

INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
CAMPUS SERRA TALHADA**

GABRIEL BEZERRA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

SERRA TALHADA

2021

GABRIEL BEZERRA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Orientador
Prof. Dr. Daniel César Macedo Cavalcante

SERRA TALHADA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48 Oliveira, Gabriel Bezerra.

Influência do tamanho do diâmetro da partícula na secagem do bagaço de cana em secador ciclônico via simulação no CFX / Gabriel Bezerra Oliveira. - Serra Talhada, 2021.

81 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Daniel César Macedo Cavalcante.

1. Física. 2. Simulação. 3. Secagem. 4. Bagaço de cana-de-açúcar. 5. CFD. I. Título.

CDD 530

GABRIEL BEZERRA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO DIÂMETRO DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do curso de licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Aprovado em: 23/12/2021.

Banca examinadora



Prof. Dr. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante
IFSertãoPE – Campus Serra Talhada
Orientador



Prof. Dr. Aléssio Tony Batista Celeste
IFSertãoPE – Campus Serra Talhada
Examinador interno



Prof. Dr. Guilherme Luiz de Oliveira Neto
IFPI – Campus Floriano
Examinador externo

Dedicatória

A Deus, a minha família e a minha
namorada Thaís por todo o incentivo,
carinho e apoio incondicional.

Agradecimentos

Em primeiro lugar eu quero agradecer, a Deus, por durante essa jornada pensei em desistir, pois eu sou fraco, mas ele me deu força e coragem para continuar em frente e lutar as minhas batalhas internas.

Aos meus pais Nivaldo César e Maria de Lourdes, pois me criaram com enorme carinho e amor, sempre me direcionando pelo caminho correto.

A minha namorada e futura esposa Thaís Teodosio pelo apoio incondicional em todos os momentos, sempre esteve nos meus momentos mais difíceis, estendendo a sua mão para me levantar e caminhar comigo nessa jornada. Sei que se não fosse por ela tudo isso não seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel César Macedo Cavalcante, pelo incentivo, motivação e confiança depositada em mim durante toda essa trajetória.

Aos meus amigos Henrique Cândido e Janiéferson Nathan, por sempre me ajudar e pela colaboração, como também, Anderson e Elismárcio por estarem comigo ao longo do curso ajudando a vencer os desafios.

A todos os meus amigos de turma que passaram pela minha vida e deixaram a sua marca, me incentivando nessa caminhada difícil que é se formar em Física.

Aos professores João Paulo Paes de Araújo Silva e Morgana de Araújo Vasconcelos, por compartilhar comigo os seus conhecimentos nessa área.

Ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada por oferecer o suporte necessário.

A toda a equipe que desenvolveu o software Ansys Academic versão Student, como também, a empresa que disponibilizou esse conjunto de ferramentas, que possibilitou a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a concretização deste objetivo.

“Buscai, pois, em primeiro lugar, o Reino
de Deus, e todas as demais coisas vos
serão providenciadas”.

Lucas, Evangelista

Resumo

O processo de secagem é importante para a preservação dos alimentos, e nossa espécie o utiliza há muito tempo. Para otimizar a secagem dos alimentos, investiu-se em equipamentos, desde então, vários tipos de secadores surgiram, mas um ciclone secador foi utilizado neste trabalho. O secador ciclone é um dispositivo usado para separar as partículas do fluxo de ar, um dispositivo mecânico simples usado em processos físicos e químicos industriais há quase um século. Para garantir uma melhor eficiência desse maquinário, o uso da Fluidodinâmica Computacional (CFD) é primordial, para reduzir o custo e melhorar processo de secagem, pois ela é de simulação que usa um computador para aplicar modelos matemáticos para simular padrões de fluxo de fluido. O objetivo deste trabalho é estudar numericamente a dinâmica do fluido térmico de secadores ciclônicos a partir da mudança do diâmetro das partículas através do CFX. Analisar a distribuição de temperatura, pressão e velocidade do gás no separador de ciclone durante o processo de secagem. Como também, a fração de massa da água no gás com a mudança no diâmetro da partícula. Chegando a resultados que mostram que o diâmetro de 7.35 mm consegue realizar mais voltas no interior do ciclone, aumentando o seu tempo de permanência, permitindo que ela trocasse mais calor com o gás o que gerou um gradiente menor de temperatura, resultando em uma maior perda da quantidade de água liberada no estado gasoso.

Palavras-chave: Simulação; secagem; bagaço de cana-de-açúcar; ciclone; CFD.

Abstract

The drying process is important for food preservation, and our species has been using it for a long time. To optimize the drying of food, investments were made in equipment, since then, several types of dryers have emerged, but a cyclone dryer was used in this work. A cyclone dryer is a device used to separate particles from the air flow, a simple mechanical device used in industrial physical and chemical processes for nearly a century. To ensure better efficiency of this machinery, the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) is essential, to reduce the cost and improve the drying process, as it is a simulation that uses a computer to apply mathematical models to simulate fluid flow patterns. The objective of this work is to numerically study the thermal fluid dynamics of cyclonic dryers from the change in particle diameter through CFX. Analyze the temperature, pressure and gas velocity distribution in the cyclone separator during the drying process. Also, the mass fraction of water in the gas with the change in particle diameter. Reaching results showed that the 7.35 mm diameter can perform more turns inside the cyclone, increasing its residence time, allowing it to exchange more heat with the gas, which generated a smaller temperature gradient, resulting in greater loss of the amount of water released in the gaseous state.

Key-words: Drying; sugarcane bagasse; cyclone; CFX.

Lista de ilustrações

Figura	Legenda	Página
Figura 1	Esquema da cinética de aquecimento de um sólido no processo de secagem	9
Figura 2	Imagem de um Spray Dryer	12
Figura 3	Estrutura de um ciclone	13
Figura 4	Modelo de funcionamento de um ciclone	14
Figura 5	Fluidodinâmica gás-partícula em um ciclone	16
Figura 6	Classificação de modelos para escoamentos multifásicos	19
Figura 7	Padrões de escoamento em dutos verticais: (a) bolhas; (b) pistonado; (c)agitado; (d) anular com bolhas; (e) anular.	21
Figura 8	Regime de escoamento bifásico gás-líquido em dutos horizontais. (a): Escoamento de bolhas; (b): Escoamento pistonado; (c): Escoamento estratificado; (d): Escoamento ondulatório; (e): Escoamento pistonado; (f): Escoamento anular.	23
Figura 9	Etapas diretas da simulação computacional utilizando o Ansys CFX	26
Figura 10	Tipos de malhas computacionais	27
Figura 11	Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado nos trabalhos de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012)	28
Figura 12	Representação da malha numérica do ciclone utilizada no presente trabalho	29

Figura 13	Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	39
Figura 14	Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	40
Figura 15	Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	40
Figura 16	Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	41
Figura 17	Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	41
Figura 18	Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	42
Figura 19	Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	42
Figura 20	Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	43

Figura 21	Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	43
Figura 22	Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	44
Figura 23	Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	44
Figura 24	Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	45
Figura 25	Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	46
Figura 26	Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	46
Figura 27	Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	47
Figura 28	Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	47
Figura 29	Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	48
Figura 30	Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	48
Figura 31	Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	49

Figura 32	Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	50
Figura 33	Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	50
Figura 34	Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5.35 mm	51
Figura 35	Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6.35 mm	51
Figura 36	Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7.35 mm	52

Lista de tabelas

Tabela	Legenda	Página
Tabela 1	Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem	37
Tabela 2	Expressões utilizadas nas simulações	38

Lista de abreviaturas e siglas

Símbolo	Nome	Unidade de medida
A	Constante	[-]
A _e	Área de seção transversal de uma partícula esférica	[m ²]
A _{ne}	Área de seção transversal de uma partícula não esférica	[m ²]
B	Constante	[-]
B _i	Número de Biot	[-]
C	Constante	[-]
C _D	Coeficiente de arraste	[-]
C _g	Calor específico do gás	[kJ/kg*K]
C _p	Calor específico da partícula	[kJ/kg*K]
C _{ε1RNG}	Constante do modelo de turbulência RNG k-ε	[-]
C _{ε2RNG}	Constante do modelo de turbulência RNG k-ε	[-]
C _{μRNG}	Constante do modelo de turbulência RNG k	[-]
D _A	Difusividade Cinemática	[m ² /s]
D _{ag}	Difusividade de vapor de água na fase gasosa	[m ² /s]
D _m	Difusividade de massa	[m ² /s]
d _p	Diâmetro da partícula	[m]
<u>F</u>	Resultante das forças que atuam sobre a partícula	[N]
<u>F</u> _D	Força de arraste	[N]
f _p	Fração de partículas	[-]
f _{H2O}	Fração de água no ar	[-]
<u>f</u> _t	Fator de área superficial	[-]
h	Entalpia estática	[J/Kg]
h _c	Coeficiente de transferência térmica	[W/m K]

h_{fg}	Calor latente de vaporização	[kJ/kg]
h_{fgo}	Calor latente na temperatura de referência	[kJ/kg]
h_{tot}	Entalpia total	[J/kg]
k	Condutividade hidráulica	[m/s]
K_b	Coefficiente de condutividade do corpo	[-]
K_m	Coefficiente de transferência de massa	[-]
L_c	Comprimento característico	[m]
M	Teor de umidade	[kg/kg]
M_o	Teor de umidade inicial	[kg/kg]
m_p	Fluxo mássico de partículas	[g/s]
m_a	Massa de água contida no produto	[kg]
m_p	Massa da partícula	[kg]
m_s	Massa seca	[kg]
m_{bs}	Teor de umidade médio em base seca	[kg/kg]
m_{us}	Teor de umidade médio em base úmida	[kg/kg]
Nu	Número de Nusselt	[-]
P	Pressão	[Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[atm]
P_{Mg}	Peso molecular do gás	[kg/mol]
P_{Mv}	Peso molecular do vapor de água	[kg/mol]
Pr	Número de Prandtl	[-]
P_{VAP}	Pressão de Vapor	[N/m ²]
Q_c	Transferência de calor convectivo	[-]
Re_p	Número de Reynolds da partícula	[-]
Se	Área superficial de uma partícula esférica	[m ²]
Sc	Número de Schmidt	[-]
Sh	Número de Sherwood	[-]
S_M	Termo Fonte	[-]

S_{ne}	Área Superficial de uma partícula esférica	$[m^2]$
t	Tempo	$[s]$
T	Temperatura	$[K]$
T_G	Temperatura do gás	$[K]$
T_p	Temperatura da partícula	$[K]$
T_{hfg0}	Temperatura de referência	$[K]$
u_g	Velocidade do gás	$[m/s]$
u_p	Velocidade da partícula	$[m/s]$
\underline{u}	Vetor velocidade	$[m/s]$
\underline{u}_p	Vetor velocidade da partícula	$[m/s]$
\underline{u}	Vetor velocidade média	$[m/s]$
V	Volume	$[m^3]$
\underline{v}_p	Velocidade relativa partícula-gás	$[m/s]$
\times	Operador produto vetorial	$[-]$
X	Direção	$[m]$
X_e	Fração molar de equilíbrio	$[-]$
X_g	Fração molar do gás	$[-]$
Y	Fração mássica	$[-]$
Y	Direção	$[m]$
Z	Direção	$[m]$
$\beta_{\epsilon 1RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- ϵ	$[-]$
β_{RNG}	Constante do modelo de turbulência RNG k- ϵ	$[-]$
∂	Variação	$[-]$
$\nabla \cdot$	Divergente	$[-]$
∇	Convergente	$[-]$
ψ	Potencial de capilaridade	$[-]$

ρ	Densidade	[Kg/m ³]
μ	Viscosidade da fase contínua	[Pas]
Ω	Velocidade angular da partícula	[rad/s]
μ_{ef}	Viscosidade efetiva	[Pas]
μ_T	Viscosidade turbulenta	[Pas]
Φ_{ij}	Correlação tensão-pressão	[-]
ε	Taxa de dissipação de energia turbulenta	[m ² s ⁻³]
δ	Função delta de Kronecker	[-]
τ	Tensor de cisalhamento	[Kg/m ²]
λ	Condutividade térmica do fluido	[W/Km]

Sumário

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivo geral.....	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
2.	Referencial teórico	3
2.1.1.	A importância da cana-de-açúcar.....	3
2.1.2.	Bagaço da cana-de-açúcar.....	4
2.1.3.	Bagaço de cana como fonte de energia.....	6
2.2.1.	Secagem: Conceito.....	7
2.2.2.	Processo de secagem.....	7
2.2.3.	Mecanismos de migração de umidade.....	8
2.2.4.	Curvas de secagem.....	8
2.2.5.	Secagem do bagaço da cana-de-açúcar.....	10
2.3.1.	Secadores.....	10
2.3.2.	Secadores industriais.....	11
2.3.3.	Ciclone.....	12
2.3.4.	Secagem via ciclone.....	14
2.4.	Escoamento multifásico.....	17
2.4.1.	Conceitos Gerais.....	17
2.4.2.	Modelos de Escoamento Multifásico.....	19
2.4.3.	Regimes de Escoamento.....	20
2.5.	Fluidodinâmica computacional.....	23
2.6.	CFD no Ansys.....	25
3.	Metodologia	28
3.1.	Descrição do problema.....	28
3.2.	Geometria e malha numérica.....	28
3.3.	O modelo matemático.....	29
3.3.1.	Equações da fase gasosa.....	29
3.3.2.	Equações de transporte da fase particulada.....	31
3.3.3.	Condições de contorno.....	35
3.3.4.	Parâmetros termo físicos.....	36
3.4.	Casos Simulado.....	37

4.	Resultados e discussões	38
4.1.	Análise das linhas de velocidade.....	39
4.2.	Tempo de residência da partícula.....	42
4.3.	Análise das linhas de temperatura.....	44
4.4.	Análise da temperatura.....	46
4.5.	Análise da pressão.....	47
4.6.	Análise da fração mássica de água.....	49
4.7.	Análise do campo vetorial.....	51
5.	Considerações finais	53
6.	Referências	54

1. Introdução

O processo de secagem é importante para a preservação dos alimentos, e nossa espécie o utiliza há muito tempo. Nos primeiros dias, nossos ancestrais armazenavam alimentos quando havia tempo suficiente para evitar problemas em tempos de escassez. Eles aprenderam a conservar alimentos com facilidade e eficácia (SOUZA, 2012).

A evidência histórica indica que a carne é seca ao sol para que a camada externa da carne não apodreça e a parte interna seja retida. Por muito tempo, a tecnologia de preservação de alimentos permaneceu inalterada. Somente com o surgimento da modernidade e o desenvolvimento da tecnologia humana, é possível conservar e armazenar alimentos como imaginamos atualmente (SOUZA, 2012).

Hoje, a secagem tem sido objeto de múltiplos estudos, proporcionando o surgimento de novas tecnologias que visam otimizar esses processos, melhorar a qualidade do produto e reduzir custos operacionais (OLIVEIRA, 2010).

Revolução Verde é o nome dos eventos de aumento da produtividade agrícola ocorridos nas décadas de 1960 e 1970. Posteriormente, com o aumento da produção de alimentos, foi necessário aprimorar os maquinários utilizados no processo de produção e armazenamento e conservação, sendo apontado que a tecnologia utilizada para conservar os produtos antes disso se mostrava ineficaz. Para otimizar a secagem dos alimentos, novos equipamentos devem ser investidos. Desde então, vários tipos de secadores surgiram, mas um ciclone secador foi utilizado neste trabalho (MATIAS, 2021).

O secador ciclone é um dispositivo usado para separar as partículas do fluxo de ar, um dispositivo mecânico simples usado em processos físicos e químicos industriais há quase um século (CORRÊA, 2003; NEBRA, 1985). Para garantir uma melhor eficiência desse maquinário, o uso da Fluidodinâmica Computacional (CFD) é primordial, para reduzir o custo e melhorar processo de secagem, retirando a maior também, aumentar a eficiência energética, tornando a indústria em uma geradora de energia.

A CFD é uma ferramenta de simulação que usa um computador para aplicar modelos matemáticos para simular padrões de fluxo de fluido, que podem prever a distribuição de velocidade, temperatura, pressão, umidade e outros parâmetros específicos do sistema em estudo (SILVA, 2016).

A tecnologia CFD é amplamente usada nas indústrias automotiva, aeroespacial e nuclear, mas não tinha sido usada na indústria alimentícia até anos recentes. Suas principais vantagens são que pode otimizar processos, economizar custos e melhorar a extração de subprodutos (SILVA, 2016).

Devido a pressões da legislação ambiental, tem-se desenvolvido novas tecnologias e aperfeiçoado outras, diante disso, a biomassa ganhou um destaque especial nas fontes de energéticas limpas, porque a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis derivados da biomassa significa um passo à frente para conservação ambiental e redução na poluição atmosférica, além de significar vantagens tanto econômicas para o país, como também, social (OLIVEIRA, 2010).

A biomassa constituída pelo bagaço da cana, quando gerenciado de forma apropriada, pode originar múltiplos produtos energéticos para o setor sucroalcooleiro. Nos últimos anos o Brasil tem passado por dificuldades energéticas por causa do baixo nível de água nos reservatórios das hidrelétricas, principal matriz energética do país, esse problema tem sido recorrente. Devido a essa problemática, tem-se investido cada vez mais em matrizes energéticas de fontes renováveis, isso inclui pesquisa de novas tecnologias na combustão do bagaço, e na própria geração de energia elétrica. O Brasil é o maior produtor mundial de biomassa proveniente da cana-de-açúcar segundo Gomes (2015) e o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (UDOP, 2020).

1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo estudar numericamente a termo fluidodinâmica de um secador ciclônico via CFX a partir da variação do diâmetro da partícula.

1.2. Objetivos específicos

- Analisar as distribuições de temperatura, pressão e velocidade do gás no ciclone durante a secagem.
- Analisar a fração mássica de água no gás referente a variação do diâmetro da partícula.

2. Referencial teórico

2.1.1. A importância da cana-de-açúcar

Martim Affonso de Souza em 1532 trouxe a primeira muda de cana-de-açúcar ao Brasil e iniciou o plantio na Capitania de São Vicente, onde construiu o primeiro engenho de açúcar. Mas foi no Nordeste do Brasil, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia que os engenhos de açúcar prosperaram, sendo exportada para a Europa nos quatro séculos seguintes (CARVALHO *et al.*, 2013).

Porém, foi somente em 1753, que a cana-de-açúcar foi descrita por Linneu, que a intitulou genericamente de *Saccharum* (SZMRECSÁNY, 1979). Na Nova Guiné ocorreu o primeiro contato com a cana-de-açúcar. Posteriormente, foi exportada para a Índia, até a região da Baía de Bengala, onde ficam os registros mais antigos de sua existência (MACHADO, 2003).

Por se tratar de uma planta tropical, sua principal distribuição geográfica abrange latitudes de 35° norte a 35° sul, uma posição privilegiada para o nosso país, fazendo assim do Brasil o maior exportador do mundo (CONAB, 2020a). Segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a Tailândia (11,5 milhões de toneladas) e a Índia (4 milhões de toneladas) são a segunda e terceira no ranking 2018/19 dos países exportadores, respectivamente (CONAB, 2019).

A cana-de-açúcar cresce na forma de touceiras, contendo uma parte aérea e uma parte subterrânea. A parte aérea inclui calmos, folhas e flores. A parte subterrânea é constituída por raízes e rizomas, de onde surge um novo tufo após o corte dos juncos (SZMRECSÁNY, 1979).

A cultura da cana-de-açúcar ocorreu no Brasil devido à necessidade de colonizar, defender e explorar as riquezas deste território, que até então não era importante economicamente para Portugal. Diversos motivos para a escolha da cana-de-açúcar, entre eles a existência no Brasil do solo de massapê adequado para esse cultivo. Além de tudo, o açúcar era um produto valorizado no comércio europeu da época, elevando o consumo e podendo gerar lucro (RODRIGUES, 2010).

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil teve dois impactos negativos, o primeiro foi após a introdução da cultura no Caribe, na América Central, onde houve resultados expressivos em Cuba, dessa forma as safras brasileiras entraram em declínio, mas

esse fato não exterminou completamente o cultivo no país. O segundo, conhecido como fim do ciclo do açúcar, aconteceu quando os franceses desenvolveram uma tecnologia para produzir açúcar de beterraba, durante esse período a dependência da Europa da cana-de-açúcar brasileira diminuiu drasticamente. Ocorrendo uma queda nas exportações de açúcar, eram 24% e passou a ser de 10% entre as décadas de 1830 e 1880 (MICHEL JUNIOR, 2010).

Na década de 70, com o programa Proálcool, o sistema agroindustrial da cana-de-açúcar sofreu grandes transformações, deixou de ser unicamente voltado para o setor alimentício, e passou a destinar-se ao setor energético (WAACK; NEVES, 1998).

Até o surgimento desse programa, a cana-de-açúcar era utilizada como suprimento alimentar para fabricação de açúcar e álcool, entretanto, após diversos avanços na tecnologia e no processo convencional, tornou-se possível uma modernização dos engenhos com a finalidade de produzir diferentes tipos de açúcar e álcool, fermentos para alimentação do rebanho, como fonte energética a partir do bagaço, eletricidade ou suprimento calorífico, como fertilizantes e reservas de alimentação para a produção de biogás, bioetanol e plásticos biodegradáveis, entre outras coisas mais (OLIVÉRIO, 2006).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o segundo maior na geração global de etanol, com 35,58 bilhões de litros, ficando somente atrás dos Estados Unidos. Além do mais, é líder na produção e na exportação de açúcar. Nas usinas nacionais, em 2019/2020, saíram 29,6 milhões de toneladas do produto, das quais 18,9 milhões seguiram para o exterior (UDOP, 2020).

Com relação à geração de energia elétrica, o setor sucroenergético também contribui para um perfil singular e positivo do Brasil em relação ao uso da bioeletricidade no mundo. Em 2019, enquanto no Brasil a bioeletricidade com biomassa sólida representou 8,4% de participação na oferta interna de energia elétrica, na média mundial essa participação foi de apenas 2,1% (UNICA, 2020).

2.1.2. Bagaço da cana-de-açúcar

Na terceira estimativa da safra brasileira de cana-de-açúcar, na temporada 2020/21. A expectativa é que sejam colhidas 665,1 milhões de toneladas. Só na região Nordeste estima-se uma produção de 50,9 milhões de toneladas (CONAB,

2020b). Em consequência a esse elevado número na produção, existe também um alto valor de resíduos, uma tonelada de cana-de-açúcar gera aproximadamente 320 kg de bagaço (NEVES; CONEJERO, 2007). Este bagaço contém 50% de umidade (bu) e contém um potencial de gerar cerca de 70 kW, energia esta que é muito mais eficiente para o autoconsumo de uma usina (NEBRA, 1985; FARIAS, 2006).

O bagaço da cana-de-açúcar é um importante resíduo da indústria sucroalcooleira. Produzido a partir do processamento da cana-de-açúcar por meio da limpeza, preparo e extração de seu caldo, o bagaço é a fração da biomassa que deve ser tratada antes de seu descarte ou reaproveitamento para a produção de energia (SILVA, 2016).

O bagaço pode ser utilizado de diferentes formas: para produzir gás, papel, plástico, ração animal, materiais compostos e, na usina sucro-alcooleira, é usado como fonte de geração de energia na produção de vapor (SILVA; GARCIA; SILVA, 2010).

Essa fração da biomassa, após a extração do caldo da cana, é composta por 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos. Além do emaranhado de fibras, possui outros elementos estruturais como vasos, carne e células epiteliais, e também consiste em uma média de 47% de carbono, 6,5% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 2,5% de cinzas por peso seco (SOSA-ARNAO; NEBRA, 2009).

A composição química de colmos de cana-de-açúcar está relacionada à composição genética. Os colmos são compostos por caldo e fibra. O caldo contém cerca de 25% de sólidos solúveis, onde se destaca a sacarose. Observa-se que a composição da cana altera em sua quantidade, entretanto qualitativamente é semelhante em todas as variedades, sendo influenciada pelo clima, solo, fertilização, estágio de desenvolvimento e variedades de culturas (SILVA, 2016).

Atualmente, o componente mais valioso dessa cultura é a sacarose, pois obtém dois produtos de maior exploração: o açúcar e o álcool etílico. O rendimento médio mundial é de 53 toneladas/ha de caules com um teor de sacarose de 10 a 18% e de 11 a 16% de fibras. A cana-de-açúcar é altamente eficiente na conversão de energia de radiação em energia química e possui alta taxa de acúmulo de biomassa, devido a sua grande superfície foliar e intensa atividade fotossintética (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2013).

2.1.3. Bagaço de cana como fonte de energia

Há uma forte ênfase em encontrar novas fontes de energia para substituir os recursos fósseis e hidráulicos, com vários fatores que levam a esse processo, incluindo fatores ambientais, econômicos e políticos. Na esfera ambiental, por exemplo, a queima de produtos fósseis em caldeiras gera grandes quantidades de gases (CO₂, metano e dióxido de enxofre), responsáveis pelo efeito estufa. Em termos econômicos e políticos, há grande incerteza quanto ao fornecimento de energia a partir do petróleo e derivados, pois 65,4% desse combustível é encontrado em regiões de conflito no Oriente Médio, além de grandes oscilações de preços (MARCONATO; SANTINI, 2008).

O conceito de biomassa para energia é relativamente novo e tem sido objeto de controvérsia e discussão devido à sua possível competição com a produção de alimentos. No entanto, devido às contínuas crises de abastecimento de petróleo bruto, bem como a possibilidade de sua escassez, inconsistências de preços e, sobretudo, os impactos nocivos dessa fonte no meio ambiente, o desenvolvimento de culturas de bioenergia voltadas à produção de um energético e parte da atual demanda por petróleo e seus derivados, principalmente no setor de transportes (SILVA, 2016).

Portanto, muitos esforços são feitos para se obter o melhor potencial possível de resíduos agrícolas renováveis, com destaque para o bagaço da cana-de-açúcar, que é visto como uma fonte alternativa de renda e energia não só pelas usinas, mas também pelo governo (OLIVEIRA, 2010).

A produção de eletricidade usando o bagaço da cana como fonte de energia é altamente dependente do teor de umidade variável encontrado na mistura binária de bagaço e água. Quanto mais seco o bagaço, maior seu potencial energético durante a combustão. Portanto, ressalta-se a importância dos ciclones como secadores ou pré-secadores adaptados para esse fim, pois possuem diversos usos (SILVA, 2016).

Em uma unidade ou usina produtora de açúcar, os seguintes produtos e subprodutos são obtidos pela moagem de uma tonelada de talo: 100 kg de açúcar; 250-300 kg de bagaço; 550-660 kg de vapor; e 70 kW/h de energia. Na unidade de produção de álcool ou em destilaria autônoma, os seguintes produtos e subprodutos são obtidos pela moagem de uma tonelada de cascas: 75 litros de álcool; 250-300 kg de bagaço; e 70 kW/h de energia (CHAVES et al., 2007).

Além da alta disponibilidade de bagaço, o Brasil tem a vantagem de ser o único país que domina todas as etapas da tecnologia de produção da cana, apresentando uma rede bem organizada (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2006).

2.2.1. Secagem: Conceito

A secagem é definida como sendo a remoção de uma substância volátil comumente, mas não exclusivamente, a água agregada a um sólido para uma fase gasosa insaturada através da vaporização térmica (FOUST et al., 1982). Além de ser uma operação unitária frequentemente utilizada. A secagem tem, em relação ao consumo de energia, um custo bastante elevado. Desta forma, vários trabalhos têm sido realizados no sentido de otimizar este processo (SILVA, 1991).

O material a ser seco pode estar no estado líquido, sólido ou mesmo no estado gasoso. Para sólidos, a geometria e o tamanho podem variar, desde grãos e pós, passando pelas pastas até materiais de considerável tamanho. Independentemente de sua forma, podem apresentar duas estruturas diferentes, sendo denominadas capilares porosos quando os poros têm dimensão da ordem de 1 micrômetro ou mais, ou de porosos quando a dimensão dos poros é inferior a este valor (GONÇALVES, 1996).

A secagem do material se dá por transferência de calor e massa entre as fases sólida e gasosa, ocorrendo assim remoção de umidade (SILVA, 1991). O calor é fornecido ao processo por uma fonte externa e transmitido através de mecanismos de convecção, radiação e condução. Pode ainda ocorrer dielétricamente dentro do sólido (CORRÊIA, 2003).

2.2.2. Processo de secagem

Dois fenômenos básicos ocorrem simultaneamente no processo de secagem de um produto: (i) a transferência de calor necessária para remover o líquido; e (ii) transferência de massa que ocorre internamente, na forma de líquido e/ou vapor, e sobre a superfície do produto, na forma de vapor (VILLAR, 1999; FARIAS, 2002; CARMO, 2004).

Na literatura, diversas teorias são propostas para a transferência de calor e massa em sólidos porosos, das quais as mais conhecidas são:

- Teoria da difusão líquida;
- Teoria de Fortes e Okos;
- Teoria de Luikov;
- Teoria da capilaridade;
- Teoria da condensação-vaporização.

2.2.3. Mecanismos de migração de umidade

Por meio do mecanismo de transferência de massa, é analisado o processo de migração da água do interior do produto para a superfície. Este mecanismo é importante porque indicará o quão difícil deve ser o processo de secagem do produto (ALONSO, 2001). Alguns dos principais mecanismos são (ALONSO, 2001; FARIAS, 2002; CARMO, 2004):

- Difusão líquida, que ocorre devido à existência de gradientes de concentração;
- Difusão de vapor, que ocorre devido ao gradiente de pressão parcial do vapor, ocasionado por gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e de vapor, que ocorrem devido à diferença de pressão externa, à concentração, à capilaridade e à alta temperatura;
- Escoamento de líquido por forças capilares;
- Escoamento de líquido devido à gravidade;
- Escoamento de líquido por pressão osmótica.

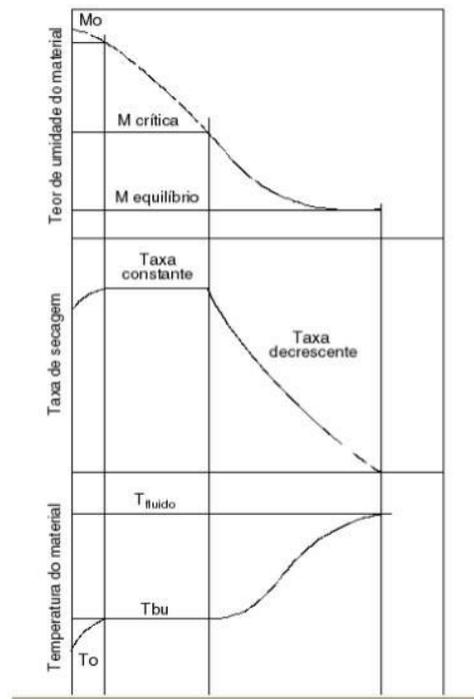
É importante notar que o mecanismo de migração da água em sólidos não foi bem definido pelos estudiosos. Ainda há um longo caminho a percorrer para estabelecer uma relação teórica única, que possa tornar a indução uma possibilidade de resolver o problema seco (FARIAS, 2006).

2.2.4. Curvas de secagem

Ao longo do processo de secagem, os sólidos podem ter ou atingir diferentes teores de umidade: o teor de umidade inicial, o teor de umidade crítica e o teor de umidade de equilíbrio que são mostrados na Figura 1. A figura ilustra as curvas de redução do teor de água, umidade do produto M , evolução da temperatura do produto T e secagem velocidade (dM/dt) ao longo do tempo. A evolução das transferências

simultâneas de calor e massa durante o processo de secagem faz com que seja dividido em 3 períodos (SILVA, 2016).

Figura 1 - Esquema da cinética de aquecimento de um sólido no processo de secagem.



Fonte: (FARIAS, 2002).

O período I marca o início da secagem. Nesse período, a temperatura do produto aumenta gradativamente, aumentando a pressão do vapor e a velocidade de secagem. Essas elevações continuam até o ponto em que a transferência de calor é equivalente à transferência de massa. Por ser um período curto, irrelevante para o período total de secagem, é denominado período de acomodação (ALONSO, 2001; FARIAS 2002).

Uma grande quantidade de água ainda permanece no produto durante o segundo período. Este período é caracterizado por uma taxa de secagem constante. A pressão do vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão do vapor d'água na temperatura do produto. Por sua vez, a temperatura do produto também é constante e igual à temperatura do termômetro de ar úmido, caracterizando que a massa e a transferência de calor são compensadas e, portanto, a taxa de secagem é constante. Este período continua enquanto água suficiente migra para a superfície dentro do produto para auxiliar na perda de evaporação (SILVA, 2016).

O terceiro período é caracterizado pela redução da quantidade de água que migra do interior do produto para a superfície, desacelerando a taxa de secagem. Isso significa que a quantidade de água presente na superfície do produto é menor, o que reduz a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; neste caso, a temperatura do produto tende a subir, aproximando-se da temperatura do ar de secagem. O fator limitante nesta fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, a taxa de secagem é zero e o processo está completo (SILVA, 2016).

2.2.5. Secagem do bagaço da cana-de-açúcar

De acordo com a literatura, o pioneiro em estudos de secagem de bagaço de cana-de-açúcar foi o professor E. W. Kerr, em 1910, utilizando um secador feito em aço com seção transversal 1,2m x 1,8m e altura 6,0m. (CORRÊA, 2003).

Entre 1910 e 1970, são poucos os registros de secagem do bagaço da cana-de-açúcar como insumo energético. Desde a década de 1970, tem havido um interesse crescente na secagem deste produto. Isso se deve à crise energética ocorrida nesta década devido ao declínio da produção mundial de petróleo e ao consequente aumento do preço desse combustível fóssil, conhecido como “Primeiro (1973) e Segundo (1979) Choque do Petróleo” (SOUZA, 2012).

As vantagens da secagem do bagaço da cana incluem: aumento da temperatura do forno, aumento do menor valor calorífico (PCI), armazenamento mais fácil, redução da emissão de cinzas ao meio ambiente, entre outros (SOUZA, 2012).

2.3.1. Secadores

A secagem é uma das operações unitárias mais comuns e antigas, que absorve a água do produto e pode ser usada em diversos campos, como agricultura, alimentos, papel e celulose, minerais, polímeros e produtos farmacêuticos (PONTES, 2014).

A secagem manual requer alguns recursos para acelerar o processo. Para isso, deve-se escolher um secador adequado para todo o processo. Na seleção, a viabilidade técnica e econômica deve ser considerada, e as vantagens e

desvantagens das várias alternativas disponíveis devem ser comparadas (SOUZA, 2012).

2.3.2. Secadores industriais

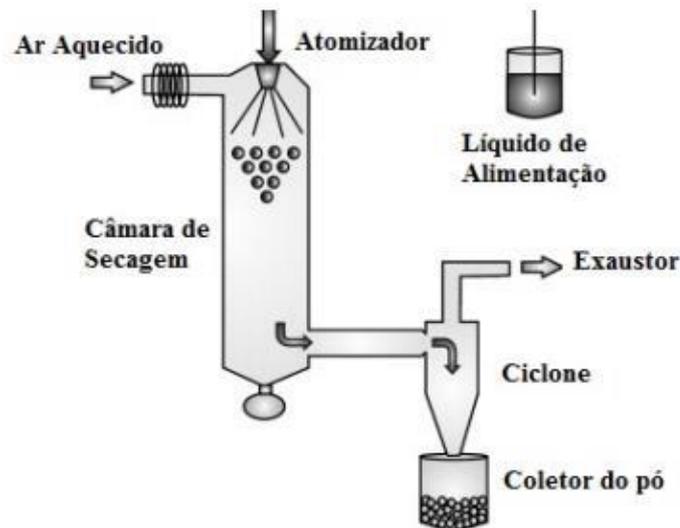
Para a realização do processo de secagem industrial, são utilizados equipamentos de secagem, que efetivamente retiram a água presente no objeto (HONORATO, 2006).

Existem diversos tipos de equipamentos que podem realizar funções de secagem, como secadores pneumáticos, que utilizam ar quente para transportar e secar as partículas de interesse; secadores rotativos, onde a umidade do material é liberada por força centrífuga (BARBOSA, 2019).

A utilização de secadores pneumáticos é vantajosa para o processo de secagem do bagaço, pois são secadores de baixo custo que atuam removendo a umidade gerada pelo ar seco durante o processo de transporte da partícula. Esse processo de baixo custo pode secar facilmente pequenas partículas de bagaço (SILVA, 2016, BARBOSA, 2019).

Ao longo dos anos, vários tipos de secadores artificiais foram desenvolvidos, entre eles: secadores de bandeja, secador tipo coluna, leito fluidizado, secador de correia, tendo como destaque os secadores pneumáticos, atomizador (Spray-Dryer) (BARBOSA, 1992; KORN, 2007; NEBRA, 1985; VIOTTO, 1991) e secadores ciclônicos (BENTA, 1997; CORRÊA, 2003; GONÇALVES, 1996; SANTOS, 2009; SILVA, 1991). Esses secadores, geralmente chamados de secadores de convecção, têm consumo de energia fortemente afetado pela temperatura e velocidade do ar de secagem (SILVA, 2016, BARBOSA, 2019).

Figura 2 – Imagem de um Spray Dryer.



Fonte: (SOSNIK; SEREMETA, 2015).

2.3.3. Ciclone

Os secadores ciclônicos são equipamentos utilizados em processos contínuos, cuja finalidade é secar e separar partículas sólidas presentes em fluidos líquidos ou gasosos. São dispositivos mecânicos simples que vêm sendo utilizados em processos químicos industriais há mais de cem anos, com a finalidade de separar e coletar sólidos e/ou líquidos suspensos em fluxos de gases (CORRÊA, 2003).

Eles foram patenteados no final do século XVIII, mas a sua utilização industrial só ocorreu após a 2ª Guerra Mundial nas indústrias de extração e processamento de minérios. Desde então, são também utilizados de maneira diversificada nas indústrias química, metalúrgica, têxtil, petroquímica, de alimentos, de bioengenharia, dentre outras (SILVA, 1989).

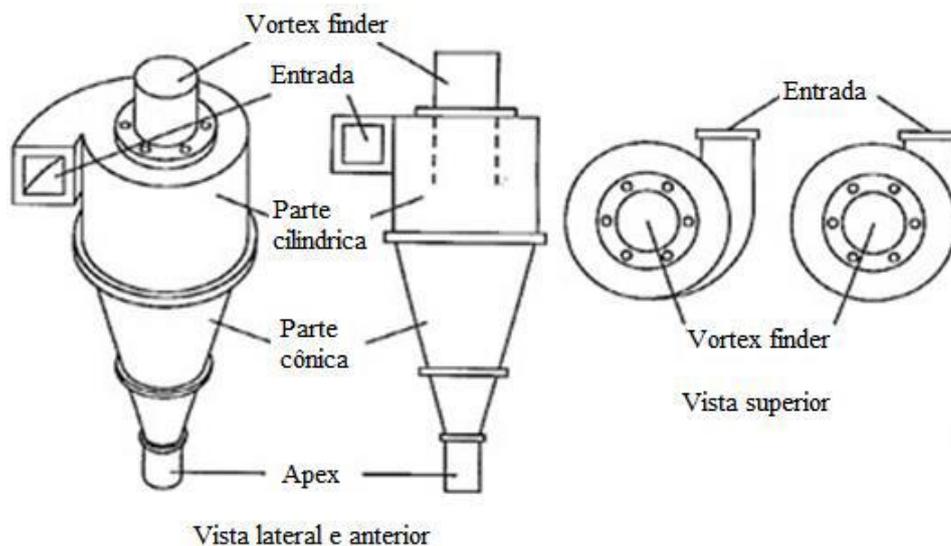
Em solo brasileiro, o trabalho pioneiro no uso de ciclones como equipamento de secagem foi o Nebra em 1985, observando um sistema composto de um secador pneumático seguido de um ciclone instalado em uma usina de álcool e açúcar, onde boa parte da secagem do bagaço ocorria no ciclone. Após este trabalho, surgiram outros sobre a secagem empregando o ciclone, utilizando esse conceito em vários outros tipos de materiais (FARIAS, 2006).

Por este tipo de equipamento apresentar alta eficiência no processo de sua execução e custo relativamente baixo se comparado a outros equipamentos

industriais que desempenham funções equivalentes, tem sido amplamente utilizado em processos industriais.

O ciclone clássico consiste basicamente em uma parte cônica conectada a um cilindro. O separador de ciclone possui três orifícios, uma entrada e duas saídas. A entrada, ajustada para promover uma alimentação tangencial, constitui o duto de alimentação. As saídas são localizadas nos extremos. A saída superior é composta por um tubo cilíndrico axial (overflow), e a saída inferior está localizada na extremidade da seção cônica (underflow).

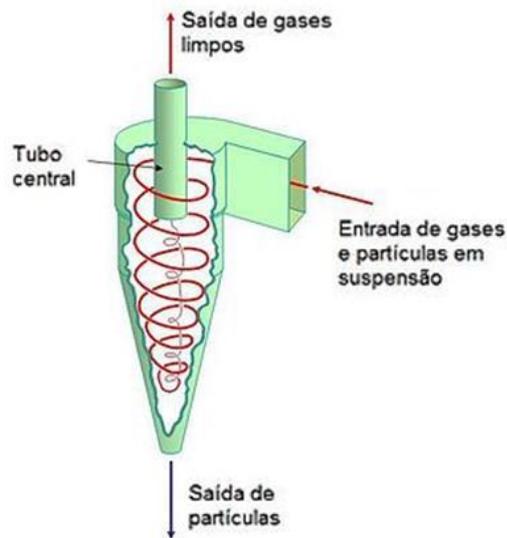
Figura 3 – Estrutura de um ciclone.



Fonte: (BARBOSA apud, 2019).

O funcionamento do ciclone consiste em um conjunto de partículas, que são transportadas pelo fluxo de ar que passa tangencialmente pela parte superior da parte cilíndrica. O campo de velocidade do gás dentro de um ciclone é constituído por linhas de fluxo em forma de espirais descendentes próximas à parede e ascendente no centro. A componente tangencial de velocidade é a dominante, cuja ordem de grandeza é igual à da velocidade do gás na entrada do equipamento; a componente vertical tem ordem de grandeza, aproximadamente 1/10 da tangencial e a componente radial, 1/100 da componente tangencial (CORRÊA, 2003).

Figura 4 – Modelo de funcionamento de um ciclone.



Fonte: (BARBOSA apud, 2019).

A partícula no início da secagem possui uma taxa de secagem crescente e um ganho considerável de temperatura, pois todo o calor recebido pela partícula é transformado em calor sensível. Quando a temperatura da partícula aumenta, intensifica-se a evaporação e todo calor recebido é transformado em calor latente, sendo utilizado para evaporar a água da partícula. Neste estágio a partícula adquire uma taxa constante de secagem e a sua temperatura se mantém constante. Por fim, a quantidade de água que migra do interior do produto ao exterior começa a diminuir, e a temperatura da partícula tende a se aproximar da temperatura do ar de secagem, uma vez que o calor recebido pela partícula também é calor sensível (SILVA, 2016).

A força de arraste da fase gasosa depende do diâmetro da partícula, da viscosidade do gás, da densidade do meio, da velocidade da partícula e do gás, e da partícula (velocidade relativa), variando de ponto a ponto. Após atingirem a parede, duas forças agem na partícula: força de atrito e força de reação da parede (SILVA, 2016).

2.3.4. Secagem via ciclone

Os ciclones possuem como característica principal a relação entre as suas medidas geométricas, associadas com o diâmetro do corpo cilíndrico. Esta proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é muito importante no

processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade de separação destes equipamentos (CRUZ, 2008).

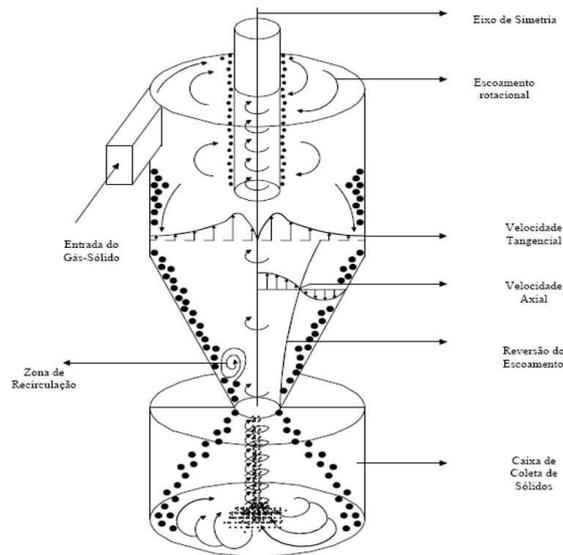
De acordo com a literatura, existem várias configurações de ciclones com o objetivo de aumento de eficiência ou diminuição de queda de pressão. Dentre as diversas configurações ou famílias de ciclones, as mais conhecidas são a de Lapple de 1950 e a de Stairmand de 1949 (SILVA, 2016).

O trabalho de Nebra em 1985 foi pioneiro no Brasil usando ciclones para secar o bagaço. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo teórico de secagem em um secador pneumático industrial que utilizou uma mistura do tamanho e formato das partículas do bagaço em combinação com um ciclone para avaliar a pressão e a perda de calor no interior do sistema.

Em 1991, Silva estudou experimentalmente a secagem de borra de café em um ciclone. Ele desenvolveu um modelo teórico de secagem em um ciclone, que consiste em equações de momento, energia e conservação de massa. Após verificação, os resultados numéricos obtidos são consistentes com os resultados experimentais, e infere-se que o modelo e o equipamento utilizado são eficazes para tais partículas.

O estudo de Cremasco (1994) analisou experimentalmente o campo de velocidade do ar na presença e ausência de sólidos (microesferas de vidro e plástico) e o tempo de residência de sólidos em um reator ciclone. O autor desenvolveu um modelo teórico baseado na equação de conservação do momento, que descreve o campo de velocidade e o tempo de residência das fases fluida e partícula. O modelo matemático proposto permite obter uma distribuição de velocidade tangencial e uma distribuição de velocidade axial muito próxima das observações experimentais, com melhor ajuste na região de fluxo descendente.

Figura 5 – Fluidodinâmica gás-partícula em um ciclone.



Fonte: (OGAWA, 1997).

No ano de 1996, Gonçalves estudou a secagem de resíduos da indústria de processamento de suco de laranja em um separador ciclônico e comparou seu desempenho com o de um secador pneumático. Em suma, está comprovado que o separador de ciclone é mais eficaz e de menor custo do que o secador pneumático na secagem da escória de laranja.

Pesquisadores começaram a estudar fatores que influenciavam a secagem e quais parâmetros aumentariam a eficiência desse aparelho. Silva e Nebra em 1997 analisaram numericamente a secagem de borra de café no ciclone, o modelo que foi utilizado por eles considerou o encolhimento da partícula, a condição de deslizamento na parede, bem como a transferência de calor entre a partícula e a parede do ciclone. Dibb e Silva em 1997 estudaram a influência da geometria no comportamento fluidodinâmico de um ciclone enquanto secador, utilizando o modelo de 1997 desenvolvido por Silva e Nebra.

Já no ano de 2003, Corrêa estudou a secagem do bagaço em um ciclone, teoricamente e experimentalmente, variando a sua geometria, com a finalidade de aumentar o tempo de residência das partículas. Ele construiu dois dispositivos com cones diferentes. Como resultado, ele observou uma grande diferença na vazão e no tempo de residência no equipamento. Neste trabalho, o código computacional CFX 4.4 foi usado para realizar a simulação do perfil de velocidade a partir do uso das técnicas de CFD.

Tendo ainda o trabalho de Bernardo (2004), que estudou o escoamento de gás (monofásico) e o escoamento gás- sólido (bifásico) em ciclone numa indústria de cimento, com diferentes entradas do duto de alimentação (entradas tangenciais) com inclinações, para cima, de 300, 450 e 600 utilizando técnicas de CFD (software CFX), com o objetivo de avaliar os campos de pressão e de velocidade e a eficiência dos ciclones. Neste trabalho foi verificada a queda de pressão na passagem de um sistema monofásico para um sistema bifásico, efeito esse devido à presença de uma fase particulada no escoamento.

Em 2006, Farias realizou um estudo numérico sobre a secagem do bagaço com ciclone. O modelo de transporte de partículas de Lagrange é adotado. Os resultados mostram que a cinética de secagem apresenta um período de adaptação, seguido de outro período de secagem em desaceleração, sendo que a secagem depende do formato do tubo de alimentação e do diâmetro de descarga das partículas.

E em 2010, Oliveira estudou o efeito do bagaço sobre o teor de umidade inicial após moagem, armazenamento no pátio e secagem em dois ciclones de secagem. Também analisa a influência da geometria do ciclone alterando a altura, o ângulo da seção cônica e o diâmetro da saída inferior (underflow). Os resultados mostraram a independência do teor de umidade inicial do bagaço no processo final de secagem.

Nos últimos anos pesquisadores vêm estudando ciclones (e hidro ciclones) tanto como separadores quanto secadores, com o intuito de melhorar a performance destes equipamentos através de métodos experimentais e/ou utilizando técnicas de Fluidodinâmica Computacional CFD (SILVA, 2016).

2.4. Escoamento multifásico

2.4.1. Conceitos Gerais

Segundo Paladino (2005), os sistemas multifásicos são definidos como áreas do espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis, separados por interfaces desconectadas ou conectadas. De acordo com o formato da interface, existem nomeações e descrições de classificação dispersas ou separadas. As fases que compõem esse fluxo ocorrem por meio de interações entre gás líquido, líquido-líquido, líquido-sólido ou gás-sólido (DAMIAN, 2007).

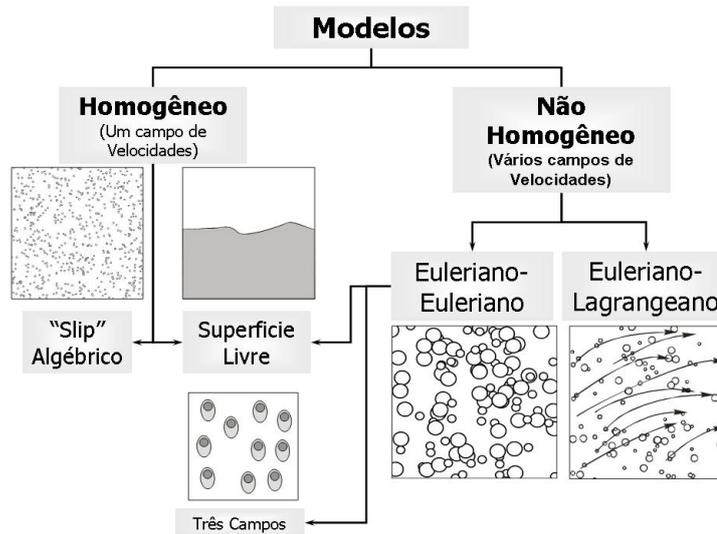
Segundo Ranade (2001), o escoamento multifásico envolve uma variedade de regimes e modelos de escoamento, dependendo das condições de operação e da geometria do equipamento.

Esses modelos podem ser divididos em dois grupos:

- Modelo pseudo-homogêneo: Nesse modelo, existe um equilíbrio entre as fases, o fluido e as partículas estão em equilíbrio com pressão, temperatura e turbulência e possuem a mesma velocidade. Com exceção da fração de volume, todas as grandezas de transporte de todas as fases são iguais, o que leva ao uso de uma única equação de conservação de momento, e a equação de conservação de massa de cada fase pode ser considerada, de modo que a distribuição da fração de cada fase no volume é avaliado. No entanto, este modelo só é válido quando as quantidades transmitidas das diferentes fases atingem o equilíbrio em uma distância curta o suficiente. Isso ocorre porque a taxa de transferência da interface é alta quando a resistência aplicada pela fase contínua na dispersão é grande e não há força do campo gravitacional (PALADINO, 2005).
- Modelo não-homogêneo: Para este modelo, assume-se que a pressão, temperatura, velocidade e turbulência são diferentes para cada fase, resultando na utilização de um sistema de equações de conservação para cada fase (PALADINO, 2005).

A Figura 6 apresenta esquematicamente uma classificação baseada nestes conceitos, mostrando alguns possíveis tipos de escoamento que podem ser resolvidos com cada abordagem.

Figura 6 – Classificação de modelos para escoamentos multifásicos.



Fonte: (PALADINO, 2005).

Na Figura 6, o modelo de três campos considera a massa de líquido arrastada pelas bolhas como uma pseudo-fase que se movimenta com a velocidade das bolhas, porém a sua massa é considerada no balanço de massa da fase líquida (PALADINO, 2005).

2.4.2. Modelos de Escoamento Multifásico

Conforme a obra de Ranade (2002), para os modelos heterogêneos, existem vários métodos matemáticos concebidos para descrever processos envolvendo escoamento multifásico, três dos quais merecem destaque:

- Aproximação do Volume de Fluido (VOF) ou Modelo Lagrangeano: Neste modelo, o fluxo total da fase de partícula é considerado modelado pelo rastreamento de um pequeno número de partículas através da fase contínua, e as partículas são consideradas arrastadas apenas pelo gás. Este procedimento é adequado para análise de fluxo em estado estacionário. Neste método, a equação de fase contínua é modificada e escrita para permitir a interação entre as duas fases. Isso é feito adicionando termos de origem que descrevem a influência do disperso em relação à fase contínua.
- Aproximação Euleriana-Euleriana ou Modelo Euleriano: Neste método, assume-se que a fase contínua e a fase dispersa penetram continuamente

uma na outra, de modo a resolver completamente as equações de Navier-Stokes das duas fases. A interpenetração das fases está relacionada ao fato de que em um volume de controle, duas ou mais fases podem coexistir, e o número relativo de cada fase é dado pelo valor da fração de volume no volume de controle. Ainda neste modelo, o modelo Lagrangeano pode ser usado para modelar os termos de transferência (massa, calor, momento e energia).

- Aproximação Euleriana-Lagrangeana ou Modelo Euleriano-Lagrangeano: Neste método, o transporte de partículas da fase dispersa é realizado pela fase contínua, e a equação de Navier-Stokes é resolvida para a fase contínua. O acoplamento entre a fase contínua e o movimento da fase dispersa e a determinação do movimento das partículas são obtidos através da transmissão das partículas e da lei de arraste.

2.4.3. Regimes de Escoamento

Dependendo das condições operacionais, como taxa de fluxo de fase, propriedades físico-químicas (densidade e viscosidade), inclinação e geometria do tubo, o fluxo multifásico pode apresentar diferentes padrões de fluxo, que podem ser encontrados na literatura (TAITEL *et al.*, 1980; RANADE, 2002; PALADINO, 2005; LUIZ, 2007).

No entanto, existem algumas diferenças no padrão de fluxo bifásico, dependendo da posição do tubo, ou seja, se é vertical ou horizontal. Uma das principais diferenças entre essas duas situações é que, devido à influência da gravidade, muitas vezes há uma tendência de estratificação no fluxo horizontal. O vapor tende a migrar para o topo do tubo, enquanto a maior parte do líquido flui para a parte inferior (LUIZ, 2007).

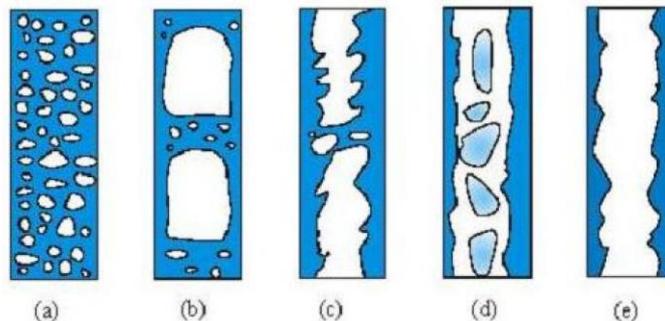
As configurações mais conhecidas para sistemas bifásicos líquido-gás para tubulações verticais estão descritas abaixo:

- Escoamento de bolhas: A fase gasosa (bolhas) pode apresentar vários tamanhos e formas geométricas (esféricas ou alongadas) e se encontram distribuídas discretamente ao longo da fase contínua (líquida), Figura 7 (a).
- Escoamento pistonado: Isso acontece quando o diâmetro da bolha é aproximadamente igual ao diâmetro do tubo. A parte superior da bolha no tubo

vertical é esférica e o gás é separado da parede do tubo por uma fina camada de líquido que desce lentamente, geralmente chamada de lesma de gás ou bolha de Taylor, Figura 7 (b).

- Escoamento agitado: Devido à instabilidade do fluxo do pistão, grandes bolhas estouram e um fluxo caótico é formado no centro do tubo, fazendo com que o líquido se reponha contra a parede, Figura 7 (c).
- Escoamento anular com bolhas: Isso acontece quando o líquido forma uma camada relativamente espessa na parede do tubo e bolhas espalhadas ainda são observadas. Uma corrente de ar flui no centro, na qual uma grande quantidade de líquido é dispersa na forma de gotículas, Figura 7 (d).
- Escoamento anular: É caracterizada por uma fina camada de líquido fluindo próximo à parede, e gás fluindo no centro do tubo, formando uma pequena quantidade de gotículas ou bolhas dispersas em ambas as fases, Figura 7 (e).

Figura 7 – Padrões de escoamento em dutos verticais: (a) bolhas; (b) pistonado; (c) agitado; (d) anular com bolhas; (e) anular.



Fonte: (LUIZ, 2007).

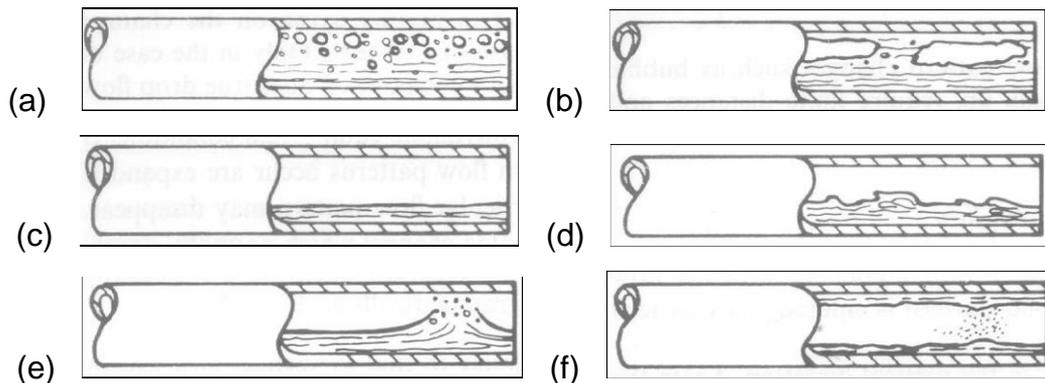
Já para os escoamentos em dutos horizontais, são descritos os seguintes tipos:

- Escoamento de bolhas (Bubbly Flow): Semelhante ao descrito para escoamentos para dutos verticais, entretanto, as bolhas tendem a escoar na parte superior do duto quando a fase dispersa é menos densa do que a contínua. Quando a velocidade do fluxo aumenta, a fase dispersa tende a ocupar toda a seção do tubo, visto que o efeito de dispersão turbulenta passa a ser mais importante do que a gravidade, como mostra a Figura 8 (a).
- Escoamento pistonado (Plug flow): É semelhante ao fluxo em um tubo vertical, mas as bolhas tendem a fluir pela metade superior do tubo. Nesse caso, devido

ao grande tamanho da bolha, essa condição de assimetria permanecerá inalterada independentemente da vazão, conforme mostrado na Figura 8 (b).

- Escoamento estratificado (Stratified Flow): Ele ocorre em velocidades de líquido e gás muito baixas, e o fluxo bifásico é separado por uma interface suave sem ondulações, como mostrado na Figura 8 (c).
- Escoamento ondulatório (Wavy Flow): Aumentando a velocidade do gás no fluxo estratificado, oscilações aparecem na interface, resultando em um padrão de fluxo caótico, conforme mostrado na Figura 8 (d).
- Escoamento pistonado ou intermitente (Slug Flow): Quando a onda começa a ficar maior e a fração de volume de líquido aumenta, ela começa a molhar a parede superior do tubo, produzindo grandes bolhas impressadas entre as duas ondas, parecendo um padrão de pistão, mas as bolhas são maiores. Fração de grande volume de gás. Este modo não deve ser confundido com fluxo em pistão em tubos "tampão" horizontais. No primeiro caso, grandes bolhas são formadas pela coalescência de pequenas bolhas. Quando o fluxo de ar aumenta num padrão de bolhas, neste caso, as bolhas (ou bolsões) são filmes finos formados pela instabilidade do líquido, conforme mostrado na Figura 8 (e).
- Escoamento anular (Annular Flow): Aumente ainda mais a velocidade do gás no fluxo estratificado, ou em circunstâncias normais, no caso de baixa fração de líquido, um filme líquido será formado na periferia do tubo para formar um anel, semelhante ao fluxo em um tubo vertical, como mostrado na figura 8 (f).

Figura 8: Regime de escoamento bifásico gás-líquido em dutos horizontais. (a): Escoamento de bolhas; (b): Escoamento pistonado; (c): Escoamento estratificado; (d): Escoamento ondulatório; (e): Escoamento pistonado; (f): Escoamento anular.



Fonte: (PALADINO, 2005).

2.5. Fluidodinâmica computacional

Um fluido é definido como uma substância que pode escoar quando submetida a uma força externa. O conceito de fluidodinâmica está ligado ao estudo de fluidos em movimento sob diferentes tipos de forças. Por exemplo, o fluxo externo está localizado ao redor da superfície e o fluxo interno existe no tubo (SILVA, 2016; FOX *et al.*, 2014).

No caso de escoamento multifásico, a transferência de massa, energia e movimento ocorre na interface entre a fase contínua ou entre a fase contínua e a fase dispersa. A modelagem matemática desses processos torna-se um tanto complicada, sendo quase impossível obter soluções analíticas devido à não linearidade das equações diferenciais parciais que regem esse fluxo. Para sua solução, eles usam métodos de cálculo numérico que podem encontrar respostas aproximadas (SILVA, 2016; RANADE, 2001).

O interesse em estudar o movimento dos fluidos pode ser rastreado há muitos anos, mas no início da década de 1910, alguns cientistas realizaram vários estudos e fizeram grandes progressos neste campo. No entanto, a fim de descrever matematicamente o comportamento do fluxo do fluido, muitas simplificações são necessárias para chegar a uma solução (KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; LIMA, 2005).

Em meados do século XX, com o advento dos computadores, com o uso da tecnologia computacional, os computadores tornaram-se uma boa opção para a

solução numérica de equações complexas, possibilitando a distribuição do fluxo de fluidos sob um determinado volume de controle. Portanto, surgiu um novo método de pesquisa para estudar o escoamento de fluidos, denominado Fluidodinâmica Computacional (LIMA, 2005).

A tecnologia CFD interage entre várias disciplinas de engenharia, incluindo: matemática, mecânica dos fluidos e ciência da computação (MARTÍN, 2014). Desta forma, a dinâmica dos fluidos computacional é definida como uma ferramenta numérica que usa métodos numéricos para usar linguagens de programação para resolver equações físicas e fenômenos de transporte em computadores (massa, movimento, energia e conservação de espécies) (AUGUSTO *et al.*, 2010).

A simulação numérica é realizada por um programa de computador que irá inserir um modelo matemático para um determinado problema, adicionar variáveis e constantes ao problema e realizar cálculos baseados nos dados exibidos (MITRE, 2018).

Matematicamente, o CFD pode resolver o problema das equações discretas de Navier-Stokes, onde essas equações podem descrever o processo de movimento, transferência de calor e massa (SILVA, 2016).

Esta ferramenta computacional é amplamente utilizada em vários problemas de engenharia (XIA; SUN, 2002). Alguns desses problemas envolve:

- Aplicações Industriais: Automotiva, Biomédica, Combustão, Eletrônicos e Computadores, Energia, Mecânica, Marinha, Metalúrgica, Nuclear, Petróleo, Química e Processos, Água (XIA; SUN, 2002);
- Aplicações Ambientais: Poluição Atmosférica, Cálculos climáticos, Fluxos oceânicos e Poluição de águas naturais (XIA; SUN, 2002).

De acordo com Veerstedt e Malalasekera (2007), as etapas importantes do processo de simulação utilizando CFD são:

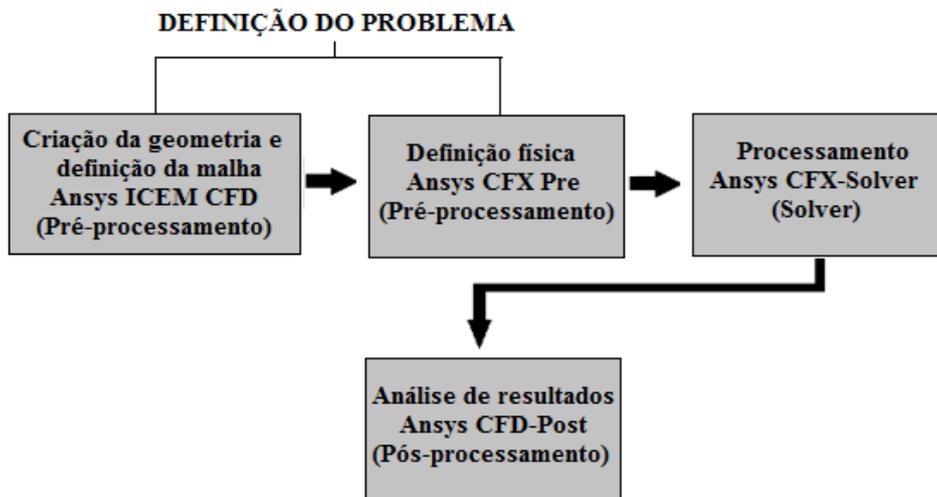
- O pré-processamento inclui a definição da forma geométrica ou campo de pesquisa a ser pesquisado; geração de uma grade e divisão do domínio em pequenos subdomínios, que são responsáveis por receber cálculos relacionados à solução de equações de conservação por meio de métodos numéricos; e as propriedades do domínio de pesquisa (A definição de densidade, viscosidade, fluxo de volume de cada fase, etc.), bem como as condições iniciais e de contorno do fluxo;

- Na etapa Solver, técnicas de resolução numérica serão utilizadas para resolver os problemas físicos do caso estudado. O sistema de equações diferenciais parciais é convertido em um sistema de equações algébricas, que podem ser resolvidos por métodos numéricos. Esses métodos podem ser métodos diretos (Eliminação de Gauss e Decomposição LU) ou iterativos (Método de Gauss Seidel, Método de Jacobi e Método das Sobre-Relaxações Sucessivas);
- No pós-processamento os dados encontrados na etapa anterior são classificados e processados por meio de gráficos, imagens, etc., para melhor interpretar os resultados.

2.6. CFD no Ansys

O pacote de software computacional Ansys CFX[®] é um aplicativo amplamente utilizado para analisar vários problemas no campo da fluidodinâmica. Possui múltiplos recursos de trabalho: Módulo ICEM CFD, no qual é possível criar a geometria do problema a ser processado e a definição de sua grade, que será o campo de pesquisa; Módulo CFX é dividido em dois submódulos (CFX-Pre e CFX-Solver) é responsável pelas etapas de entrada e processamento dos dados e, por fim, o módulo CFD Post, no qual os resultados são interpretados e analisados. Na Figura 9, são mostradas as etapas diretas da simulação em computador usando o Ansys CFX. Sua linguagem de programação é baseada em FORTRAN e está diretamente relacionada à solução de equações de conservação em regiões de interesse (TAVARES, 2012).

Figura 9 - Etapas diretas da simulação computacional utilizando o Ansys CFX.



Fonte: (TAVARES, 2012).

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos. Esses pontos são considerados onde essas linhas se cruzam e servem como um guia para o cálculo de propriedades físicas com base em modelos matemáticos. Uma malha computacional nada mais é que uma representação ou a “discretização” do plano físico utilizado na simulação numérica (FRARI; PEDROSO, 2009).

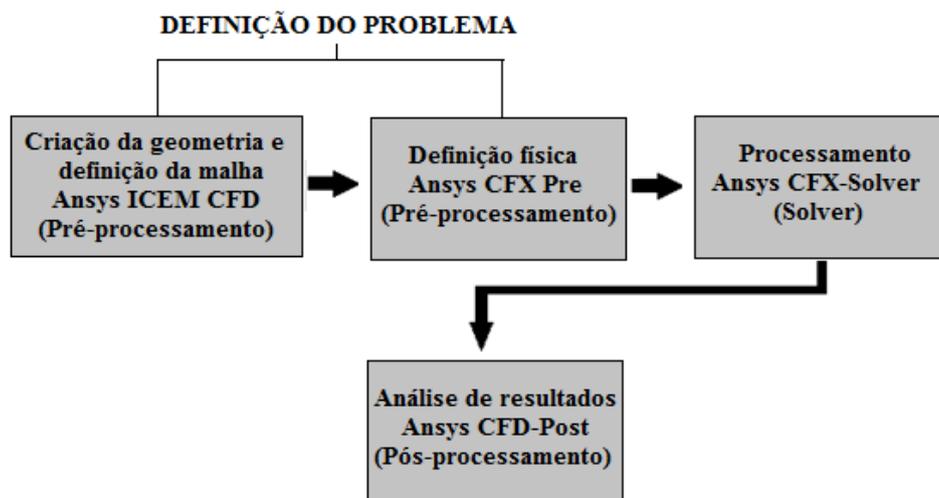
De acordo com a pesquisa de Malska (2004), o método de geração da rede é dividido em dois:

- Manual: A figura geométrica a ser discretizada é desenhada em uma folha de papel milimetrado, e são determinadas as coordenadas de cada ponto formado pela intersecção das linhas que representam a área da figura geométrica. Essas coordenadas são informadas ao computador, e o computador as lerá automaticamente para formar uma grade de cálculo geométrica.
- Automático: Existem duas operações algébricas, eles usam diferentes tipos de interpolação, e são muito versáteis e rápidos, e a diferenciação é chamada porque eles usam equações diferenciais, então são mais versáteis, mas por outro lado, seus cálculos demoram significativamente operações matemáticas mais longas e detalhadas.

As malhas computacionais são classificadas, em dois tipos, Figura 10: malhas estruturadas, onde cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e

a numeração dos mesmos tem uma sequência natural, e a malha não- estruturada, quando tem-se o número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação. Existe ainda outro tipo de classificação, as malhas híbridas, que consiste na utilização simultânea de malhas estruturadas e não-estruturadas (BORTOLI, 2000).

Figura 10 - Tipos de malhas computacionais.



Fonte: (SANTOS, 2010).

Com relação às malhas estruturais, elas têm implementações simples que requerem menos capacidade de armazenamento e, ainda mais importante, menos células são geradas neste tipo de grade em comparação com grades não estruturadas. No entanto, sua desvantagem é que não são muito complexas. A flexibilidade de ajuste na geometria. As grades não estruturadas podem se adaptar facilmente a geometrias complexas, mas requerem maior capacidade de armazenamento. (SILVA, 2016; SANTOS, 2010).

A precisão da solução em um problema CFD depende muito do número de elementos presentes na grade e como eles são distribuídos. Geralmente, a precisão da solução aumentará conforme o número de elementos da grade aumenta, até que um certo limite seja alcançado. No entanto, é necessário equilibrar a precisão da solução com o custo computacional, otimizando a grade. A qualidade da grade afeta diretamente a qualidade da análise, portanto, a geração da grade tornou-se a etapa mais importante e demorada na análise de CFD (SANTOS, 2010).

3. Metodologia

3.1. Descrição do problema

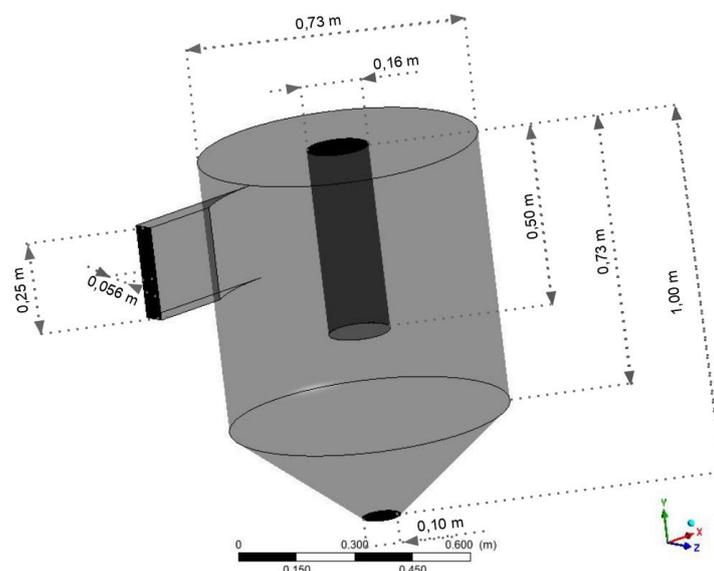
O trabalho consiste na reprodução do trabalho de Silva (2016), que estuda a secagem do bagaço de cana, modificando o diâmetro da partícula e analisando sua influência na secagem das partículas.

3.2. Geometria e malha numérica

Para gerar uma malha representativa do ciclone secador, é necessário inicialmente criar a geometria definindo pontos de referência de acordo com o método usado para criar as curvas e superfícies que definem a borda ou parede do ciclone. Os resultados numéricos foram gerados com o auxílio de uma malha estruturada com base nas dimensões do secador ciclônico utilizado por Corrêa (2003) (Figura 11). A geração da malha foi feita seguindo as seguintes etapas:

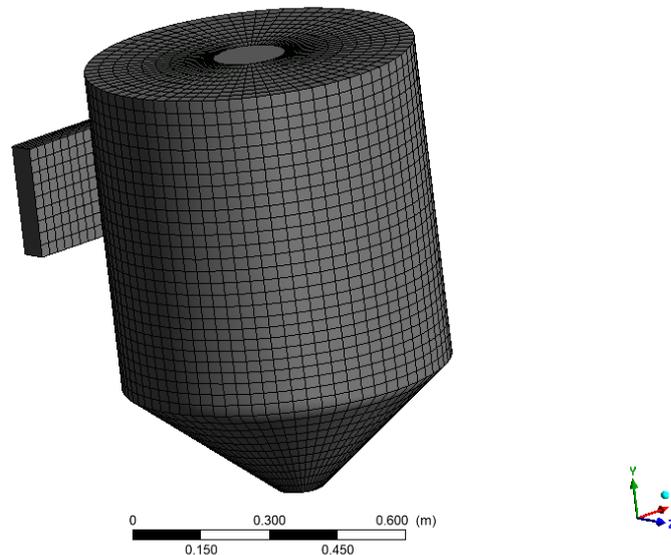
- Definição de um conjunto de pontos e curvas para representar a geometria;
- Escolha de um conjunto de blocos por meio de divisão, junção, definições de borda, modificações das faces e movimentos nos vértices, possuindo 40 mil elementos hexaédricos.

Figura 11 - Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado nos trabalhos de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012).



A Figura 12 mostra a grade numérica usada na simulação. Mais informações sobre grades numéricas podem ser encontradas no capítulo de resultados e discussão.

Figura 12 - Representação da malha numérica do ciclone utilizada no presente trabalho.



Fonte: Autoria própria (2021)

3.3. O modelo matemático

3.3.1. Equações da fase gasosa

O presente trabalho usa a metodologia utilizada por Silva (2016), para termos eficácia na simulação. O modelo matemático utilizado para descrever o fluxo de partículas corresponde ao modelo multifásico de Euler-Lagrangiano. Nesse método, o monitoramento das partículas é realizado no tempo por meio de um conjunto de equações diferenciais ordinárias. Essas equações são então resolvidas para obter o comportamento das partículas conforme elas passam pelo domínio do fluxo, e o comportamento da fase gasosa é descrito pelas equações de conservação de massa, momento linear, energia e matéria.

No trabalho atual, as seguintes considerações para a fase gasosa são consideradas:

- Regime permanente;

- Não há reação química;
- Foi considerado o efeito da gravidade;
- Não é considerado as forças de não arraste;
- As propriedades físico-químicas são constantes.

Com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear (Equação 1 e 2) reduzem-se a:

- **Equação da continuidade**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Em que, ρ é a densidade para a fase contínua e \vec{u} é o vetor velocidade.

- **Equação de momento linear**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

Em que, S_M é o termo que incorpora as forças do corpo e da rotação; P é a pressão e τ representa o tensor cisalhamento dado pela fórmula:

$$\tau = \mu_{ef} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{u} \quad (3)$$

Em que, δ é a função Delta de Kronecker e μ_{ef} é a viscosidade efetiva demonstrada pela fórmula:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_T \quad (4)$$

Em que, μ é a viscosidade da fase contínua e μ_T a viscosidade turbulenta expressa por:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Em que, C_μ é uma constante empírica com igual a 0,09, k é a energia cinética turbulenta e ε é a dissipação de energia cinética turbulenta. Esses últimos parâmetros são com base no modelo de turbulência utilizado.

- **Modelo de turbulência**

O modelo RNG (*Renormalized group Theory*) foi proposto como uma variação do modelo $k - \varepsilon$, denominada RNG $k - \varepsilon$. Mostrando-se adequado para a previsão de escoamentos em regiões internas de camadas limite (baixo número de Reynolds) sem a necessidade da adição de termos de correção, o modelo RNG $k - \varepsilon$ oferece alguma melhoria se comparado ao modelo $k - \varepsilon$ padrão, fornecendo previsões mais precisas em situações de linhas de corrente curvas, separação e estagnação.

As equações de transporte para a geração e dissipação de turbulência são iguais as equações presentes no modelo $k - \varepsilon$ padrão, o diferencial são as constantes do modelo. A equação para a dissipação turbulenta é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1 RNG} P_{\dot{\sigma}}) \quad (6)$$

Em que:

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{\left(1 + \eta^3 \beta_{RNG} \right)} \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (8)$$

- **Equação de energia**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda T) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) \quad (9)$$

Em que, λ é a condutividade térmica e h_{tot} corresponde à entalpia total dada por:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{u}^2 \quad (10)$$

Em que, h é a entalpia estática (entalpia termodinâmica) e o termo $\frac{1}{2} \vec{u}^2$ é a entalpia ocorrida devido à energia cinética, o termo $\nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau)$ representa o trabalho devido às tensões viscosas.

- **Equação de transferência de massa**

$$\nabla \cdot [\rho(\bar{u}Y_A - D_A(\nabla Y_A))] = 0 \quad (11)$$

Em que, Y_A corresponde à fração mássica do componente A e D_A corresponde à difusividade cinemática.

3.3.2 Equações de transporte da fase particulada

A equação representante da equivalência ou interação entre a fase gasosa e a fase particulada é dada pela 2ª lei de Newton, nesta observa-se que:

$$\vec{F} = m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (12)$$

Em que, m_p corresponde à massa da partícula; \vec{u}_p o vetor velocidade da partícula e \vec{F} corresponde à somatória das forças de arraste e não arraste que atuam sobre as partículas das quais apenas as forças de arraste foram consideradas. Assim,

$$\vec{F} = \vec{F}_D = \frac{1}{8} \pi d_p^2 \hat{f}_s \rho C_D |\vec{v}_r| \vec{v}_r \quad (13)$$

Em que d_p é o diâmetro da partícula; \vec{v}_r a velocidade relativa partícula-gás; \hat{f}_s é um fator de área de seção transversal dado pela Equação 21 e C_D o coeficiente de arraste definido pela correlação semi-empírica de Ishii/Zuber:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + (1 + 0,1 Re_p^{0,75}) \quad (14)$$

Válida para $0,2 \leq Re_p \leq 1000$, sendo o número de Reynolds da partícula dado pela fórmula:

$$Re = \frac{\rho |\vec{v}_r| d_p}{\mu} \quad (15)$$

Em que, ρ é a densidade da fase gasosa, μ a viscosidade da fase gasosa e \vec{v}_r o vetor velocidade relativa.

A correlação de Ishii/Zuber foi aplicada a partículas de geometria esférica, sendo necessário adotar um procedimento de correção da partícula esférica para não esférica, como é o caso das partículas de bagaço de cana-de-açúcar. Neste caso,

foram usados dois fatores de correção, um fator de área de seção transversal, \hat{f}_s , e o fator de área superficial, \hat{f}_t , definidos, respectivamente, por:

$$\hat{f}_s = \frac{A_{ne}}{A_e} \quad (16)$$

$$\hat{f}_t = \frac{S_e}{S_{ne}} \quad (17)$$

Em que, A_{ne} é a área de seção transversal de uma partícula não esférica de volume V , A_e área de seção transversal de uma partícula esférica de volume V , S_e é a área superficial de uma partícula esférica de volume V e S_{ne} a área superficial de uma partícula não esférica de volume V .

A transferência de calor entre as partículas-ar de secagem é expressa ao se abordar duas situações: a) transferência de calor por convecção; b) por transferência de calor latente associado à transferência de massa.

- **Transferência de calor por convecção**

Esta quantidade de energia é dada por:

$$Q_c = \mu d_p \lambda Nu (T_G - T_p) \quad (18)$$

Em que, T_p é a temperatura da partícula; λ a condutividade térmica do fluido; T_G a temperatura do gás e Nu é o número de Nusselt, que representa a razão entre a transferência de calor de um fluido por convecção e por condução dado por:

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda} \quad (19)$$

Em que, h_c é o coeficiente de transferência térmica. O número de Nusselt é obtido pela função dos números de Prandtl, Pr , e do número de Reynolds da partícula, Re_p , é dado pela correlação de Ranz e Marshall, citado no manual do ANSYS CFX® 15.0 (2015), como a seguir:

$$Nu = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (20)$$

O número de Prandtl mede a relação entre a transferência calor por difusão e a transferência de momento. Esta correlação empírica é válida para a seguinte situação: $5 \times 10^5 \leq Re_p \leq 5 \times 10^7$ e $0,5 \leq Pr \leq 2000$, com o número de Prandtl dado por:

$$Pr = \frac{C_{pg}\mu}{\lambda} \quad (21)$$

- **Transferência de calor latente associado à transferência de massa**

A energia consumida para evaporar a água na superfície da partícula, Q_m , é definida como sendo a somatória da energia de cada partícula que entra no ciclone, esta é dada por:

$$Q_m = \sum \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (22)$$

Sendo o calor latente de vaporização, h_{fg} , que é função da temperatura, dado por:

$$h_{fg} = h_{fg0} + \int_{T_{hfg0}}^T (C_p - C_g) dT \quad (23)$$

Em que, h_{fg0} é o calor latente na temperatura de referência; T_{hfg0} é a temperatura de referência; C_p é o calor específico da partícula e C_g representa o calor específico do gás.

Neste modelo, é suposto que a umidade e a temperatura possuem o mesmo valor para todos os pontos do sólido, desprezando-se a resistência interna à transferência de massa e calor, quando comparada à resistência externa (modelo concentrado). Esse modelo é válido para números de Biot (Equação 24) de transferência de massa ou calor menor que 0,1, para transferência de calor, em que a condução é muito mais rápida que a convecção.

O número de Biot estabelece a relação entre a queda de temperatura no corpo e a diferença de temperatura entre a superfície e o meio externo expresso por:

$$Bi = \frac{h_c L_c}{k_b} \quad (24)$$

Em que, h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo; L_c o comprimento característico (V/A) e k_b é o coeficiente de condutividade térmica do corpo.

A transferência de massa entre a fase particulada e a fase gasosa é determinada pela seguinte equação:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho D Sh \frac{PM_v}{PM_g} \log \left(\frac{1 - X_e}{1 - X_g} \right) \quad (25)$$

Em que, D é a difusividade dinâmica; PM_v o peso molecular do vapor de água; PM_g o peso molecular do gás; X_e a fração molar de equilíbrio; X_g a fração molar do gás e Sh é o número de Sherwood, também chamado de número de Nusselt de transferência de massa. Este parâmetro representa a razão entre a transferência de massa convectiva e difusiva dado por:

$$Sh = \frac{K_m L_c}{D_{ag}} \quad (30)$$

Em que, K_m é o coeficiente de transferência de massa convectivo; D_{ag} é a difusividade do vapor de água no ar e L_c é o comprimento característico (V/A).

O número de Sherwood foi determinado usando a correlação empírica dada por:

$$Sh = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad (31)$$

Válida para $2 \leq Re_p \leq 200$, sendo Sc é o número de Schimdt definido por:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{ag}} \quad (32)$$

Em que, μ é viscosidade dinâmica e ρ a densidade, ambas da fase fluida.

A (Equação 25) é aplicada quando a temperatura da partícula está abaixo do ponto de bolha, caso contrário emprega-se a seguinte equação:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\frac{Q_c}{Q_m} \quad (33)$$

Em que, dm_p/dt é a transferência de massa no decurso do tempo; Q_c corresponde à transferência de calor por convecção e Q_m é a quantidade de calor latente devido à vaporização.

A pressão de vapor é determinada com o auxílio da equação de Antoine, dada por:

$$P_{vapor} = P_{ref} \exp\left(A - \frac{B}{C+T}\right) \quad (34)$$

Em que, A, B, C são constantes e iguais a 18,30; 3816,44 K e -4,13 K, respectivamente.

3.3.3 Condições de contorno

- **Paredes do ciclone**

Adotou-se a condição de não deslizamento para as componentes de velocidade, e condição de fluxo de calor adiabático, isto é:

$$u_x = u_y = u_z = 0 \quad (35)$$

$$Q = 0 \quad (36)$$

- **Seções de saída do ciclone**

Adotou-se a pressão igual à pressão atmosférica e condição de Neumann para a temperatura, isto é, a variação de temperatura na direção normal ao contorno é nula:

$$P = P_{atm} \quad (37)$$

$$\frac{dT}{dy} = 0 \quad (38)$$

- **Seção de entrada**

Foi adotada uma condição prescrita de velocidade, temperatura e fração de água no ar quente, bem como o fluxo mássico de partículas.

3.3.4. Parâmetros termofísicos

Na Tabela 1 estão os valores das propriedades que não foram alteradas durante as simulações. Estas propriedades foram definidas de acordo com os materiais utilizados no processo de secagem, que foram o ar a 25°C e partícula de bagaço de cana-de-açúcar.

Durante as simulações assumiu-se que a partícula de bagaço de cana-de-açúcar era totalmente constituída de água com o objetivo de simplificar o modelo de secagem adotado.

Tabela 1 - Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem.

Propriedades físico-químicas	Fluido: ar (25°C)	Partícula (bagaço de cana-de-açúcar)
Densidade [$\frac{Kg}{m^3}$]	1,185	958,37
Condutividade Térmica [$\frac{N}{m \cdot K}$]	$3,7673 \times 10^2$	0,215
Calor latente de vaporização [$\frac{J}{Kg}$]	-	$2,251 \times 10^6$
Difusividade [$\frac{m^2}{s}$]	$4,0787 \times 10^{-5}$	-
Peso Molecular [$\frac{Kg}{Kmol}$]	28,96	18,02
Temperatura da partícula [°C]	-	30,6
Fator de área superficial [ft]	-	2,78
Fator de área de seção transversal [fs]	-	3,89

Fonte: Autoria própria (2021)

3.4. Casos Simulado

Foram escolhidos 3 casos para a realização das simulações, dentre variáveis escolhidas para serem alteradas durante a realização das simulações foi o diâmetro da partícula, sendo eles:

- Caso 1 – 5,35 mm;
- Caso 2 – 6,35 mm;
- Caso 3 – 7,35 mm.

As demais variáveis mantendo-se constante, os valores utilizados podem-se conferir na tabela 2.

Tabela 2: Expressões utilizadas nas simulações.

Expressões	
Calor Latente	2,251e+06 [$\frac{J}{Kg}$]
Difusividade Efetiva	4,0787e-05 [$\frac{m^2}{s}$]
Fluxo de Massa da Partícula	13,1 [$\frac{g}{s}$]
Pressão de Referência	1 [atm]
Rugosidade	0,045 [mm]
Temperatura de Ent. Gás	483,15 [K]
Temperatura da Partícula	303,75 [K]
Tensão Superficial	0,073 [$\frac{N}{m}$]
Velocidade de Ent. do Gás	15,0 [$\frac{m}{s}$]
Velocidade da Partícula	15,0 [$\frac{m}{s}$]
Fluxo de partículas	6,55 [$\frac{g}{s}$]

Fonte: Autoria própria (2021)

Os critérios para selecionar o melhor caso incluem:

- As Linhas de Velocidade da Partícula;
- As Linhas de Temperatura da Partícula;
- A Tempo residência da Partícula;
- A Temperatura;
- A Pressão;
- Fração Mássica de Água;
- O Campo Vetorial.

4. Resultados e discussões

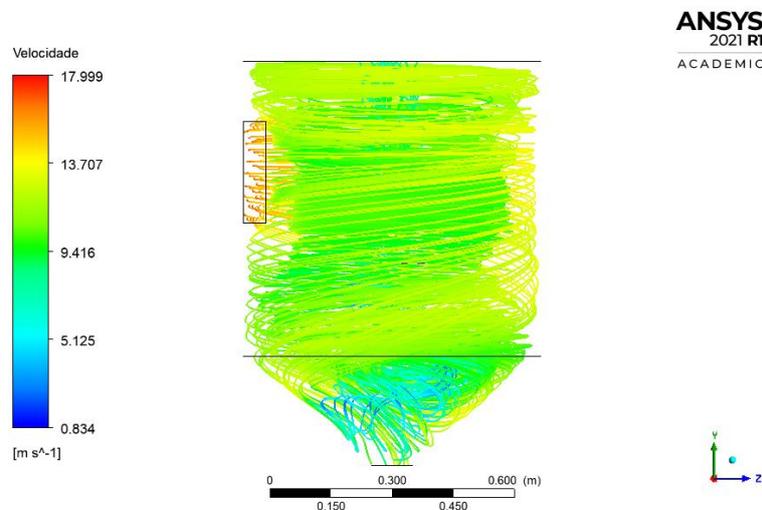
4.1. Análise das linhas de velocidade

As Figuras 13, 14 e 15 ilustram a velocidade do gás em termos de linhas de fluxo do gás entrando no ciclone pela mesma posição. Esses resultados mostram que o comportamento em helicoidal do gás mostra uma tendência decrescente próximo às paredes cilíndricas e cônicas do ciclone, enquanto mostra uma tendência ascendente próximo ao centro do ciclone, o que é justificado pelas características tridimensionais do ciclone. Corrêa (2003) e Farias (2006) também observaram o escoamento de fases dentro do equipamento, utilizando o mesmo tamanho do ciclone utilizado neste trabalho.

Observa-se claramente que o comportamento fluidodinâmico é diretamente afetado pela forma como o fluido entra no ciclone, onde alteração ocorreu devido aos diferentes diâmetros das partículas.

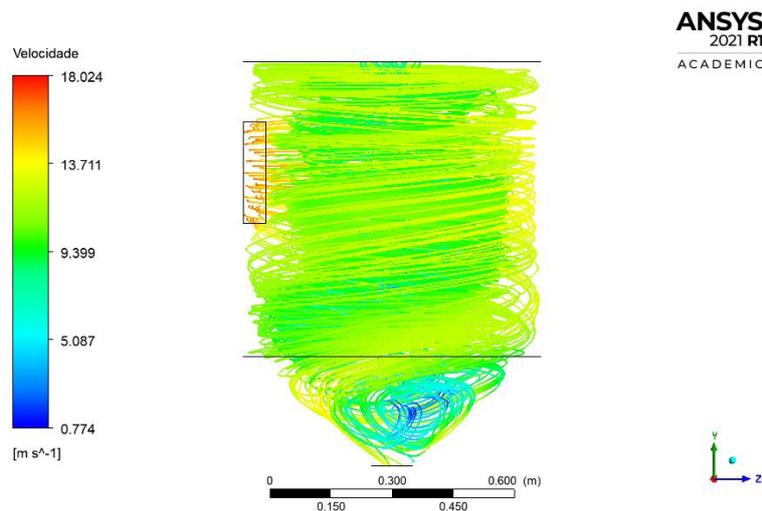
Percebe-se um aumento gradativo na concentração dos números de voltas das linhas de fluxo do gás na Figura 13 para a Figura 15. Comprovando que a trajetória do gás é afetada pelo diâmetro da partícula.

Figura 13 - Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



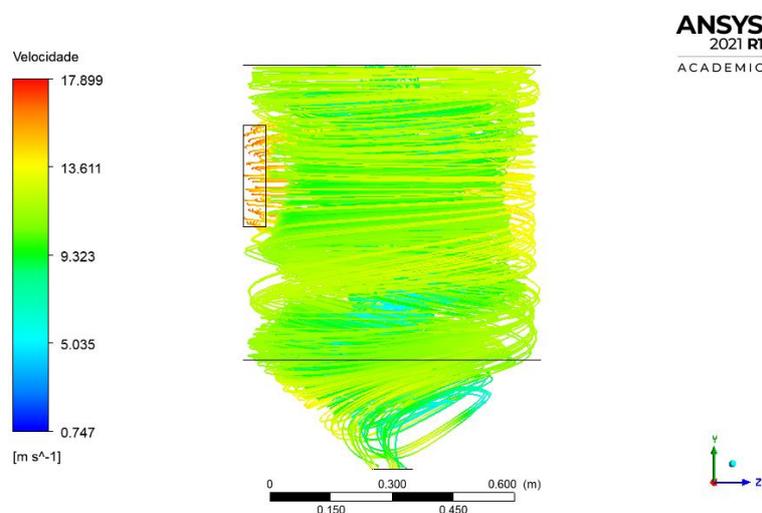
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 14 - Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 15 - Fluxo de velocidade no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.

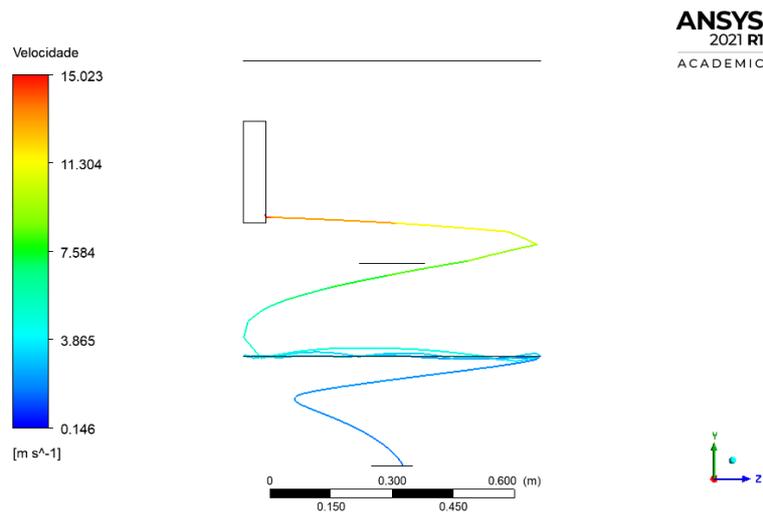


Fonte: Autoria própria (2021)

As Figuras 16, 17 e 18, mostram a trajetória de uma única partícula, indicando que o comportamento helicoidal da partícula mostra uma tendência decrescente próximo às paredes cilíndricas e cônicas do ciclone. Considerando a grande diferença de densidade entre as fases gasosa (ar) e particulada (bagaço), esse comportamento já é esperado. Este comportamento está relacionado à gravidade, força centrífuga, força centrípeta e força de arrasto atuando dentro do separador de ciclone, essas forças direcionam as partículas para as paredes cilíndricas e cônicas.

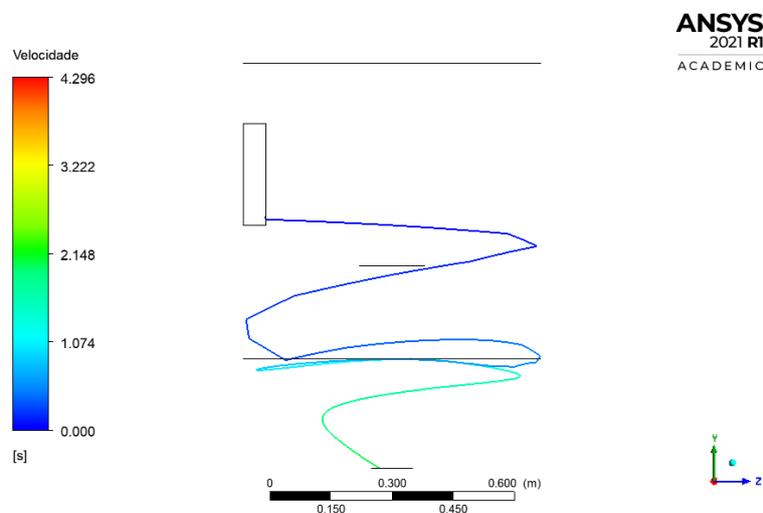
Svarovsky (2001) e Farias (2006) atribuem esse comportamento à forte mistura turbulenta causada pelo fluxo de ar que entra no ciclone pelo tubo de alimentação, que promove a difusão radial das partículas próximas à parede cilíndrica para a saída inferior do ciclone. Observa-se também que a trajetória da partícula não é fortemente afetada pelo diâmetro da partícula, entretanto, o número de voltas se tornou maior à medida em que o diâmetro da partícula aumentou.

Figura 16 - Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



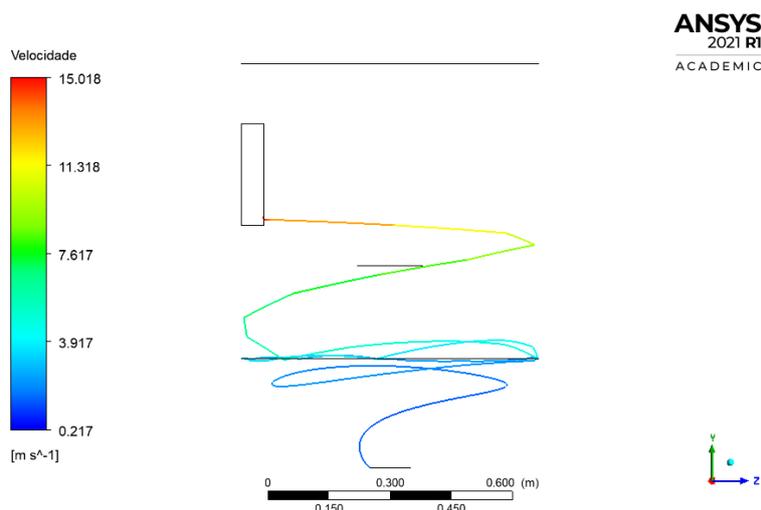
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 17 - Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 18 - Linhas de velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.

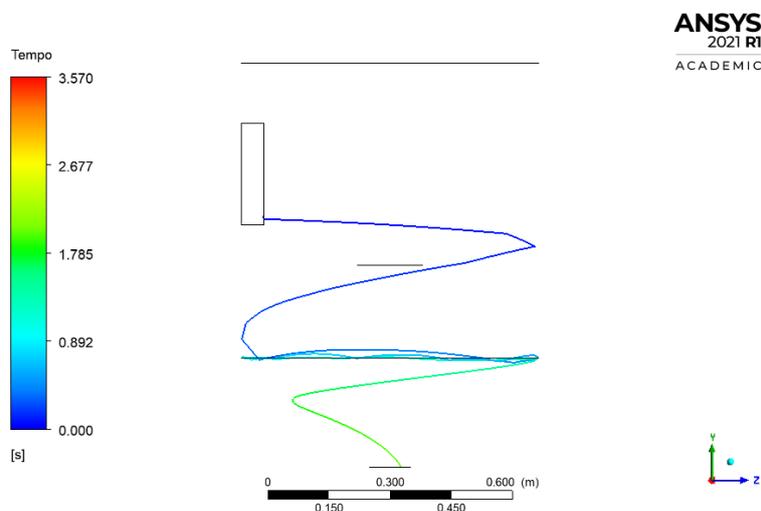


Fonte: Autoria própria (2021)

4.2. Tempo de residência da partícula

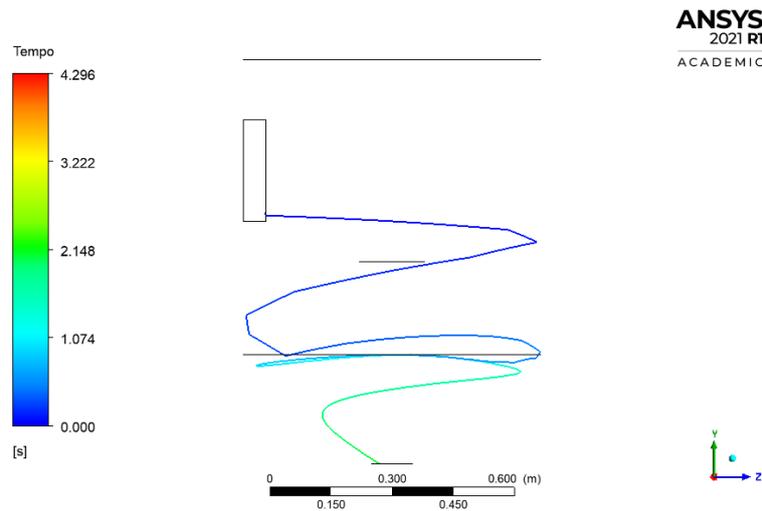
As Figuras 19, 20 e 21, apresentam o tempo de residência da partícula sobre o plano longitudinal YZ. Sendo possível perceber que, quanto maior o diâmetro da partícula, maior é o tempo de residência. Dentro dos casos avaliados, o tempo é maior para o caso da Figura 21, sendo notável a presença de um número de voltas na região onde acontece a conexão entre a parte cilíndrica e a parte cônica.

Figura 19 - Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



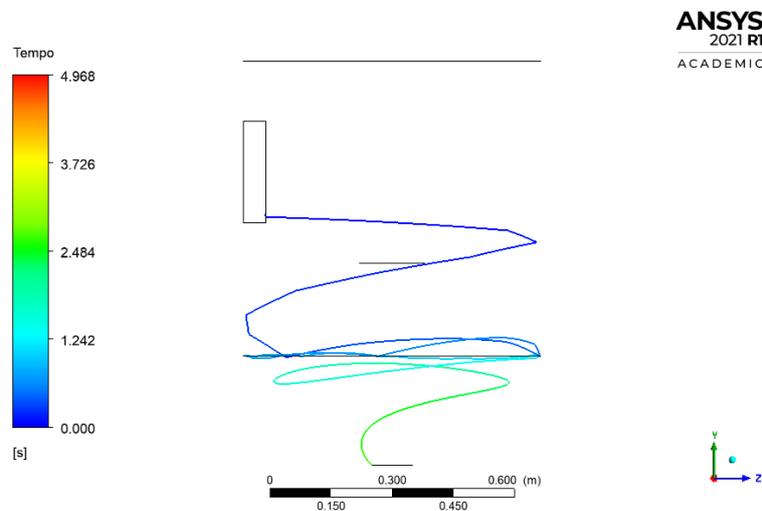
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 20 - Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 21 - Tempo de residência da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.

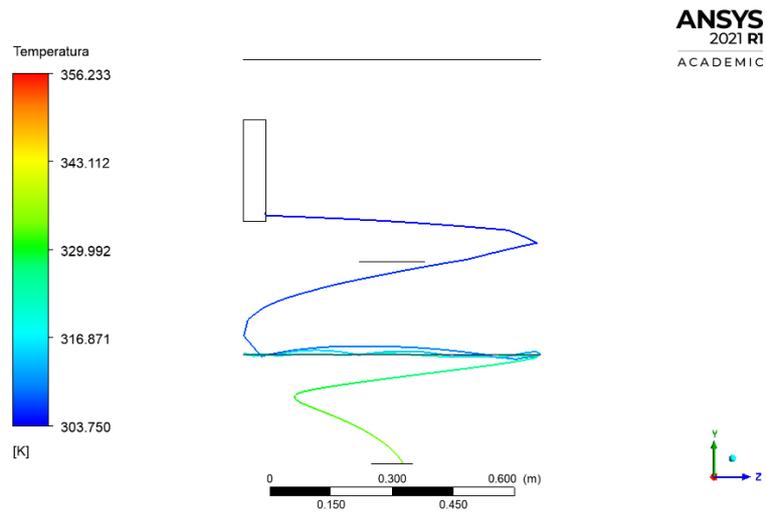


Fonte: Autoria própria (2021)

4.3. Análise das linhas de temperatura

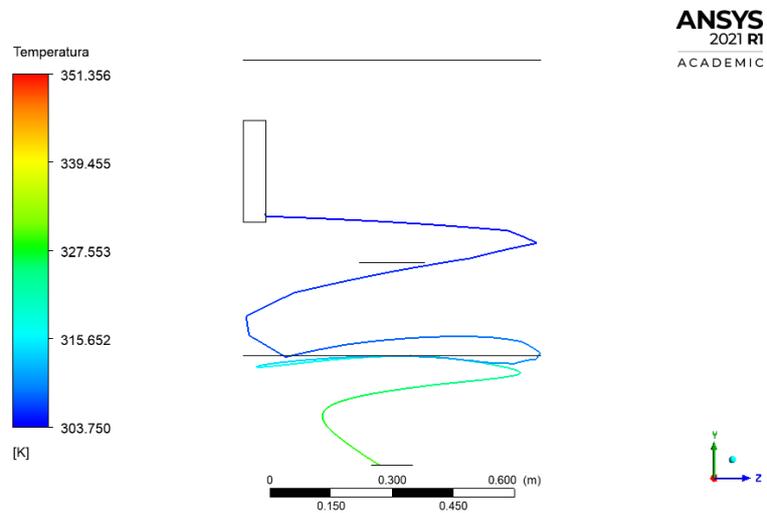
As Figuras 22, 23 e 24, apresenta o tempo de residência da partícula sobre o plano longitudinal YZ. Nota-se, que quanto maior o diâmetro da partícula, maior é o gradiente de temperatura, ou seja, a diminuição da temperatura ocorre de forma mais lenta. Dentro dos casos avaliados, o gradiente de temperatura é maior para a Figura 24, devido ao tempo de residência maior, mais voltas, isso permite uma troca térmica com o gás de secagem maior.

Figura 22 - Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



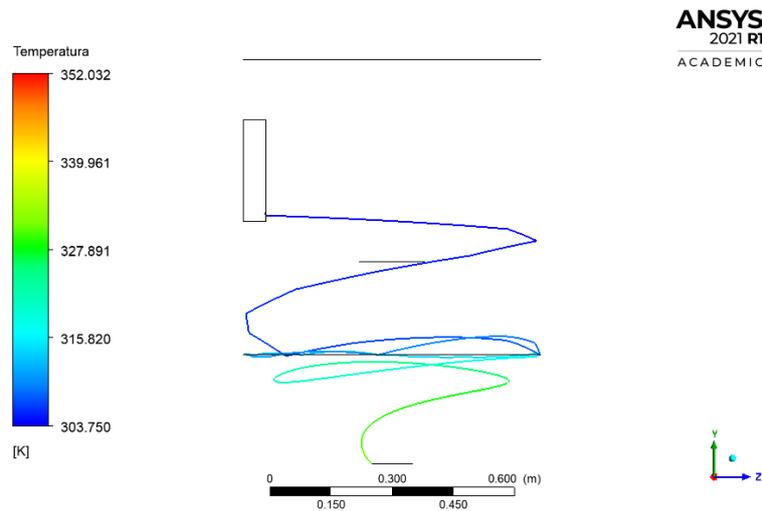
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 23 - Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 24 - Linha de temperatura da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.



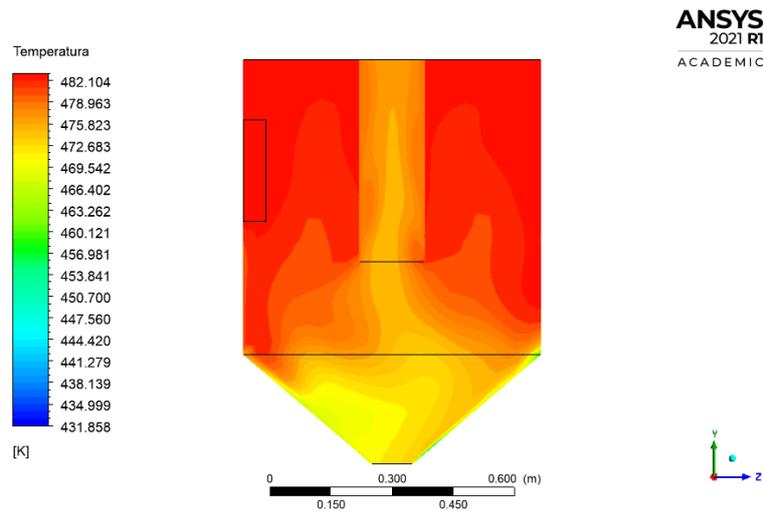
Fonte: Autoria própria (2021)

4.4. Análise da temperatura

Nas Figuras 25, 26 e 27, observa-se que a distribuição de temperatura da fase gasosa segue o comportamento em helicoidal descendente das partículas arrastadas pelo fluxo de ar seco, pois pode-se observar que o gradiente de temperatura está localizado no cone do separador de ciclone. Comportamento semelhante foi observado em Souza (2012), segundo ele, é nessa área em forma de cone que as partículas ficam mais tempo e, assim, trocam mais calor com o ar seco.

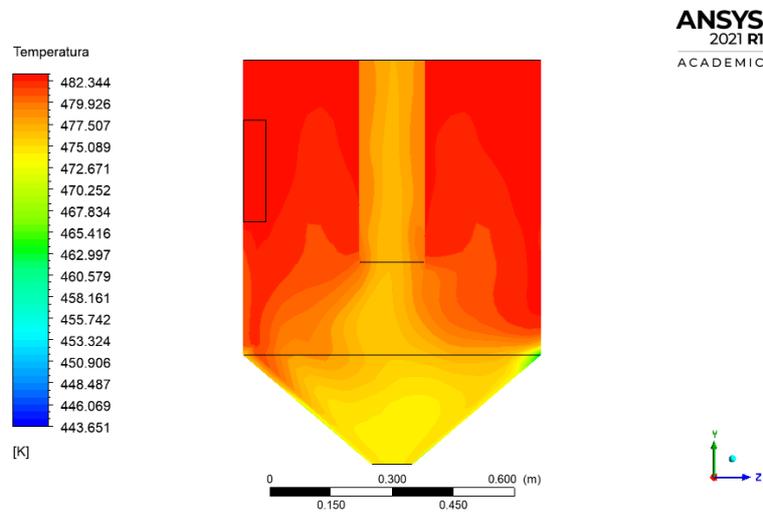
Percebe-se que quanto maior for o diâmetro da partícula, menor é o gradiente de temperatura sobre o plano longitudinal YZ, resultando assim que partículas maiores tendem a perder menos temperatura que as de menor diâmetro, pois o tamanho da área de contato da partícula com o gás no interior, está diretamente ligado com a temperatura.

Figura 25 - Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



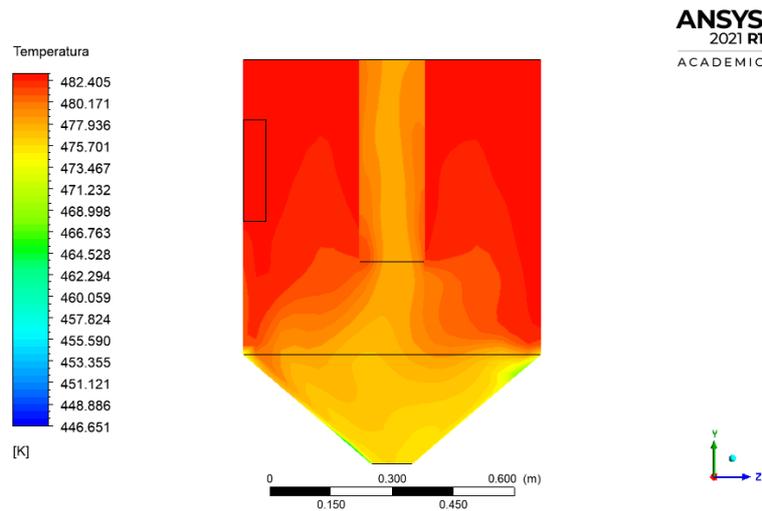
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 26 - Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 27 - Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.

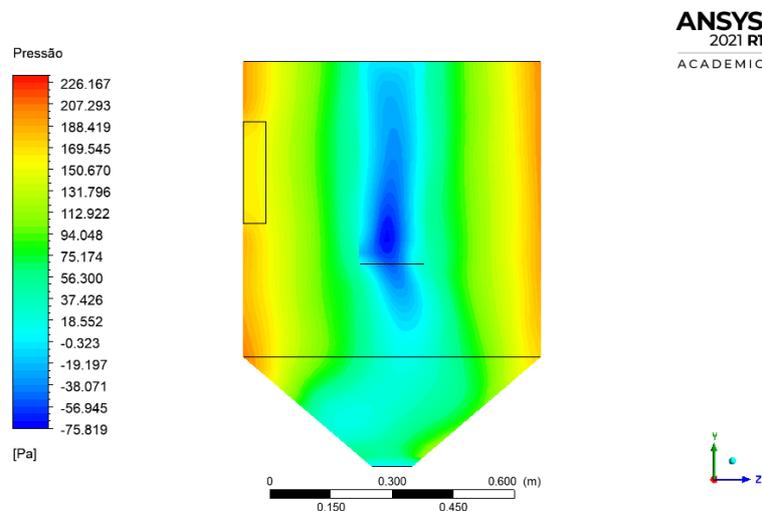


Fonte: Autoria própria (2021)

4.5. Análise da pressão

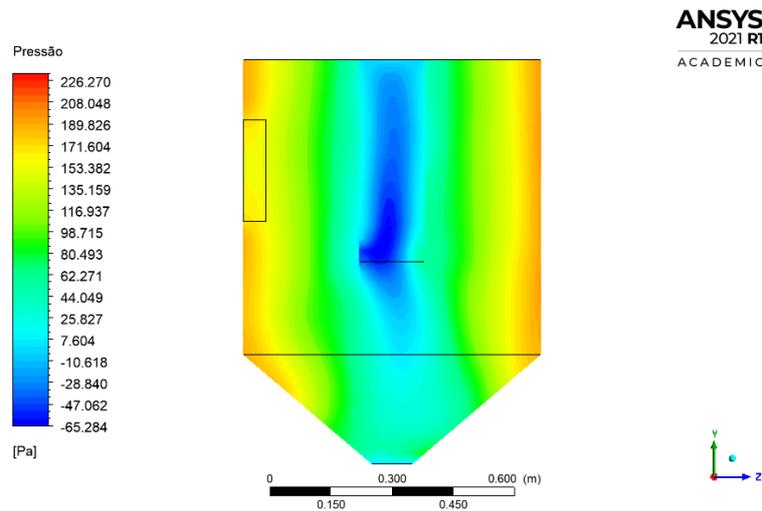
Nas Figuras 28, 29 e 30, percebe-se pelos gradientes de pressão sobre os planos longitudinais YX e YZ que a pressão decresce radialmente em direção ao centro do ciclone a partir das paredes do cilindro-cônico (SILVA, 2016).

Figura 28 - Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



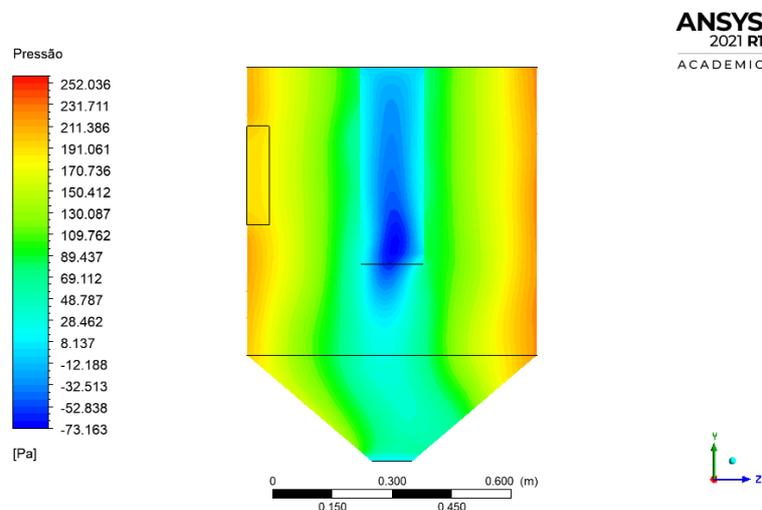
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 29 - Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 30 - Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

4.6. Análise da fração mássica de água

As Figuras 32 e 33, apresenta o gradiente de fração mássica de água no plano longitudinal YZ. A fração mássica presente no tubo central é composta de vapor de água que se desprende da partícula durante o seu movimento circular no interior do ciclone.

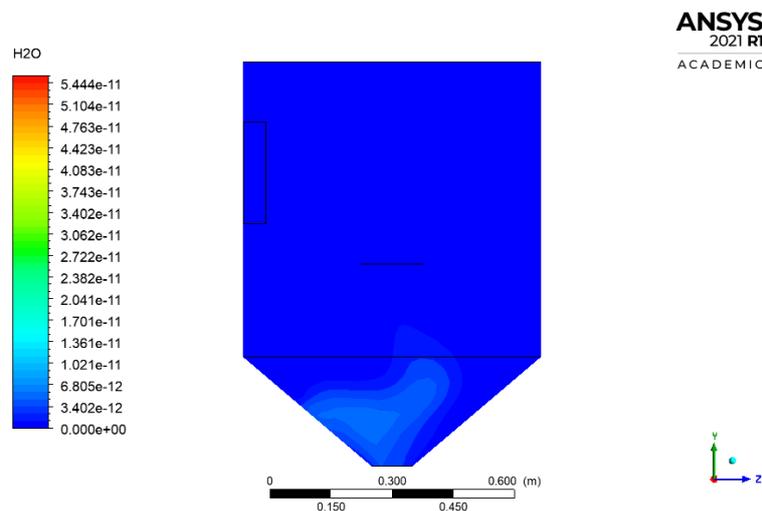
É possível perceber, observando na Figura 31 que o tubo central de saída do ciclone (overflow), apresenta um menor gradiente de concentração de vapor de água,

diferente das Figuras 32 e 33, podendo notar um pequeno gradiente somente na parte inferior da região cônica.

O gradiente de concentração de água na Figura 33 é maior que na Figura 32, sendo também nítida a diferença na região de maior fração mássica de água entre elas, uma vez que este último caso foi o que mais liberou vapor de água, tendo pontos de concentração no tubo central de saída do ciclone (overflow) e na parte inferior da região cônica. Analisando as Figuras 32 e 33, é possível perceber, ainda, que a fração mássica de água cresce radialmente em direção ao centro do ciclone a partir das paredes do cilindro-cônico (SILVA, 2016).

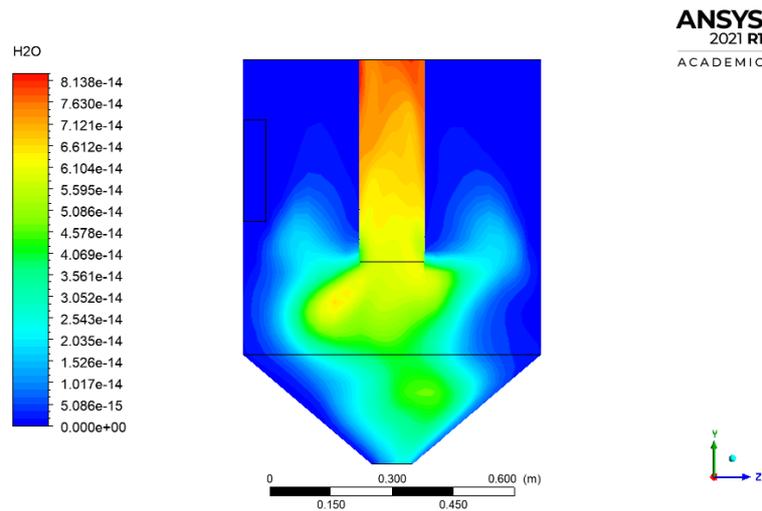
A conclusão é que quanto maior o tamanho da partícula, maior a quantidade de água liberada no estado gasoso. Isso ocorre porque o diâmetro maior proporciona mais voltas das partículas no interior do ciclone, o que resulta em melhor troca térmica com o gás de secagem.

Figura 31 - Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



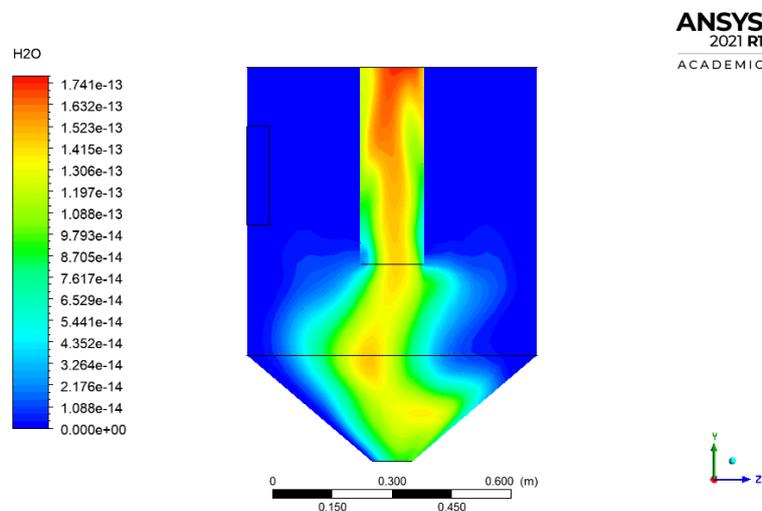
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 32 - Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 33 - Fração mássica de água no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.

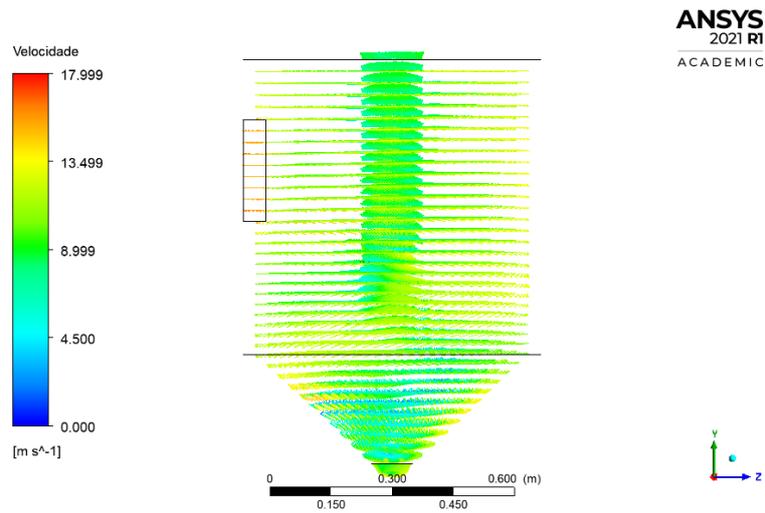


Fonte: Autoria própria (2021)

4.7. Análise do campo vetorial

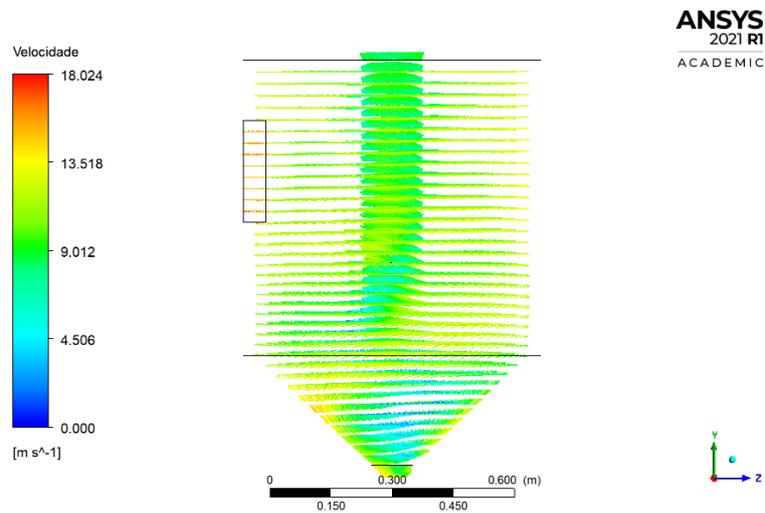
Nas Figuras 34, 35 e 36, apresenta o campo vetorial de velocidade do gás sobre o plano longitudinal YZ. É possível perceber que a alteração do diâmetro alterou a presença de vórtices, zonas de reversão de fluxo e intensidade turbilhonar do escoamento, devido a uma pequena variação da velocidade na região de entrada. Pois sabemos que os vórtices estão relacionados a velocidade (SILVA, 2016).

Figura 34 - Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 5,35 mm.



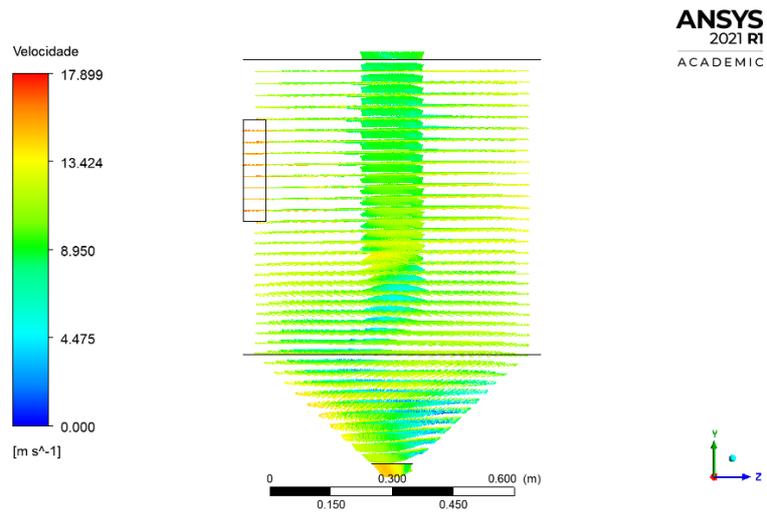
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 35 - Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 6,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 35 - Campo vetorial no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YZ, para o diâmetro da partícula de 7,35 mm.



Fonte: Autoria própria (2021)

5. Considerações finais

A partir das simulações, foi visto o caráter tridimensional do escoamento.

Neste trabalho, os resultados mostram que o comportamento espiral do gás apresenta uma tendência descendente próximo às paredes cilíndricas e cônicas do ciclone, e uma tendência ascendente próximo ao centro do ciclone, que é causada pelo ciclone.

Também pode ser visto que a trajetória da partícula não é fortemente afetada pelo diâmetro da partícula, mas conforme o diâmetro da partícula aumenta, o número de voltas torna-se maior.

O tempo é maior para o diâmetro 7,35 mm, havendo muitas voltas na área onde a ligação entre a parte cilíndrica e a cônica é significativa.

O gradiente de temperatura é maior para o diâmetro 7,35 mm, devido ao tempo de residência maior e um número maior de voltas, permitiu uma troca de calor com o gás de secagem maior.

Quanto maior o tamanho da partícula, menor o gradiente de temperatura, portanto, as partículas maiores perdem menos temperatura do que as partículas menores, porque o tamanho da área de contato entre as partículas e o gás interno está diretamente relacionado à temperatura.

Pode ser visto a partir do gradiente de pressão que a pressão diminui radialmente em direção ao centro do ciclone a partir das paredes do cilindro-cônico.

Quanto maior for o tamanho da partícula, maior será a quantidade de água liberada no estado gasoso. Isso ocorre porque o diâmetro maior da partícula faz com que ela dê mais voltas no interior do ciclone, o que resulta em melhor troca de calor com o gás.

Também pode ser notado, que a mudança no tamanho do diâmetro da partícula modificou a presença de vórtices, zonas de reversão de fluxo e intensidade turbilhonar do escoamento, por causa de uma pequena variação da velocidade na região de entrada, porque o vórtice está relacionado à velocidade.

Referências

- ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores.** 241 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.
- AUGUSTO, P. E. D. *et al.*. Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na avaliação da pasteurização de cervejas: efeito da orientação da lata. **Braz. J. Food Technol**, Campinas, v. 13, n. 4, p. 260-270, 2010.
- BARBOSA, B. M. B. **Influência da temperatura do ar de entrada na secagem do bagaço de cana-de-açúcar em secador ciclônico via simulação no CFX.** 43 p. TCC (Bacharelado em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.
- BARBOSA, R. D. **Secagem de bagaço de cana em sistema pneumático.** 223 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1992.
- BENTA, E. S. **Estudo da secagem de sabugo de milho em ciclone.** 130 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1997.
- BERNARDO, S. **Estudo dos escoamentos gasoso e gás-sólido em ciclones pela aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional.** 2004. 266 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2004.
- BORTOLI, A. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional.** [S. l.]: UFRGS, 2000. 136 p. ISBN 8570255454.
- CARMO, J. E. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas.** 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2004.
- CARVALHO, L. C. *et al.*. Cana-de-açúcar e álcool combustível: Histórico, sustentabilidade e segurança energética. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, p. 530-543, 1 jul. 2013.
- CHAVES, J. B. P. *et al.*. **Cachaça – Produção Artesanal de Qualidade. Viçosa – Minas Gerais, CPT, 2007.** 321 p. ISBN 978-85-7601-936-7.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar Safra 2019/2020: Primeiro Levantamento Maio/2019.** Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/26522_a59699997ccd7d2a58a5c9a29371b267. Acesso em: 25 de março 2021.

CONABa. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar Safra 2020/2021: Terceiro Levantamento Dezembro/2020.** Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/34871_f71cd14bf535e24ef75efc4f16b5f444. Acesso em: 25 de março 2021.

CONABb. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar Safra 2020/2021: Terceiro Boletim da Safra de Cana-de-açúcar Dezembro/2020.** Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/34870_e1c52a336b53ca05c29824831da3c9e9. Acesso em: 25 de março 2021.

CORREA, J. L. G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos.** 169 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.

CREMASCO, M. A. **Estudo sobre o escoamento ar-partículas em um reator ciclônico.** 182 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1994.

CRUZ, O. C. **Desempenho de um hidrociclone de geometria “Rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação.** 66 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2008.

DAMIAN, R. B. **Acoplamento de balanço populacional à simulação computacional de escoamentos multifásicos polidispersos.** Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

FARIAS, F. P. M. **Estudo teórico da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos.** 131 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esferoidais usando o método de Galerkin.** 65 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das Operações Unitárias.** 2. ed. LTC, 1982. 682 p. ISBN 9788521610380.

FOX, R. W. *et al.* **Introdução à mecânica dos fluidos.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 884 p. ISBN 9788521623021

FRARI, R. V D.; PEDROSO, C. A. Malhas Computacionais para Simulação Numérica de Escoamentos de Fluidos entre Cilindros com Excentricidade. **X Encontro Gaúcho de Educação Matemática**, Ijuí, p. 1-8, 2009.

GOMES, Márcia Andréa. **Destoxificação de hidrolisados lignocelulósico visando à obtenção de etanol 2G.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alagoas, [S. I.], 2015.

GONÇALVES, E. C. **Secagem ciclônica do resíduo da indústria processadora de laranja.** 87 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1996.

HONORATO, G. C. **Concepção de um secador rotatório para secagem do cefalotórax do camarão.** 167 p. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento

de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

KORN, O. Cyclone dryer: a pneumatic dryer with increased solid residence time. **Drying Technology**, v. 19, p. 1925-1937, 2007.

KURIAKOSE, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. **Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products**. Trends in Food Science & Technology, v. 21, n. 8, p. 383–398, 2010.

LIMA, R. C. **Simulação de grandes escalas de escoamentos incompressíveis com transferência de calor e massa por um método de elementos finitos de subdomínio**. 161 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

LUIZ, L. C. **Visualização de Escoamentos Bifásicos em Tubulações Metálicas por Neutronografia em Tempo Real**. 75 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MACHADO, Fúlvio de Barros Pinheiro. Brasil, a doce terra - História do Setor. **Jornal Cana**, Ribeirão Preto, 2003. Disponível em: <https://www.jornalcana.com.br/brasil-a-doce-terra-historia-do-setor/>. Acesso em: 25 de março de 2021.

MARCONATO, M. S.; SANTINI, G. A. **Alternativas para a geração de energia renovável no Brasil: a opção pela biomassa**. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, 46., 2008, Rio Branco. Anais... Rio Branco: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2008. p.17.

MARTÍN, M. M. **Introduction to Software for Chemical Engineers**. 1. ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2014. 613 p. ISBN 9781466599369.

MATIAS, Á. Revolução Verde. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/revolucao-verde.htm>. Acesso em: 07 de outubro de 2021.

MICHEL JUNIOR, R. J. S. **Obtenção do álcool etílico hidratado, com graduação alcoólica para uso automotivo: validação de um processo em batelada**. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2010.

MITRE, J. F. **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2018. 40 Slides.

NEBRA, S. A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 121 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Revista de Economia Aplicada**, São Paulo, v. 11, p. 587-604, 2007.

OLIVEIRA, L. F. **Secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico**. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras 2010.

OLIVÉRIO, J. L. Technological evolution of the Brazilian sugar and alcohol sector: Dedini's contribution. **International Sugar Journal**, Tunbridge Wells, v. 108, n. 1287, p. 120-129, 2006.

PALADINO, E. E. **Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial**. 263 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PONTES, T. G. **Avaliação do sistema de secagem do açúcar da usina Monte Alegre**. 28 p. TCC (Graduação em Tecnologia Sucoalcooleira) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

RANADE, V. **Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering**. 1. ed. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2001. 480 p. v. 5. ISBN 0125769601.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: Impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 59 p. TCC (Especialização em Análise Ambiental) - Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2010.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. [S. l.]: UFV, 2013. 637 p. ISBN 978-85-6024-939-8.

SANTOS, J. C. P. **Secagem da borra de café em secador ciclônico**. 60 p. Dissertação (Mestrado) - Secagem da borra de café em secador ciclônico, Minas Gerais, 2009.

SANTOS, J. S. S. *et al.*. Transporte de óleos pesados em catenárias via técnica core-flow – Modelagem e Simulação. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânica - ABCM**, Campina Grande, 2010.

SILVA, J. P. P. A. **Secador ciclônico: Modelagem e simulação via CFX**. 83 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, M. A. **Estudo de secagem em ciclone**. 1991. 123 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1991.

SILVA, M. A. P. **Hidrociclones de bradley: dimensionamento e análise de desempenho**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 1989.

SILVA, V. S. *et al.*. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**, Maringá, v. 3, n. 1, p. 59-76, 23 jun. 2010.

SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A. Bagasse dryer role in the energy recovery of water tube boilers. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 27, n. 4, p. 587-594, 2009.

SOSNIK, A.; SEREMETA, K. P. **Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers**, Advances in Colloid and Interface Science, 2015.

SOUZA, J. A. R. **Secagem de sólidos via ciclones: modelagem e simulação**. 114 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2012.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. 4. ed. Inglaterra: Butterworth-Heinemann, 2001. 554 p.

SZMRECSÁNYI, T. J. K. **O Planejamento da Agroindústria Canavieira do Brasil (1930-1975)**. Campinas: Hucitec, 1979.

TAITEL, Y. *et al.*. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE**, New York, v. 26, p. 345-354, 1980.

TAVARES, D. P. S. A. **Escoamento trifásico não-Isotérmico em oleodutos horizontais com vazamento: Modelagem e simulação**. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

UDOP. **Cana-de-açúcar: Do etanol ao açúcar**. União Nacional da Bioenergia. Araçatuba, 2020. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2020/06/09/do-etanol-ao-acucar.html>. Acesso em: 26 de março 2021.

UNICA. **Cresce participação da cana-de-açúcar na geração de energia.** União da Indústria de Cana-de-Açúcar. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/cresce-participacao-da-cana-de-acucar-na-geracao-de-energia/>. Acesso em: 26 de março 2021.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** 2. ed. Hoboken, Nova Jersey: Prentice Hall, 2007. 503 p. ISBN 0131274988.

VIDAL, M. F.; SANTOS, J. A. N.; SANTOS, M. A. Setor sucroalcooleiro no nordeste brasileiro: estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. **Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural**, Fortaleza, p. 1-18, 2006.

VILLAR, G. C. **Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de banana: análise da influência das variáveis operacionais.** 117 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba Campus II, Campina Grande, 1999.

VIOTTO, L. A. **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café.** 274 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1991.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F. Competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana-de-açúcar. **PENSA/FIA/FEA/USP**, São Paulo, v. 5, p. 72, 1998.

XIA, B.; SUN, D. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. **Elsevier Science**, [S. l.], v. 34, p. 5-24, 2002.