



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL



CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

MARIANA RÊGO LIMA

**Avaliação da secagem da polpa do coco em secadores convectivos e híbridos:
uma abordagem experimental e fluidodinâmica**

Maceió

2023

MARIANA RÊGO LIMA

**Avaliação da secagem da polpa do coco em secadores convectivos e híbridos:
uma abordagem experimental e fluidodinâmica**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira
Brandão

Coorientadora: Prof.^a Dra. Dayana de
Gusmão Coêlho

Maceió

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Betânia Almeida dos Santos – CRB-4 – 1542

L732a Lima, Mariana Rêgo.

Avaliação da secagem da polpa de coco em secadores convectivos e híbridos: uma abordagem experimental e fluidodinâmica / Marina Rêgo Lima. – 2023.

76 f. : il. color.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.

Coorientadora: Dayana de Gusmão Coêlho.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 71-76.

1. Indústria – coco – manipulação . 2. Coco – secagem – processo experimental. 3. Fluidodinâmica computacional. I. Título.

CDU: 66.047 : 634.616

*Dedico esse trabalho à minha família, mas em especial ao
meus pais, por todo apoio durante minha trajetória.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, e acima de tudo sabedoria nessa fase da vida que tanto sonhei.

Aos meus pais, Ricardo e Neuma, por me apoiarem nesse sonho que tinha desde pequena. A eles que nunca mediram esforços para proporcionar a mim e à minha irmã a melhor educação e condução nessa vida acadêmica e profissional. Obrigada por todo carinho, amor e conforto que nos deram, nada seríamos sem vocês.

À minha querida irmã Beatriz, minha rede de apoio, que sempre teve paciência ao ouvir as reclamações, dificuldades e encantos do curso. Saiba que serei eternamente grata por cada conversa, cada conselho e ensinamento. Mesmo de longe, esteve sempre tão presente.

Ao meu noivo Mérçon, que esteve ao meu lado em toda essa trajetória. Por ser minha fortaleza. Obrigada pela paciência das horas de estudo que não consegui estar ao seu lado. Obrigada por fazer do meu sonho, o nosso.

Aos meus colegas de classe, aos quais dividimos longos 5 anos. Nossos caminhos estão tomando rumos diferentes, mas partimos do mesmo ponto, e guardarei para sempre cada momento vivido. Mas em especial agradeço à minha querida amiga Anne Caroline, que esteve comigo desde o primeiro dia de aula, dividindo comigo as tristezas e angústias do curso, as intermináveis listas de Cinética 1. Obrigada por ser essa amiga irmã.

Aos meus professores da faculdade, que foram essenciais nesse processo de construção da vida acadêmica. Ao Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão, ao qual me fez perder o medo da programação. Obrigada por toda sua orientação, que foi além dos trabalhos acadêmicos, foram ensinamentos para vida. À Prof^a. Dra. Dayana de Gusmão Coêlho, que esteve presente desde o começo do meu TCC, me orientando desde a escolha do tema.

Aos meus colegas de trabalho da COPRA, que estiveram presentes no final dessa caminhada, e que foram essenciais para a construção da profissional que estou me tornando.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte de forma direta e indiretamente na construção do meu trabalho.

RESUMO

O coco, principal fruto da palmeira pertencente à família *Arecaceae*, possui elevado valor agregado dentro das esferas acadêmicas e industriais. No âmbito industrial, seu principal foco é no setor alimentício. Mediante a isso, alguns parâmetros devem ser levados em consideração durante a manipulação do mesmo, sendo o teor de umidade um parâmetro essencial para o adequado controle de qualidade. Diante da necessidade de manter um baixo teor de água livre na polpa do coco, faz-se necessário a utilização de equipamentos que removam e controlem a umidade do alimento, sendo os secadores equipamentos expoentes para esta aplicação. Devido a sua vasta aplicabilidade, hoje tem-se um leque de diferentes tipos de secadores, específicos para cada tipo de operação, regime e objetivo. Tendo isso em vista, o presente trabalho teve por objetivo realizar experimentalmente o processo de secagem da polpa do coco em dois secadores, convectivo e híbrido (convectivo-infravermelho), e então determinar a eficiência de secagem para cada um dos casos avaliados. Para isso, foi utilizado como artifício e critério de escolha, as curvas de cinética de secagem. Além disso, teve-se como proposta de estudo a otimização de diferentes configurações das posições de entrada e saída de fluxo de ar do secador tido como mais eficiente no processo de secagem, por meio das técnicas de CFD. Para a realização do trabalho, foi utilizado o software Statistica® e Origin para a determinação da cinética de secagem, o software de código aberto OpenFOAM para a realização das simulações e o Paraview para fins de visualizações de resultados. Por meio disso, foi determinado que o secador híbrido (convectivo-infravermelho) apresentou uma eficiência superior na secagem da polpa do coco, quando comparado ao secador convectivo. Além disso, por intermédio das técnicas de CFD, o secador híbrido teve suas posições de entrada e saída de fluxo de ar otimizadas, apresentando como melhor simulação, dentre as determinadas pelo Planejamento fatorial, a simulação/posição 27, a qual apresenta as seguintes disposições geométrica as de entrada e saída de fluxo de ar no secador híbrido para X_{1E} , Y_{1E} , Y_{1S} e Y_{2S} respectivamente: 0,1122 m, 0,1782 m, 0,1782 m, 0,1782 m.

Palavras-Chave: Secagem. Cinética de Secagem. CFD. Coco.

ABSTRACT

Coconut, the main fruit of the palm tree belonging to the Arecaceae family, has high added value within academic and industrial spheres. In the industrial sphere, its main focus is on the food sector. Therefore, some parameters must be taken into consideration when handling it, with moisture content being an essential parameter for adequate quality control. Given the need to maintain a low free water content in the coconut pulp, it is necessary to use equipment that removes and controls moisture from the food, with dryers being exponent equipment for this application. Due to its wide applicability, today there is a range of different types of dryers, specific to each type of operation, regime and objective. With this in mind, the present work aims to experimentally carry out the drying process of coconut pulp in two dryers, convective and hybrid (convective-infrared), and then determine the drying efficiency for each of the cases evaluated. For this, the drying kinetic curves were used as a device and selection criterion. Furthermore, the study proposal was to optimize different configurations of the inlet and outlet airflow positions of the dryer considered to be more efficient in the drying process, using CFD techniques. To carry out the work, the software Statisca® and Origin were used to determine the drying kinetics, the open source software OpenFOAM to carry out the simulations and Paraview to visualize results. Therefore, it was determined that the hybrid dryer (convective-infrared) presented a higher efficiency in drying coconut pulp, when compared to the convective dryer. Furthermore, through CFD techniques, the hybrid dryer had its air flow inlet and outlet positions optimized, presenting the following configurations for X1E, Y1E, Y1S and Y2S as the best geometric arrangement, respectively: 0,1122 m, 0,1782 m, 0,1782 m and 0,1782 m.

Keywords: Drying. Drying Kinetics. CFD. Coconut.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: <i>Cocos Nucifera L</i>	16
Figura 2: Relação entre a umidade em base seca em função do tempo de secagem	19
Figura 3: Secador do tipo bandeja com telas fixas.....	21
Figura 4: Desenho representativo de um secador rotativo.....	21
Figura 5: Modelos de Turbulências	30
Figura 6: Malhas computacionais: a) malha estruturada; b) malha não estruturada .	34
Figura 7: Fluxograma esquemático do Planejamento Experimental	35
Figura 8: Polpa do coco utilizado para secagem.....	37
Figura 9: <i>Fans de cooler</i> utilizada como fonte de calor no secador híbrido	38
Figura 10: Lâmpada com radiação infravermelha	39
Figura 11: Dimensões do secador híbrido.....	43
Figura 12: Geometria do secador híbrido criada no Onshape.....	44
Figura 13: Malha computacional do secador híbrido.....	44
Figura 14: Fluxograma representativo do <i>OpenFOAM</i>	45
Figura 15: Polpa do coco após o período de secagem de 100 minutos.....	48
Figura 16: Relação entre a Razão do teor de água (XR) vs Tempo no secador convectivo à temperatura de 55 °C	53
Figura 17: Relação entre a Razão do teor de água (XR) vs Tempo do secador híbrido à temperatura de 55 °C	53
Figura 18: Relação da taxa de secagem da polpa do coco dos secadores híbrido e convectivo com relação ao tempo de secagem.....	54
Figura 19: Média \pm desvio padrão de XR dos secadores convectivo e híbrido à temperatura de 55 °C	55
Figura 20: Comparação das curvas de cinética de secagem dos secadores convectivo e híbrido com o a curva do modelo de Page.....	56
Figura 21: Posicionamento da saída de ar do Secador Convectivo. a) Vista frontal. b) Vista superior	58
Figura 22: Vista superior do secador híbrido.....	59
Figura 23: Relação do Valor Normal Esperado e do Resíduo.....	63
Figura 24: Relação dos Valores Preditos e Observados.....	64

Figura 25: Configuração do secador híbrido em diferentes posições de entrada e saída de calor. a) Simulação 27. b) Simulação 8. c) Secador na posição 27. d) Secador na posição 8.....	65
Figura 26: Visualização da velocidade e do volume do secador híbrido em diferentes posições de entrada e saída de calor. a) Posição 27. b) Posição 8	66
Figura 27: Comportamento fluidodinâmico da simulação/posição 27	67
Figura 28: Linhas de corrente de fluido referente à simulação/posição 27 do secador híbrido	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos matemáticos de predição de secagem	20
Tabela 2: Fatores e níveis adotados no Planejamento Fatorial 3^K	41
Tabela 3: Planejamento Fatorial 3^K para criação de geometrias do secador híbrido com variáveis de entrada e saída de fluxo ar.....	42
Tabela 4: Dimensões do Secador Híbrido.....	43
Tabela 5: Características das simulações computacionais realizadas no OpenFOAM	45
Tabela 6: Massas aferidas no secador convectivo à temperatura de 55 °C.....	47
Tabela 7: Massas aferidas no secador híbrido à temperatura de 55 °C.....	48
Tabela 8: Massa de sólido seco obtida nos secadores posto em estudo.....	48
Tabela 9: Teor de umidade dos experimentos realizados no secador convectivo	49
Tabela 10: Teor de umidade dos experimentos realizados no secador híbrido	49
Tabela 11: Razão do teor de água referente ao secador convectivo	50
Tabela 12: Razão do teor de água referente ao secador híbrido	50
Tabela 13: Média e Desvio Padrão das triplicatas do Secador Convectivo	51
Tabela 14: Média e Desvio Padrão das triplicatas do Secador Híbrido.....	51
Tabela 15: Valores de K e n utilizando o Modelo de Page para simular a cinética de secagem da polpa do coco nos secadores convectivo e híbrido.....	57
Tabela 16: Velocidade e Volume ocupado pelo fluido referente a cada simulação...61	

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
IR	Radiação infravermelha
LES	Large Eddy Simulation
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
RANS	Raynolds Average Navier-Stokes
Re	Número de Reynolds
SST	Shear Strees Transport

Lista de Símbolos

A_s	Área de superfície
$D_{a,b}$	Coefficiente difusivo
D	Diâmetro
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$J_{A,z}$	Fluxo de difusão molecular
K	Constante de cinética de secagem
k	Condutividade térmica
k	Energia Turbulenta
$\dot{m}_{convecção}$	Taxa convectiva
m_{eq}	Massa de equilíbrio

m_{ss}	Massa de sólido seco
m_t	Massa total
m_w	Massa de água
$Q_{condução}$	Calor de condução
T_{circ}	Temperatura da superfície maior
T_s	Temperatura na superfície
T_{∞}	Temperatura distante da superfície
V	Velocidade
X	Teor de água
X_0	Teor de água inicial
X_{1E}	Posição de entrada em relação a x
X_e	Teor de água em equilíbrio
X_{BS}	Umidade em base seca
XR	Razão do teor de água
Y_{1E}	Posição de entrada em relação a y
Y_{1S}	Posição de saída 1 em relação a y
Y_{2S}	Posição de saída 2 em relação a y
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\tau_{x,y}$	Tensão cisalhante
ε	Taxa de dissipação de energia turbulenta
ω	Frequência turbulenta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1.	Objetivo geral	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	O Coco	16
3.2	Secagem	16
3.2.1.	Cinética de Secagem	18
3.2.2	Secadores.....	20
3.2.2.1.	Secador de Bandeja	20
3.2.2.2.	Secador rotativo	21
3.2.2.3.	Secador híbrido	22
3.3.	Transferência de Calor	23
3.3.1.	Condução	23
3.3.2.	Convecção	23
3.3.3.	Radiação	24
3.4	Transferência de Massa	25
3.5	Mecânica dos Fluidos	26
3.6	Turbulência.....	27
3.7	CFD	28
3.8	Navier-Stokes	29
3.9	Modelos de Turbulência	29
3.9.1.	DNS.....	30
3.9.2.	LES.....	30
3.9.3.	RANS	31
3.10	Discretização	32
3.11	Malha Computacional	33
3.12	OpenFOAM	35
3.13	Planejamento fatorial	35
3.13.1.	Planejamento Fatorial 3 ^K	36
4	METODOLOGIA	37
4.1	Cinética de Secagem.....	37

4.2	CFD	40
4.2.1.	Pré-processamento	40
4.2.2.1.	Planejamento experimental	41
4.2.2.2.	Geometria e Malha computacional	44
4.2.2.	Processamento.....	45
4.2.3.	Pós- processamento.....	46
5	RESULTADOS	47
5.1	Determinação da Razão do teor de água (XR) nos secadores convectivo e híbrido	47
5.2.	Determinação da cinética de secagem e do modelo de cinética	52
5.3.	Otimização das posições do Secador Híbrido	60
5.4.	Planejamento Experimental.....	62
5.5.	CFD para otimização das Posições do Secador Híbrido	64
6	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O *Cocos nucifera L.* é a espécie pertencente à família *Arecaceae*, uma palmeira presente no território brasileiro, a qual tem como principal fruto o coco (ANDRADE; PASSOS, 2004). Sendo utilizada como matéria prima na indústria alimentícia, algumas ressalvas são levadas em consideração ao manipular essa fonte alimentícia, sendo o teor de umidade presente, um parâmetro essencial para o controle de qualidade (SANTOS, 2022).

Mediante a isso, devido à necessidade de manter um baixo teor de água livre na polpa do coco, faz-se necessário a utilização de operações que realizem o controle da umidade do alimento., sendo a secagem uma expoente aliada (NASCIMENTO, 2009).

Por ser uma atividade imprescindível na esfera industrial, a secagem de alimentos conta com uma gama de equipamentos, personalizados para cada tipo de regime operacional, parâmetros e produto de interesse final. Sendo assim, devido à sua relevância dentro dos processos, faz-se necessário a utilização de secadores otimizados, que promovam, de forma eficiente, o controle do teor de água livre do produto em questão.

Assim sendo, é necessário a aplicabilidade de ferramentas apropriadas que determinem o equipamento mais eficaz durante o processo de controle de umidade. O estudo da cinética de secagem faz-se necessário nessa abordagem, visto que o mesmo fornece informações acerca do comportamento de transferência de massa e calor entre o fluido e o produto utilizado, o ar e a polpa do coco, respectivamente.

Além da cinética de secagem, uma aliada a esse tipo de estudo são as técnicas da fluidodinâmica computacional, a qual proporciona um estudo no que diz respeito ao escoamento de fluidos e seu comportamento.

Levando isso em consideração, o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo entre os secadores convectivo e híbrido (convectivo-infravermelho), a fim de investigar aquele que exerce de forma mais eficiente secagem da polpa do coco. Além disso, é de interesse também otimizar o equipamento escolhido, a fim de determinar a melhor posição de entrada e saída de ar, e conseqüentemente atingir seu melhor desempenho.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O trabalho em vigor tem por objetivo determinar, por meio da comparação entre os secadores convectivo e híbrido (convectivo-infravermelho), aquele que apresenta uma maior eficiência de secagem da polpa do coco, através da avaliação da cinética de secagem. Além disso, teve por interesse também otimizar as posições de entrada e saída de ar do secador escolhido como mais eficiente, por meio das técnicas da fluidodinâmica computacional.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar o processo experimental da secagem da polpa do coco nos secadores híbrido (convectivo-infravermelho) e convectivo;
- Determinar a cinética de secagem de operação de ambos os secadores e fazer a análise a partir dos modelos matemáticos dispostos na literatura;
- Estudar, por meio da fluidodinâmica computacional, o comportamento da velocidade e do volume ocupado pelo fluido no secador escolhido para análise.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

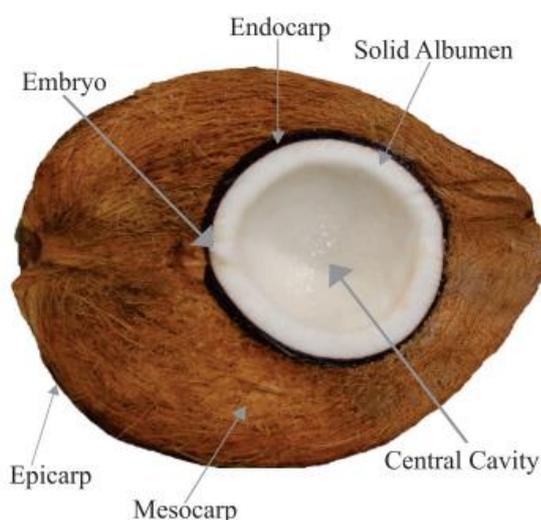
3.1 O Coco

“Coco - da - baía”, nome pelo qual o coqueiro também é conhecido, é uma planta disseminada em praticamente todos os continentes, sendo bastante explorado devido a sua versatilidade industrial, tendo como principal foco a agroindústria e o setor alimentício (MARTINS; JÚNIOR, 2014).

Para a realidade brasileira, o *Cocos Nucifera L*, pertencente à família *Arecacea*, foi trazido para o país em meados dos anos 1950, dando entrada no estado da Bahia. Por ser um fruto de origem asiática, com predominância do clima tropical, essa planta adaptou-se bem ao clima e solo brasileiro, tendo hoje, boa parte do litoral brasileiro coberto por essa vegetação, sem contar com o crescimento em outras regiões, como no norte do país (MARTINS *et al*, 2016).

Ainda segundo os autores, sua produção está mais voltada para o setor alimentício, e em vista disso, faz-se necessário os cuidados acerca do teor de água livre no produto, visto que é um parâmetro essencial para o controle de qualidade.

Figura 1: *Cocos Nucifera L*



Fonte: LÉDO *et al*, 2019.

3.2 Secagem

A secagem é a operação unitária que tem por finalidade remover a umidade contida em leito por intermédio da passagem de uma corrente de fluido (COSTA, 2007). Ainda segundo o autor, esse processo pode ser confundido com a evaporação, a qual está relacionada com a remoção de um líquido confinado em uma solução

líquida, o que a torna mais concentrada. Um outro ponto de ressalva à diferença entre os processos, diz respeito à temperatura do procedimento, visto que na evaporação, esse parâmetro é igual ou maior que a de ao seu ponto de ebulição, enquanto que na secagem, a grandeza escalar referida é inferior à de ebulição.

Segundo Geankoplis (1998), a secagem é uma técnica bastante utilizada para fins alimentícios, tendo como um dos propósitos a remoção de água, a fim de evitar a proliferação de microrganismos. Para isso, faz-se necessário o estudo e avaliação a no que diz respeito à umidade presente no objeto de estudo.

A umidade poder ser apresentada por meio de base seca ou úmida. Quando se trata da umidade de um sólido de base seca, X_{bs} , o contexto refere-se à relação entre a quantidade de massa de água, por massa de sólido seco, conforme mostrado na Equação 1:

$$X_{bs} = \frac{m_w}{m_{ss}} \quad (1)$$

Em que X_{bs} representa o teor de umidade em base seca ($g \cdot g^{-1}$), m_w é a massa de água (g), e m_{ss} a massa de sólido seco (g).

Enquanto que a umidade do sólido em base úmida é a relação entre a massa de água, pela massa total do sólido (seco mais água), sendo o equacionamento matemático presente na Equação 2:

$$X_{bu} = \frac{m_w}{m_t} \quad (2)$$

Onde X_{bu} é o teor de umidade em base úmida ($g \cdot g^{-1}$), m_t é a massa total (g).

Tais valores são importantes para predizer a razão do teor de água, XR , a qual é definida segundo a Equação 3:

$$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Em que X equivale ao teor de água em determinado ponto, X_e representa o teor de água de equilíbrio, e X_0 o teor de água inicial. Tem-se como umidade de equilíbrio aquela que é obtida ao fim do processo de secagem, e a umidade inicial, o valor alcançado assim em que se inicia a secagem.

Deve-se ressaltar que, para a ocorrência da operação de secagem, dois processos acontecem de forma simultânea: a transferência de calor e de massa. Tratando-se da transferência de calor, essa pode se manifestar por meio da condução, convecção e/ou radiação. E a transferência de massa manifesta-se através dos mecanismos difusivos e convectivos (GEANKOPLIS, 1998).

Conforme avaliado por Zonta *et al* (2011), a secagem de alimentos pode ocorrer de forma natural ou artificial. Na secagem natural, a fonte de calor será a própria radiação solar, onde o alimento é exposto a uma temperatura média entre 35 a 40 °C, e uma baixa umidade relativa. Já o processo artificial utiliza-se equipamentos específicos, os secadores, que realizam a remoção da umidade do alimento, por meio de um controle de temperatura e velocidade do ar.

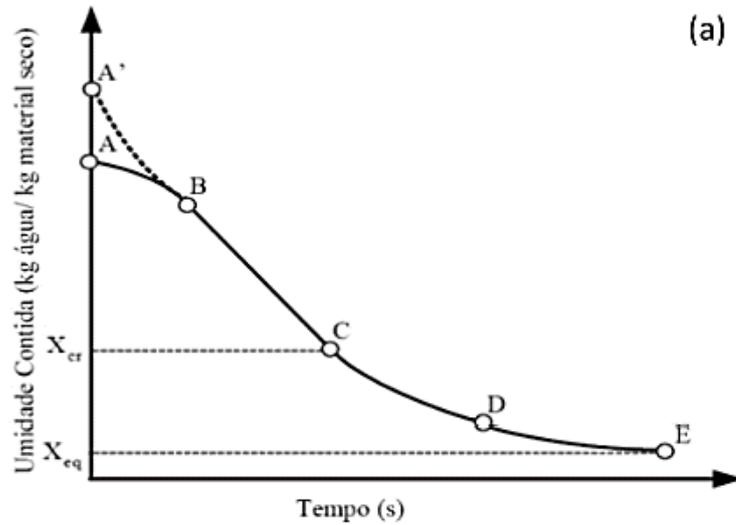
Na secagem artificial, a operação pode acontecer de forma contínua, onde o produto úmido e seco são colocados e retirados continuamente, ou ocorrer sob um regime em batelada, em que a remoção de umidade acontece por um período de tempo já predeterminado (CELESTINO, 2010).

3.2.1. Cinética de Secagem

Diante da necessidade de obter informações acerca do processo de secagem, faz-se uso do estudo de sua cinética, a fim de avaliar o comportamento da transferência de massa e de calor entre o fluido e o objeto de interesse. Mediante a isso, é possível identificar parâmetros essenciais do processo, como a velocidade de secagem, coeficientes termodinâmicos, que contribuem na determinação da eficiência de secadores, os quais podem ser estipulados a partir das curvas de cinética e sua modelagem matemática (GEANKOPLIS, 1998).

Posto isso, tem-se na Figura 2 o comportamento básico da cinética de secagem, em que mostra a relação à umidade em base seca de um determinado produto em função do tempo.

Figura 2: Relação entre a umidade em base seca em função do tempo de secagem



Fonte: FOUST *et al*, 1982.

Com respeito à Figura 2, tem-se que os caminhos AB e A'B representam o período em que dar-se início ao processo de secagem, sendo a temperatura da amostra inferior à do fluido, no caminho AB, e o contrário é representado por A'B (FOUST *et al*, 1982).

Ainda segundo o autor, em BC tem-se o período em que a taxa de secagem é constante, sendo o processo controlado pelas condições do transporte de massa e de calor. Os caminhos CD e DE indicam que o processo ocorre com taxa decrescente, onde em CD começa haver escassez líquida na superfície, sendo o ponto D caracterizado pela ausência de região com umidade saturada, caracterizado pelo protagonismo do transporte difusivo. Ao fim do processo, em DE, tem-se o momento de equilíbrio do sólido com o ambiente, onde define-se que a taxa de secagem é nula, e há o fim da secagem.

Para garantir êxito processual, bem como uma assertividade de dados para que sejam utilizados em simulações e dimensionamento de secadores, é fundamental que a secagem ocorra em camada delgada. Por ser um estudo já difundido na área, e devido ao seu sucesso diversos trabalhos na literatura empregam o uso da secagem em camada delgada como Merlo (2020), D'avila *et al* (2019).

A camada delgada pode ser definida como sendo uma “fatia” do leito que está sendo posto para estudo de cinética. Para que seja obtido sucesso durante o processo de secagem, a camada deverá ser suficientemente fina a ponto ser considerada como

uma partícula do leite. Tal exigência é necessária para garantir que o tempo de residência do fluido no interior da mesma seja curto o suficiente, atestando-se que não haja alterações nos parâmetros, como a velocidade e temperatura, em relação seu valor inicial (CARLESSO *et al*, 2005).

Posto isso, tem-se como artifício ao processo de secagem a utilização da modelagem matemática, a qual descreve, em forma de modelos, a cinética de secagem, o comportamento das taxas de umidade em relação ao tempo, bem como a quantificação dos parâmetros tidos como essenciais durante o procedimento (CAVALCANTE *et al.*, 2020) Os principais modelos estão dispostos na Tabela 1:

Tabela 1: Modelos matemáticos de predição de secagem

Modelo	Equação
Lewis	$XR = \exp(-K * t)$ (4)
Page	$XR = \exp(-K * t^n)$ (5)
Henderson e Pabis	$XR = a * \exp(-K * t)$ (6)
Midilli	$XR = a * \exp(-K * t) + b * t$ (7)

Fonte: Adaptada de CAVALCANTE *et al*, 2020

Em que a, b, c, k, n e são parâmetros dos modelos, e t o tempo de secagem em minutos.

3.2.2 Secadores

Bem como mencionado anteriormente, os secadores são equipamento responsáveis pelo processo da secagem artificial. Devido a sua vasta aplicabilidade, há uma gama de equipamentos disponíveis, sendo cada um deles qualificados para cada tipo de operação (batelada ou contínua), produto a ser trabalhado, e também a forma a qual o calor será transferido, podendo ser por condução, convecção ou radiação (MARTINS *et al*, 2020).

Sob a perspectiva de Celestisno (2010), dentre os secadores utilizados na secagem de alimentos, destacam-se: secador de bandeja, secador rotativo e secador híbrido (convectivo-infravermelho).

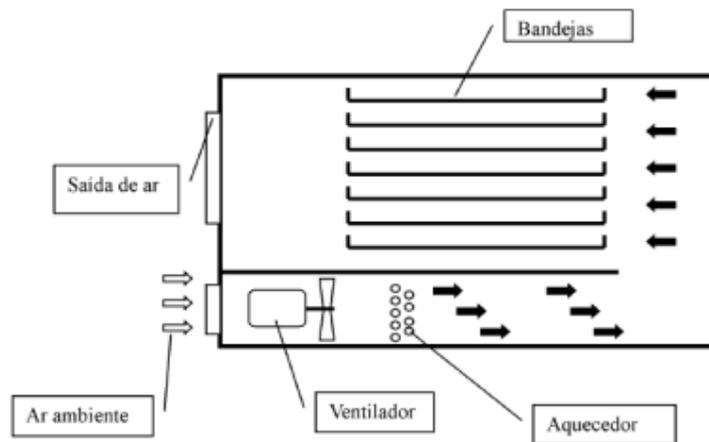
3.2.2.1. Secador de Bandeja

O secador de bandeja é um importante equipamento de secagem convectiva, o qual opera sob um regime em batelada, tendo uma de suas principais características o baixo custo de operação e manutenção. Com relação à configuração do secador, tem-se dispostos telas metálicas, as quais podem ser fixas, fazendo com que a

corrente de ar passe sobre as mesmas, ou móveis, onde há a possibilidade do deslocamento durante o processo (ARAGÃO, 2007).

O secador do tipo bandeja, com telas fixas pode ser melhor visto a partir da Figura 3.

Figura 3: Secador do tipo bandeja com telas fixas



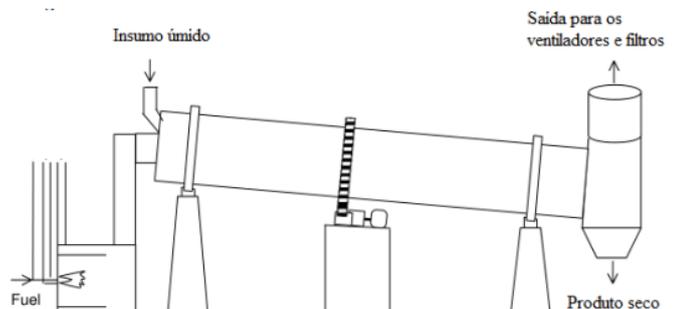
Fonte: MELONI, 2003.

3.2.2.2. Secador rotativo

Na atualidade essa é a classe de secadores convectivos mais utilizados na indústria, destacando-se não somente na rede alimentícia, mas também em diversos outros segmentos industriais, como por exemplo na área farmacêutica e na produção de cimentos. Dentre os motivos para sua escolha, ressalta-se o fato de que sua operação oferecer um alto nível de mistura das partículas, fazendo com os produtos possuam um elevado grau de uniformidade (PERAZZINI, 2011).

O mesmo pode ser visualizado a partir da Figura 4, disposta abaixo:

Figura 4: Desenho representativo de um secador rotativo



Fonte: KROKIDA; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2006.

3.2.2.3. Secador híbrido

Tendo em vista a preocupação com a conservação de alimentos, e a utilização dos secadores aliados a esse propósito, tem-se a secagem convectiva como uma das protagonistas desse cenário.

O funcionamento dos secadores convectivos é baseado no conceito de troca de calor por convecção, onde a corrente de ar quente, fornecida de maneira artificial, carrega a umidade superficial contida no alimento (SANTOS JÚNIOR, 2021). Após toda umidade superficial ser removida, a umidade contida no interior do leito é levada para superfície, dando continuidade ao processo (SILVA,2021).

Segundo Andrade, Prado e Marques (2019), o efeito combinado da secagem convectiva com algum outro tipo de secador é uma forma eficiente para se adquirir bons resultados de preservação de alimentos, sendo a radiação infravermelha (IR) uma fonte que vem sendo bastante difundida.

Para Nascimento, Biagi, Oliveira (2015), a secagem por infravermelho consiste em utilizar ondas de comprimento no intervalo entre 2,5 a 2000 μm a fim de promover a remoção da umidade contida em determinado objeto.

Segundo Rabello *et al* (2021), a IR torna-se eficiente visto que a energia é transferida diretamente para superfície do objeto, sem que haja a necessidade de transferência de calor através do ar circundante. Dessa forma, não há um aquecimento total do fluido que aquece a amostra de estudo, contribuindo em uma economia energética.

De acordo com Borel (2014), a secagem por IR surge como alternativa do processo, trazendo diversas vantagens, as quais destacam-se: redução de gastos energéticos, minimização significativa da umidade, permanência de parâmetros físico-químico dos alimentos, diminuição do tempo de operação, constância na qualidade do produto. Mostrando-se assim, uma fonte alternativa e viável do processo.

Sendo assim, vem sendo recorrente a utilização da mesma na secagem de alimentos, como: secagem do tomate (CELMA *et al.*, 2009), banana (RABELLO *et al.*, 2021), abacaxi (TAN *et al.*, 2001).

3.3. Transferência de Calor

Remetendo-se às definições aceitas na atualidade, segundo a Termodinâmica, a transferência de energia entre corpos é definida como calor, tendo como ponto de interesse de estudo a quantidade de calor transferida (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Ainda sob a ótica dos autores, a área que estuda a taxa e a forma como o calor se propaga é conhecida como Transferência de Calor, tendo como exigência básica a diferença de temperatura entre os sistemas, ou seja, a força motriz.

A transferência de calor pode ocorrer de três maneiras distintas: condução, convecção e radiação (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1996).

3.3.1. Condução

De acordo com Incropera e Dewitt (1990), a condução pode ser definida como sendo a transferência de energia que ocorre de forma intramolecular, ou seja, por meio das agitações entre as moléculas, indo dá mais energética a menos. Além disso, ressalta-se que a energia é propagada por todo o sistema, podendo ocorrer em meios fluidos ou sólidos.

A modelagem matemática da condução é proposta pela Lei de Fourier da Condução Térmica, como mostrado abaixo:

$$Q_{condução} = -k * A * \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Onde k é a condutividade térmica, que representa a capacidade de um determinado material conduzir calor, A é a área em que ocorre o processo e dT/dx representa o gradiente de temperatura.

O valor negativo da Equação 9 garante que o calor seja transferido da região mais quente para a de menor temperatura (SCHMIDT; HENDERSON; WOLGEMUTH, 1996).

3.3.2. Convecção

A convecção é a transferência de energia na forma calor entre uma superfície sólida e um fluido em movimento. O transporte de energia dar-se por meio da combinação de condução e movimentação de fluido. (McCABE; SMITH; HARRIOTT, 2007).

O processo pode ocorrer de forma forçada, onde o fluido é forçado a escoar pela superfície sólida, sendo realizado por equipamentos como secadores e bombas.

Além da convecção forçada, há também a natural, onde o movimento do fluido é ocasionado pela diferença de massa específica. Devido à diferença de temperatura, há uma desigualdade de massa específica dentro do sistema, e conseqüentemente ocasionando uma mudança no volume do fluido. A fração aquecida torna-se mais leve, gerando sua ascensão, enquanto que a outra porção que continua fria desça, fazendo com que o calor seja transferido dentro do meio (McCABE; SMITCHE; HARRIOTT, 2007).

Ainda segundo os autores, deve-se salientar que, somente a diferença de temperatura não é suficiente para que haja a convecção, visto que, sendo a variação muito pequena, a tendência é que ocorra a transferência por condução. Para que a convecção seja garantida, a temperatura entre as porções deverá ser suficiente para alcançar o ponto crítico, o que acarreta em uma instabilidade no fluido, causando assim a movimentação das correntes.

A matemática do mecanismo é mostrada a partir da Lei de Newton de Resfriamento:

$$Q_{convecção} = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad (10)$$

Em que h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s a área da superfície, onde acontece a transferência de calor, T_s é a temperatura em que a superfície se encontra, e T_{∞} é a temperatura longe da superfície.

3.3.3. Radiação

Posto a ideia trazida por Barrera *et al* (2021), a radiação pode ser definida como sendo a forma pela qual a matéria emite energia através de ondas eletromagnéticas. Para isso, não é necessário um meio de propagação, uma vez que, os sólidos e fluidos emitem e absorvem a energia através do próprio corpo de matéria.

A modelagem matemática da radiação é definida por meio da Lei de Stefan-Boltzmann, descrita pela Equação 11:

$$Q_{\text{radiação}} = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{\text{circ}}^4) \quad (11)$$

Em que ε refere-se à emissividade da superfície, T_s representa a temperatura da superfície onde ocorre o mecanismo, e T_{circ} , a temperatura da superfície maior. Há também a constante de Stefan- Boltzmann, σ , equivalente a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{w/m}^2\text{k}^4$.

3.4 Transferência de Massa

Assim como a Transferência de Calor, o estudo sobre o transporte da matéria é essencial para o entendimento de assuntos já abordados, como a secagem, e de temas que serão vistos posteriormente, a respeito do escoamento de fluidos.

A transferência de massa pode ser entendida como sendo a ciência que estuda o movimento de um ou mais componentes em um sistema, sendo o meio propagador sólido ou fluido.

O entendimento à Transferência de Massa torna-se mais assimilável devido às analogias feitas com o Transporte de Calor. Assim como já mostrado, para que haja o transporte de energia em forma de calor é necessário que haja uma diferença de temperatura. Para que a massa esteja em trânsito, é preciso que a força motriz seja representada pelo gradiente de concentração, o qual permite que o componente em questão se desloque da região mais concentrada para a de menor concentração (MERCALI, 2009).

Pela perspectiva de Mercali (2009), a transferência da matéria pode acontecer por meio da convecção ou da difusão.

O transporte convectivo dá-se através da transferência de massa entre uma dada superfície, de área A_s , e os componentes presentes no fluido contido nela. Essa movimentação pode ocorrer de forma natural ou forçada.

A convecção é tida como natural quando o gradiente de concentração ocorre devido à aparição de uma diferença de massa. Em contrapartida, quando há a presença de alguma força externa, como por exemplo, o uso de uma bomba, a convecção torna-se forçada. A taxa convectiva ($\dot{m}_{\text{convecção}}$) pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{m}_{\text{convecção}} = h * A_s * (C_s - C_\infty) \quad (12)$$

Onde, h representa o coeficiente de transferência de massa, e $C_s - C_\infty$ o gradiente de concentração.

O outro mecanismo do Transporte de Matéria ocorre por difusão, onde a transferência decorrerá por meio das interações intermoleculares, análogo à condução, na Transferência de Calor (CREMASCO, 2012) A representatividade matemática é feita por meio das Leis de Fick, segundo a Equação 13:

$$J_{A,z} = -D_{a,b} * \left(\frac{dC_a}{dz} \right) \quad (13)$$

Em $J_{A,z}$ é o fluxo de difusão molecular da substância A, na direção de z, e C_a sua concentração. $D_{a,b}$ diz respeito ao coeficiente difusivo da espécie A no meio B.

A Primeira Lei de Fick pode ser definida por meio da força motriz que age no meio, ou seja, a diferença de concentração, que se desloca do meio de maior concentração para o de menor.

Além disso, Fick contribui com mais teorias na Transferência de Massa, sendo sua segunda lei baseada na distribuição da matéria no tempo e no espaço, representada da seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{a,b} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (14)$$

Para o caso em que o coeficiente de difusão não seja dependente da concentração de A, em outras palavras, independa da posição, a 2ª Lei de Fick pode ser enunciada da seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{a,b} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (15)$$

3.5 Mecânica dos Fluidos

Sob a perspectiva de Munson, Young e Okiishi (1997), diversas são as características para definir-se um fluido, sendo uma delas a capacidade de

deformação do mesmo. Quando aplicado a uma determinada força por unidade de área, ou seja, a tensão de cisalhamento, os fluidos possuem a capacidade de deformação contínua, diferentemente dos sólidos, que se deformam, mas sem a aptidão de escoar.

Sabendo que os fluidos são caracterizados por sua capacidade de escoamento, torna-se necessário uma classificação com relação à deformação dos mesmos, surgindo assim o conceito de fluidos newtonianos e não newtonianos.

Os fluidos newtonianos são aqueles em que a tensão de cisalhamento e a deformação sofrida pelo fluido são diretamente proporcionais, além do fato da viscosidade dinâmica, μ , independe da taxa de deformação, tendo como exemplo o ar (GOTSCHLICH, 2011). Em contrapartida, tem-se os fluidos não newtonianos, cuja característica de linearidade entre a força de cisalhamento e a taxa de deformação não é aplicada (GEANKOPLIS, 1998).

3.6 Turbulência

Outra definição muito importante ao trabalhar-se com fluidos é a relação entre seu escoamento e o meio ao qual está inserido. Para isso, tem-se um coeficiente adimensional que trata da relação entre as forças de inércia e viscosas do movimento dos fluidos, o Número de Reynolds (Re), o qual possui o seguinte equacionamento:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (16)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, v sua velocidade, D o diâmetro do meio escoante, e μ a viscosidade dinâmica do mesmo.

Do ponto de vista de Fox, McDonald e Pritchard (2014), o coeficiente em questão pode ser utilizado como forma de classificação dos movimentos de fluidos devido aos efeitos ou não da viscosidade sob o mesmo. Entretanto, segundo o próprio Reynolds, a turbulência de um escoamento não está ligada diretamente ao valor do coeficiente, mas sim dos efeitos gerados pelo escoamento do fluido (RANGEL, 2019).

Ainda sob a perspectiva do autor sobre escoamento turbulento, a instabilidade do movimento pode ser explicada devido à superioridade das forças viscosas em relação às de inércia, caracterizado por altos valores de Reynolds, sendo superiores a valores críticos.

Quando o escoamento ocorre de forma linear, em que o fluido acompanha a direção do duto, de forma paralela, a uma baixa velocidade, sem que haja a formação de vórtices, diz que há a prevalência das forças inerciais do movimento, o que qualifica o escoamento como laminar, sendo o número de Reynolds inferior ao valor crítico (DÍAZ; BAÑOL, 2015). Ainda para os autores, quando começa a haver agitações no escoamento laminar, iniciando-se à formação de vórtices, ao atingir a velocidade crítica, tem-se o conhecido regime transitório.

3.7 Fluidodinâmica computacional (CFD)

Sob a perspectiva de Versteeg e Malalasekra (2007), a Fluidodinâmica Computacional representa uma análise de processos envolvendo o fluido e seus mecanismos com base em simulações computacionais. Ou seja, através de ferramentas mais tecnológicas, é possível observar e prever os fenômenos que estão ocorrendo.

A *Computational Fluid Dynamics (CFD)* surge como uma aliada aos estudos tradicionais da área, destacando-se por sua interface gráfica e acurácia dos resultados, o que a torna essencial nas esferas indústrias e de ensino (FERNANDES; MOREIRA, 2019).

Segundo Lorenzoni (2022) para a resolução de problemas via CFD, três etapas devem ser seguidas: pré-processamento, processamento, e pós processamento.

Ainda sob a ótica do autor, no pré-processamento ocorre a geração do domínio computacional, a geometria, e também onde haverá a discretização do mesmo em pequenos volumes ou elementos de controle, gerando assim a malha. Além disso, é nesse estágio em que são definidos os parâmetros e condições de contorno do fluido a ser trabalhado.

A etapa seguinte, processamento, é onde haverá a solução das equações algébricas obtidas na discretização da malha, por meio de *solvers*, sendo utilizados métodos iterativos para tais resoluções (AMARAL, 2017).

Para Souza *et al.* (2022) o pós-processamento é onde haverá a extração dos resultados obtidos nas simulações, sendo exibidos por meio de interfaces gráficas, tabelas, que ajudam no entendimento de todo o processo. Ainda segundo os autores,

dentre os softwares mais utilizados para a análise dos resultados, pode-se citar o Paraview.

3.8 Navier-Stokes

As Equações de Navier-Stokes são empregadas a fluidos Newtonianos, tendo a aplicabilidade de três princípios básicos para sua funcionalidade: a conservação de massa, conhecida mais como equação da continuidade; a lei da viscosidade de Newton; e a segunda lei de Newton para o contínuo (NOBRE, 2021).

Tendo o equacionamento matemático descrito abaixo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \rho * v \quad (17)$$

Na equação da continuidade (17), ρ representa a massa específica do fluido, t o tempo, e v a velocidade do mesmo.

A Lei de Viscosidade de Newton traz uma relação entre a tensão de cisalhamento, sendo a viscosidade do fluido utilizada como constante de proporcionalidade, podendo ser vista a seguinte:

$$\tau_{x,y} = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (18)$$

Onde $\tau_{x,y}$ é a tensão cisalhante e $\frac{du_x}{dy}$ a taxa de cisalhamento.

Para um fluido incompressível e com viscosidade constante, a Equação de Navier-Stokes pode ser definida como:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v = -\nabla \rho * v \quad (19)$$

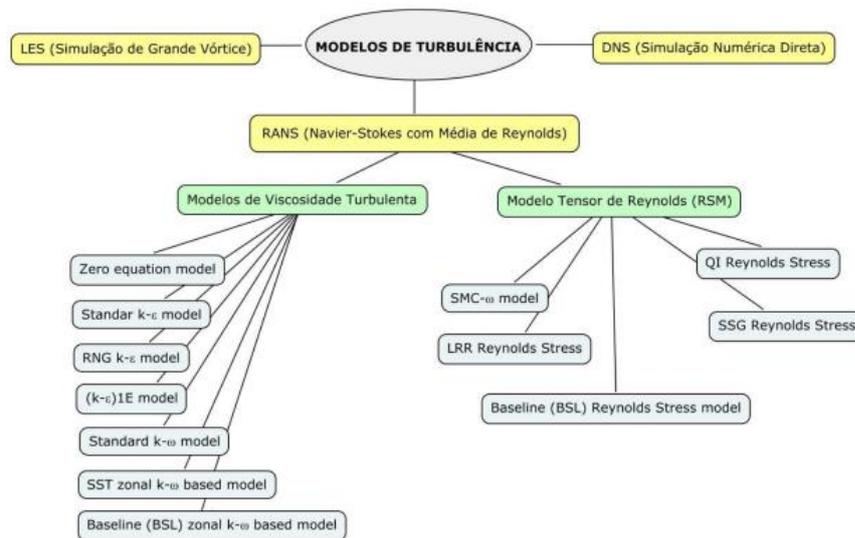
3.9 Modelos de Turbulência

Ao trabalhar-se com fluidos, diversas características necessitam ser consideradas para as resoluções dos equacionamentos, e ao trabalhar-se com CFD, os modelos de turbulência surgem como auxiliares para tais soluções.

Os modelos podem ser: *Direct Numerical Simulation (DNS)*, *Large Eddy Simulation (LES)* e *Raynold Average Navier-Stokes (RANS)*. Em que cada um deles

distingue-se pelas características do fluido trabalhado, como também seu escoamento, além da disponibilidade de tempo de simulação e poder computacional (HANSRAJ, 2019).

Figura 5: Modelos de Turbulências



Fonte: VERGEL, 2013.

3.9.1. DNS

Ainda segundo Hansraj (2019), o modelo DNS é utilizado para geometrias menores, visto que o mesmo necessita de um grande refinamento das malhas, o que requer um grande custo computacional e temporal.

Nesse modelo, as equações de Navier-Stokes são discretizadas diretamente e resolvidas numericamente, sem a necessidade de uma modelagem matemática. Mediante a isso, faz-se a necessidade de um grande refinamento da malha, sendo pelo mesmo motivo o fato de o modelo não ser amplamente difundido.

3.9.2. LES

O modelo de *Large Eddy Simulation (LES)*, como o próprio nome já diz, remete-se a grandes escalas. Nesse caso, os turbilhões são resolvidos numericamente, contando com um menor passo de tempo e escalas menores, *subgrid-scales*.

Em comparação com o *DNS*, o modelo *LES* necessita de um custo computacional menor, entretanto ainda é considerado uma opção onerosa, visto a demanda de malhas bem refinadas e os pequenos passos de tempo (WILCOX, 2016).

3.9.3. RANS

Por fim, tem-se o modelo de *Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)*, sendo a opção de melhor custo computacional, visto que o mesmo se baseia na aplicação das médias de Reynolds nas equações de Navier-Stokes (HANSRAJ, 2019).

Mesmo não tendo o mesmo refinamento, qualidade e acurácia de resultados ao comparar-se com os modelos de *LES* e *DNS*, *RANS* é o mais aplicável aos problemas de engenharia (HANSRAJ, 2019).

Para a resolução de problemas de escoamento utilizando *RANS*, são utilizados alguns tipos de modelos, que se distinguem pela quantidade de equações, sendo eles: modelo $k-\epsilon$, modelo $k-\epsilon$ Standart, modelo $k-\omega$

O modelo $k-\epsilon$ é o mais simples dentre os mencionados, caracterizado por ser o mais utilizado no âmbito industrial devido a sua geração de informações sobre o escoamento, sem a necessidade de um grande custo computacional (ROCHA, 2019).

Esse modelo é definido através da resolução de problemas de escoamento livre, longe das paredes, por meio das equações de energia cinética turbulenta (κ) e da taxa de dissipação de energia turbulenta (ϵ) (ROCHA, 2019).

Para utilização do modelo algumas características do fluido devem ser consideradas, como o fato do escoamento ser totalmente turbulento, além da viscosidade molecular não afetar o mesmo (ANSYS Fluent Theory Guide, 2020). Através de suas equações de energia cinética e sua taxa de dissipação, algumas modificações foram feitas, surgindo o modelo $k - \epsilon$ Standart, sendo válido apenas para escoamento totalmente turbulento.

As equações representativas da energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação, dos modelos citados acima, podem ser vistas através das equações 20 e 21 respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial(x_i)}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial(x_j)} \left[\left(\mu + \frac{\mu_k}{\partial(\sigma_k)} \right) \frac{\partial k}{\partial(x_j)} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial(x_i)}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial(x_j)} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\partial(\sigma_\epsilon)} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial(x_j)} \right] + C_{1\epsilon} * \frac{\epsilon}{k} * (G_k + C_{3\epsilon} * G_b) - C_{2\epsilon} * \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (21)$$

Onde G_k e G_B são a energia cinética com relação ao gradiente de velocidade e a energia cinética relacionada à flutuabilidade, respectivamente. Algumas constantes são importantes para o entendimento e utilização das equações acima, como é o caso dos valores de σ_ϵ , σ_k , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, os quais equivalem, respetivamente: 1.3, 1.0, 1.44; 1.92, 0.09.

Um outro modelo já difundido é o $k-\omega$, em que se diferencia dos citados anteriormente pela utilização da energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação ou frequência turbulenta (ω), onde ω possui a seguinte relação com os valores de k e ϵ :

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (22)$$

Assim como o modelo de $k-\epsilon$, o de $k-\omega$ foi adaptado, surgindo assim o modelo $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), o qual apresenta a mesma equação do modelo $k-\epsilon$, tendo como mudança apenas o aparecimento de ω , assim como mostrado na Equação 23:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial(x_i)}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial(x_j)}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial\omega}{\partial(x_j)}\right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (23)$$

3.10 Discretização

A maior parte dos problemas de engenharia são descritos matematicamente por equações diferenciais parciais (EDP), as quais, em sua maioria, não possuem uma solução analítica, necessitando assim de artifícios para sua resolução (MALISKA, 2017).

Segundo a concepção de Patankar (1980), a discretização consiste em substituir as EDP's por equações algébricas, gerando o resultado de interesse em cada ponto discreto do domínio de interesse. Para isso, é necessária uma quantidade grande de pontos discretos, para a minimização de erros. Dentre os principais métodos numéricos de discretização, destacam-se: Método dos Volumes Finitos (MVF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF).

O Método das Diferenças Finitas realiza a discretização do domínio em um número finito de pontos, realizando a aproximação das equações diferenciais através

da diferença finitas das funções (MARQUES, 2022). O Método dos Elementos Finitos é caracterizado pela discretização dos domínios em cada elemento de controle, sendo mais aplicado para o estudo dos sólidos.

Para a Mecânica dos Fluidos, o Método dos Volumes Finitos é um dos mais utilizados, visto que sua discretização ocorre diretamente no domínio de interesse. Seu processo ocorre inicialmente integrando as equações do fluido em cada ponto do volume de domínio, e posteriormente, essas integrais são transformadas em equações algébricas, aplicadas em cada elemento de volume da malha (MOUKALLED *et al.*, 2016)

O equacionamento matemático da discretização pode ser visto na Equação 24 (Patankar, 1980):

$$\phi = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + a_n * x^n \quad (24)$$

Em que ϕ é o valor da equação algébrica em um ponto específico da malha, e esse valor varia de acordo com a distância x entre os pontos. Para isso, utiliza-se como artifício os Métodos de Discretização para determinar os coeficientes da equação ($a_0, a_1 \dots a_n$) e o valor de x .

Para a Mecânica dos Fluidos, o Método dos Volumes Finitos é um dos mais utilizados, visto que sua discretização ocorre diretamente no domínio de interesse. Seu processo ocorre inicialmente integrando as equações do fluido em cada ponto do volume de domínio, e posteriormente, essas integrais são transformadas em equações algébricas, aplicadas em cada volume de controle da malha (MOUKALLED *et al.*, 2016).

3.11 Malha Computacional

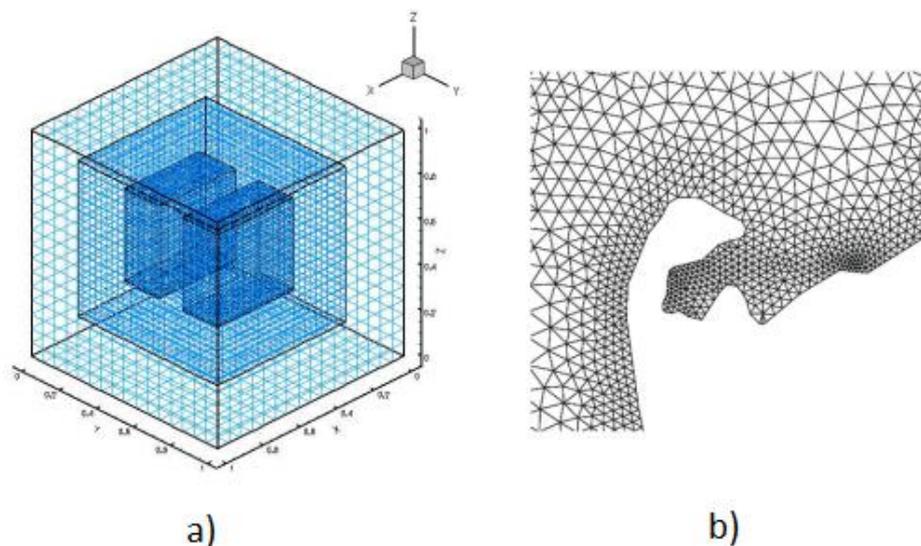
Como citado anteriormente, para aplicação dos Métodos dos Volumes Finitos, é necessário que haja a discretização da geometria. Para aplicação das técnicas, é fundamental compreender e distinguir os diferentes tipos de malhas, podendo ser classificadas em: estruturadas e não estruturadas.

Pode-se assim dizer que, a malha estruturada, Figura 6, apresenta uma regularidade na distribuição de seus pontos, sendo estes, caracterizados por possuírem o mesmo tamanho e número de vizinhos. Dentre as vantagens dessa

malha, pode-se citar o fator da facilidade da simulação, visto que, a conectividade entre os vizinhos facilita a operação. Em contrapartida, esse mesmo raciocínio é classificado também como um ponto negativo, uma vez que, geometrias mais complexas não conseguem ser discretizadas (SANTOS, 2022).

Sendo assim, as malhas não estruturadas, Figura 6, nascem devido à necessidade da discretização de geometrias mais complexas, onde os volumes de controle não apresentam necessariamente o mesmo tamanho nem a mesma quantidade de vizinhos. Como desvantagem, destaca-se a complexidade das simulações, o que necessita de uma memória computacional maior (DIAS, 2021).

Figura 6: Malhas computacionais: a) malha estruturada; b) malha não estruturada



Fonte: NÓS, 2007

Por ser uma das etapas de validade da simulação, as malhas computacionais carecem de uma boa qualidade, sendo listado abaixo alguns pontos que ajuda a metrificar esses atributos:

- **Quantidade de elementos:** quanto maior a quantidade de elementos da malha, mais refinada será a mesma.
- **Razão de aspecto:** traz referência à razão entre a maior e a menor aresta da célula do elemento. Quanto menor a razão de aspecto, maior a qualidade da malha, sendo 1 o valor de aspecto ideal.
- **Skewness:** representa o grau de achatamento da malha, sendo calculada a partir da distância do vetor que liga os elementos e o centro das células. Em

outras palavras, quanto mais próximo de 0 for o grau de achatamento, mais próxima do ideal estará a malha.

- **Ortogonalidade:** esse parâmetro refere-se ao ângulo entre as faces dos elementos, metrificando-se assim o quão próximo está ao ângulo ideal, sendo 90° para faces quadrilaterais, e 60° para triangulares.

3.12 OpenFOAM

Tendo em vista a vasta aplicabilidade dos estudos computacionais, o *OpenFoam* torna-se um destaque nas aplicações de CFD. O *Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM)*, é um *software* gratuito e de código aberto que utiliza a linguagem de programação C++, e que utiliza o Método dos Volumes Finitos para solução de equações diferenciais (MOUKALLED *et al.*, 2016).

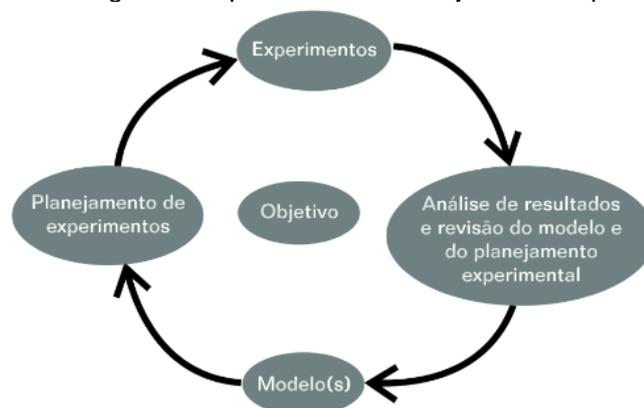
Para Silva (2020), o *OpenFOAM* é composto pela união de duas temáticas básicas da engenharia, a mecânica dos fluidos e os métodos numéricos, tendo em sua estrutura básica os *solvers*, responsáveis pelas resoluções das problemática designadas na etapa do pré-processamento e processamento.

3.13 Planejamento fatorial

Sob a perspectiva de Calado e Montgomery (2003), para qualquer trabalho desenvolvido, é de suma importância a validação das variáveis de interesse e a relevância das mesmas no estudo.

Sendo assim, o Planejamento experimental fatorial surge como sendo uma técnica que permite aperfeiçoar processos e identificar as variáveis que influenciam o mesmo, por meio de modelos matemáticos representantes do processo.

Figura 7: Fluxograma esquemático do Planejamento Experimental



Fonte: CALADO; MONTEGOMERY, 2003.

3.13.1. Planejamento Fatorial 3^k

No Planejamento Fatorial 3^k os fatores dos experimentos são representados por 3 níveis: -1, 0 e +1. O nível 0, ponto central, representa a média dos demais níveis. Por apresentar uma quantidade maior de níveis, comparando-se com o planejamento 2^k , o Planejamento fatorial 3^k requer uma quantidade maior de experimentos, em que a quantidade de experimentos é dita pela relação entre os fatores (3 fatores) e os fatores (k) (BERGER; MAURER; CELLI, 2018);

Segundo Calado e Montgomery (2003) a escolha do Planejamento fatorial 3^k dar-se pela necessidade da investigação das relações lineares e não lineares do fator na resposta de estudo.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada no trabalho foi dividida em duas etapas. Inicialmente aplicou-se os estudos da cinética de secagem dos dois secadores posto em análise, convectivo e híbrido (convectivo-infravermelho), a fim de obter o equipamento que detivesse a maior eficiência.

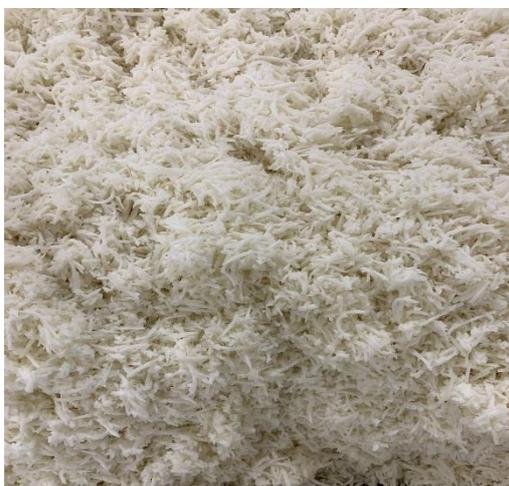
Posteriormente, fez-se uso das técnicas de CFD, com o intuito de otimizar as posições de entrada e saída de fluxo de ar do secador definido na etapa da secagem. Para esse propósito, teve-se como base, a metodologia prevista por Versteeg e Malalaseka (2007).

4.1 Cinética de Secagem

O processo experimental foi realizado no Laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Nesse estudo inicial, foram efetuadas as seguintes atividades nos secadores convectivo e híbrido: secagem e averiguação da massa da polpa do coco, análise das umidades em base úmida e seca e determinação da cinética de secagem.

O primeiro objeto de estudo utilizado foi a polpa do coco, obtido de uma indústria alimentícia de beneficiamento de coco, pertencente ao estado de Alagoas. Para realizar uma secagem mais eficiente, a polpa do coco foi utilizada em forma flocos, ou seja, “tiras” de coco, as quais não apresentavam adição de compostos químicos e/ou aditivos.

Figura 8: Polpa do coco utilizado para secagem



Fonte: AUTORA, 2023.

A operação de secagem da polpa coco foi realizada em um secador convectivo, presente no laboratório, e em um secador híbrido, o qual foi desenvolvido no próprio laboratório. Para a realização dessa etapa algumas condições iniciais de operação precisaram ser estabelecidas, para posteriormente ser possível determinar a cinética de secagem.

O emprego da secagem convectiva já é bastante difundido nas esferas industriais e acadêmicas, sendo então utilizada como fonte comparativa nesse trabalho. O secador convencional, Figura 9, da marca *Hexasystems*, operou sob um fluxo de ar vertical, com a entrada de calor posicionada na parte inferior, e a saída na região superior. O experimento foi desenvolvido com uma velocidade de fluxo de ar de 1m/s e uma temperatura com *SetPoint* de 55°C.

O secador híbrido utilizado foi construído no próprio laboratório, e sua fonte energética é proveniente de dois processos de secagem, convectiva e infravermelha. A convecção torna-se presente através do posicionamento de *fans de cooler*, como visto na Figura 9.

As *fans* são responsáveis pelo fluxo de entrada e saída de ar no secador híbrido, sendo uma delas responsável pelo fornecimento de ar para o interior do equipamento, e duas para a saída do mesmo.

Figura 9: *Fans de cooler* utilizada como fonte de calor no secador híbrido



Fonte: GARRTE, 2022.

A secagem por infravermelho ocorre através da presença de uma lâmpada de secagem infravermelha, Figura 10, disposta na região superior do secador.

Figura 10: Lâmpada com radiação infravermelha



Fonte: MARTINS, 2021.

Algumas características de operação do secador convencional prevaleceram no secador híbrido, sendo elas o regime de operação, a velocidade do ar, e o *SetPoint* de temperatura. Além disso, foi necessário determinar a corrente elétrica da lâmpada, sendo medida em 1 A.

A secagem da polpa do coco foi realizada em triplicata, em ambos os secadores. As pesagens ocorreram inicialmente com um intervalo de tempo de 5 minutos. Após atingir os primeiros 30 minutos de processo, aumentou-se o intervalo para 10 minutos a cada pesagem, e 20 minutos após uma hora de processo, totalizando 100 minutos para a estabilização da massa. Após decorrer um período de 100 minutos, obteve-se a massa de equilíbrio (m_{eq}).

Para determinação da massa em sólido seco (m_{ss}) do objeto de estudo, empregou-se como metodologia as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (1985), onde o alimento deve ser levado a uma estufa, a uma temperatura de 105°C, e um intervalo de tempo de 24h.

A fim de determinar o teor de água do produto, XR, em cada tempo experimental, utilizou-se inicialmente como auxílio matemático da Equação 24 da massa de sólido seco, aplicada para cada uma das triplicatas.

$$m_{ss} = \frac{m_0}{1 + X_{bs}} \quad (24)$$

Em que m_0 corresponde à massa inicial da polpa do coco, equivalente a 10g. Com os valores da massa de sólido seco, e com o auxílio da Equação 25, tem-se o teor de água em um dado tempo (X_t).

$$X_t = \frac{m_t - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (25)$$

Onde m_t é o valor da massa medida em determinado tempo do processo.

A partir da umidade em cada ponto (X_t), é possível definir, por meio da Equação 3, a razão do teor de umidade (XR), a qual apresenta um papel fundamental para obtenção da curva de cinética de secagem, e do modelo aplicada a mesma.

Além disso, com os valores de XR para cada tempo de secagem, utilizou-se o *software* Statistica para determinar a equação da cinética de secagem.

4.2 CFD

A segunda etapa do trabalho foi realizada utilizando as ferramentas da fluidodinâmica computacional, com o intuito de otimizar o secador dito como mais eficiente, a partir da escolha da melhor posição de entrada e saída de fluxo de ar do secador. Para tal, foi empregado, como referência, a metodologia adotada por Versteeg e Malalaseka (2007) para problemas de CFD.

Segundo os autores essa metodologia é dividida em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. O pré-processamento consiste em gerar a malha de interesse de estudo, seguido pelo processamento, onde ocorrerá a discretização matemática das equações, e por fim, o pós-processamento, etapa de análise dos resultados obtidos durante toda a execução.

4.2.1. Pré-processamento

Como citado anteriormente, o pré-processamento serviu como base para os estágios seguintes, sendo necessário realizar inicialmente o planejamento estatístico dos experimentos, e posteriormente a confecção da geometria, bem como sua discretização, a qual fornece a malha computacional.

4.2.2.1. Planejamento experimental

O Planejamento experimental serviu como base para as simulações, visto que por meio dele foi estabelecido as diferentes possibilidades de entrada e saída de fluxo de ar no secador. Para isso, foi adotado o Planejamento Fatorial 3^K , representado por 3 níveis, e k igual a 4 fatores, totalizando 81 experimentos.

Os fatores são representados pelas alocações de entrada e saída do fluxo de ar no secador: entrada em relação ao eixo x (X_{1E}), entrada em relação ao eixo y (Y_{1E}), e as saídas em relação ao eixo y (Y_{1S} e Y_{2S}). Os níveis são os limites permitidos para a variação das posições de entrada e saída de fluxo de ar no secador. A Tabela 2 mostra a relação adotada no planejamento para as posições do secador.

Tabela 2: Fatores e níveis adotados no Planejamento Fatorial 3^K

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
X_{1E}	0,34	0,5	0,66
Y_{1E}	0,34	0,5	0,66
Y_{1S}	0,34	0,5	0,66
Y_{2S}	0,34	0,5	0,66

Fonte: AUTORA, 2023

As posições do secador variam em torno de 34, 50 e 66% do valor originário da dimensão do secador da seguinte forma:

- Entrada (X_{1E}): varia sua posição em relação ao comprimento do secador;
- Entrada (Y_{1E}): varia sua posição em relação à altura do secador;
- Saídas (Y_{1S} e Y_{2S}): variam suas posições em relação à altura do secador;

Disposto isso, tem-se na Tabela 3, possíveis variações de alocação de entrada e saída de ar no secador.

Tabela 3: Planejamento Fatorial 3^K para criação de geometrias do secador híbrido com variáveis de entrada e saída de fluxo ar

Posição	X _{1E} (m)	Y _{1E} (m)	Y _{1S} (m)	Y _{2S} (m)	Posição	X _{1E} (m)	Y _{1E} (m)	Y _{1S} (m)	Y _{2S} (m)
1	0,1122	0,0918	0,0918	0,0918	42	0,1650	0,1350	0,1350	0,1782
2	0,1122	0,0918	0,0918	0,1350	43	0,1650	0,1350	0,1782	0,0918
3	0,1122	0,0918	0,0918	0,1782	44	0,1650	0,1350	0,1782	0,1350
4	0,1122	0,0918	0,1350	0,0918	45	0,1650	0,1350	0,1782	0,1782
5	0,1122	0,0918	0,1350	0,1350	46	0,1650	0,1782	0,0918	0,0918
6	0,1122	0,0918	0,1350	0,1782	47	0,1650	0,1782	0,0918	0,1350
7	0,1122	0,0918	0,1782	0,0918	48	0,1650	0,1782	0,0918	0,1782
8	0,1122	0,0918	0,1782	0,1350	49	0,1650	0,1782	0,1350	0,0918
9	0,1122	0,0918	0,1782	0,1782	50	0,1650	0,1782	0,1350	0,1350
10	0,1122	0,1350	0,0918	0,0918	51	0,1650	0,1782	0,1350	0,1782
11	0,1122	0,1350	0,0918	0,1350	52	0,1650	0,1782	0,1782	0,0918
12	0,1122	0,1350	0,0918	0,1782	53	0,1650	0,1782	0,1782	0,1350
13	0,1122	0,1350	0,1350	0,0918	54	0,1650	0,1782	0,1782	0,1782
15	0,1122	0,1350	0,1350	0,1782	56	0,2178	0,0918	0,0918	0,1350
16	0,1122	0,1350	0,1782	0,0918	57	0,2178	0,0918	0,0918	0,1782
17	0,1122	0,1350	0,1782	0,1350	58	0,2178	0,0918	0,1350	0,0918
18	0,1122	0,1350	0,1782	0,1782	59	0,2178	0,0918	0,1350	0,1350
19	0,1122	0,1782	0,0918	0,0918	60	0,2178	0,0918	0,1350	0,1782
20	0,1122	0,1782	0,0918	0,1350	61	0,2178	0,0918	0,1782	0,0918
21	0,1122	0,1782	0,0918	0,1782	62	0,2178	0,0918	0,1782	0,1350
22	0,1122	0,1782	0,1350	0,0918	63	0,2178	0,0918	0,1782	0,1782
23	0,1122	0,1782	0,1350	0,1350	64	0,2178	0,1350	0,0918	0,0918
24	0,1122	0,1782	0,1350	0,1782	65	0,2178	0,1350	0,0918	0,1350
25	0,1122	0,1782	0,1782	0,0918	66	0,2178	0,1350	0,0918	0,1782
26	0,1122	0,1782	0,1782	0,1350	67	0,2178	0,1350	0,1350	0,0918
27	0,1122	0,1782	0,1782	0,1782	68	0,2178	0,1350	0,1350	0,1350
28	0,1650	0,0918	0,0918	0,0918	69	0,2178	0,1350	0,1350	0,1782
29	0,1650	0,0918	0,0918	0,1350	70	0,2178	0,1350	0,1782	0,0918
30	0,1650	0,0918	0,0918	0,1782	71	0,2178	0,1350	0,1782	0,1350
31	0,1650	0,0918	0,1350	0,0918	72	0,2178	0,1350	0,1782	0,1782

Posição	X_{1E} (m)	Y_{1E} (m)	Y_{1S} (m)	Y_{2S} (m)	Posição	X_{1E} (m)	Y_{1E} (m)	Y_{1S} (m)	Y_{2S} (m)
32	0,1650	0,0918	0,1350	0,1350	73	0,2178	0,1782	0,0918	0,0918
33	0,1650	0,0918	0,1350	0,1782	74	0,2178	0,1782	0,0918	0,1350
34	0,1650	0,0918	0,1782	0,0918	75	0,2178	0,1782	0,0918	0,1782
35	0,1650	0,0918	0,1782	0,1350	76	0,2178	0,1782	0,1350	0,0918
36	0,1650	0,0918	0,1782	0,1782	77	0,2178	0,1782	0,1350	0,1350
37	0,1650	0,1350	0,0918	0,0918	78	0,2178	0,1782	0,1350	0,1782
38	0,1650	0,1350	0,0918	0,1350	79	0,2178	0,1782	0,1782	0,0918
39	0,1650	0,1350	0,0918	0,1782	80	0,2178	0,1782	0,1782	0,1350
40	0,1650	0,1350	0,1350	0,0918	81	0,2178	0,1782	0,1782	0,1782
41	0,1650	0,1350	0,1350	0,1350					

Fonte: AUTORA, 2023

A Tabela 4 consta as dimensões do secador híbrido.

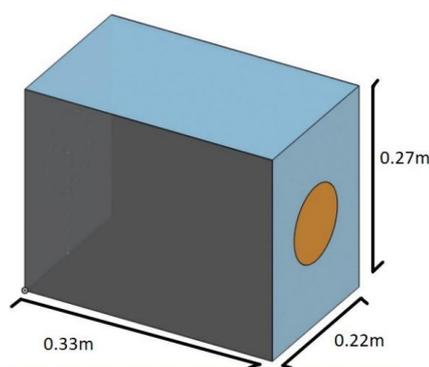
Tabela 4: Dimensões do Secador Híbrido

Dimensão do secador	Valor de medida (m)
Comprimento	0,33
Altura	0,27
Largura	0,20

Fonte: AUTORA, 2023

A entrada varia sua posição com relação ao comprimento do secador (X_{1E}) e com a altura (Y_{1E}), e as saídas alteram em relação somente a altura (Y_{1S} e Y_{2S}). As dimensões originárias do secador híbrido podem ser melhores visualizadas a partir da Figura 11, mostrada abaixo:

Figura 11: Dimensões do secador híbrido



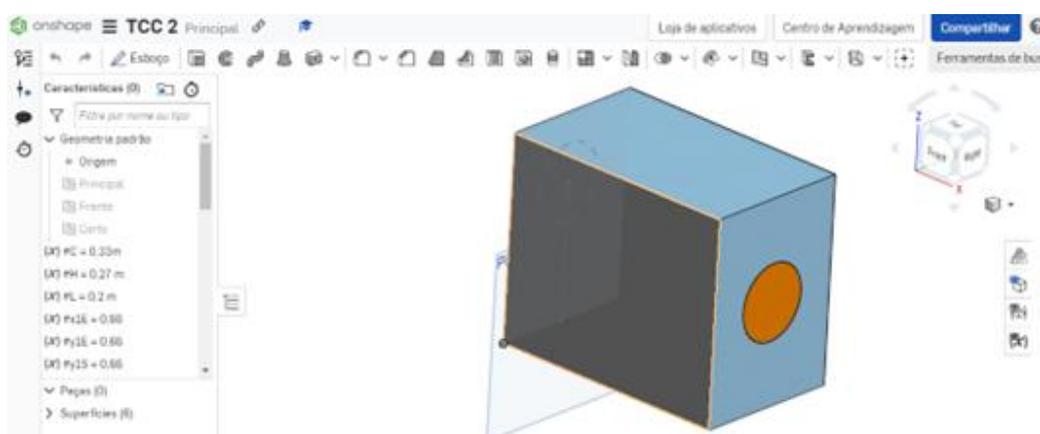
Fonte: AUTORA, 2023.

4.2.2.2. Geometria e Malha computacional

Para o desenvolvimento da geometria, foi utilizado o *software Onshape*. O posicionamento geométrico das entradas e saídas do fluxo ar deu-se a partir do planejamento experimental e das dimensões do secador, sendo os valores dispostos nas Tabelas 3 e 4 respectivamente.

A partir da Figura 12, é possível compreender a geometria básica que foi utilizada no trabalho, gerada por meio do *software* citado.

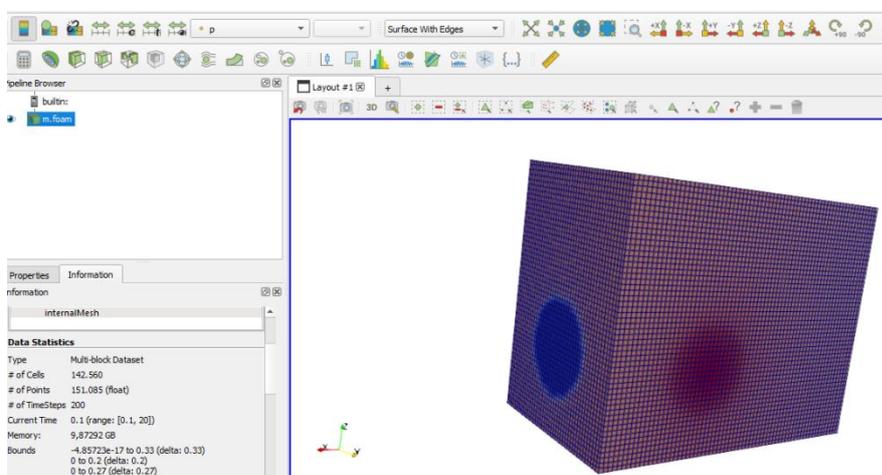
Figura 12: Geometria do secador híbrido criada no Onshape



Fonte: AUTORA, 2023.

A malha foi gerada com auxílio do *software OpenFoam*, utilizando o comando *blockMesh*. Para garantir uma qualidade de malha, aplicou-se o comando *snappyHexMesh*, o que caracterizou uma malha estruturada com cerca de 142.560 células. A configuração da malha pode ser vista na Figura 13:

Figura 13: Malha computacional do secador híbrido



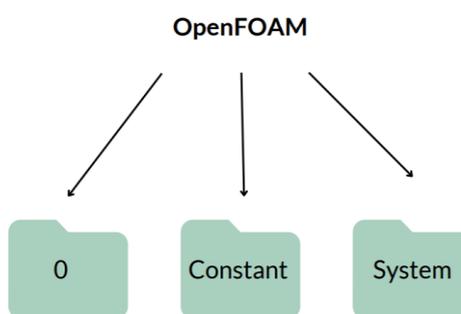
Fonte: AUTORA, 2023.

4.2.2. Processamento

A etapa do processamento é onde ocorre a discretização do equacionamento matemático em cada volume de controle da malha gerada, sendo utilizada as ferramentas do próprio *OpenFOAM*.

Segundo Silva (2020), a estrutura básica do *OpenFOAM* é constituída por 3 pastas, que são criadas à medida que a simulação está sendo desenvolvida, sendo elas “0”, *system* e *constant*, conforme apresentadas na Figura 14:

Figura 14: Fluxograma representativo do *OpenFOAM*



Fonte: Adaptada de SILVA, 2020.

A pasta “0” é o diretório onde contém informações acerca das condições iniciais e de contorno da problemática desenvolvida, enquanto que o diretório *constant* representa as características da malha e também informações físicas sobre o fluido e o escoamento. A pasta *system*, a qual apresenta referências sobre simulação, como passo do tempo e solucionadores das equações (FAVERO, 2009).

Após a geração da malha, deu-se início de fato ao processo de simulação, sendo utilizado o solucionador *simpleFoam* para simulação numérica, com um tempo de resolução de 20s. A escolha do *solver* deu-se por ser executado em estado estacionário, regime turbulento, além da característica do fluido incompressível. Em consequência ao aspecto turbulento do escoamento do fluido, optou-se pelo modelo de Turbulência de RANS $k-\epsilon$.

Tabela 5: Características das simulações computacionais realizadas no OpenFOAM

Parâmetro	Valor
Δt (s)	0,1
Taxa de dissipação de energia turbulenta (ϵ) (m^2/s^3)	0,0002
Energia cinética turbulenta (K) (m^2/s^2)	0,0006
V (m/s)	1

Fonte: AUTORA, 2023.

4.2.3. Pós- processamento

Teve-se por intuito nessa etapa do trabalho analisar os resultados obtidos durante toda a simulação, sendo utilizado alguns *softwares* para contribuir na assertividade e melhor visualização dos mesmos. No presente trabalho, constou-se com ferramentas auxiliares: *Paraview 5.11* e *Statistica 10*.

O *Paraview* é um *software* de código aberto que auxilia na visualização e análise de resultados, de forma gráfica e interativa. Seu aproveitamento no trabalho deu-se através da visualização acerca do comportamento do fluido a partir das variações das posições geométricas.

O *Statistica* foi utilizado com o intuito de analisar os dados provenientes do *Paraview*, sendo a programação com o papel fundamental de permitir a extração e interpretação dos dados provenientes do *software* de visualização dos resultados.

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados acerca da secagem e das simulações computacionais, bem como as análises a respeito das mesmas. Como mencionado anteriormente, o trabalho foi dividido em duas etapas, sendo assim, os resultados também seguirão a mesma sequência.

Primeiramente, será discutido a respeito das atividades experimentais, e em seguida, será exposto as análises com relação às simulações, afim de obter a otimização do secador escolhido no primeiro estágio.

5.1 Determinação da Razão do teor de água (XR) nos secadores convectivo e híbrido

Após o período de 24h, obteve-se uma massa de 5,1186g, a qual foi considerada como sendo a massa em sólido seco (m_{ss}).

Por intermédio da Equação 1, foi determinada a umidade em base seca, X_{bs} , a qual correspondeu a um valor numérico de 95,37%. As massas da polpa do coco, obtidas durante o período de secagem, estão dispostas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Massas aferidas no secador convectivo à temperatura de 55 °C

Tempo (min)	m_{1t} (g)	m_{2t} (g)	m_{3t} (g)
0	10,0023	9,9841	10,0040
5	8,8092	8,8244	8,8394
10	8,0010	8,3942	8,6470
15	7,5144	7,9381	8,0629
20	7,1620	7,6031	7,7668
25	6,8723	7,3294	7,5007
30	6,6022	7,0817	7,2618
40	6,1596	6,6646	6,8512
50	5,8423	6,3126	6,4855
60	5,7190	6,1688	6,2744
80	5,6166	6,0445	6,1958
100	5,5841	5,8348	5,9086

Fonte: AUTORA, 2023

Tabela 7: Massas aferidas no secador híbrido à temperatura de 55 °C

Tempo (min)	m_{1t} (g)	m_{2t} (g)	m_{3t} (g)
0	9,8972	9,9992	9,9951
5	7,6928	7,8125	8,6185
10	6,6389	6,7137	7,8228
15	5,9931	6,2160	7,2697
20	5,7475	5,9574	6,8606
25	5,6383	5,8375	6,6750
30	5,5789	5,7053	6,5338
40	5,5330	5,7035	6,3824
50	5,5217	5,6896	6,2936
60	5,5049	5,6638	6,1470
80	5,4780	5,6623	6,0882
100	5,4715	5,6346	6,0712

Fonte: AUTORA, 2023

A partir desses dados, e ainda por intermédio da Equação 1, tem-se disposto na Tabela 8 os valores da massa de sólido seco de cada uma das triplicatas nos respectivos secadores:

Tabela 8: Massa de sólido seco obtida nos secadores posto em estudo

Secador	m_{ss1} (g)	m_{ss2} (g)	m_{ss3} (g)
Convectivo	5,1197	5,1105	5,1206
Híbrido	5,0656	5,1182	5,1161

Fonte: AUTORA, 2023

Tem-se na Figura 15 as amostras da polpa do coco após o período de 100 minutos de secagem.

Figura 15: Polpa do coco após o período de secagem de 100 minutos



Fonte: AUTORA, 2023.

A partir desses dados das Tabelas 6, 7 e 8, e por meio da Equação 25, tem-se o teor de umidade das amostras durante o período de 100 minutos, dispostos nas Tabelas 9 e 10:

Tabela 9: Teor de umidade dos experimentos realizados no secador convectivo

Tempo (min)	X ₁ (-)	X ₂ (-)	X ₃ (-)
0	0,9537	0,9537	0,9537
5	0,7206	0,7267	0,7262
10	0,5628	0,6426	0,6535
15	0,4677	0,5533	0,5746
20	0,3989	0,4878	0,5168
25	0,3423	0,4342	0,4648
30	0,2895	0,3857	0,4181
40	0,2031	0,3041	0,3380
50	0,1411	0,2352	0,2665
60	0,1170	0,2071	0,2253
80	0,0970	0,1828	0,2100
100	0,0907	0,1417	0,1539

Fonte: AUTORA, 2023

Tabela 10: Teor de umidade dos experimentos realizados no secador híbrido

Tempo (min)	X ₁ (-)	X ₂ (-)	X ₃ (-)
0	0,9436	0,9537	0,9537
5	0,5131	0,5264	0,6846
10	0,3072	0,3117	0,5291
15	0,1811	0,2145	0,4209
20	0,1331	0,1640	0,3410
25	0,1118	0,1405	0,3047
30	0,1002	0,1147	0,2771
40	0,0912	0,1144	0,2475
50	0,0890	0,1116	0,2302
60	0,0857	0,1066	0,2015
80	0,0805	0,1063	0,1900
100	0,0792	0,1009	0,1867

Fonte: AUTORA, 2023

A partir desses dados, e por intermédio da Equação 3, tem-se então o a razão do teor de água (XR), presentes nas Tabelas 11 e 12:

Tabela 11: Razão do teor de água referente ao secador convectivo

Tempo (min)	XR ₁ (-)	XR ₂ (-)	XR ₃ (-)
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,7300	0,7205	0,7156
10	0,5470	0,6168	0,6247
15	0,4369	0,5069	0,5260
20	0,3571	0,4262	0,4537
25	0,2916	0,3602	0,3888
30	0,2304	0,3005	0,3304
40	0,1303	0,2000	0,2302
50	0,0584	0,1152	0,1409
60	0,0305	0,0805	0,0893
80	0,0074	0,0505	0,0701
100	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: AUTORA, 2023.

Tabela 12: Razão do teor de água referente ao secador híbrido

Tempo (min)	XR ₁ (-)	XR ₂ (-)	XR ₃ (-)
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,5019	0,4990	0,6492
10	0,2638	0,2472	0,4464
15	0,1179	0,1332	0,3054
20	0,0624	0,0740	0,2012
25	0,0377	0,0465	0,1539
30	0,0243	0,0162	0,1179
40	0,0139	0,0158	0,0793
50	0,0113	0,0126	0,0567
60	0,0075	0,0067	0,0193
80	0,0015	0,0063	0,0043
100	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: AUTORA, 2023.

Mediante aos valores de XR, foi realizada a média e desvio padrão dos valores dos três experimentos, referente a cada um dos equipamentos, sendo os resultados observados a partir das Tabelas 13 e 14:

Tabela 13: Média e Desvio Padrão das triplicatas do Secador Convectivo

Tempo (min)	Média (-)	Desvio Padrão (-)
0	1,0000	0,0000
5	0,7220	0,0073
10	0,5962	0,0428
15	0,4899	0,0469
20	0,4123	0,0498
25	0,3468	0,0500
30	0,2871	0,0513
40	0,1868	0,0512
50	0,1048	0,0422
60	0,0668	0,0317
80	0,0427	0,0321
100	0,0000	0,0000

Fonte: AUTORA, 2023

Tabela 14: Média e Desvio Padrão das triplicatas do Secador Híbrido

Tempo (min)	Média (-)	Desvio Padrão (-)
0	1,0000	0,0000
5	0,5500	0,0859
10	0,3191	0,1105
15	0,1855	0,1042
20	0,1125	0,0770
25	0,0794	0,0647
30	0,0528	0,0565
40	0,0363	0,0372
50	0,0269	0,0258
60	0,0112	0,0071
80	0,0040	0,0025
100	0,0000	0,0000

Fonte: AUTORA, 2023

Ao explorar os resultados fornecidos nas Tabelas 9 e 10, as quais contém os teores de umidade medidos em cada tempo do processo, nota-se que o secador híbrido conseguiu remover uma quantidade maior de umidade da polpa do coco, visto que em 100 minutos de processo havia em média cerca de 12,33% de umidade, enquanto que no secador convectivo a média de 12,88%.

Visto que os valores do teor de umidade de ambos os secadores são muito próximos, tal comparação não é suficiente para afirmar com clareza que o secador híbrido é mais eficiente. Entretanto, ao analisar os valores da razão do teor de água em 80 minutos de processo de secagem de cada um dos equipamentos, nota-se uma superioridade do secador híbrido, visto que o mesmo apresentou como razão do teor de água na polpa do coco um valor médio de 0,40%, enquanto que o XR do secador convectivo, no mesmo intervalo de tempo, foi de 4,27%.

Dessa forma, nota-se que a quantidade de água presente na polpa do coco ao fim do processo de secagem do secador híbrido é bastante inferior comparado ao secador convectivo, evidenciando a eficiência da secagem híbrida.

5.2. Determinação da cinética de secagem e do modelo de cinética

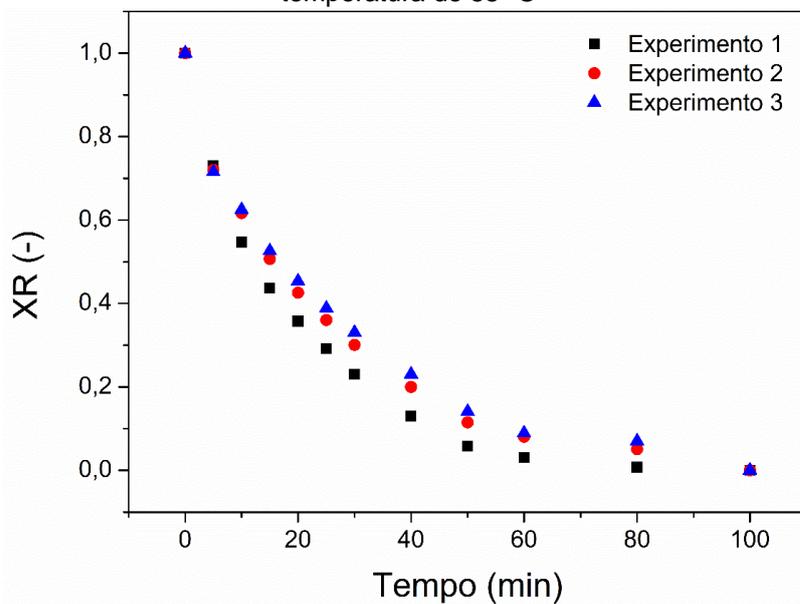
Apesar do secador híbrido já expor resultados superiores no quesito da remoção de umidade, tem-se por finalidade a acurácias desses resultados utilizando a cinética de secagem.

Por meio da cinética de secagem tem-se por finalidade determinar o equipamento mais eficiente para a secagem da polpa do coco, utilizando o critério do alcance da umidade de equilíbrio.

Para tal objetivo, fez-se necessário o estudo das curvas de cinética de secagem, as quais estão dispostas nas Figuras 16 e 17.

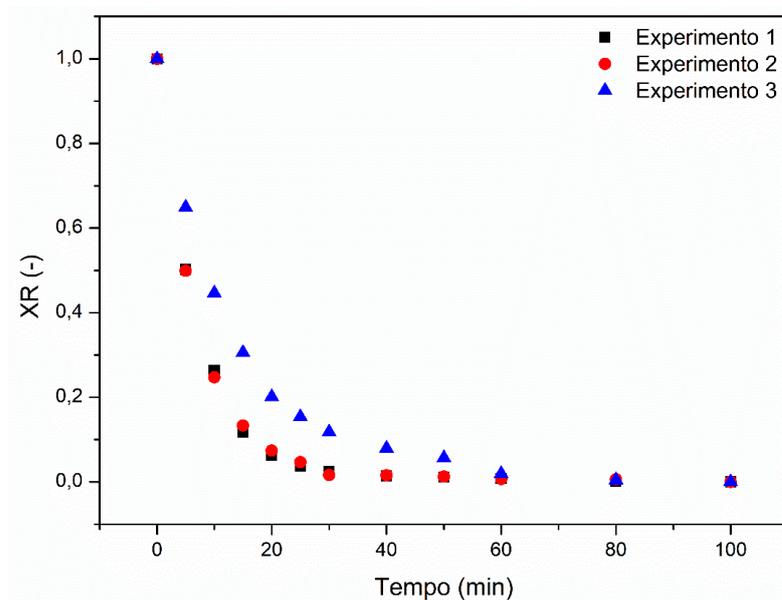
Ao fazer uma alusão das figuras mostradas abaixo, com a Figura 2, a qual representa um modelo típico de cinética de secagem, nota-se que ambos os secadores seguem um perfil de secagem padrão, tendo uma semelhança mais perceptível no secador híbrido.

Figura 16: Relação entre a Razão do teor de água (XR) vs Tempo no secador convectivo à temperatura de 55 °C



Fonte: AUTORA, 2023

Figura 17: Relação entre a Razão do teor de água (XR) vs Tempo do secador híbrido à temperatura de 55 °C



Fonte: AUTORA, 2023

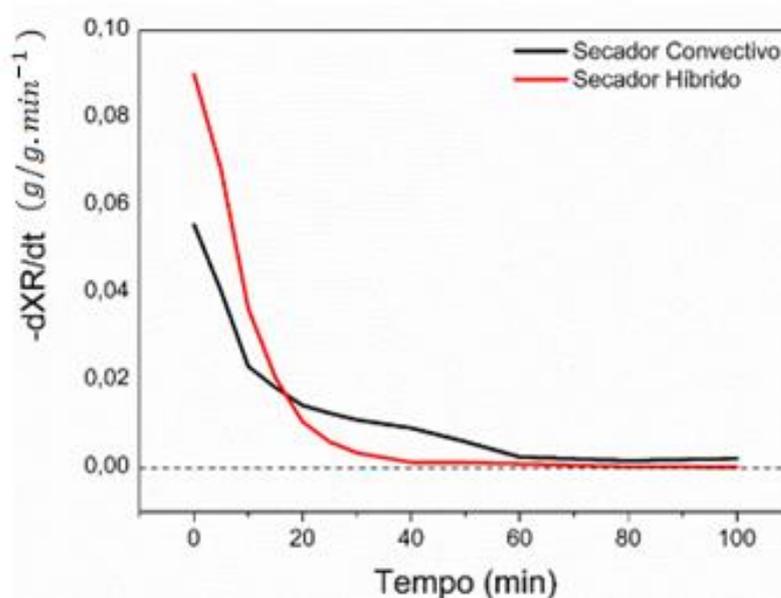
Por meio de tais análises nota-se, conforme esperado, que não há um período de secagem constante nos secadores posto em estudo. Algumas características da polpa do coco justificam a ausência desse período constante, sendo elas: tamanho e formato do corte da polpa do coco, presença de solutos (açúcares), alto teor de gordura, baixa condutividade térmica.

Com o objetivo de analisar e determinar o secador que apresentou a secagem mais eficiente, tomou-se como base as Figuras 16 e 17 a fim de realizar uma análise comparativa entre os processos. Nota-se que nos primeiros 10 minutos de secagem cerca de 70% do teor de umidade da polpa de coco foi removida no secador híbrido, enquanto que no convencional, o valor fica em torno de 40%.

Tendo em vista os assuntos abordados anteriormente, sabe-se que a secagem é comandada por dois processos fundamentais, o transporte convectivo e o difusivo. Inicialmente a operação é controlada pelo transporte convectivo, havendo a remoção superficial do filme líquido que recobre o produto. Por intermédio da Figura 17, nota-se que o transporte convectivo é predominante até os 30 minutos iniciais no secador híbrido. Em contrapartida, no equipamento convencional, após de 1h de processo o transporte de calor ainda é comandado pela convecção.

Em razão a isso, tornou-se necessário uma avaliação mais assertiva com relação à secagem dos alimentos. Posto isso, fez-se necessário a análise da taxa de secagem em relação ao tempo de processo, conforme apresentado na Figura 18:

Figura 18: Relação da taxa de secagem da polpa do coco dos secadores híbrido e convectivo com relação ao tempo de secagem



Fonte: AUTORA, 2023

Tendo em vista o exposto na Figura 18, ao realizar uma análise crítica do processo, percebe-se que a taxa de secagem do equipamento híbrido é maior frente ao convencional. Isso significa dizer que, a remoção da umidade superficial da

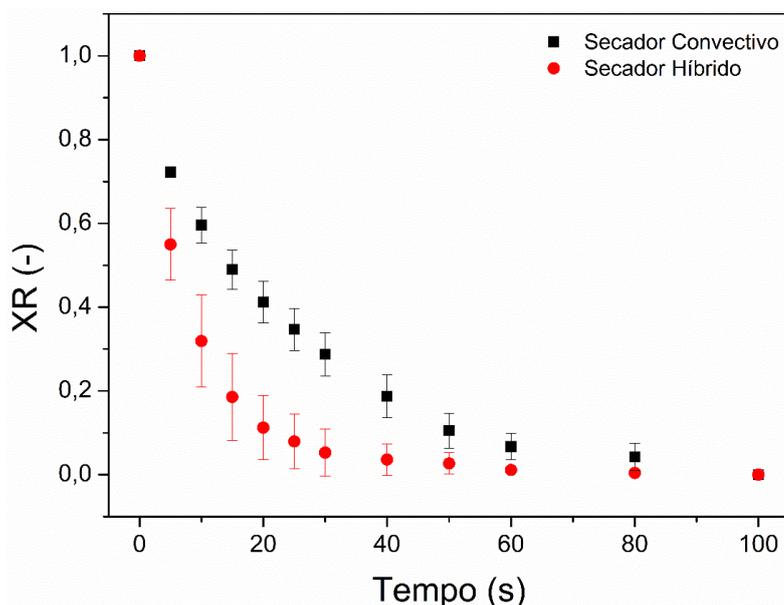
amostra torna-se mais rápida e eficiente. Sendo assim, o transporte difusivo é alcançado antes no secador híbrido.

Posto isso, a partir de 40 minutos de operação, o secador híbrido atinge a condição de equilíbrio, em que a taxa $\frac{dXR}{dt}$ tende a zero, caracterizando-se assim o fim da secagem. No secador convectivo essa circunstância só é alcançada em um período de 60 minutos de secagem.

Ao realizar uma análise comparativa entres os dois secadores, a partir das figuras expostas acima, averígua-se que o secador híbrido é mais eficiente ao utilizar o atingimento de equilíbrio de umidade como critério de avaliação.

Outro critério de avaliação foi realizado ao analisar a média e o desvio padrão de XR com relação ao tempo, a partir das Tabelas 13 e 14. Essa relação pode ser melhor visualizada a partir da Figura 19:

Figura 19: Média \pm desvio padrão de XR dos secadores convectivo e híbrido à temperatura de 55 °C



Fonte: AUTORA, 2023

Através dessa ilustração, nota-se uma diferença de comportamento entre os secadores, onde há a convergência de seus pontos de somente nos pontos de partida, tempo zero, e finalização de processo, em 100 minutos.

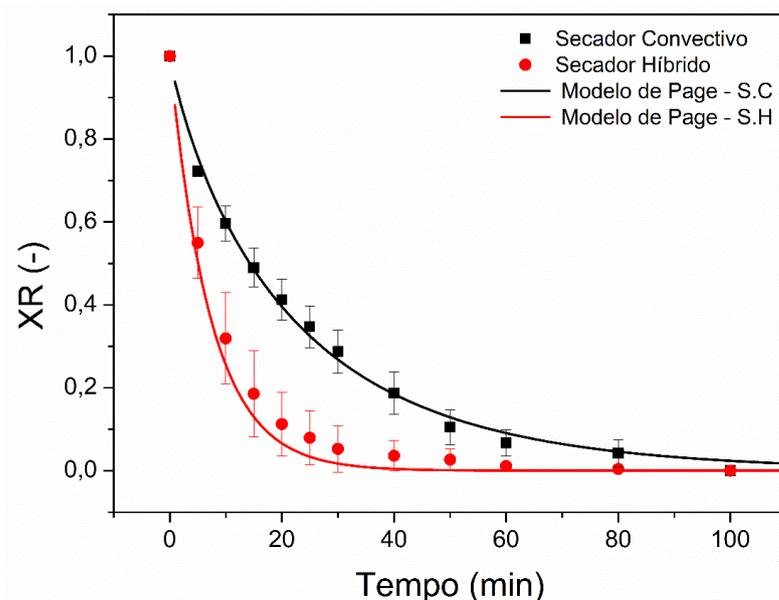
Mais uma vez é possível constatar que o secador híbrido desenvolve um o processo de secagem de forma mais eficaz que o secador convectivo. Ao longo dos 30 minutos iniciais nota-se uma remoção de umidade mais acelerado no secador

híbrido ao comparar-se com o secador convectivo. Posterior a esses 30 minutos, nota-se a ocorrência da inversão dos fatos, em que a medida de dispersão do secador híbrido começa a diminuir, enquanto que a do equipamento convencional aumenta. Sendo assim, após esse período de tempo o secador híbrido começa a e entrar em estado de equilíbrio, enquanto que o secador convectivo permanece em seu processo de secagem.

Uma possível justificativa para o comportamento das curvas da Figura 19, decorre-se do aumento acentuado do desvio padrão no secador híbrido até os primeiros 30 minutos, evidenciando que os dados estão mais distribuídos em torno da média apresentada, o que fisicamente representa uma secagem acelerada nesse intervalo de tempo. Em contrapartida, a partir de 40 minutos começa a haver um decaimento da medida de dispersão, o que representa o início do estado de equilíbrio. Sendo esse processo ocorrendo de forma inversa no equipamento convencional.

Ainda com o intuito de identificar que o secador híbrido apresentou a melhor cinética de secagem, optou-se pelo ajuste das curvas experimentais a partir da utilização da Equação 5 (modelo de Page), podendo ser melhor visualizada através da Figura 20:

Figura 20: Comparação das curvas de cinética de secagem dos secadores convectivo e híbrido com o a curva do modelo de Page



Fonte: AUTORA, 2023

Utilizou-se do Modelo de Page pelas características de ser aplicado em leito poroso, o transporte de calor ser convectivo e o transporte de massa ser difusivo, além do fato do mesmo ser largamente utilizado para simular a secagem de alimentos, como visto por Simal *et al* (2005) na secagem do Kiwi, Doymaz (2004) na secagem da cenoura e Sanjinez-Argandona (2011).

Tendo isso em vista, tomou-se como critério de análise do processo de secagem os valores da constante cinética de (K). Sendo esses dados expostos na Tabela 15:

Tabela 15: Valores de K utilizando o Modelo de Page para simular a cinética de secagem da polpa do coco nos secadores convectivo e híbrido

Secador	K (s ⁻¹)
S.H	0,1392
S.C	0,0693

Fonte: AUTORA, 2023

Visto que a constante de cinética de secagem representa a velocidade a qual a umidade é removida de um determinado produto, tem-se que, quanto maior o seu valor numérico, mais eficiente será o processo. Posto isso, comprova-se novamente que o secador híbrido é mais eficiente que o secador convencional no estudo de secagem da polpa do coco.

Assim como é retratado por Silva (2021), ao trabalhar-se com cinética de secagem é de suma importância atestar a presença da camada delgada do material a ser seco. Como já mencionado, a camada delgada necessita apresentar o comportamento de uma partícula do fluido, ou seja, sua espessura deverá ser fina o suficiente para que o ar percorra por entre as partículas sólidas do leito, em um tempo de residência suficiente para que não haja alterações em seus parâmetros iniciais, como é o caso da razão de umidade.

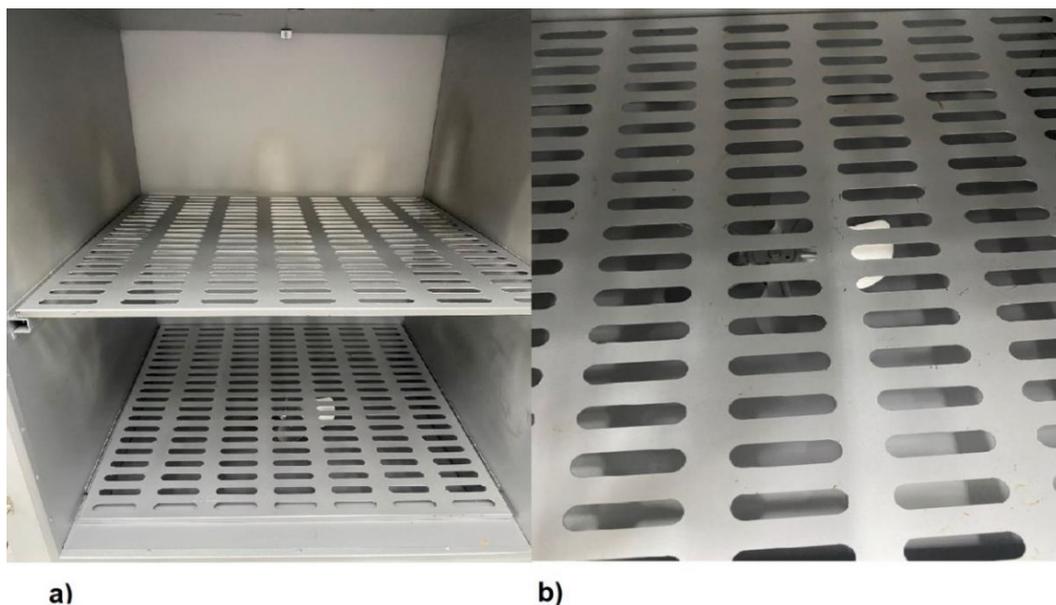
Apesar do secador híbrido apontar uma superioridade no processo de secagem, ao analisar o comportamento da curva do Experimento 3, exibida na Figura 18, percebe-se um comportamento singular, frente as demais. Tal comportamento pode ser justificado em razão a não garantia da presença da camada delgada.

A fim de obter uma justificativa para comportamento de secagem do secador convectivo, um fato de extrema importância foi chamado atenção com relação ao mesmo. Mesmo sendo um equipamento utilizado para fins acadêmicos e industriais,

o dimensionamento da entrada e saída do fluxo calor não foi alocado de maneira a proporcionar um fluxo de ar de maneira otimizada.

A partir da Figura 21, constata-se que a direção do escoamento do ar dentro do secador ocorre de forma perpendicular ao material a ser seco, ou seja, de baixo para cima.

Figura 21: Posicionamento da saída de ar do Secador Convectivo. a) Vista frontal. b) Vista superior



Fonte: AUTORA, 2023.

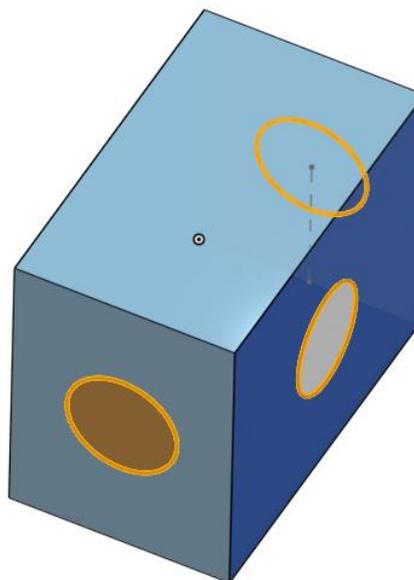
Quando se inicia o processo de escoamento do fluido, o mesmo tem dificuldade de prosseguir seu caminho, visto que há inúmeras barreiras ao longo do percurso, como as barras de ferro dispostas ao longo do secador. No momento que o fluido atinge de fato o produto de interesse, a secagem não consegue ser tão eficiente, visto que no caminho houve uma perda de carga considerável.

Ao aproximar-se dessas regiões sólidas, o fluido tende a movimentar-se com uma velocidade suficientemente próxima a zero. Caso essa estrutura sólida esteja em estado estacionário, assim como é visto na Figura 21, o fluido tende a aderir-se junto a ela, adquirindo uma velocidade nula, sendo esse fenômeno conhecido como condição de não deslizamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Tendo isso em vista, no secador convectivo, o fluido aquecido busca rotas alternativas para dar continuidade ao escoamento, evidenciando sua baixa eficiência frente ao secador híbrido.

Diferentemente, as posições de entrada e saída de calor do secador híbrido são posicionadas de forma perpendicular à locação do material a ser seco, conforme mostrado na Figura 22:

Figura 22: Vista superior do secador híbrido



Fonte: AUTORA, 2023.

Dessa forma, o fluido consegue percorrer todo espaço do secador, gerando sempre uma renovação do ar, o que contribui para que a remoção de umidade mais eficiente.

Apesar de ser um equipamento comercializado para fins industriais, torna-se evidente que o posicionamento do fornecimento de ar aquecido do secador convectivo não foi alocado em um ponto estratégico, o que gerou um comprometimento no seu processo de secagem.

Além da configuração do secador convectivo, um outro ponto pode ser levantado como sendo justificava para inferioridade de sua eficiência. Ao utilizar a secagem convectiva em alimentos, há o risco de formação de uma “crosta” sob a produto, dificultado o processo de transporte convectivo e difusivo, devido a obstrução dos poros do alimento. Esse processo é conhecido como “*Case-hardening*” (JÚNIOR, 2021). Tal fenômeno pode ser visto no secador híbrido, mas de forma menos acentuada, devido a transferência de energia ocorrer também por radiação.

Apesar de ser bastante difundido, possuir um baixo custo de mão de obra, e uma gama de equipamento regidos pela secagem convectiva, foi apresentado que a mesma possui eficiência inferior quando trabalhada sozinha.

Tal fato foi estudado e relatado também por outros autores ao trabalhar com a secagem convectiva e infravermelha. Nathakaranakule *et al.* (2010) mostraram que quando combinadas, a secagem convectiva e infravermelha apresentou resultados satisfatório no processo de remoção de umidade da fruta de longan. Silva (2018) também relata sucesso ao combinar a radiação por infravermelho com a secagem roto-aerada na secagem do resíduo de acerola.

Por conseguinte, o uso combinado da secagem convectiva junto com a infravermelha apresentou resultados satisfatórios na secagem da polpa do coco, mostrando sua eficiência frente ao secador convectivo.

5.3. Otimização das posições do Secador Híbrido

Tendo a ciência de que o secador híbrido foi o mais eficiente no processo de secagem da polpa do coco, teve-se por intuito, na segunda etapa do projeto, a otimização do equipamento.

Ao término das 81 simulações computacionais, foram extraídos os resultados acerca do comportamento do fluido e sua interação no meio ao qual estava inserido. Com o intuito de otimizar as posições de entrada e saída de fluxo ar do equipamento, e também mitigar as zonas de estagnação, utilizou-se como critério de análise a velocidade e o volume ocupado pelo fluido durante o processo de escoamento no secador híbrido. Sendo a velocidade um parâmetro crucial dentro da análise fluidodinâmica, visto que a mesma consegue prever aspectos comportamentais sob o fluido e o meio ao qual está inserido, optou-se pelo seu uso como critério de avaliação. A partir disso, foi possível realizar outras análises sob a simulação, como por exemplo o volume ocupado pelo fluido no intervalo de velocidade escolhido.

Definiu-se também o estudo acerca do volume ocupado pelo fluido como qualificação das posições, pelo fato de que um secador será bem otimizado se em seu interior houver uma circulação máxima do fluido. Isso quer dizer que, a melhor alocação geométrica do equipamento será aquela em que houver um maior volume ocupado pelo fluido, ou seja, menores zonas “mortas”.

De antemão, o ponto mínimo da velocidade ocorreu quando o fluido se encontrava estagnado, ou seja, a velocidade para que houvesse convecção natural. Esse ponto foi escolhido tomando como referência os estudos abordados por Silva (2021), em que define a convecção natural ocorrendo em valores inferiores a 0,3 m/s em um processo de secagem de camada fina. A velocidade máxima alcançada durante o de escoamento foi de 2,45 m/s.

A partir de tais definições, foram obtidos os seguintes resultados, encontrados na Tabela 16, extraídos das simulações com auxílio do *software Paraview* e linguagem de programação *Python*.

A partir desses resultados foi possível realizar a análise do comportamento fluidodinâmico em cada simulação, como consequência da variação das posições de entrada e saída de fluxo ar.

Tabela 16: Velocidade e Volume ocupado pelo fluido referente a cada simulação

Simulação/ Posição	Velocidade (m/s)	Volume (m ³)	Função Objetivo	Simulação	Velocidade (m/s)	Volume (m ³)	Função Objetivo
1	0,5758	0,0148	0,0085	42	0,6121	0,0147	0,0090
2	0,5759	0,0148	0,0085	43	0,5994	0,0147	0,0088
3	0,5817	0,0145	0,0085	44	0,5907	0,0149	0,0088
4	0,5824	0,0147	0,0086	45	0,5991	0,0148	0,0089
5	0,5677	0,0144	0,0082	46	0,6093	0,0155	0,0095
6	0,5707	0,0155	0,0089	47	0,6240	0,0154	0,0096
7	0,6318	0,0115	0,0073	48	0,6265	0,0150	0,0094
8	0,4495	0,0150	0,0067	49	0,5887	0,0153	0,0090
9	0,5773	0,0147	0,0085	50	0,6252	0,0154	0,0096
10	0,5269	0,0139	0,0073	51	0,6367	0,0151	0,0096
11	0,5728	0,0143	0,0082	52	0,5921	0,0151	0,0089
12	0,5657	0,0144	0,0081	53	0,5869	0,0152	0,0089
13	0,5718	0,0141	0,0081	54	0,6002	0,0153	0,0092
14	0,5664	0,0146	0,0083	55	0,6098	0,0147	0,0090
15	0,5743	0,0142	0,0081	56	0,5726	0,0147	0,0084
16	0,5661	0,0143	0,0081	57	0,5671	0,0141	0,0080
17	0,5699	0,0142	0,0081	58	0,5542	0,0149	0,0082

Simulação/ Posição	Velocidade (m/s)	Volume (m ³)	Função Objetivo	Simulação	Velocidade (m/s)	Volume (m ³)	Função Objetivo
18	0,5621	0,0140	0,0078	59	0,5805	0,0147	0,0085
19	0,5717	0,0148	0,0085	60	0,5841	0,0149	0,0087
20	0,5882	0,0150	0,0088	61	0,5799	0,0145	0,0084
21	0,5805	0,0140	0,0081	62	0,5827	0,0149	0,0087
22	0,5500	0,0147	0,0081	63	0,5982	0,0147	0,0088
23	0,5910	0,0151	0,0089	64	0,5854	0,0139	0,0081
24	0,5767	0,0145	0,0084	65	0,5713	0,0142	0,0081
25	0,5597	0,0145	0,0081	66	0,5684	0,0143	0,0081
26	0,5848	0,0153	0,0090	67	0,5686	0,0144	0,0082
27	0,7259	0,0148	0,0107	68	0,5677	0,0144	0,0082
28	0,5712	0,0152	0,0087	69	0,5768	0,0144	0,0083
29	0,6063	0,0152	0,0092	70	0,5668	0,0144	0,0081
30	0,6037	0,0152	0,0092	71	0,5707	0,0142	0,0081
31	0,5958	0,0151	0,0090	72	0,5688	0,0138	0,0079
32	0,6099	0,0155	0,0095	73	0,5710	0,0149	0,0085
33	0,6385	0,0153	0,0098	74	0,5856	0,0147	0,0086
34	0,6234	0,0151	0,0094	75	0,5945	0,0147	0,0087
35	0,5908	0,0153	0,0090	76	0,5800	0,0150	0,0087
36	0,6238	0,0155	0,0097	77	0,5824	0,0147	0,0085
37	0,6285	0,0148	0,0093	78	0,5804	0,0147	0,0086
38	0,6059	0,0150	0,0091	79	0,5779	0,0143	0,0083
39	0,6039	0,0146	0,0088	80	0,5594	0,0148	0,0083
40	0,5873	0,0147	0,0087	81	0,5716	0,0147	0,0084
41	0,5993	0,0146	0,0087				

Fonte: AUTORA, 2023

5.4. Planejamento Experimental

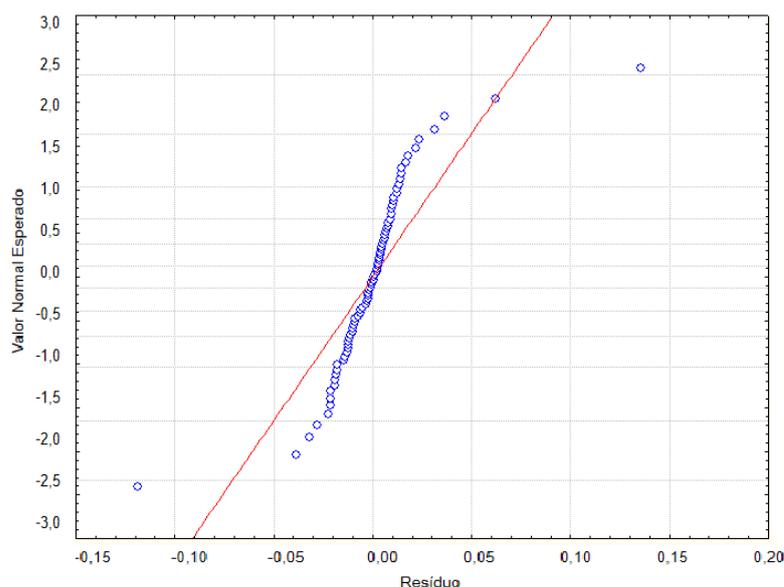
A essência da utilização do software *Statisica*® residia na busca de uma relação matemática que elencasse a maneira como as variáveis independentes, representadas pelas posições de entrada e saída de fluxo de ar, e como as mesmas

exerceriam influência sobre as respostas de interesse, a velocidade de escoamento do fluido dentro do secador e o volume ocupado pelo mesmo.

Sendo assim, tomou-se como base os dados dispostos nas Tabelas 3 e 16 para tal determinação. A partir das Figuras 24 e 25, tem-se as respostas estatística a respeito da relação entre as variáveis postas em estudo.

Em um gráfico de análise da relação do valor normal esperado com o resíduo espera-se um comportamento aleatório dos resíduos ao longo da linha zero, caracterizando uma distribuição normal dos pontos. Tal situação não é vista na Figura 23, onde percebe-se uma tendência da distribuição dos pontos, o que indica a ocorrência de problemas na geração do modelo matemático.

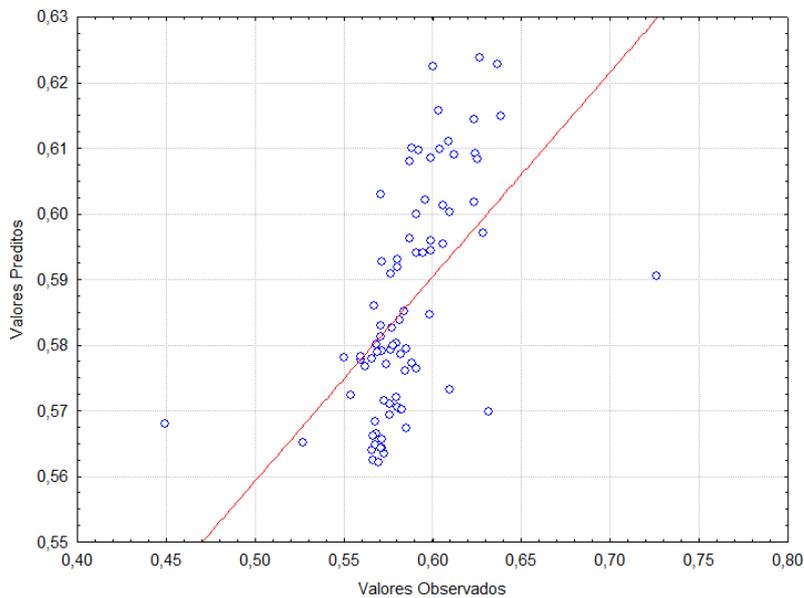
Figura 23: Relação do Valor Normal Esperado e do Resíduo



Fonte: AUTORA, 2023

Para confirmação do resultado, tem-se na Figura 24 uma análise com relação aos valores e os valores observados. Em um cenário ideal, tem-se que os pontos são bem distribuídos, o caracterizando uma relação linear entre x e y. Ou seja, esperava-se que os pontos estivessem bem distribuídos ao longo da normal.

Figura 24: Relação dos Valores Preditos e Observados



Fonte: AUTORA, 2023.

Visto que, as simulações numéricas ocorreram a partir da aplicação do Modelo de Turbulência de RANS $k-\epsilon$, o que qualifica a complexidade do meio, tem-se uma dificuldade ao aplicar um modelo de análise de relação entre as variáveis dependentes e independentes, como é o caso do uso do Planejamento Fatorial 3^k .

Dessa forma, optou-se pela não utilização dos recursos estatísticos para a validação das respostas de otimização de posição, verificando que o uso do *software* traria uma resposta equivocada a respeito da otimização do secador, comprometendo os resultados do trabalho.

5.5. CFD para otimização das Posições do Secador Híbrido

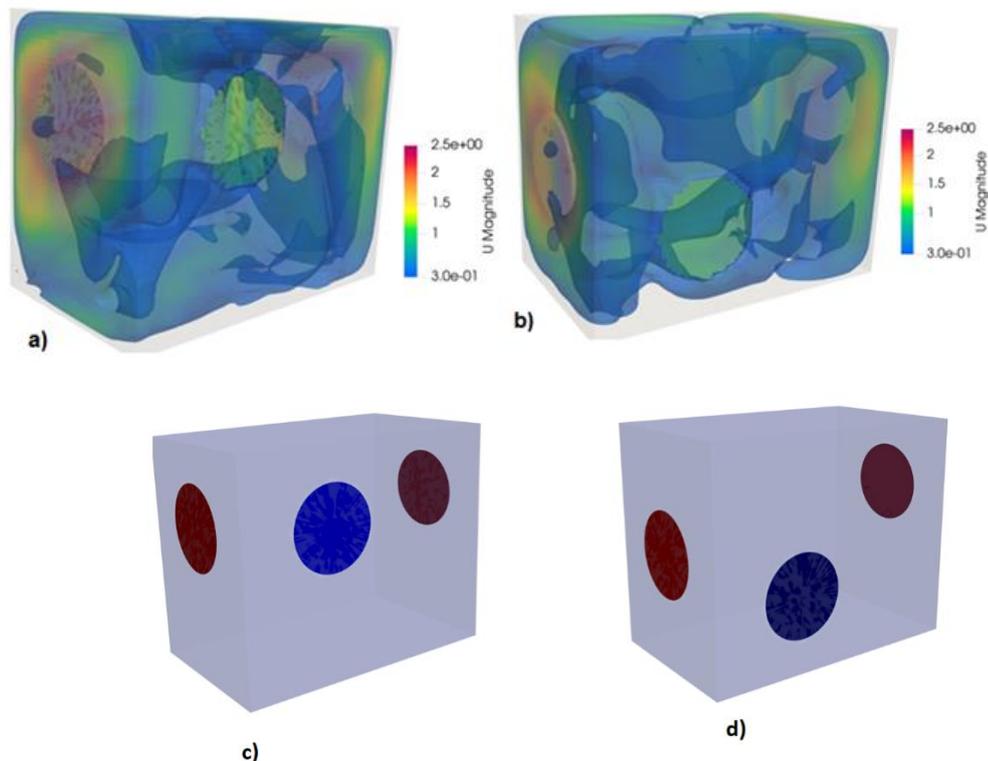
Tendo em vista que planejamento estatístico não pode ser utilizado como estratégia para a otimização, optou-se como critério de escolha a simulação/posição que apresentasse uma maximização da função objetivo. No caso do estudo vigente, a função objetivo, Equação 26, é caracterizada pelo produto dos parâmetros avaliados: velocidade fluidodinâmica e a ocupação volumétrica do fluido.

$$\text{Função objetivo} = \text{volume} * \text{velocidade} \quad (26)$$

Dessa forma, definiu-se que as posições geométricas que trariam uma otimização do secador seriam aquelas que apresentassem uma maximização da função objetiva. Em contrapartida, as piores alocações trariam uma minimização da mesma. Posto isso, através da análise da Tabela 16, tem-se que as simulações 27 e 8 apresentam, respectivamente, os melhores e piores resultados.

Para uma melhor visualização dos resultados acerca das simulações, utilizou-se a ferramenta computacional *Paraview*.

Figura 25: Configuração do secador híbrido em diferentes posições de entrada e saída de calor. a) Simulação 27. b) Simulação 8. c) Secador na posição 27. d) Secador na posição 8



Fonte: AUTORA, 2023

A partir da Figura 25 é possível visualizar o secador híbrido em suas diferentes posições geométricas de entrada e saída de calor, bem como o perfil de velocidade em cada uma delas.

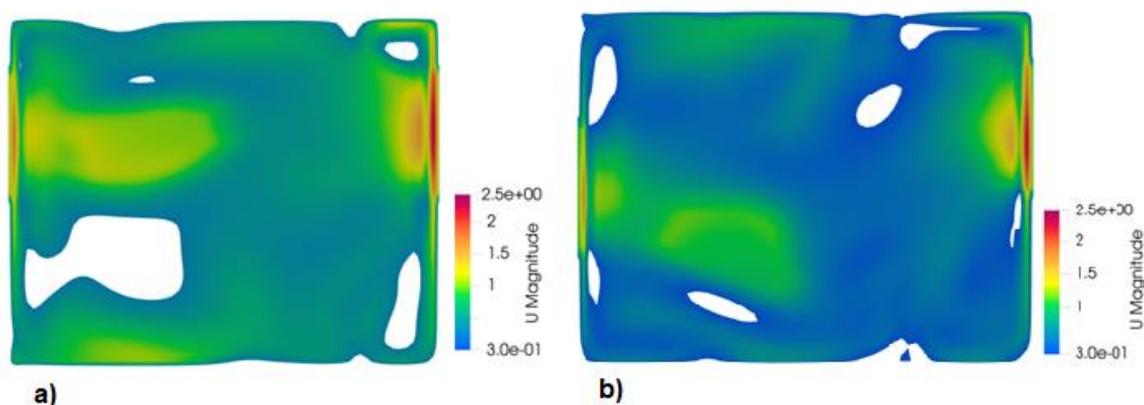
A velocidade de escoamento do fluido foi determinada como sendo 1 m/s, contudo percebeu-se que ao fim da simulação a velocidade máxima atingida foi de 2,45 m/s.

Verifica-se que o aumento da grandeza vetorial se dá principalmente nas regiões de saída de ar, onde há uma acentuação no gradiente de pressão, fazendo com que as moléculas do fluido se tornem mais agitadas, ocorrendo a soma vetorial da velocidade devido ao choque entre as partículas.

Do contrário, tem-se que a região que possui velocidade mínima, próxima a zero, apontada por uma coloração azulada, é vista principalmente nas paredes do equipamento. Visto que o fluido próximo as paredes do secador encontra-se estagnado, o mesmo adquire velocidade nula, sendo essa relação ocorrendo devido à condição de não deslizamento.

A partir da Tabela 16, tem-se que a simulação/posição 27 apresentou uma velocidade superior frente a alcançada pela simulação 8. Tais valores podem ser elucidados por meio da Figura 26:

Figura 26: Visualização da velocidade e do volume do secador híbrido em diferentes posições de entrada e saída de calor. a) Posição 27. b) Posição 8



Fonte: AUTORA, 2023

Ao avaliar a magnitude da velocidade de escoamento tem-se que no cenário de a) mostra um perfil de velocidade mais próximo a 1 m/s, representada por uma coloração mais esverdeada, enquanto que em b) a velocidade se aproxima do mínimo, 0,3 m/s, sendo caracterizada por um tom mais azul.

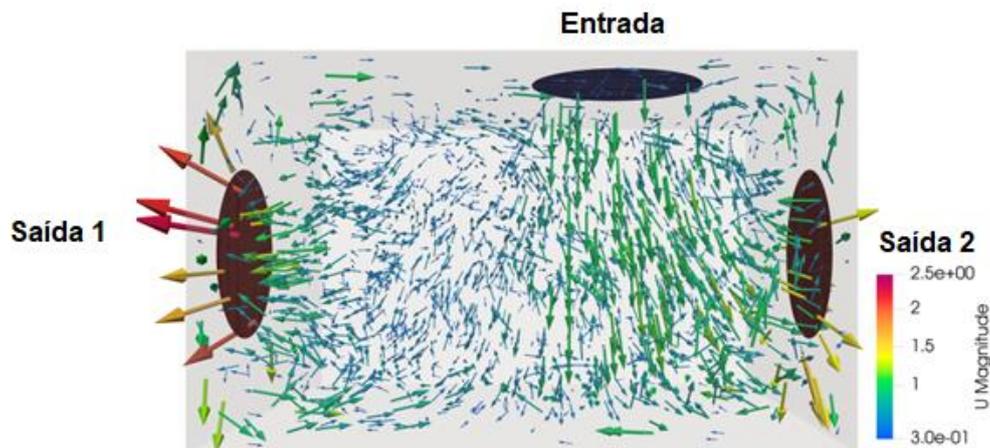
Entretanto, percebe-se que simulação 27 apresentou mais zonas “mortas”, quando comparada com à simulação 8. Tendo em vista a relação de proporcionalidade entre área, volume e velocidade, já era de se esperar que, a posição

que apresentasse um maior volume ocupado pelo fluido, seria a que iria apresentar uma menor magnitude de sua velocidade.

As zonas “mortas”, ou área de estagnação do fluido na posição 27 pode ser explicada e justificada através das Figuras 27 e 28.

As posições de entrada e saída de ar dentro do secador influenciam diretamente no comportamento do fluido em seu interior, como pode ser visualizado na Figura 26. Devido à proximidade da entrada de calor com a saída 2, há a formação de caminho preferencial tomado pelo fluido, fazendo com que o mesmo entre e saia, sem que haja uma circulação no interior do secador.

Figura 27: Comportamento fluidodinâmico da simulação/posição 27

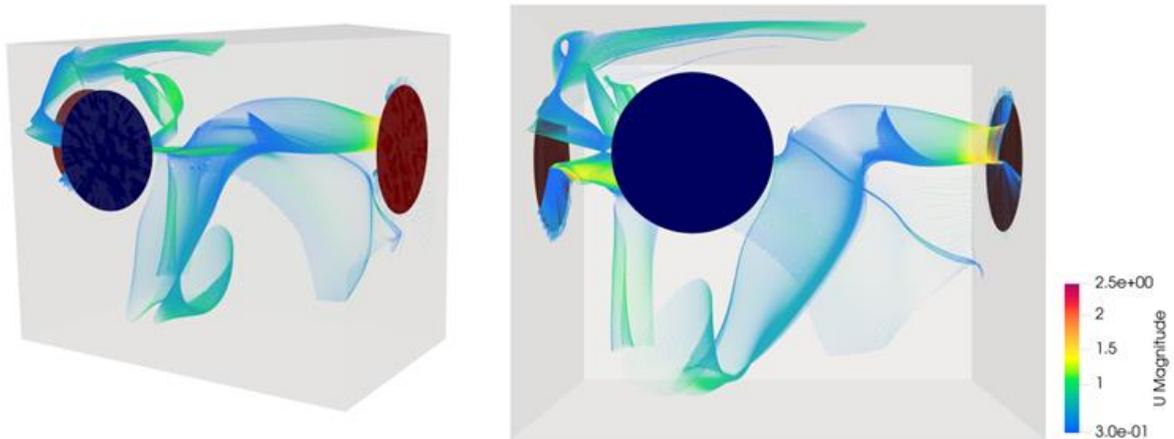


Fonte: AUTORA, 2023

Posto isso, nota-se um acúmulo de fluido na região compreendida entre a entrada e a saída 2, o que justifica a elevação da velocidade nessa região. Além disso, como citado anteriormente, as regiões de saída há uma tendência de aumento de velocidade, o que justifica o comportamento desse parâmetro na saída 1.

Por intermédio da Figura 28, em que há a ilustração das linhas de corrente de fluido, é possível visualizar melhor a tendência de movimento no interior do secador híbrido. Além disso, também é possível avaliar os pontos de zona morta, onde encontram-se normalmente próximos à parede do equipamento, como citado anteriormente.

Figura 28: Linhas de corrente de fluido referente à simulação/posição 27 do secador híbrido



Fonte: AUTORA, 2023

Posto isso, apesar de ser considerado como melhor alocação das posições de entrada e saída de fluxo de ar no secador híbrido, é perceptível que mesmo assim ainda se encontram presentes zonas em que o fluido se encontra com a velocidade inferior a 0,3 m/s, o que compromete o processo da secagem.

6 CONCLUSÃO

Baseado nos objetivos propostos para o trabalho a respeito da comparação de secagem da polpa do coco realizada em dois secadores convectivo e híbrido (convectivo-infravermelho), e na otimização das posições de entrada e saída de ar no secador tomado como mais eficiente, tem-se que:

O secador híbrido apresentou uma secagem mais eficiente frente ao secador convencional, tomando como critério de análise a cinética de secagem de ambos os equipamentos;

A partir do estudo da cinética de secagem, o secador híbrido apontou o atingimento da secagem de equilíbrio com cerca de 40 minutos de processo, intervalo de tempo inferior ao encontrado no secador convectivo;

Determinou-se, ao comparar os modelos de cinética de secagem de ambos os equipamentos com o proposto por Page, que o secador híbrido apresentou uma superioridade na constante cinética ($0,1392 \text{ s}^{-1}$), elucidando a acurácia de seus resultados de secagem frente ao secador convectivo;

Constatou-se que a posição de fluxo de ar no secador convectivo, a qual encontra-se na parte inferior do mesmo, foi um dos motivos que comprometeu seu processo de secagem, o que justificou a inferioridade de seu processo;

As técnicas de CFD apresentaram-se como sendo uma ferramenta de grande valia para predição e otimização das posições de entrada e saída de fluxo de ar no secador híbrido;

Notou-se que a utilização do planejamento experimental como artifício de resposta para a otimização das posições do secador híbrido comprometeria os resultados da mesma, visto que o mesmo apresentou resultados com baixa veracidade;

Determinou-se que a simulação que melhor atendeu aos requisitos pré-estabelecidos de análise acerca do escoamento fluidodinâmico no secador híbrido foi a de número 27, apresentando as seguintes configurações para X_{1E} , Y_{1E} , Y_{1S} e Y_{2S} respectivamente: 0,1122 m, 0,1782 m, 0,1782 m, 0,1782 m.

Apesar de ter sido determinada como sendo a posição para melhor otimização do secador híbrido, a simulação 27 exibiu muitas zonas “mortas”, onde havia estagnação de fluido;

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. **Simulação da secagem de café utilizando a fluidodinâmica computacional**. 2017. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas e Automação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- ANDRADE, A. M. PASSOS, P. R. de A. Pyrolysis of coconut residues (*cocos nucifera L.*) and analysis of charcoal. **Sociedade de Investigações Florestais**, v. 28, n. 5, p. 707–714, 2004.
- ANDRADE, K.S; PRADO, M.M; MARQUES, L.G. Estudo da transferência de calor e massa na secagem infravermelho combinada com convecção forçada do resíduo da laranja. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 5, n. 10, p. 20199-20206, 2019.
- ARAGÃO, R. F. **Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de bandejas**. 2007. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- BARCELOS, K. M. **Análise do potencial do leite de jorro como reator para pirólise da casca do coco: estudo experimental e simulação via CFD**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.
- BARRERA, J; LEÓN, S.A; TRUJILL, O.J.A.P; ANGELES, E.S; ALVAREZ, A.C. Mecanismos de transferencia de calor. **Tepexi Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji del Río**, Hidalgo, v. 8, n. 16, p. 38-42, jul. 2021. Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo. <http://dx.doi.org/10.29057/estr.v8i16.6401>.
- BERGER, P.D; MAURER, R.E; CELLI, G.B. **Experimental design with applications in management**, engineering, and the sciences. Springer, 2 ed., 2018.
- CALADO, M; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. E-papers Serviços Editoriais: Rio de Janeiro, 2023.
- CARLESSO, V.O; BERBERT, P.A; SILVA, R.F. VIANA, A.P. DETMANN, E; DIONELLLO, R.G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 444-448, set. 2005.
- CAVALCANTE, A.M.M; ALMEIDA, R.D; MELO, A.M; MORAIS, B.A; SILVA, I.R; RIBEIRO, N.L; ALEXANDRE, H.V; SILVA, O.S. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 11192-11209, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-113>.
- CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 51p. 2010. ISSN online 2176-5081.

CELMA, A.R.; CUADROS, F.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F. Characterization of industrial tomato by-products from infrared drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v.87, p.282–291, 2009b.

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

CHEN, K.; BACHMANN, P.; BÜCK, A.; JACOB, M.; TSOTSAS, E. Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed. *Particuology*. v.34. p. 134–146. 2017.

CN FABRICA, 2023.

COSTA, E.C. **Secagem Industrial**. 1.ed: Edgard Blucher, SP, 2007. 196p.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos**. Ed. Blucher, 2012

D'AVILA, F. URNAU, R. M. BLAETH, A. M. Z. MOREIRA, M. F. P. **Análise de correlações da difusividade efetiva de grãos de soja submetidos a secagem em camada**. COBEQ-IC, Uberlândia, MG, p. 1-6, 24 jul. 2019.

DIAS, M. M. G. **Otimização do efeito Sweep da Turbina Eólica NREL-phase VI, através de CFD e da construção de metamodelos**. 2021. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 1, p. 359-364, 2004.

FERNANDES, F.D; MOREIRA, N.L. Uma interface de controle para a Fluidodinâmica Computacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 41, n. 4, 2019.

FOUST, A.S. WENZEL, L. A. CLUMP, C.W. MAUS, L. ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

Fox, R. W; McDonald, A. T; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 8ª. Edição, LTC Editora, 2014.

GALARÇA, M. M. **Transferência de calor combinando radiação e convecção no interior de dutos de geradores de vapor fumotubulares**. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GARRET. **Techtudo, 2022**. O que é cooler? Veja tipos e saiba a importância no computador. Disponível em: < <https://www.techtudo.com.br/noticias/2022/12/o-que-e-cooler-veja-tipos-e-saiba-importancia-no-computador.ghtml>>. Acesso em: 13 de julho de 2023.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. 3a. ed. Mexico: CECSA, 1998.

GOTSCHLICH, M. F. L. **Escoamento de fluidos não newtonianos: revisão da literatura e análise de correlações para fator de atrito e coeficientes de perda**

localizada. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

HANSRAJ, H. S. **Análise CFD de modelos de turbulência durante a combustão no motor CFM56-3**. 2019. 78 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Aeronáutica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2019.

HEXASYSTEMS GROUP, 2022. Estufa de esterilização e secagem digital microprocessado bivolt – inox 13 litro. Disponível em: <hexasystems.com.br/produto/estufa-de-esterilizacao-e-secagem-digital-microprocessado-bivolt-inox-13-litros>. Acessado em 13 de julho de 2023.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 3ª edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.

KROKIDA, M.; MARINOS-KOURIS, D.; MUJUMDAR, A. S. Rotary drying. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Handbook of industrial drying**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 151-172.

LÉDO, A.S; PASSOS, E.E.M; FONTES, H.R; FERREIRA, J.M.S; TALAMINI, V; VENDRAME, W.A. Advances in Coconut palm propagation. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 2, p. 159-172, set. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452019159>.

LEONEL, E. C. **Análise da Eficiência Energética de e Otimização de Secadores Rotativos**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

LORENZONI, R. K. BINELLO, M. O. DOMBROWSKI, A. T. FAORO, V. Simulações Computacionais do Fluxo de Ar em Secador de Fluxo Misto. **Proceeding Series Of The Brazilian Society Of Computational And Applied Mathematics**, [S.L.], 8 dez. 2022. SBMAC.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ª edição rev e ampliada**. Rio de Janeiro: LCT, 2017.

MARTINS, C. R.; JUNIOR, L. A. de J. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 28 p. Documentos 164.

MARQUES, A.C.P. **Convergência de Métodos de Diferenças Finitas para Leis de Conservação Hiperbólicas**. 2022. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2022.

MARTINS, A.A. **Estação de solda infravermelho de baixo custo**. 2021. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnólogo em Eletrônica Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

MARTINS, H.F. CARVALHO, S. S. R. de A. BISPO, J. A. C. SOUZA, S. M. A. MARTINEZ, E. A. Maracujá-amarelo (*Passiflora edulis f. Flavicarpa*): cinética da secagem artificial e natural da casca. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 5, n. 10, p. 23234-23245, 2019.

MARTINS, A.P; SANCHES, R.A; SILVA, P.L.R; BORELLI, C; WATANABE, T; MARCICANO, J.P.P. Problema do Pós-consumo do Coco no Brasil. **Sustainability**

In Debate, v. 7, n. 1, p. 44-57, 30 abr. 2016. Editora de Livros IABS.
<http://dx.doi.org/10.18472/sustdeb.v7n1.2016.16566>.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit **Operations of Chemical Engineering**, 6a ed., Editora McGraw-Hill, 1114 p, 2001.

MELONI, P.L.S. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2003.87p.

MERLO, G.R. de F. **Modelagem com difusividade efetiva variável via analogia da Lei de Fick para a secagem de sementes de *Jacaranda mimosifolia* em camada delgada**. 2020. 93 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons, 5 ed., 2001.

MOUKALLED, F; MANGANI, L; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics - An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab**, 1st ed. New York: Springer Cham Heidelberg, 2016.

MUNSON, B. R; YOUNG, D. F; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluídos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.

NASCIMENTO, B de. S. **Secagem de sementes de *Arachis Hipogae L.* com capa protetora**. 2009. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NASCIMENTO, V.R.G.; BIAGI, J.D.; OLIVEIRA, R.A.de. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 7, p. 686-692, jul. 2015.

NATHAKARANAKULE, A.; JAIBOON, P.; SOPONRONNARIT, S. Far-infrared radiation assisted drying of longan t. **Journal of Food Engineering**, 100(4), 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.05.016>

NOBRE, B. D. A. **Simulação RANS de configurações de jatos em tandem num escoamento cruzado**. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2021.

NÓS, R. L. **Simulações de escoamentos tridimensionais bifásicos empregando métodos adaptativos e modelos de campo de fase**. Tese (Doutorado) — Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2007. 18, 87

OBISPO, J. A. G. VELIZ, A. K. H. **Influência de la velocidad del aire y la temperatura em la humedad de la mala (*Lepidium meyenii*) em um secador de bandejas**. 2021. 99 f. TCC Curso de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2021.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York:Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. 2011. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

RABELLO, A.A. RESENDE, U.C. GOMES, F.C.O.G. MACHADO, A.M.R. MARTINS, E.C. SOARES, I.V. Utilização da radiação infravermelha na secagem de amostras de banana / Use of infrared radiation in drying banana samples. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 39317-39330, 15 abr. 2021. South Florida Publishing LLC.

RANGEL, V.B. **Influência do tratamento da base de dados DNS na aplicação de técnicas de aprendizagem de máquina para melhorar acurácia de simulações RANS**. 2019. 75 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

ROCHA, K.D.C. FERREIRA, M.C. GARCIA, C.E.R. Produção e produtos à base de coco (*Cocos nucifera* L.): uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, vol. 8, no 5, maio de 2022, p. 41476–91.

ROCHA, G. J. A. M. **Análise metodológica da aplicação dos modelos de turbulência para simulações de escoamentos em perfis aerodinâmicos**. 2019. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E.J. BRANCO, I.G. BITTENCOURT, T.U. MUNHOZ, C.L. Influência da geometria e da temperatura na cinética de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 2, n. 31, p. 308-312, jun. 2011.

SANTOS, B. A. de. S. F. **Modelagem das cinéticas de secagem das amêndoas de babaçu**. 2022. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Luís, São Luís, 2022.

SANTOS JÚNIOR, H. C. M. **Secagem de alimentos por micro-onda: desenvolvimento de um protótipo de secador a vácuo, análise do processo e aplicação sobre diferentes tipos de alimentos**. 2021. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Alimentos, Universidade Federal do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2021.

SANTOS, G. W. Q dos. **Malhas não-estruturadas com arranjo desencontrado de variáveis para solução numérica de problemas de poroelasticidade**. 2022. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SCHMIDT, Frank W.; HENDERSON, Robert E.; WOLGEMUTH, Carl H. **Introdução às ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. São Paulo, SP: E. Blücher, 1996

SILVA, P. B. **Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos**. 2018. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SILVA, R. H. **Secagem convectiva da folha de aroeira (*Schinus terebinthifolius Raddi*) em tambor rotativo com parede perfurada: influência das condições operacionais na preservação da cor de compostos bioativos**. 2021. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

SIMAL, S. FEMEIA, A. GARAU, M.C. ROSSELÓ, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 109-114, 2005.

SOUZA, V.B. SOUZA, H.R. SANCHES, R.S.G. CERQUEIRA, N.A. GALLO, D.P. LIMA, A.C. BARTOLAZZI, V.T. SILVA, L.F.S. VICENTE, R.T. FRAGONO, B.P. Investigação da transferência de calor em cilindros aquecidos utilizando a dinâmica dos fluidos computacional. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 12431-12445, 17 fev. 2022. South Florida Publishing LLC.

TAN, M.; CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. **Drying Technology**, v.19, n.9, p.2193–2207. 2001.

TUFAILE, A; TUFAILE, A.P.B. Efeito da evaporação num termômetro secando. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 44, 2022.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT Usando Malhas Não-estruturadas**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

WILCOX, D. C., 2006, **Turbulence Modeling for CFD**. USA, DCW Industries.

ZONTA, J.B. ARAUJO, E.F. ARAUJO, R.F. DIAS, L.A.S. Diferentes tipos de secagem: efeitos na qualidade regulatória de sementes de pinhão manso. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 33, nº 4, 2011, p.721 – 73.