorou a cinética de secagem, uma vez que houve a redução do seu tempo (27,1%). De acordo com os autores, a aplicação de ultrassom ofereceu alta influência sobre a resistência à transferência de massa interna, de acordo com os números de Sherwood, concluindo que US é eficaz em reduzir o tempo de secagem sem prejuízo à qualidade final do produto.

Corrêa *et al.* (2017) afirmaram que o uso do ultrassom como processo pré-secagem representa um meio alternativo para melhorar a transferência de calor e massa. O estudo explorou a aplicação de ultrassom (20 e 40 minutos a 40 kHz) e/ou desidratação em solução osmótica (sacarose a 40%) na secagem em diferentes temperaturas (40°C e 70°C) de abacaxi. Os autores evidenciaram que o aumento da temperatura de secagem e a aplicação de ultrassom aceleraram de forma substancial o processo, reduzindo o tempo de secagem em 25 – 33%, explicando que isto deve ter ocorrido devido à redução da resistência interna e externa ao transporte de calor e massa.

Horuz, Jaafar e Maskan (2017) investigaram as implicações do uso do pré-tratamento ultrassônico na secagem e propriedades de qualidade (temperatura de transição vítrea, cor, textura, conteúdo de clorofila, ácido ascórbico e fenólicos totais) em fatias de tomate, que foram secas com ar (60°C) combinado com microondas. Os autores testaram 0, 20 e 40 minutos de ultrassom (US), variando também a potência (120, 150 e 180 W). Com relação ao tempo de secagem atingidos pelos ensaios tratados com ultrassom, os autores observaram que, numa mesma potência de microondas, ou seja redução causada apenas pelo US, o melhor tratamento obteve 7,38% (40 min US a 120 W) quando comparado com os ensaios sem aplicação de US.

Magalhães *et al.* (2017), que investigaram a aplicação de ultrassom como pré-tratamento, testaram o efeito desta aplicação na secagem convectiva convencional e assistida por ultrassom em cubos de maçã (*Malus domestica* L. var. *Royal Gala*). Os resultados obtidos por eles revelam que o uso da técnica combinada pode reduzir o tempo de secagem, atingindo até 58% de redução e 93% de aumento da difusividade efetiva em comparação com o tratamento de controle, demonstrando o benefício do uso dessa técnica.

Oladejo *et al.* (2017), aplicando ondas ultrassônicas como pré-tratamento em batata-doce durante 30 minutos, investigaram o efeito sobre o teor de umidade e absorção de óleo durante fritura, além de verificarem sua influência na transferência de massa. Os autores afirmam terem provado o bom desempenho do ultrassom no caso estudado, obtendo baixos teores de umidade e absorção de óleo durante a fritura da batata-doce.

Jin, Zhang e Shi (2018) estudaram o processo de secagem de fatias de melão amargo, (*Momordica charantia* L.) aplicando ultrassom como pré-tratamento a dois sistemas: secagem com ar quente (HAD) e assistida por radiofrequência (RFHAD). Eles constataram que, com relação à perda de água, o processo de pré-tratamento ultrassônico foi benéfico em ambos os tratamentos (HAD e RFHAD), uma vez que houve uma aceleração na perda de água, provando assim uma redução do tempo de secagem. Os autores classificam as técnicas como alternativas promissoras para o processamento de alimentos.

Cao *et al.* (2018) estudando secagem de grama de cevada, um alimento vegetal que auxilia a reabilitação de pacientes, analisaram, dentre outros fatores, a ação da aplicação de ondas ultrassônicas precedentes à secagem (10 minutos de exposição) sobre o tempo da mesma. Relatam uma redução de 14% em relação às amostras não tratadas, concluindo que, em relação à redução do tempo de secagem, a ultrassonicação é uma alternativa que garante melhor qualidade, sabor e menor consumo de energia dos processos.

Wang *et al.* (2018) investigaram o efeito do pré-tratamento com ultrassom de baixa frequência (LFU) na secagem por radiação infravermelha de onda intermediária (IW – IR) na migração de água em fatias de cenoura. Os autores afirmam que o uso do pré-tratamento com LFU causou uma quebra das estruturas celulares, tendo efeito significativo na microestrutura, migração de umidade, tempo de secagem e atributos de qualidade (cor, consumo de energia, temperatura de transição vítrea, atividade de água, teores de flavonóides e clorofila) de cenouras.

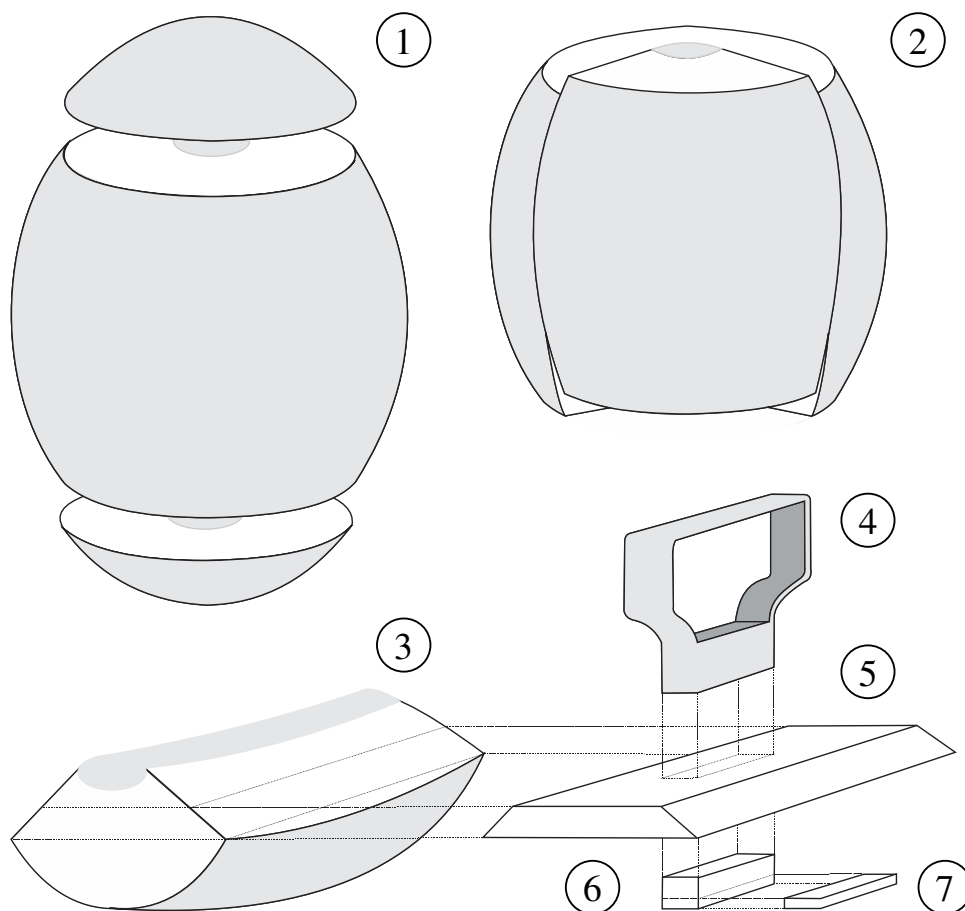
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição das metodologias utilizadas nesse trabalho foi feita de modo a reduzir as lacunas que poderiam surgir para o leitor, indo desde a demonstração de como foi realizado o corte até como a simulação e suas configurações foram realizadas.

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Foram utilizados melões maduros da variedade amarelo (*Cucumis melo* L.), adquiridos na mesma empresa (mesma época) em mercado local (Recife, PE). A matéria-prima, previamente selecionada, limpa e descascada manualmente, foi fatiada em retângulos (5,0 cm x 3,0 cm x 0,5 cm), como pode ser visto na Figura 15, utilizando-se uma faca de aço inoxidável e cortadores projetados para este fim, sendo submetidas ao processamento.

Figura 15 – Procedimento de Corte: remoção das cúpulas (1), divisão em três fatias (2), remoção da casca e da região mais amadurecida (3), molde de corte (4), prisma com base de trapézio isósceles (5), resultado do corte pelo molde (6), melão de formato retangular (7).



Fonte: O autor (2018).

3.2 PRÉ-TRATAMENTO ULTRASSÔNICO

As amostras de melão 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. O tempo de aplicação do ultrassom foi de 10, 20 e 30 minutos. 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). Os experimentos foram realizados em triplicata. Após os tempos pré-determinados, as amostras foram retiradas da água destilada, colocadas em papel absorvente durante 10 segundos para remoção do excesso de água em cada face maior (5,0 cm x 3,0 cm) e pesadas. Esta etapa foi avaliada em termos de perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS).

A PA (%) foi calculada pela Equação 3.1:

$$PA (\%) = 100 \frac{(E_0 - E_t)}{M_0} \quad (3.1)$$

Sendo: E_0 – conteúdo inicial de água no produto (g); E_t – conteúdo de água no produto no tempo t (g); M_0 – massa inicial do produto (g).

O GS (%) foi calculado através da Equação 3.2:

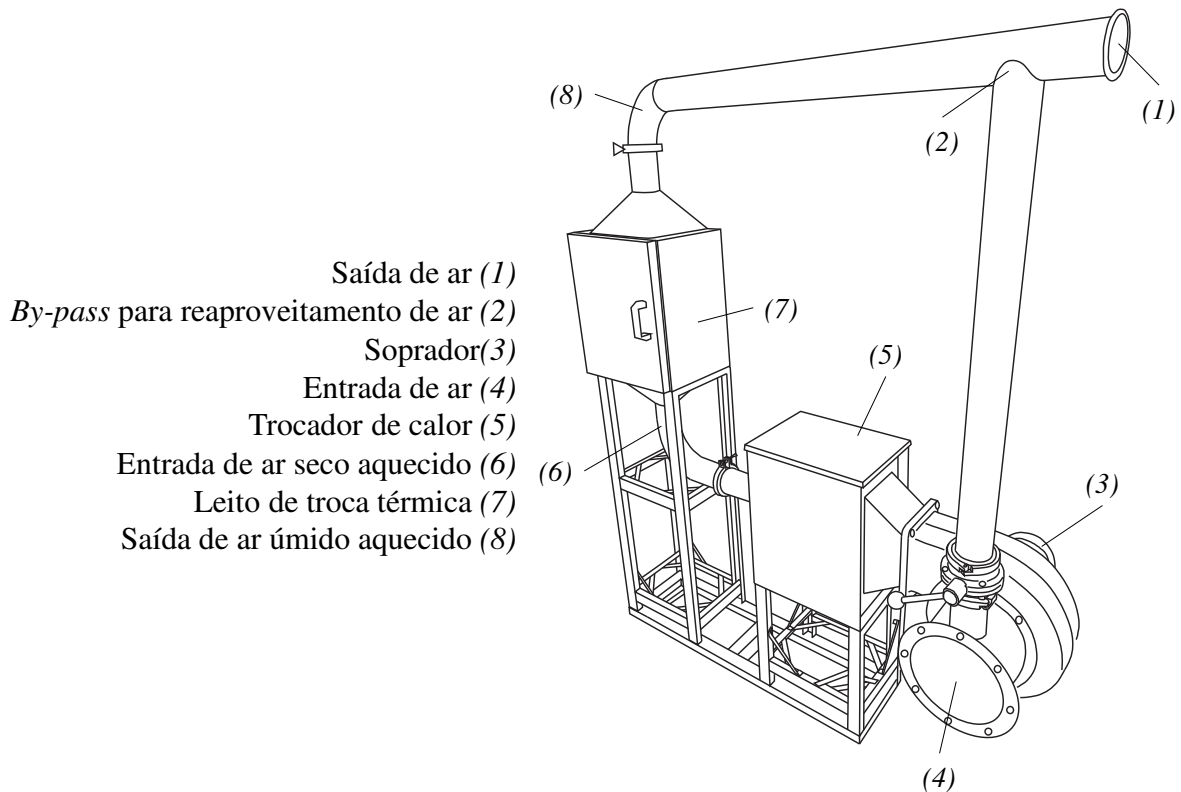
$$GS (\%) = 100 \frac{(m_{s_t} - m_{s_0})}{M_0} \quad (3.2)$$

Sendo: m_{s_0} – massa seca inicial (g); m_{s_t} – massa seca no tempo t (g); M_0 – massa inicial do produto (g).

3.3 CINÉTICA DE SECAGEM, MODELAGEM MATEMÁTICA E EMPÍRICA E ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

A secagem do melão com e sem pré-tratamento foi realizada nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C utilizando um secador de leito fixo (secador de bandejas), de aço inoxidável, com velocidade do ar de secagem fixa (2,0 m·s⁻¹). A faixa de temperatura estudada foi delimitada buscando evitar um tempo de secagem muito elevado (temperaturas abaixo de 50°C) e altas temperaturas, que causariam a perda de componentes nutricionais (temperaturas acima de 70°C), ou seja, por questões de viabilidade. O sistema de operação do secador consiste na passagem vertical de ar através de uma bandeja, com recirculação (*By-pass*), constituindo um circuito fechado (Figura 16).

Figura 16 – Secador de leito fixo.



Fonte: O autor (2018).

Como a bandeja onde a fatia de melão foi posta para secagem era feita por uma rede de fios finos de aço inoxidável, a mesma não foi representada no domínio discreto estudado durante a simulação, uma vez que o custo computacional atrelado ao refino de malha que isto causaria foi considerado demasiado. Além disto, os fios são muito finos, portanto, sua interferência no fluxo de ar foi desprezada.

A pesagem das amostras foi realizada através de uma balança semi-analítica. Os intervalos de tempo utilizados na pesagem foram a cada 15 minutos durante a primeira hora de processo e a cada 30 minutos até que a condição de equilíbrio fosse alcançada (SILVA *et al.*, 2016). Devido a limitações experimentais, um maior detalhamento dos primeiros 15 minutos da secagem não foi possível.

O estudo da cinética de secagem foi realizado a partir dos dados do adimensional de umidade e da taxa de secagem em função do tempo do processo. O modelo difusional (Equação 2.4) foi utilizado para obtenção da difusividade efetiva.

A dependência da difusividade com a temperatura durante o processo de secagem foi obtida através da energia de ativação (E_a), que calculada pela equação de Arrhenius (3.3).

$$D_{ef} = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.3)$$

Sendo: E_a a energia de ativação (kJ/mol), A a constante de secagem, R a constante universal dos gases ($8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e T a temperatura absoluta de secagem (K).

Esta equação apresenta-se como função linear relacionada com o logaritmo da difusividade e o inverso da temperatura. Para o cálculo do perfil de troca térmica durante o processo de secagem do melão, a condutividade térmica (k_p) e capacidade calorífica específica (C_p) foram estimadas, de acordo com a Tabela 4 (TZEMPELIKOS *et al.*, 2015).

Tabela 4 - Propriedades térmicas estimadas para simulação.

Propriedade	Equação	
Condutividade térmica (W/m·K)	$k_p(X) = 0,148 + 0,493X$	(3.4)
Capacidade calorífica específica (J/kg·K)	$C_p(X) = (1,26 + 2,97X)1000$	(3.5)

Para o ajuste aos dados experimentais de secagem, três modelos empíricos foram utilizados (Başlar, Kiliçli e Yalinkiliç, 2015). Estes modelos, que constam na Tabela 5, são amplamente utilizados na literatura de cinética de secagem.

Tabela 5 - Modelos empíricos utilizados para ajuste aos dados experimentais.

Nome do modelo	Equação	(Nº)
Dois termos (DT)	$X_\theta = a \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-wt)$	(3.6)
Henderson e Pabis (HP)	$X_\theta = a \exp(-kt)$	(3.7)
Page (Pg)	$X_\theta = \exp(-kt^n)$	(3.8)

a , k , w e n são parâmetros dos modelos a serem ajustados.

Os ajustes dos parâmetros do modelo foram realizados no *Software Statistica v.10.0* por meio do método de estimação 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 3.9.

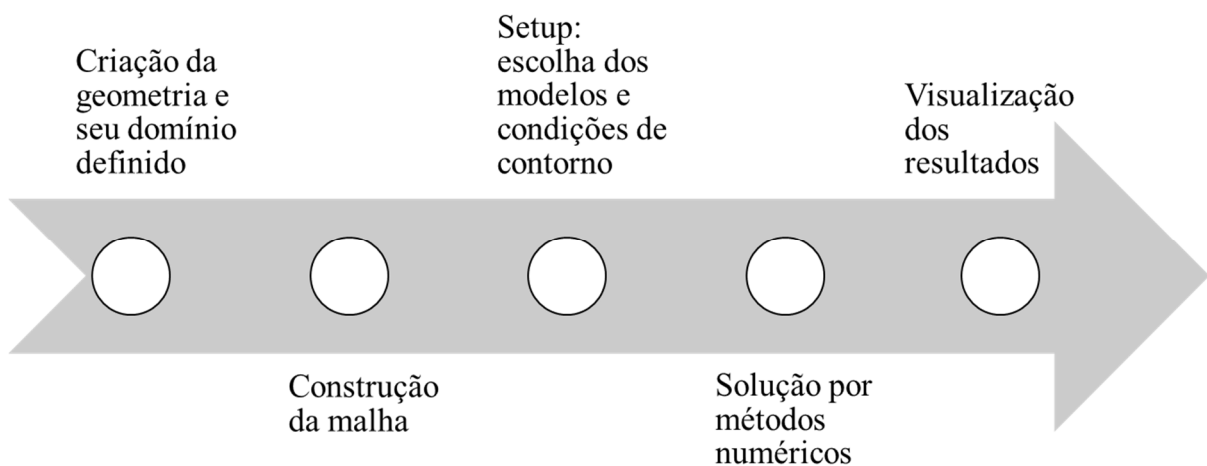
$$E (\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_O - V_P}{V_O} \right|_i 100 \quad (3.9)$$

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

3.4 SIMULAÇÃO VIA CFD

Basicamente, o processo de simulação via CFD pode ser dividido em 5 etapas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2009), conforme ilustrado na Figura 17. Por ser o solver mais utilizado, além da interface de *setup* ser mais simples e clara para adicionar as condições iniciais e de contorno, o CFX foi utilizado como *solver* neste estudo.

Figura 17 – Etapas do processamento via CFD.



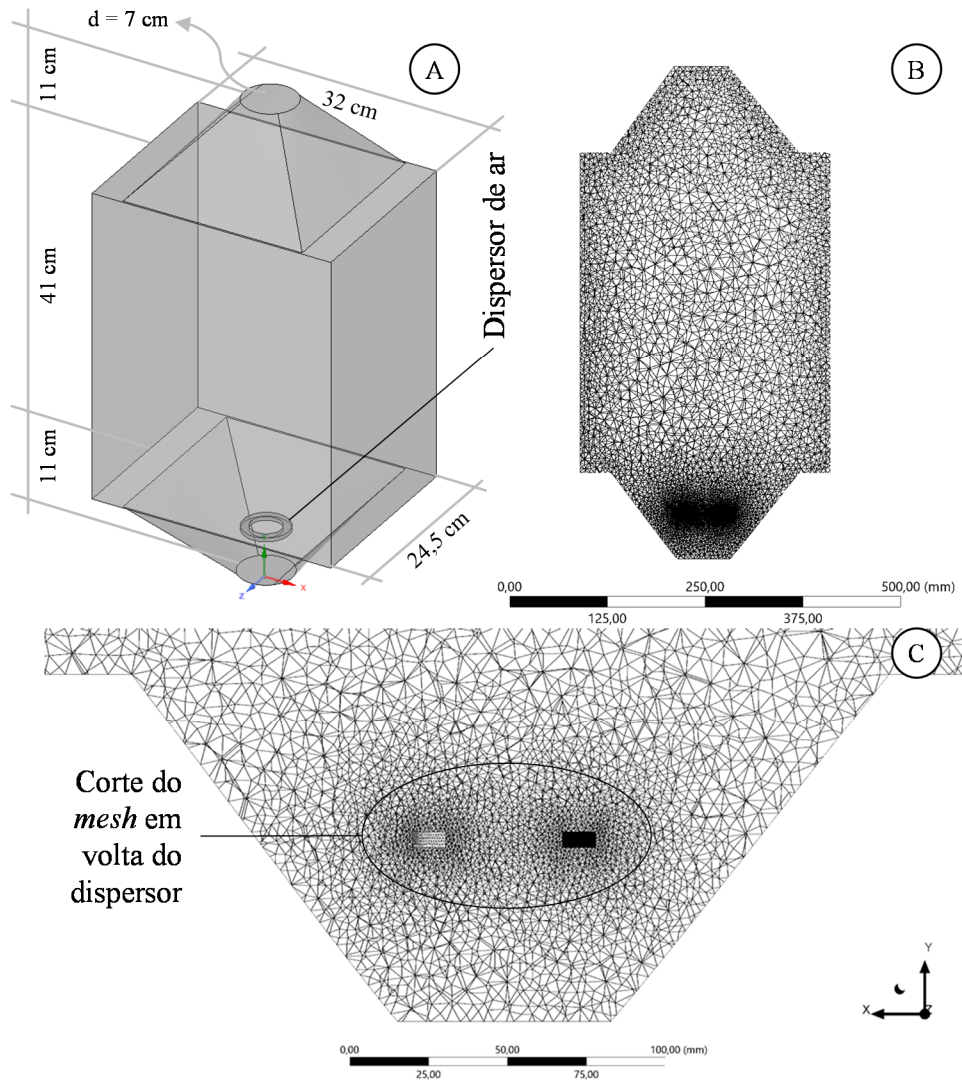
Fonte: Autor

Inicialmente, foi realizado um estudo fluidodinâmico no secador para estudar o perfil de distribuição de velocidade e, por consequência, o perfil de temperatura, de forma a observar a distribuição da temperatura dentro do secador (Esquema 1). A geometria e malha utilizadas são apresentadas na Figura 18 juntamente com as condições utilizadas para gerar a malha (Tabela 6). A geração da malha foi deixada sob controle do programa, que neste caso optou por uma geração de malha não-estruturada para todo o sistema, aumentando sua densidade de malha nas regiões de parede e tensão.

Tabela 6 – Parâmetros para criação do *Mesh* do secador (Esquema 1).

<i>Física preferencial</i>	CFD
<i>Solver preferencial</i>	CFX
<i>Relevance</i>	100
<i>Element Midside Nodes</i>	Dropped
<i>Size Function</i>	Proximity and Curvature
<i>Relevance Center</i>	Fine
<i>Número de nós</i>	452.273
<i>Número de elementos</i>	2.526.800

Figura 18 – Esquema 1: Geometria (A) do secador utilizada na simulação; Representação das regiões de densidade de malha no plano XY (B) e zoom da região inferior central da geometria (C) para detalhamento da densidade de geometria local. Caso: malha não-estruturada.



Fonte: O autor (2018).

Após a realização do estudo preliminar no secador, passou-se então dar o foco real para o processo de secagem do melão (Esquema 2). A geometria e malhas usadas podem ser visualizadas as Figuras 19 e 20. As opções utilizadas para geração da malha estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros para criação do *Mesh* para o sistema simplificado secador – melão (Esquema 2).

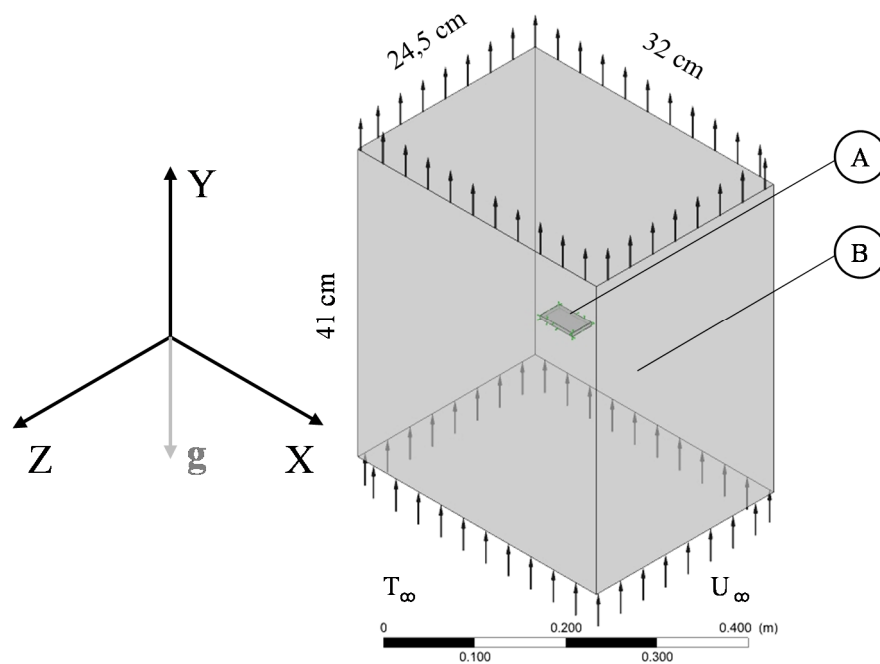
<i>Física preferencial</i>	CFD
<i>Solver preferencial</i>	CFX
<i>Relevance</i>	100
<i>Element Midside Nodes</i>	Dropped

Tabela 7 Continuação.

<i>Size Function</i>	Proximity and Curvature
<i>Relevance Center</i>	Fine
<i>Número de nós</i>	166.186
<i>Número de elementos</i>	877.812

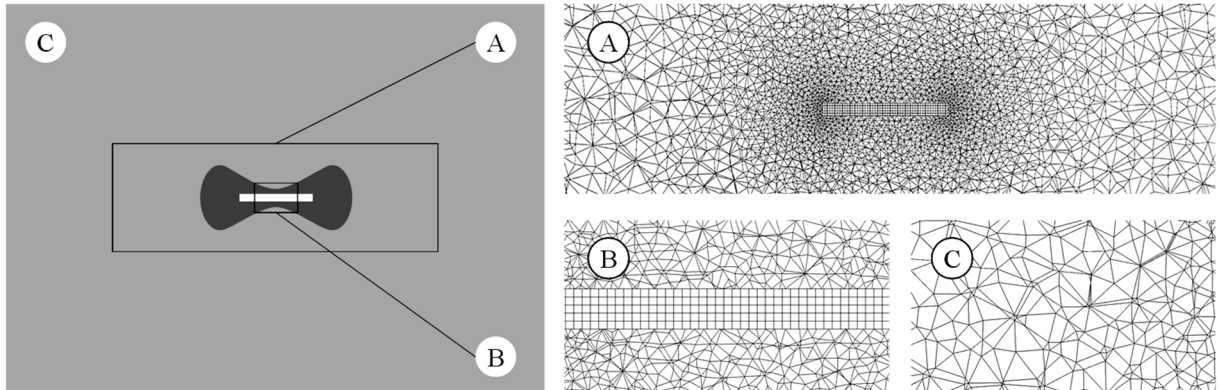
Por uma questão de simplificação de malha, e considerando que a posição do melão foi escolhida de acordo com o estudo fluidodinâmico realizado preliminarmente sobre o secador, a geometria foi simplificada, como pode ser observado comparando as Figuras 18 e 19. O posicionamento do melão está localizado no centro de gravidade do secador (espessura uniforme).

Figura 19 – Esquema 2: Representação geométrica do aparato utilizado para simulação. Fatia de melão (A) e corpo do secador simplificado (B).



Fonte: Autor.

Figura 20 – Representação das zonas de malha estruturada e não-estruturada utilizadas no plano XY; A – Zona não-estruturada mais densa no entorno do objeto de estudo (melão), B – Zona de malha estruturada utilizada no objeto de estudo e C – Zona de malha menos densa, representando o meio fluido externo (ar de secagem).



Fonte: O autor (2018).

Finalizada a geração da malha, o *setup* (Pré-CFX) foi realizado. As principais condições utilizadas na realização dos setups para o Esquema 1 e 2 são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Principais configurações realizadas no *setup*.

Configurações	Fronteira: Entrada		
	Esquema 1 (Transiente)	Esquema 2 (Estacionário)	
Regime de escoamento	Subsônico	Subsônico	
Transferência de calor	Temperatura estática	Temperatura estática	
Temperatura estática	333 K	355 K	
Massa e Momentum	Velocidade normal	Velocidade normal	
Velocidade normal	2,0 m·s ⁻¹	2,0 m·s ⁻¹	
Turbulência	Média intensidade e Razão de Viscosidade Eddy	Média intensidade e Razão de Viscosidade Eddy	
Fronteira: Ar-secador (Interface 1)			
Ar	Transferência de calor	Fluxo de interface conservativo	–
	Massa e Momentum	Sem parede de deslizamento	–
	Rugosidade da parede	Parede lisa	–
Fronteira: Saída			
Regime de escoamento	Subsônico	Subsônico	
Mass And Momentum	Pressão estática média	Pressão estática média	
Pressão relativa	0 Pa	0 Pa	
Fronteira: paredes			
Transferência de calor	Adiabática	Adiabática	
Mass And Momentum	Sem parede de deslizamento	Sem parede de deslizamento	
Rugosidade da parede	Parede lisa	Parede lisa	
Fronteira: Ar-melão (Interface 2)			
Melão	Transferência de calor	Fluxo de interface conservativo	–

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

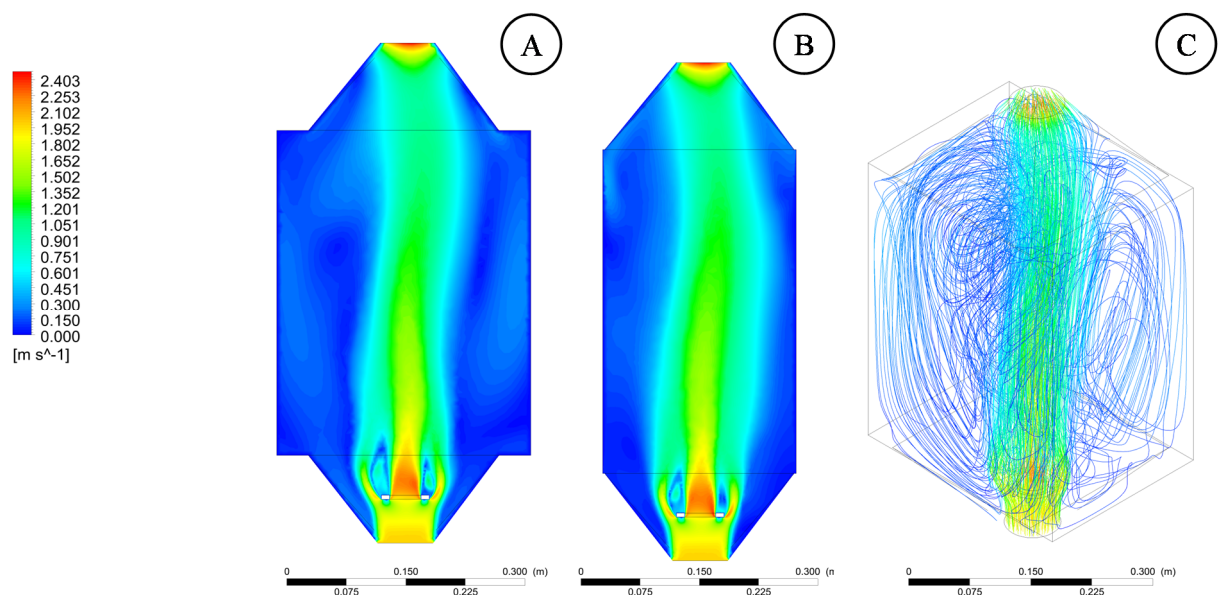
Nesta seção aborda-se os resultados encontrados desde a secagem até a simulação, buscando a compreensão dos fenômenos inerentes ao processo.

4.1 MODELAGEM DO SECADOR

Os resultados da simulação do secador quanto ao fluxo de ar e regiões de pressão podem ser vistos nas Figuras 21 e 22. Na Figura 21.C, é possível observar as linhas de corrente dentro do secador.

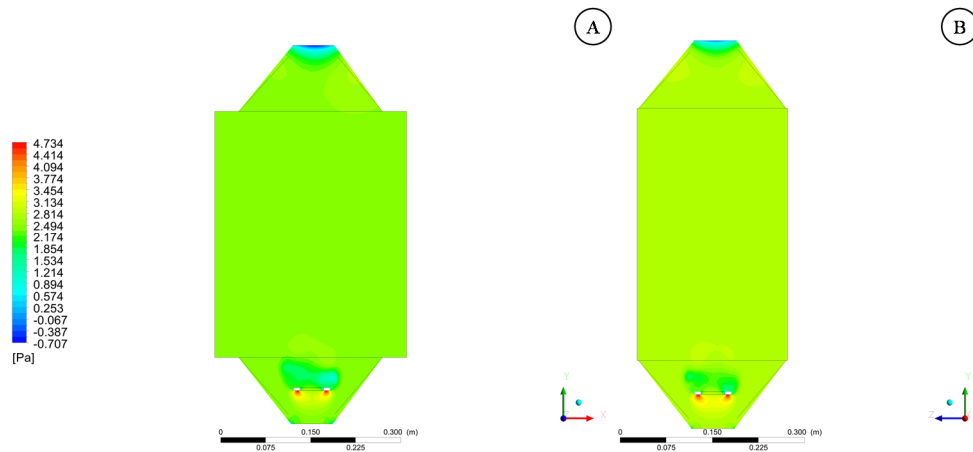
A tendência ondulatória mostrada na Figura 21 pode ser justificada com base no vórtice de von Kármán. A forma mais didática para entender o que ocorre neste tipo de vórtex é imaginar um cilindro circular se movendo em um fluido que inicialmente estava em repouso, o que causa a formação dos vórtices. Ao passar o cilindro, o fluxo bifurca, separando-o em duas correntes (ou fileiras) que se alternam conforme o cilindro avança, fazendo com que uma fileira gere vórtice no sentido horário e a outra no sentido anti-horário, formando ondulações conforme o cilindro avança sobre o fluido livre (KARMAN, 2004). Um efeito similar pode ser visualizado (Figura 21.A e B). Entretanto, a visualização perfeita do vórtice na Figura 21.A e B não é nítida, pois o fluido, neste caso o ar, não está se movendo livremente, uma vez que as entradas, saídas e paredes laterais limitam seu movimento propagatório, além de que este fenômeno é muito mais nítido em fluidos mais viscosos ou soluções coloidais (KARMAN, 2004; BOUSCASSE *et al.*, 2017).

Figura 21 – Perfil de velocidade nos planos XY (A) e YZ (B). Linhas de corrente dentro do secador (*streamlines*) (C).



É provável que a visualização do vórtice de von Kármán seja facilmente visível num cenário em que as dimensões do secador sejam suficientemente maiores ou que fosse feita uma diminuição das dimensões do dispersor de ar. Na Figura 21.A e B, observa-se uma redução da velocidade ao passo que há um afastamento em relação ao centro, variando de $\sim 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ em regiões de redução de pressão (Figura 22) até velocidades próximas de 0 na parede do secador.

Figura 22 - Zonas de pressão dentro do secador no plano XY (A) e YZ (B).

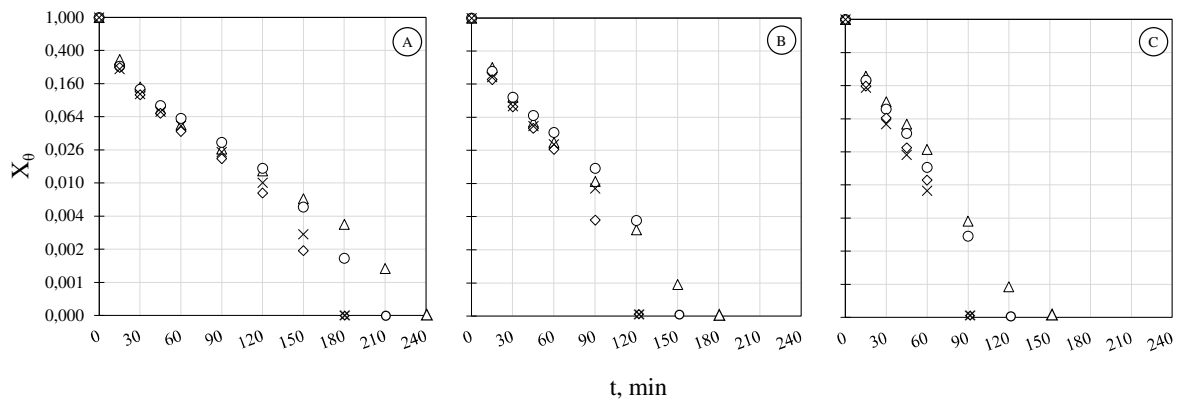


A Figura 22 torna possível o entendimento da Figura 21, que mostra as zonas de velocidade ao longo de secador. Pode-se observar que as regiões em torno do dispersor de ar do secador e próximo a saída do mesmo é turbulenta e, logo acima da zona turbulenta, se formou uma região de pressão reduzida devido à perda de carga oferecida pelo dispersor, justificando a queda na velocidade.

4.2 CINÉTICA DE SECAGEM

As cinéticas de secagem nas condições de temperatura testadas podem ser vistas na Figura 23. Para melhor visualização dos pontos finais da curva de secagem, pontos de interesse nesse estudo, o eixo Y (valores referentes a X_0) foi posto em escala logarítmica. Entretanto, é preciso ressaltar que, devido ao último ponto curva de cinética ser zero, quando expressa em termos da umidade adimensionalizada, o último ponto não pode ser mostrado nesta escala. Assim, o ponto final da curva vista na Figura 23 é o penúltimo ponto da cinética fora desta escala.

Figura 23 – Cinética de secagem a 50°C (A), 60°C (B) e 70°C (C) para os diferentes tratamentos: SU (Δ), US10 (\circ), US20 (\diamond), US30 (\times).



Observando a Figura 23.A, nota-se que o menor tempo até que a umidade de equilíbrio fosse atingida foi para os tratamentos US20 e US30 (180 min), seguido por US10 (210 min). Esses valores representam reduções de tempo expressivas quando comparados com o tratamento SU, que atingiu o equilíbrio após 240 min. Sendo assim, a redução foi de 25%, para US20 e US30, e 12,5% para US10 a 50°C.

Na Figura 23.B é possível ver que os tratamentos US20 e US30 atingem primeiramente a condição de equilíbrio (120 min) mais uma vez, seguidos pelo tratamento US10 (150 min). O tratamento SU necessitou de 180 minutos para que tal condição fosse atingida. As reduções de tempo, comparando os demais tratamentos com o tratamento SU, foram de 33,3%, para US20 e US30, e 16,6% para US10 a 60°C.

Por fim, pode-se observar na Figura 23.C que os tratamentos se comportaram de forma similar às cinéticas anteriores, sendo também os tratamentos US20 e US30 atingem primeiramente a condição de equilíbrio (120 min) mais uma vez, seguidos pelo tratamento US10 (150 min). O tratamento SU foi o mais demorado, necessitando de 180 minutos para que tal condição fosse atingida. As reduções de tempo, comparando os demais tratamentos com o tratamento SU, foram de 33,3%, para US20 e US30, e 16,6% para US10 a 70°C.

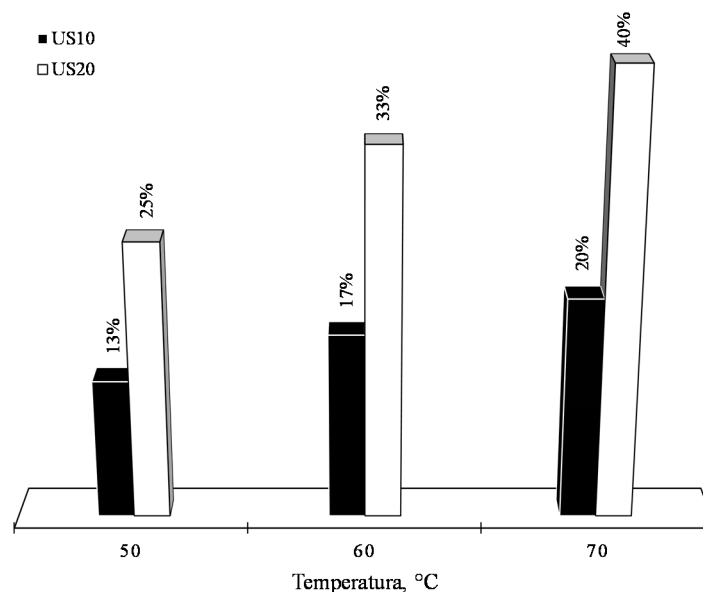
Resultados similares foram encontrados por Nowacka *et al.* (2012), que obtiveram reduções de 31 – 40% no tempo de secagem de maçãs utilizando 70°C, de 1,5 m·s⁻¹ e 35 kHz de frequência, aplicando 10, 20 e 30 minutos de ultrassom.

Já o trabalho realizado por Rodríguez *et al.* (2014), que também trabalharam com maçãs (var. Granny Smith), obteve resultados que diferem dos encontrados no presente estudo. Os autores, que utilizaram diferentes níveis de ultrassom a 30°C, 50°C e 70°C, obtiveram percentuais de redução de 8,7 – 17,4% (70°C/1,0 m·s⁻¹) e 37,0 – 53,8% (30°C/1,0 m·s⁻¹) no tempo de secagem. Magalhães *et al.* (2017), analisando o processo de secagem de cubos de

maça (var. Royal Gala), obtiveram uma redução no tempo de secagem 22% ($45^{\circ}\text{C}/2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e 17% ($60^{\circ}\text{C}/2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ao aplicarem 10 minutos de exposição ao ultrassom. Estes dois trabalhos levam a crer que a aplicação do ultrassom é mais substancial em temperaturas menores, uma vez que obteve maior redução do tempo de secagem, e que, ao elevar a temperatura, o percentual de redução já não é mais tão expressivo, o que conduz a acreditar que o efeito causado pelo aumento da temperatura se sobressaia frente ao efeito do ultrassom, tendo assim percentuais de redução menores a temperaturas maiores.

Contudo, este trabalho obteve resultados diferentes, uma vez que mostra que o aumento da exposição da amostra ao ultrassom juntamente com o aumento da temperatura resulta numa sinergia positiva, provocando maior redução do tempo de secagem (Figura 24). Na figura 24 não é mostrado o tratamento US30 pois este obteve o mesmo percentual de redução que US20.

Figura 24 - Percentual de redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura para os diferentes tratamentos.



Zhang *et al.* (2016), trabalhando na secagem de fatias de cogumelo, obtiveram uma redução no tempo de secagem de 16,6% aplicando 10 minutos de exposição ao ultrassom e efetuando uma secagem a $60^{\circ}\text{C}/0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Já o trabalho realizado por Tao *et al.* (2016), que estudaram a secagem de folhas de amoreira, atingiram 17,2% de redução no tempo de secagem ($60^{\circ}\text{C}/2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ao aplicar 10 minutos de pré-tratamento ultrassônico.

García-Pérez *et al.* (2015) estudaram uso do ultrassom para secagem e desidratação de alimentos, abordando tanto a aplicação do ultrassom por contato direto ou por meio do ar. Os autores relataram que o efeito do ultrassom sobre o tempo de secagem, bem como outros

parâmetros como a qualidade ou em termos dos fenômenos de transporte, varia conjuntamente de acordo com vários fatores, como temperatura, velocidade do ar, potência e frequência, além da matriz utilizada, podendo atingir até 70% de redução do tempo de secagem.

4.3 MODELAGEM EMPÍRICA DA CINÉTICA EXPERIMENTAL

Uma vez realizada a cinética, modelos empíricos puderam ser testados e seus parâmetros ajustados. Os parâmetros calculados para cada condição são expostos na Tabela 9, bem como os valores de R².

Tabela 9 - Parâmetros de ajuste dos modelos aos dados experimentais e os erros percentuais, E (%).

Tratamento	Parâmetros	Temperatura (°C)								
		50			60			70		
		DT	HP	Pg	DT	HP	Pg	DT	HP	Pg
SU	a	0,7353	0,9921	-	0,6638	0,9955	-	0,6086	0,9960	-
	k	0,1115	0,0695	0,1813	0,1500	0,0838	0,2178	0,2925	0,0952	0,3211
	n	-	-	0,6886	-	-	0,6781	-	-	0,5826
	w	0,0272	-	-	0,0395	-	-	0,0444	-	-
	R ²	0,9999	0,9963	0,9999	0,9999	0,9976	0,9999	0,9999	0,9964	0,9999
	E (%)	1,16	35,46	5,21	1,75	41,74	1,81	0,57	38,60	0,63
US10	a	0,7377	0,9910	-	0,7223	0,9947	-	0,6253	0,9976	-
	k	0,1505	0,0779	0,3212	0,1708	0,0885	0,3257	0,2808	0,1044	0,3297
	n	-	-	0,5319	-	-	0,5585	-	-	0,5989
	w	0,0242	-	-	0,0317	-	-	0,0498	-	-
	R ²	0,9999	0,9919	0,9999	0,9999	0,9951	0,9999	0,9999	0,9977	0,9999
	E (%)	0,56	43,29	1,16	0,40	46,83	1,79	1,46	40,76	3,96
US20	a	0,7367	0,9941	-	0,7092	0,9974	-	0,6335	0,9986	-
	k	0,1457	0,0829	0,2746	0,2245	0,1054	0,3840	0,3486	0,1167	0,3586
	n	-	-	0,5982	-	-	0,5490	-	-	0,6023
	w	0,0297	-	-	0,0409	-	-	0,0572	-	-
	R ²	0,9999	0,9955	0,9999	0,9999	0,9970	0,9999	0,9999	0,9986	0,9999
	E (%)	0,97	43,87	2,43	1,29	51,75	1,20	0,22	43,79	4,02
US30	a	0,7529	0,9936	-	0,7676	0,9971	-	0,6800	0,9991	-
	k	0,1550	0,0847	0,3309	0,1735	0,1010	0,3555	0,2339	0,1206	0,3333
	n	-	-	0,5422	-	-	0,5636	-	-	0,6382
	w	0,0266	-	-	0,0345	-	-	0,0589	-	-
	R ²	0,9999	0,9940	0,9999	0,9999	0,9970	0,9999	0,9999	0,9991	0,9999
	E (%)	0,72	45,75	1,43	2,31	58,16	29,34	0,60	43,49	3,14

DT – Dois termos; HP – Henderson e Pabis; Pg – Page.

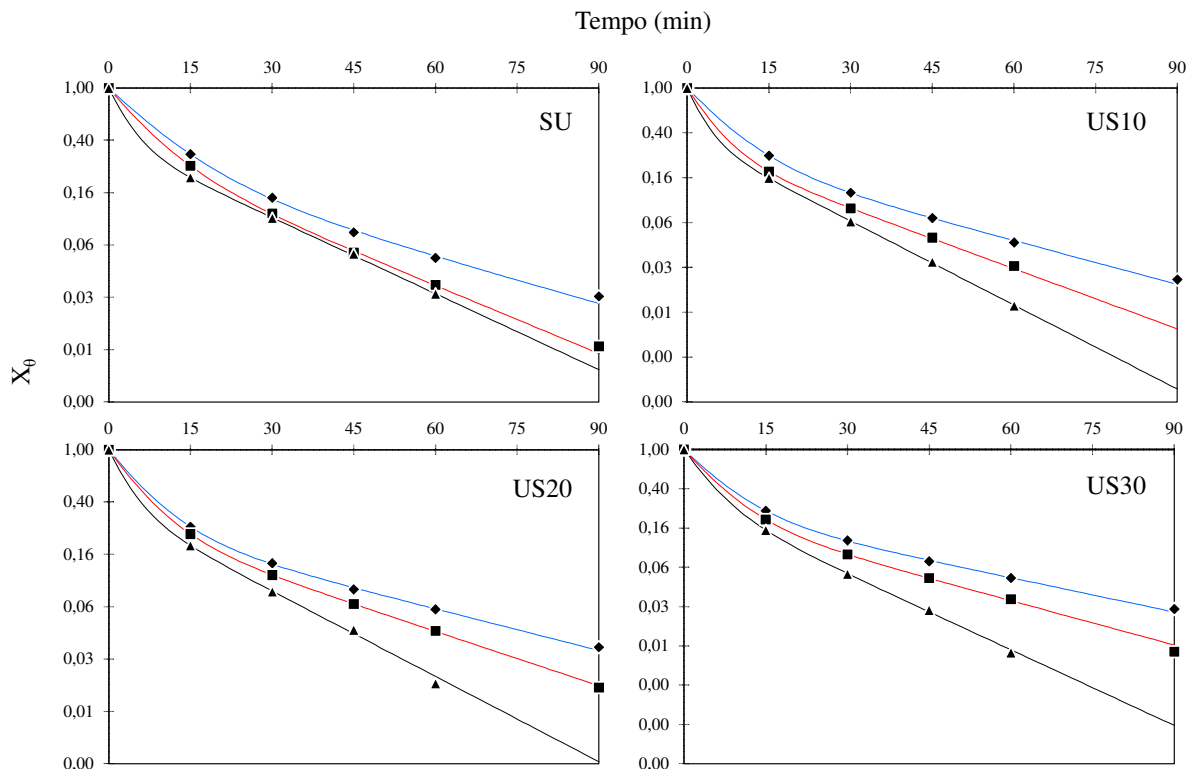
Na tabela acima pode-se notar que, para todas as condições, os valores de R² foram igual a 0,9999 tanto para o modelo DT quanto o modelo de Pg. O modelo de HP apresentou valores

menores para R^2 , variando de 0,9919 – 0,9991. A modelagem empírica da cinética de secagem é muito dependente das condições operacionais e do produto a ser seco (matriz). Esta afirmação pode ser corroborada com a literatura.

Com relação ao erro percentual, é possível notar que os modelos DT e Pg apresentaram os menores valores, indicando melhor ajuste aos dados. Já o mesmo não pode ser afirmado para o modelo de HP, uma vez que apresentaram erros percentuais que variaram de 35,46 – 58,16%. Os elevados R^2 associados com altos erros percentuais parecem ser incoerentes à primeira vista, porém, este resultado se explica pela distribuição dos dados ao longo da reta de regressão, ou seja, devido à questão da homoscedasticidade das respostas observadas, no qual variância dos erros é constante ao longo de toda a faixa estudada (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001). Devido a uma variação atípica para o erro percentual na condição US20 a 60°C para o modelo de Dois termos, foi feito o gráfico dos resíduos em relação ao tempo (Apêndice).

Na Figura 25 pode-se observar o ajuste dos modelos que apresentaram os menores erros percentuais para cada condição. O modelo Dois termos foi o melhor em todos os tratamentos, como visto na Tabela 9, embora o modelo de Page também tenha tido um bom ajuste.

Figura 25 – Modelagem empírica dos dados experimentais. As linhas contínuas representam o modelo melhor ajustado (Dois-termos) para as diferentes temperaturas, $T = 50$ (◆), $T = 60$ (■) e $T = 70$ (▲) °C.



Kadam, Tiwari e O'donnell (2015) buscaram modelar o processo de secagem (50°C a 0,3 m/s) de alga marrom (*Ascophyllum nodosum*) pré-tratada com ultrassom aplicando os modelos cinéticos de Newton, Henderson e Pabis, Wang e Singh, Page, Midilli e Weibull. Dentre os modelos estudados, o modelo de Wang e Singh se adequou melhor aos dados experimentais, atingindo $R^2 \geq 0,998$. É válido ressaltar que os modelos de Page e Henderson e Pabis obtiveram valores satisfatórios para R^2 , sendo iguais ou superiores a 0,995 e 0,982, respectivamente, resultados similares aos encontrados neste estudo.

Já Méndez *et al.* (2015), que aplicaram ultrassom na secagem convectiva (50°C/1,0 m·s⁻¹) de banana (*Musa paradisiaca*), manga (*Mangifera indica* L.) e goiaba (*Psidium guajava* L.), verificaram o ajuste dos modelos de Newton, Henderson e Pabis, Midilli Wang e Singh, Logarítmico, Page modificado, Page, Verma e Dois termos aos dados experimentais. Os modelos de Page e Dois termos obtiveram os melhores ajustes, atingindo $R^2 > 0,9966$. Resultados que se assemelham aos deste estudo.

Ricce *et al.* (2016) estudaram a aplicação do ultrassom como pré-tratamento (30 e 60 min) na secagem convectiva (40 e 60°C a 2 m/s) e reidratação de cenoura e utilizaram os modelos de Page, Lewis, Dois termos e Henderson e Pabis para modelar sua cinética. De acordo com os autores, todos os modelos testados descreveram os dados experimentais, obtendo um $R^2 > 0,96$, entretanto, seu melhor ajuste foi com o modelo de Henderson e Pabis, alcançando um $R^2 > 0,99$, resultados diferentes dos apresentados até aqui.

Em seu trabalho, Zhang *et al.* (2016) testaram o ajuste de modelos empíricos na secagem convectiva (60°C a 2 m/s) de fatias de cogumelo pré-tratadas com ondas ultrassônicas (3 e 10 minutos a 40 kHz). Os autores buscaram ajustar os modelos de Lewis, Page e Logarítmico e obtiveram bons ajustes ($R^2 > 0,986$) para todos os casos estudados. Para os autores, o modelo Logarítmico atingiu o melhor ajuste para as cinéticas, uma vez que $R^2 > 0,9948$. Contudo, é oportuno de sublinhar o bom ajuste do modelo de Page aos dados, uma vez que obteve $R^2 > 0,9923$.

Horuz, Jaafar e Maskan (2017) estudaram a aplicação de ondas ultrassônicas (20 e 40 minutos) em fatias de tomate em um forno híbrido de ar quente (60°C) junto de microondas para a secagem do produto. Os autores utilizaram o modelo de Page para representar a cinética de secagem e obtiveram $R^2 > 0,99$, indicando o bom ajuste do modelo qualquer que fosse o tratamento de ultrassom aplicado.

4.4 TRANFERÊNCIA DE MASSA EM TERMOS DA DIFUSIVIDADE EFETIVA (D_{ef})

Os resultados acerca da variação da difusividade efetiva com a mudança de temperatura são apresentados da Tabela 10.

Tabela 10 – Difusividade efetiva para cada condição explorada.

Tratamento	$D_{ef} \times 10^9 \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$					
	323,15 K (50°C)	R ²	333,15 K (60°C)	R ²	343,15 K (70°C)	R ²
SU	2,47	0,9965	3,00	0,9969	3,43	0,9974
US10	2,75	0,9899	3,17	0,9930	3,82	0,9964
US20	2,97	0,9944	3,85	0,9951	4,33	0,9974
US30	3,02	0,9914	3,68	0,9953	4,50	0,9983

Como pode ser observado na Tabela 10, o aumento do tempo de exposição as ondas ultrassônicas prova um aumento na difusividade em todas as condições, o que era esperado já que a aplicação de ultrassom facilita a saída de água, ou seja, aumenta a difusividade da mesma. Resultados similares foram obtidos por Zhang *et al.* (2016), que analisaram o efeito do ultrassom na transferência de massa e remoção de água de fatias de cogumelo. Estes autores observaram um aumento da difusividade conforme aumentaram o tempo de ultrassom de 3 para 10 minutos, obtendo valores de difusividade efetiva iguais a 4,21 e $4,38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Entretanto, para o melão pré-tratado US30 e seco a 60°C este efeito não ocorreu. Nesta condição de operação, aumentar o tempo de ultrassom de 20 (US20) para 30 (US30) minutos reduziu a difusividade em 4,42%.

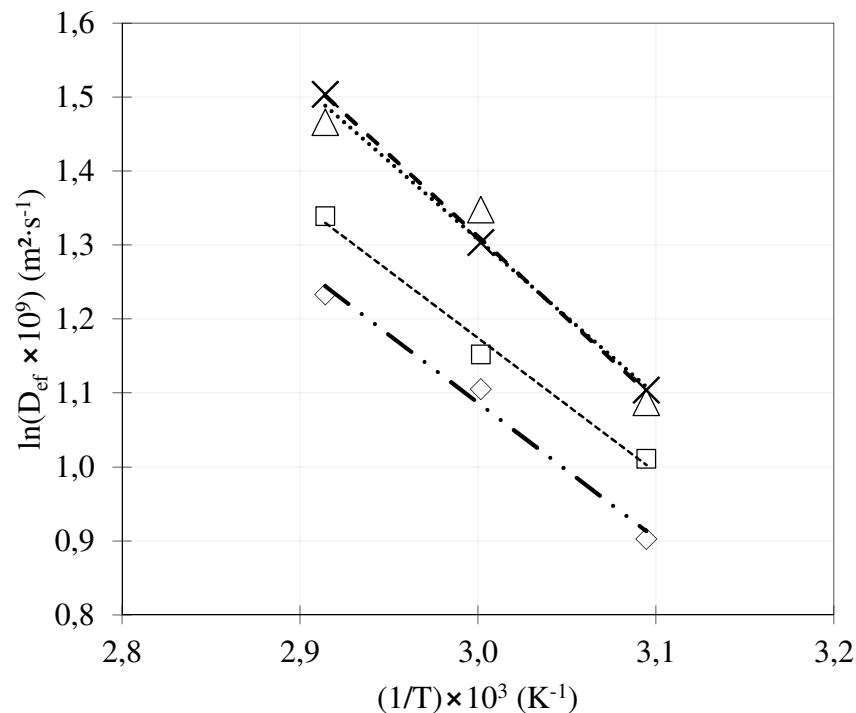
Esta condição peculiar pode ser evidenciada na literatura. Nowacka *et al.* (2012), que avaliaram o efeito da aplicação do ultrassom na secagem de maçãs, também constataram em seu trabalho que a aplicação de 10 minutos de ultrassom resultou em um coeficiente de difusividade maior ($2,168 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) do que o tratamento com 20 minutos de ultrassom ($2,058 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), representando uma diferença percentual de 5,07%, que foi superior à encontrada neste trabalho (4,42%). Romero e Yépez (2015), estudando o efeito da aplicação de ultrassom como pré-tratamento na secagem convectiva de amora-preta *Andean (Rubus glaucus Benth)*, notaram que, numa velocidade de 3 m/s a 50°C, aumentar o tempo de aplicação do ultrassom de 10 para 30 minutos provocou uma redução da difusividade efetiva da água de $1,042 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para $1,029 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente, provocando uma redução de 1,25%.

Corrêa *et al.* (2017) estudaram influência da aplicação do ultrassom no pré-tratamento osmótico e posterior secagem convectiva do abacaxi. Também observaram esse decréscimo da difusividade conforme o tempo de exposição ao ultrassom aumentou para diferentes temperaturas, obtendo $2,09 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (20 min) e $1,95 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 min), a 40°C , e $7,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (20 min) e $7,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (40 min), a 70°C .

Tais resultados demonstram que o rearranjo microestrutural do produto, após exposição deste a ondas ultrassônicas, é caótico e pouco previsível quanto às consequências sobre a difusividade efetiva. Sendo assim, a estrutura pode se organizar de forma a beneficiar a difusividade ou acabar prejudicando o transporte de água do interior ao meio externo do produto.

A Figura 26 mostra o perfil linear da difusividade com o inverso da temperatura com base na Tabela 10, comprovando a linearidade de Arrhenius obtida a partir da Equação 3.3.

Figura 26 – Dependência da difusividade com o inverso da temperatura. SU (\diamond), US10 (\square), US20 (Δ) e US30 (\times).



Os dados se ajustaram bem a esta linearidade, obtendo $R^2 > 0,994$, para os tratamentos SU e US10, e $R^2 > 0,977$, para os tratamentos US20 e US30. Tzempelikos *et al.* (2015) encontram valores de R^2 em torno de 0,98 ao comprovar a linearidade da dependência da difusividade com a temperatura pela equação de Arrhenius.

4.5 TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM TERMOS DE PERDA DE ÁGUA (PA_m) E GANHO DE SÓLIDOS (GS_m)

Dois últimos parâmetros, utilizados para determinar qual condição simular para comparar com o tratamento controle (SU), foram analisados: PA_m (%) e GS_m (%), conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS).

Tratamento	PA_m (%)	GS_m (%)
US10	-1,19 \pm 0,17	-1,61 \pm 0,02
US20	-1,32 \pm 0,28	-2,20 \pm 0,03
US30	-2,65 \pm 0,09	-2,30 \pm 0,01

Fernandes e Rodrigues (2008) examinaram a influência do pré-tratamento ultrassônico antes da secagem de sapota (*Achras sapota* L.) a 60°C. Com relação a PA_m (%) e GS_m (%), os autores obtiveram valores que variaram de -4,0 a -5,2% e -2,7 a -7,8%, respectivamente, inferiores aos encontrados neste estudo.

Garcia-Noguera *et al.* (2010) analisaram o efeito do tempo de aplicação de ultrassom como pré-tratamento, variando o tempo e a frequência, à desidratação osmótica de morango. Na frequência utilizada neste estudo, 25 kHz, os autores tiveram uma variação de -2,7 a -3,9 para PA_m (%), e de -0,1 a -0,7 para GS_m (%).

Silva *et al.* (2016) buscaram avaliar o uso do ultrassom (10, 20 e 30 min) e/ou vácuo como pré-tratamento sobre a eficiência da secagem convectiva (2,0 m/s a 60°C) de fatias de melão, além de realizar um estudo de qualidade. Sobre o tratamento que fez uso somente do ultrassom sem o vácuo, com relação a PA_m (%), os autores encontraram valores negativos, indicando ganho de água, que variaram de -8,51 a -10,59%, superiores aos encontrados neste trabalho (Tabela 11). Para o GS_m (%), os valores obtidos também foram negativos, ou seja, houve perda de sólidos e tais valores variaram de -0,07 a -1,45%, valores similares aos encontrados neste estudo. O estudo de Silva *et al.* (2016) corrobora a tendência de aumento no ganho de água (PA_m negativa) e perda de sólidos (GS_m negativo) conforme aumenta-se o tempo de exposição ao ultrassom.

As diferenças encontradas quanto à perda de água e ganho de sólidos pode ter sido causada por diferentes graus de maturação bem como diferenças atreladas ao tipo e estrutura do produto a ser processado.

A utilização dos parâmetros de perda de água e ganho de sólidos ajuda a determinar a condição mais adequada. Ao considerar a PA_m (%) e o GS_m (%) para determinar a condição

para realizar a simulação, a mais viável foi US20 a 60°C, juntamente com SU, visando compará-los. Neste caso, o ganho de água (PA_m negativa) se tornou muito substancial, ao passo que o GS_m entre os tratamentos US20 e US30 não foram muito distantes entre si, já que esse percentual se apoiou na base seca do produto, representando uma fração mínima do peso total. Além destes valores, os dados cinéticos e difusivos também levaram a escolher a condição US20 a 60°C para ser simulada.

4.6 SIMULAÇÃO VIA CFD DO PERFIL DE TEMPERATURA NA FATIA DE MELÃO

Os valores das propriedades utilizadas para simulação do perfil de temperatura do melão podem ser visualizadas na Tabela 12, com uso das Equação (3.4) e Equação (3.5).

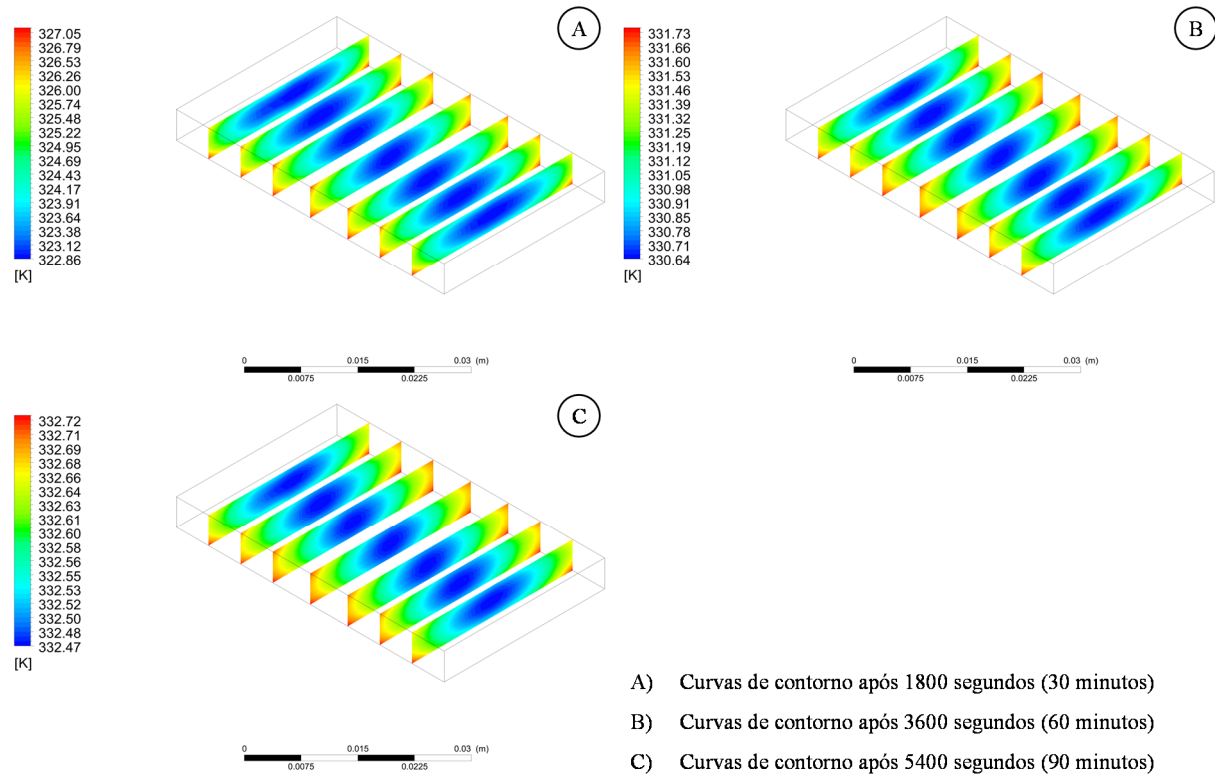
Tabela 12 – Propriedades utilizadas na simulação do perfil de temperatura a 60°C.

Tratamento	k_p (W/m.K)	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
SU	0,5849	3891,830	2028,467
US10	0,5926	3938,500	2052,676
US20	0,5953	3954,830	2055,224
US30	0,5963	3961,004	2082,154

ρ – Densidade da fatia de melão.

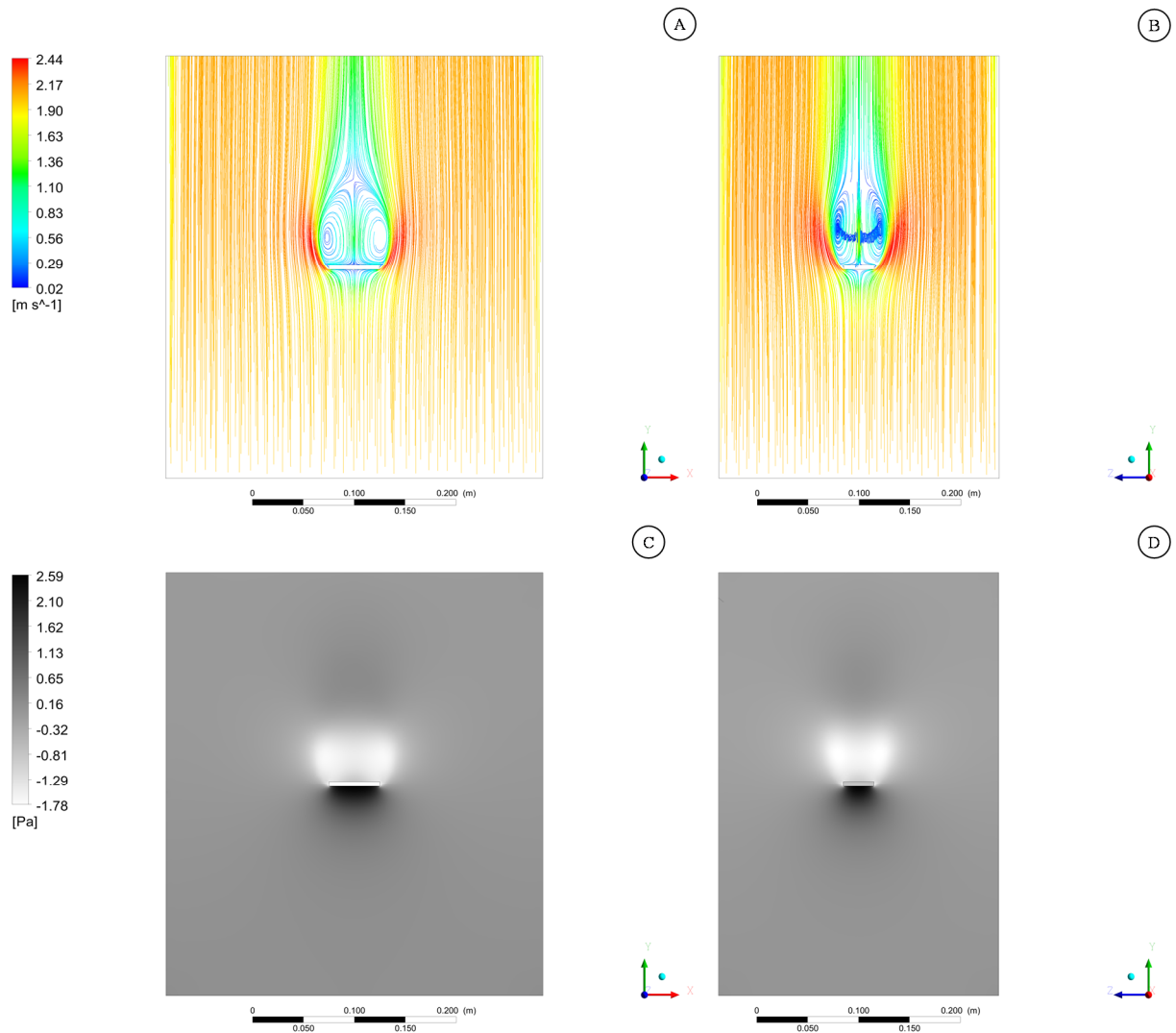
A Figura 27 apresenta o perfil de transferência de calor, ou seja, da temperatura na fase sólida do melão úmido, ao longo do tempo para o tratamento US20/60°C. A condição SU/60°C também foi simulada, porém, o perfil é o mesmo uma vez que a geometria foi considerada inalterada ao longo do processo e a única mudança é a ocorrência de valores mais elevados em escala de temperatura, uma vez que os valores de C_p , k_p e ρ foram sutilmente menores para o tratamento SU/60°C. Devido a isto, a simulação do SU/60°C não foi exposta.

Figura 27 – Perfil temperatura na fatia de melão (US20/60°C). Condição da fatia 30 min (A), após 60 min (B) e após 90 min (C).



Os resultados exibidos na Figura 27 mostram que a temperatura é maior nas bordas, o que era esperado, já que a geometria proposta gera turbulência nessas regiões, que por sua vez aumenta o coeficiente local de transferência de calor e, por isso, a temperatura é maior nessas regiões. Conforme a distância em relação as zonas laterais aumenta, observa-se que a temperatura é menor ao aproximar-se do centro. Isto se deve a regiões de baixa pressão formadas acima do melão (Figura 28.A e B) devido aos vórtices gerados pelos fluxos laterais de ar (Figura 28.C e D), ou seja, gerando uma redução na temperatura, reduzindo os coeficientes locais de transferência de calor (BEJAN, 2013). Observações similares podem ser encontradas na literatura quanto ao perfil de temperatura gerado por métodos numéricos.

Figura 28 – Linhas de corrente nos planos XY (A) e YZ (B). Pressão relativa nos planos XY (C) e YZ (D).



Villa-Corrales *et al.* (2010) realizaram um estudo numérico em 2D e experimental sobre a cinética de secagem em fatias de manga Ataulfo. Os modelos obtidos são similares aos encontrados neste estudo. Chandra Mohan e Talukdar (2010) investigaram numericamente o comportamento de um objeto úmido retangular durante uma secagem convectiva, resolvendo as equações de transferência de calor e massa para um modelo 3D. Obtiveram resultados que se assemelham com este trabalho quanto aos perfis de temperatura encontrados.

Tzempelikos *et al.* (2015) também buscaram desenvolver um modelo numérico para transferência de calor (modelagem do perfil de temperatura) e massa durante a secagem convectiva de fatias cilíndricas de marmelo, tendo seu eixo paralelo ao fluxo de ar, tal como neste trabalho. Os resultados encontrados foram similares aos obtidos neste estudo.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Esta seção busca resumir os principais resultados encontrados e as sugestões que podem ser exploradas em pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

Previamente à secagem do melão, notou-se a necessidade de realizar um estudo de simulação preliminar usando a Fluidodinâmica Computacional (CFD) acerca do fluxo de ar e distribuição de temperatura dentro do secador leito fixo (bandejas). Os resultados mostram que a melhor localização espacial, ou seja, que oferece condições mais uniformes, foi na região central do secador uma vez que a velocidade do fluxo de ar oferece menores variações da velocidade de entrada.

Os resultados da cinética de secagem mostraram que a aplicação de ultrassom como pré-tratamento ofereceu sinergia positiva com a temperatura, ou seja, quanto maior o tempo de exposição ao ultrassom, juntamente com o aumento da temperatura de secagem, maior foi a redução do tempo de secagem, atingindo reduções que chegam a 40% a 70°C com aplicação de 20 minutos de ultrassom.

O modelo empírico que ofereceu melhor ajuste aos dados experimentais de secagem foi o Exponencial de Dois termos, obtendo $R^2 > 0,999$ e erros percentuais de 0,22 a 2,31%. O modelo de Page também ofereceu ajuste eficaz para a maioria das condições, com valores de $R^2 > 0,999$, entretanto, na condição US20 e US30, o erro percentual foi em torno de 30%.

Com relação à difusividade, sua dependência com a temperatura seguindo a Lei de Arrhenius foi verificada. Os coeficientes de difusividade efetiva obtidos a partir do modelo matemático derivado da Lei de Fick mostraram uma tendência de aumento conforme elevou-se o tempo de exposição do melão a ondas ultrassônicas. Contudo, na temperatura de 60°C, foi observado uma peculiaridade quanto a esta tendência, uma vez que, ao aumentar o tempo de ultrassom de 20 para 30 minutos, a difusividade efetiva diminuiu ao invés de aumentar.

Os valores de PA_m (%) variaram de $-1,19\% \pm 0,17\%$ a $-2,65\% \pm 0,09\%$, já o GS_m (%) variou de $-1,61 \pm 0,02$ a $-2,30 \pm 0,01\%$. Os valores de PA_m (%) e GS_m (%) foram utilizados para escolher a melhor condição com aplicação do pré-tratamento a ser comparada com o tratamento controle (SU) durante a simulação, juntamente com os dados cinéticos e difusivos.

Os resultados da simulação via CFD da distribuição de temperatura ao longo de uma fatia de melão em diferentes sistemas se mostraram consistentes com os dados encontrados na literatura. Portanto, o perfil obtido via CFD descreveu satisfatoriamente o processo de secagem.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com vistas na melhoria do processo de secagem convectiva do melão com desenvolvimento de um modelo numérico robusto e validado para previsões dos perfis de temperatura da fase fluida (gás de secagem) e sólida (fruta) durante o processo de transferência de calor envolvido na secagem. Algumas sugestões são colocadas a seguir para dar continuidade aos trabalhos de pesquisa iniciados nessa pesquisa de mestrado:

- ✓ Realizar testes paramétricos quanto a modificações estruturais no secador, visando a mudança e otimização do dispersor de ar buscando a maximização da distribuição das velocidades;
- ✓ Modelar o secador com todas as bandejas e com quantidades maiores de fatias de melão e em outras condições operacionais;
- ✓ Modelar matematicamente o processo de secagem com aplicação de ultrassom como pré-tratamento visando reduzir as simplificações do modelo e maximizar a precisão dos resultados dos coeficientes difusivos;
- ✓ Efetuar um estudo estrutural complexo quanto à ação das ondas ultrassônicas nas estruturas moleculares de frutas e vegetais, já que a literatura apresenta resultados oscilatórios, buscando encontrar parâmetros que expliquem o real mecanismo de ação da cavitação provocadas pelo ultrassom na microestrutura do produto; e
- ✓ Executar a validação experimental dos resultados numéricos do perfil de transferência de calor, obtidos via CFD, por meio do uso de câmera termográfica, além de realizar testes de malha para verificar a influência desta sobre os resultados obtidos.

Embora a aplicação de ultrassom como pré-tratamento neste trabalho tenha sido na secagem convectiva de melão, a técnica pode ser estendida como um método de maximização da transferência de massa em meios porosos, abrindo perspectivas para várias aplicações em engenharia, de alimentos, em particular, de materiais sólidos porosos.

REFERÊNCIAS

AIRES, K. L. C. D. A. F. **Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã cortada em forma de paralelepípedo descritas por solução numérica tridimensional da equação de difusão**. 2016. Tese (Doutorado) - Campina Grande, PB: UFCG, 2016.

APEX-BRASIL. **Mercado de frutas na china**: estudo setorial de mercados prioritários para exportação. Disponível em: <www.apexbrasil.com.br/Content/.../965e1d39-c67d-46de-808b-0c3ba6f6b30a.pdf>. Acesso em: 22 maio. 2018.

AROUCHA, E. M. M.; ARAUJO, J. M. M. de; NUNES, G. H. de S.; NEGREIROS, M. Z. de; PAIVA, C. A. de; SOUZA, M. S. de. Cantaloupe melon (*Cucumis melo* L.) conservation using hydrocooling. **Revista Ceres**, v. 63, n. 2, p. 191–197, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2016000200191&lng=en&tlng=en>.

AUGUSTO, P. E. D.; PINHEIRO, T. F.; CRISTIANINI, M. Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na avaliação de tratamentos térmicos de bebidas em garrafas. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 04, p. 260–270, 2011. Disponível em: <<http://www.ital.sp.gov.br/bj/artigos/html/busca/PDF/v13n4431a.pdf>>.

AZEVEDO, B. M. DE; BOMFIM, G. V. DO; NASCIMENTO NETO, J. R. DO; VIANA, T. V. D. A.; VASCONCELOS, D. V. Irrigation depths and yield response factor in the productive phase of yellow melon. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 4, p. 1–13, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452016000400704&lng=en&tlng=en>.

BAŞLAR, M.; KILIÇLI, M.; YALINKILIÇ, B. Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 27, p. 495–502, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135041771500190X>>.

BAŞLAR, M.; TOKER, Ö. S.; KARASU, S.; TEKIN, Z. H.; YILDIRIM, H. B. **Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry**. Singapore: Springer Singapore, 2016.

BECK, S. M.; SABAREZ, H.; GAUKEL, V.; KNOERZER, K. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – A response surface approach. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 6, p. 2144–2150, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350417714000625>>.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York:

JohnWiley & Sons, LTC, 2004.

BOUSCASSE, B.; COLAGROSSI, A.; MARRONE, S.; SOUTO-IGLESIAS, A. SPH modelling of viscous flow past a circular cylinder interacting with a free surface. **Computers and Fluids**, v. 146, p. 190–212, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.01.011>>.

CÂMARA, M. J. T.; NEGREIROS, M. Z. de; MEDEIROS, J. F. de; NETO, F. B.; JÚNIOR, A. P. B. Produção e qualidade de melão amarelo influenciado por coberturas do solo e lâminas de irrigação no período chuvoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 1, p. 58–63, 2007.

CAO, X.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S.; ZHONG, Q.; WANG, Z. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 333–340, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.06.014>>.

CÂRLESCU, P.-M.; ARSENOAIA, V.; ROȘCA, R.; ȚENU, I. CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 85, p. 479 - 486, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643817301603>>.

CARVALHO, C. de. **Anuário Brasileiro da Fruticultura**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2017a.

CARVALHO, C. de. **Anuário Brasileiro de Hortaliças**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2017b.

CBI - MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS. **CBI Product Factsheet: dried fruit and vegetables in finland**. Disponível em: <<https://www.cbi.eu/market-information/processed-fruit-vegetables-edible-nuts/dried-fruit-vegetables/finland/>>. Acesso em: 22 maio. 2018.

CBI - MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS. **Exporting dried fruit to the United Kingdom**. Disponível em: <<https://www.cbi.eu/market-information/processed-fruit-vegetables-edible-nuts/dried-fruit/uk/>>. Acesso em: 22 maio. 2018.

CHANDRA MOHAN, V. P.; TALUKDAR, P. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21–22, p. 4638–4650, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.029>>.

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

2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.002>>.

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

DALASTRA, G. M.; ECHER, M. de M.; KLOSOWSKI, É. S.; HACHMANN, T. L. Produção e qualidade de três tipos de melão, variando o número de frutos por planta 1. **Revista Ceres**, v. 63, n. 4, p. 523–531, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2016000400523&lng=pt&tlng=pt>.

DARABI, H.; ZOMORODIAN, A.; AKBARI, M. H.; LORESTANI, A. N. Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 1, p. 359–366, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13197-013-0983-1>>.

DEFRAEYE, T.; RADU, A. Convective drying of fruit: A deeper look at the air-material interface by conjugate modeling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 1610–1622, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.002>>.

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. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, v. 74, p. 114–119, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002364381630442X>>.

EKEZIE, F.-G. C.; CHENG, J.-H.; SUN, D.-W. Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances. **Trends in Food Science and Technology**, v. 74, p. 12–25, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.007>>.

FARIAS, S. M. de O. C. **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*)**. 2016. Tese (Doutorado) - Florianópolis, SC: UFSC, 2016.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 4, p. 604–610, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643807001867>>.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Dehydration of Sapota (*Achras sapota* L.) Using

Ultrasound as Pretreatment. **Drying Technology**, v. 26, n. 10, p. 1232–1237, 2008. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373930802307118>>.

FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE - USDA. **Poland: Food Processing Ingredients**. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/poland-food-processing-ingredients>>. Acesso em: 22 maio. 2018.

GARCIA-NOGUERA, J.; OLIVEIRA, F. I. P.; GALLÃO, M. I.; WELLER, C. L.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. **Drying Technology**, v. 28, n. 2, p. 294–303, 2010. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373930903530402>>.

GARCÍA-PÉREZ, J. V.; CARCEL, J. A.; MULET, A.; RIERA, E.; GALLEGO-JUAREZ, J. A. Ultrasonic drying for food preservation. In: **Power Ultrasonics**. Elsevier, 2015. p. 875–910.

GOMES, G. P.; GONÇALVES, L. S.; SEKYIA, A.; EUZEBIO, M. P.; ROBAINA, R. P.; MARINHO, G. D. Registro e proteção de olerícolas no Brasil, período de 1998 a 2014. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 1, p. 19–25, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362016000100019&lng=pt&tlng=pt>.

HORUZ, E.; JAAFAR, H. J.; MASKAN, M. Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air–microwave hybrid oven. **Drying Technology**, v. 35, n. 7, p. 849–859, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1222538>>.

JIN, W.; ZHANG, M.; SHI, W. Evaluation of ultrasound pretreatment and drying methods on selected quality attributes of bitter melon (*Momordica charantia* L.). **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1458735>>.

KADAM, S. U.; TIWARI, B. K.; O'DONNELL, C. P. Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 23, p. 302–307, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.001>>.

KARMAN, T. von. **Aerodynamics**: selected topics in the light of their historical development. Mineola, New York: Dover Publications, 2004.

LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S. da; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. dos. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 155–162, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-40632015000200004&lng=pt&tlng=pt>.

MACHADO, L. S.; ALBUQUERQUE, R. A. **Oportunidades comerciais para frutas Brasileiras nos EUA**. Disponível em: <www.apexbrasil.com.br/Content/.../35ba1a72-f560-40a9-b1a4-c3e28847e9e9.pdf>. Acesso em: 22 maio. 2018.

MAGALHÃES, M. L.; CARTAXO, S. J. M.; GALLÃO, M. I.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; CÁRCEL, J. A.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, v. 215, p. 72–77, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417303254>>.

MÉNDEZ, E. K.; ORREGO, C. E.; MANRIQUE, D. L.; GONZALEZ, J. D.; VALLEJO, D.; PREPARATION, A. S. Power Ultrasound Application on Convective Drying of Banana (*Musa paradisiaca*), Mango (*Mangifera indica* L.) and Guava (*Psidium guajava* L.). **International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering**, v. 9, n. 10, p. 973–978, 2015.

MUSIELAK, G.; MIERZWA, D.; KROEHNKE, J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 56, p. 126–141, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.003>>.

NETO, B. de B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

NOWACKA, M.; WIKTOR, A.; ŚLEDŹ, M.; JUREK, N.; WITROWA-RAJCHERT, D. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. **Journal of Food Engineering**, v. 113, n. 3, p. 427–433, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877412003093>>.

OLADEJO, A. O.; MA, H.; QU, W.; ZHOU, C.; WU, B.; YANG, X.; ONWUDE, D. I. 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**, v. 43, p. 7–17, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.019>>.

PELIZZA, T. R.; SILVEIRA, F. N.; MUNIZ, J.; HOFFMANN, A.; ECHER, B.; BEATRIZ, T.; ARAÚJO, G. Produção de mudas de meloeiro amarelo, sob cultivo protegido, em diferentes substratos. **Revista Ceres**, v. 60, n. 2, p. 257–261, 2013.

PIAIA, J. C. Z. **Secagem da linguiça calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais**. 2009. Tese (Doutorado) - Florianópolis, SC: UFSC, 2009.

POWLES, A. E.; MARTIN, D. J.; WELLS, I. T.; GOODWIN, C. R. Physics of ultrasound. **Anaesthesia and Intensive Care Medicine**, v. 19, n. 4, p. 202–205, 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2018.01.005>>.

RICCE, C.; ROJAS, M. L.; MIANO, A. C.; SICHE, R.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound pretreatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, v. 89, p. 701–708, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996916304215>>.

RODRÍGUEZ, Ó.; SANTACATALINA, J. V.; SIMAL, S.; GARCIA-PEREZ, J. V.; FEMENIA, A.; ROSSELLÓ, C. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. **Journal of Food Engineering**, v. 129, p. 21–29, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877414000120>>.

ROMERO J., C. A.; YÉPEZ V., B. D. Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 22, p. 205–210, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.06.011>>.

SILVA, G. T. M. D. A.; RIBEIRO, R. M. P.; BARROS JÚNIOR, A. P.; SILVEIRA, L. M. DA; RIBEIRO JÚNIOR, P. M.; ALBUQUERQUE, N. R. C. DE. Characterization of cucurbit production systems and disease prevalence in municipalities in Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 3, p. 774–779, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252016000300774&lng=en&tlng=en>.

TAO, Y.; WANG, P.; WANG, Y.; KADAM, S. U.; HAN, Y.; WANG, J.; ZHOU, J. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 31, p. 310–318, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.012>>.

TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. Introduction. In: **Computational Fluid Dynamics**. Elsevier, 2018a. p. 1–31.

TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. CFD Mesh Generation: A Practical Guideline. In: **Computational Fluid Dynamics**. Elsevier, 2018b. p. 125–154.

TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. CFD Techniques: The Basics. In: **Computational Fluid Dynamics**. [s.l.] Elsevier, 2018c. p. 155–210.

TZEMPELIKOS, D. A.; MITRAKOS, D.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. **Journal of Food Engineering**, v. 156, p. 10–21, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017>>.

VERSTEEG, K. H.; MALALASEKERA, W. **Computational Fluid Dynamics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, v. 27, 2009.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 387–394, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000200018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J. J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J. P.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 2, p. 198–206, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.026>>.

WANG, B.; YAO, M. Examination of drying behavior of mung bean in laboratory and the establishment of the corresponding rea model. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 3, p. e12939, 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/jfpp.12939>>.

WANG, L.; XU, B.; WEI, B.; ZENG, R. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 619–628, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.005>>.

ZHANG, Z.; LIU, Z.; LIU, C.; LI, D.; JIANG, N.; LIU, C. Effects of ultrasound pretreatment on drying kinetics and quality parameters of button mushroom slices. **Drying Technology**, v. 34, n. 15, p. 1791–1800, 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2015.1117486>>.

**APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESÍDUOS DO MODELO DT EM CADA
CONDIÇÃO ESTUDA DE TEMPERATURA (70, 60 E 50°C)**

