



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

**CARLOS RICARDO FLORENTINO MANDU BEZERRA**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SECAGEM DAS  
PARTÍCULAS DO BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO CICLONE SECADOR VIA  
SIMULAÇÃO NO CFX**

**SERRA TALHADA**  
**2024**

**CARLOS RICARDO FLORENTINO MANDU BEZERRA**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SECAGEM DAS  
PARTÍCULAS DO BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO CICLONE SECADOR VIA  
SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no 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(a): Prof. Dr. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante

**SERRA TALHADA**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

B574 Bezerra, Carlos Ricardo Florentino Mandu.

Influência da temperatura no processo de secagem das partículas do bagaço de cana utilizando ciclone secador via simulação no CFX / Carlos Ricardo Florentino Mandu Bezerra. - Serra Talhada, 2024.  
58 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Serra Talhada, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante.

1. Termodinâmica. 2. Fluidodinâmica computacional (CFD). 3. Secagem. 4. Ciclone. 5. Bagaço- de-cana. I. Título.

CDD 536.5

---

CARLOS RICARDO FLORENTINO MANDU BEZERRA

## INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE SECAGEM DAS PARTÍCULAS DO BAGAÇO DE CANA UTILIZANDO CICLONE SECADOR 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: 07/02/2024

Banca examinadora

**Daniel Cesar De  
Macedo Cavalcante**

Assinado digitalmente por Daniel Cesar De Macedo Cavalcante  
ND: OU=Campus Serra Talhada, O=IFSertãoPE, CN=Daniel Cesar De  
Macedo Cavalcante, E=daniel.cesar@ifsertao-pe.edu.br  
Razão: Eu concordo com os termos definidos por minha assinatura neste  
documento  
Localização: Serra Talhada - PE  
Foxit PDF Reader Versão: 2023.3.0

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

Documento assinado digitalmente



ALESSIO TONY BATISTA CELESTE  
Data: 15/02/2024 18:33:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Prof. Me. Tarcisio David Konna Nunes Santos  
IFSertãoPE – Campus Serra Talhada  
Examinador interno

Guilherme Luiz de Oliveira Neto

Assinado de forma digital por Guilherme Luiz de Oliveira Neto  
Dados: 2024.02.08 19:41:59 -0300'

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

## DEDICATORIA

Dedico esse trabalho inteiramente aos meus pais e minha irmã que sempre estiveram comigo diante de todas as dificuldades.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me presenteou com um dos dons mais preciosos: a força de vontade. Minha eterna gratidão se estende à minha mãe, Maristela Florentino, uma presença constante e incansável em minha jornada, que sacrificou seus próprios desejos para que eu pudesse seguir meus estudos. Meu pai, Carlos Antônio, é uma fonte inesgotável de apoio, trabalhando incansavelmente em um escritório monótono e sob o sol escaldante de um sítio, garantindo-me tudo, mesmo quando as finanças apertavam, nunca negando nada para me manter bem. Ele é meu exemplo de honra e moral.

Expresso minha gratidão ao meu tio Paulo César, cuja fé inabalável em mim e apoio constante foram fundamentais. Suas orientações, especialmente na escolha do meu curso, foram sábias e valiosas, alertando-me sobre os desafios, mas nunca duvidando da minha capacidade. À minha irmã, Amanda Letícia, que sempre me incentivou nos estudos, minha sincera gratidão.

Às minhas tias, cujo apoio, conselhos e desejo sincero pelo meu sucesso sempre foram presentes, minha profunda gratidão. Ao Dr. Daniel Cesar, agradeço por guiar-me ao longo de dois anos consecutivos em pesquisas, trabalhos, congressos e no TCC, proporcionando-me a oportunidade de explorar o campo da pesquisa.

Agradeço ao meu colega de jornada no IF, Isaías Lima, que, como um mentor, ofereceu-me oportunidades para melhorar profissionalmente, aconselhando-me e nunca perdendo a confiança em meu potencial. Minha gratidão se estende a todos os amigos que estiveram ao meu lado nessa jornada, apoiando-me e acreditando em mim.

Expresso minha profunda gratidão aos notáveis professores do ensino médio, Edinete Cipriano, José Neto, Maria do Bom Conselho e Sebastião Alves, que sempre me apoiaram incondicionalmente, mantendo sua fé constante no meu potencial. Além disso, sou grato por proporcionarem oportunidades contínuas para aprimorar minha trajetória profissional, enriquecendo-a com suas valiosas experiências, as quais foram compartilhadas durante meus estágios ao lado deles. E por fim, gostaria de agradecer o Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos - LCTFDa UFCG por ceder a estrutura para a simulação.

## EPÍGRAFE

"Se pensar em desistir, não será julgado, pois a maioria escolhe esse caminho. No entanto, você não está entre a maioria. Um acidente não determina quem você é... mas sua reação a ele sim."  
(Gran Turismo: Jack Salter)

## RESUMO

O processo de desidratação desempenha um papel crucial na preservação de alimentos, sendo uma prática ancestral. Ao longo do tempo, houve investimentos em equipamentos para aprimorar esse procedimento, resultando no desenvolvimento de diversos tipos de secadores. No contexto deste estudo, optou-se pelo uso de um secador ciclone, um dispositivo mecânico simples empregado na indústria por quase um século, cuja função é separar as partículas do fluxo de ar. A fim de assegurar uma eficiência otimizada nesse equipamento, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) torna-se essencial. Essa abordagem de simulação, que utiliza modelos matemáticos aplicados por meio de um computador, visa reduzir custos e aprimorar o processo de secagem. O objetivo principal desta pesquisa consiste na análise numérica da dinâmica do fluido térmico em secadores ciclônicos, especificamente explorando a influência da variação da temperatura de entrada do gás por meio do software CFX. O estudo visa examinar a distribuição de temperatura, pressão no ciclone secador durante o ciclo de secagem. Adicionalmente, busca-se avaliar a velocidade do gás em função das alterações da temperatura de entrada da partícula. Os resultados indicam um comportamento helicoidal do gás no ciclone secador, com uma tendência descendente próximo às paredes e ascendente no centro, resultante da rotação do ciclone. A análise dos gradientes de pressão revela uma variação significativa ao longo do plano longitudinal, sugerindo uma influência da geometria na dinâmica do fluxo. A distribuição helicoidal da temperatura na fase gasosa destaca a importância das partículas arrastadas pelo fluxo, especialmente no cone do separador, indicando uma troca térmica mais intensa e prolongada nessa região.

**Palavras-chave:** Fluidodinâmica computacional (CFD); secagem; Ciclone; bagaço-de-cana.

## ABSTRACT

The dehydration process plays a crucial role in food preservation and has been a longstanding practice. Over time, investments have been made in equipment to enhance this procedure, resulting in the development of various types of dryers. In the context of this study, a cyclone dryer, a simple mechanical device employed in the industry for almost a century, was chosen. Its function is to separate particles from the airflow. In order to ensure optimized efficiency in this equipment, Computational Fluid Dynamics (CFD) becomes essential. This simulation approach, utilizing mathematical models applied through a computer, aims to reduce costs and improve the drying process. The main objective of this research is the numerical analysis of the thermal fluid dynamics in cyclone dryers, specifically exploring the influence of varying the gas inlet temperature using CFX software. The study aims to examine the distribution of temperature and pressure in the dryer cyclone during the drying cycle. Additionally, it seeks to evaluate the gas velocity as a function of changes in the particle inlet temperature. The results indicate a helical behavior of the gas in the cyclone dryer, with a descending tendency near the walls and an ascending tendency in the center, resulting from the cyclone's rotation. The analysis of pressure gradients reveals a significant variation along the longitudinal plane, suggesting an influence of geometry on the flow dynamics. The helical distribution of temperature in the gas phase highlights the importance of particles dragged by the flow, especially in the separator cone, indicating a more intense and prolonged thermal exchange in that region.

**Keywords:** Computational fluid dynamics (CFD); drying; Cyclone; sugarcane bagasse.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura da celulose, formada por monômeros de glicose .....	20
Figura 2 - Estrutura polimérica da hemicelulose .....	20
Figura 3 - Estrutura polimérica da Lignina .....	21
Figura 4 - Estrutura de um ciclone .....	26
Figura 5 - Estrutura de um ciclone .....	28
Figura 6 - Modelo de funcionamento de um ciclone.....	28
Figura 7- Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado nos trabalhos de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012). .....	34
Figura 8 - Mostra a grade numérica usada na simulação .....	35
Figura 9 - Mostra a entrada tangencial do ciclone secador.....	35
Figura 10 - Mostra as paredes do ciclone secador. ....	36
Figura 11 - Mostra a saída inferior e superior do ciclone secador.....	36
Figura 12 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35 mm .....	48
Figura 13 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35 mm .....	48
Figura 14 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35 mm .....	49
Figura 15 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35mm .....	50
Figura 16 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35mm .....	50
Figura 17 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35mm .....	51
Figura 18 – Velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35mm.....	52
Figura 19 – Velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35mm.....	52
Figura 20 - Velocidade da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35mm.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição percentual de algumas biomassas .....	22
Tabela 2 – Casos Simulados .....	46
Tabela 3 – Parâmetros físicos que se mantiveram constantes durante o estudo e seus respectivos valores. ....	46
Tabela 4 - Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Nome	Unidade de medida
A	Constante	[-]
A <sub>e</sub>	Área de seção transversal de uma partícula esférica	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>ne</sub>	Área de seção transversal de uma partícula não esférica	[m <sup>2</sup> ]
B	Constante	[-]
B <sub>i</sub>	Número de Biot	[-]
C	Constante	[-]
C <sub>D</sub>	Coeficiente de arraste	[-]
C <sub>g</sub>	Calor específico do gás	[kJ/kg K]
C <sub>p</sub>	Calor específico da partícula	[kJ/kg K]
C <sub>ε1RNG</sub>	Constante do modelo de turbulência RNG k-ε	[-]
C <sub>ε2RNG</sub>	Constante do modelo de turbulência RNG k-ε	[-]
C <sub>μRNG</sub>	Constante do modelo de turbulência RNG k	[-]
D <sub>A</sub>	Difusividade Cinemática	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
D <sub>ag</sub>	Difusividade de vapor de água na fase gasosa	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
D <sub>m</sub>	Difusividade de massa	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula	[m]
F	Resultante das forças que atuam sobre a partícula	[N]
F <sub>D</sub>	Força de arraste	[N]
f <sub>p</sub>	Fração de partículas	[-]
f <sub>H2O</sub>	Fração de água no ar	[-]
$\hat{f}_t$	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]
$K_b$	Coeficiente de condutividade do corpo	[-]
$K_m$	Coeficiente de transferência de massa	[-]
$L_c$	Comprimento característico	[m]
$M$	Teor de umidade	[kg/kg]
$M_0$	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 <sup>2</sup> ]
$Sc$	Número de Schmidt	[-]

Sh	Número de Sherwood	[-]
SM	Termo Fonte	[-]
S <sub>ne</sub>	Área Superficial de uma partícula esférica	[m <sup>2</sup> ]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T <sub>G</sub>	Temperatura do gás	[K]
T <sub>p</sub>	Temperatura da partícula	[K]
T <sub>hfg0</sub>	Temperatura de referência	[K]
u <sub>g</sub>	Velocidade do gás	[m/s]
u <sub>p</sub>	Velocidade da partícula	[m/s]
<i>u</i>	Vetor velocidade	[m/s]
<i>u<sub>p</sub></i>	Vetor velocidade da partícula	[m/s]
<i>u</i>	Vetor velocidade média	[m/s]
V	Volume	[m <sup>3</sup> ]
<i>v<sub>p</sub></i>	Velocidade relativa partícula-gás	[m/s]
x	Operador produto vetorial	[-]
X	Direção	[m]
X <sub>e</sub>	Fração molar de equilíbrio	[-]
X <sub>g</sub>	Fração molar do gás	[-]
Y	Fração mássica	[-]
Y	Direção	[m]
Z	Direção	[m]

## LETRAS GREGAS

Letra	Nome	Unidade de medida
$\sigma_{\epsilon 1RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\epsilon$	[-]
$\beta_{RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\epsilon$	[-]
$\partial$	Varição	[-]
$\nabla \cdot$	Divergente	[-]
$\nabla$	Convergente	[-]
$\psi$	Potencial de capilaridade	[-]
$\rho$	Densidade	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade da fase contínua	[Pas]
$\Omega$	Velocidade angular da partícula	[rad/s]
$\mu_{ef}$	Viscosidade efetiva	[Pas]
$\mu_T$	Viscosidade turbulenta	[Pas]
$\Phi_{ij}$	Correlação tensão-pressão	[-]
$\epsilon$	Taxa de dissipação de energia turbulenta	[m <sup>2</sup> s <sup>3</sup> ]
$\delta$	Função delta de Kronecker	[-]
$r$	Tensor de cisalhamento	[Kg/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Condutividade térmica do fluido	[W/Km]

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	14
2.	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	15
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	16
3.1	Cana de açúcar.....	16
3.2.	Bagaço da cana .....	18
3.3.	Bagaço de cana, uma fonte de energia renovável .....	18
3.4.	Biomassa .....	19
3.5.	Secagem.....	23
3.6.	Curvas de secagem .....	23
3.7.	Secagem do bagaço .....	25
3.8.	Secadores Industriais.....	25
3.9.	Secadores Ciclônicos.....	26
3.10.	Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	31
3.11.	Programa Ansys.....	31
4.	METODOLOGIA .....	33
4.1.	O modelo matemático .....	37
4.2.	Casos Simulados .....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1.	Análise da pressão.....	48
5.2 .	Análise da temperatura .....	50
5.3.	Análise das Linhas de Fluxo .....	52
6.	CONCLUSÃO .....	54
	REFERÊNCIAS .....	55-58

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem é um procedimento unitário bastante aplicado em ambientes industriais. Ela opera por meio da desidratação do produto e é empregada em setores como os da agricultura, alimentos, papel e celulose, mineração, polímeros e farmácia (PONTES, 2014). De acordo com Luiz (2012), a escolha do aparelho para o processo de secagem é de suma importância, pois vai determinar a operação total do processo, o consumo de energia e a eficácia do mesmo.

Os secadores ciclônicos são dispositivos usados em processos contínuos, com a finalidade de desidratar partículas sólidas por meio da transferência de calor e massa feita pelo ar que transporta as partículas dentro do ciclone (MALDANER, 2012). Desde os anos 70, as sucessivas crises energéticas e a grande quantidade de poluentes oriundos de combustíveis fósseis têm elevado a importância do estudo de fontes de energia renováveis, como por exemplo, a energia produzida a partir da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar.

O bagaço é um resíduo obtido da extração do suco da cana-de-açúcar. Depois de tratado adequadamente, o bagaço pode ser usado como biomassa na cogeração de energia. Para um melhor aproveitamento do bagaço como biomassa, é essencial a redução da umidade. Através do uso de ciclones, é possível eliminar essa umidade de maneira rápida e eficiente, melhorando a manipulação do bagaço de cana-de-açúcar (SILVA, 2016).

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta de pesquisa dos processos físicos e físico-químicos evidenciados em fluxos. Com essa ferramenta, é possível estudar os efeitos demonstrados durante a extração da umidade do bagaço da cana-de-açúcar em um ciclone, através da previsão do sistema de fluxo dos fluidos, transferência de calor e fenômenos associados presentes nesse processo (AUGUSTO et al., 2010).

O objetivo deste trabalho é agregar à comunidade acadêmica e abrir novas possibilidades para o estudo do uso de ciclones na secagem do bagaço de cana-de-açúcar, através de simulações numéricas. O desafio tratado neste trabalho é realizar a simulação e estudo dos efeitos da temperatura do ar de entrada em um secador ciclônico, com foco na análise da remoção de umidade de partículas de bagaço de cana-de-açúcar por meio deste secador.

## **2. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS**

### **a. Objetivo Geral**

- i. Este trabalho tem como objetivo estudar numericamente a termofluidodinâmica de um secador ciclônico via CFX a partir da variação da temperatura de entrada da partícula.

### **b. Objetivos específicos**

- i. Realizar simulações numéricas para analisar a distribuição de pressão dentro do secador ciclônico em diferentes condições de temperatura de entrada da partícula.
- ii. Avaliar o impacto da variação da temperatura de entrada da partícula na pressão interna do secador.
- iii. Investigar numericamente a influência da temperatura de entrada da partícula na velocidade da partícula no sistema.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

#### 3.1 Cana de açúcar

Acredita-se que a cana-de-açúcar tenha se originado em regiões temperadas quentes a tropicais da Ásia, particularmente na Índia, foi introduzida em regiões situadas ao longo do Mar Mediterrâneo e do Oceano Índico pelos árabes e chineses. Os cruzados, tendo adquirido o gosto pelo açúcar durante sua estada no Extremo Oriente, desejaram continuar seu uso após seu retorno à Europa, levando a um florescente comércio de açúcar.

Por vários séculos, um de seus derivados, o açúcar, foi uma raridade luxuosa, consumido apenas pelas classes privilegiadas da Europa, que o haviam provado pela primeira vez por volta do século VIII, e o consumiam como especiaria e medicamento. Apenas no século XVIII é que ele se tornaria um produto trivial, de uso diário (Mintz, p. 38-40, 2003).

A chegada da cana-de-açúcar ao Brasil ocorreu através de Martim Affonso de Souza em 1532, onde ele foi incumbido de o início de uma base de colonização efetiva nas novas terras, uma responsabilidade que ele teria de pensar em um produto para estimular a fixação e desenvolvimento dos colonizadores. Um produto que fosse apreciado pelo mercado europeu, fácil de produzir, de comercializar e adaptável às condições ambientais brasileiras (Piletti, 1996; Ferreira, 1996). A prévia experiência exitosa, associada à disponibilidade de terras e de mão de obra indígena na nova colônia, foi um fator decisivo para a opção pela cana-de-açúcar como primeiro produto a ser cultivado em terras brasileiras (Furtado, 1969, p. 10).

Conforme descrito por Rodrigues (2010), a introdução da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu por volta do século XVI, como parte da estratégia de colonização e exploração de Portugal. O solo massapê, predominante na região nordeste do país, aliado à alta cotação do açúcar no mercado europeu, fez com que o cultivo de cana se tornasse a principal atividade econômica da região.

Leite et al. (2018) afirmam que a cana-de-açúcar tem relevância global como uma cultura agrícola, sendo significativa não apenas para a produção de açúcar, mas também para a de biocombustível. Após a crise do petróleo em 1973, o mercado de combustíveis incentivou a produção de cana, gerando muitos empregos.

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).

O bagaço da cana-de-açúcar é um subproduto importante da indústria de açúcar e álcool. Ele é produzido durante o processamento da cana-de-açúcar, que envolve a limpeza, preparação e extração do caldo. O bagaço é um tipo de biomassa que precisa ser tratado antes de ser descartado ou reutilizado para geração de energia (SILVA, 2016).

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%.

A eficácia da extração do caldo afeta diretamente a composição do bagaço. Portanto, é importante remover a umidade deste através de secadores para que o material possa ser usado como fonte de energia. Muitas indústrias, por exemplo, dependem exclusivamente da energia obtida do bagaço resultante do processamento da cana-de-açúcar (FERNANDES; MIGUEL, 2011).

Vital, Luz e Lima (2003) esclarecem que antes da extração do caldo, a cana-de-açúcar consiste em 75% de água, 10% de fibras e 15% de sólidos dissolvidos. Depois da extração do caldo, essas porcentagens mudam para: 50% de água, 46% de fibras e 4% de sólidos totais dissolvidos no bagaço. Embora o bagaço de cana tenha sido tratado historicamente apenas como resíduo, ele tem sido usado na alimentação animal e na produção de energia. Isso permitiu que muitas indústrias se tornassem autossuficientes através da geração de energia derivada da queima do bagaço de cana, também conhecida como cogeração (SOUZA, 2012).

Em termos de rendimento, é possível obter 300 kg de bagaço de cana a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar. Este bagaço contém 50% de umidade (bu) e tem a capacidade de gerar cerca de 70kW de energia, o que é muito mais eficiente para o autoconsumo de uma usina (FARIAS, 2006).

### **3.2. Bagaço da cana**

Como toda a produção anual de cana-de-açúcar no Brasil se torna evidente a quantidade de resíduos que serão gerados por esse processo. A primeira estimativa, da safra 2023/24, aponta para um aumento na produção de cana-de-açúcar, quando comparada à última safra. A estimativa é de crescimento de 4,4% em relação à safra 2022/23, resultando em uma produção de 637,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. (CONAB)

Na produção do álcool combustível, em média, cada tonelada de cana-de-açúcar produz 140 kg de bagaço e 140 kg de palha como resíduo. Na cadeia produtiva do biodiesel, também é gerado material lignocelulósico residual (palha, tronco, galhos, cascas e bagaço) proveniente das espécies oleaginosas. A elevada disponibilidade de biomassa lignocelulósica residual no Brasil tem papel importante na produção de energia utilizando fontes renováveis. (GUEDES, C. L. B. 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).

### **3.3. Bagaço de cana, uma fonte de energia renovável**

A noção de utilização de biomassa para energia é um conceito relativamente novo que gerou considerável controvérsia e discurso, principalmente devido à competição potencial que representa com relação à produção de alimentos. No entanto, devido às crises incessantes no fornecimento de petróleo, bem como à probabilidade de sua escassez, à volatilidade dos preços e, principalmente, aos efeitos ambientais deletérios dessa fonte, o cultivo de culturas bioenergéticas voltadas para a geração de energia e energia surgiu como uma alternativa viável, sustentável e criteriosa para atender a uma parte da demanda existente por petróleo e seus subprodutos, particularmente em o setor de transporte. (SILVA, 2016)

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia para a produção de eletricidade está sujeita à influência significativa do teor de umidade

variável observado na mistura binária bagaço-água. Especificamente, o potencial energético do bagaço durante a combustão está positivamente correlacionado com seu grau de ressecamento. Consequentemente, o valor dos ciclones como secadores ou pré-secadores eficazes que podem ser adaptados para esse fim deve ser fortemente enfatizado, dadas suas aplicações multifacetadas. (SILVA, 2016)

Em uma instalação de produção de açúcar, especificamente em uma usina, o processo de moagem de uma tonelada de talo produz uma variedade de produtos e subprodutos. Isso inclui 100 kg de açúcar, 250-300 kg de bagaço, 550-660 kg de vapor e 70 kW/h de energia. No contexto de uma destilaria autônoma ou unidade de produção de álcool, o procedimento de moer uma tonelada de cascas resulta na aquisição de 75 litros de álcool, 250 a 300 kg de bagaço e 70 kW/h de energia. (CHAVES et al., 2007).

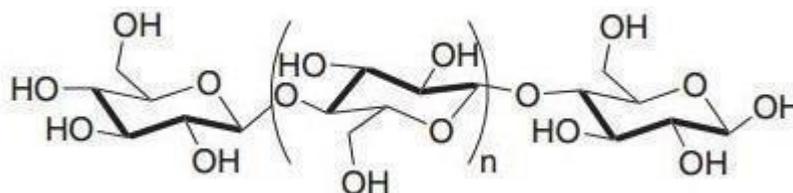
### **3.4. Biomassa**

Biomassa é definida como resíduos sólidos urbanos, animais, vegetais, industriais e florestais (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). A biomassa lignocelulósica é composta por celulose, hemicelulose, lignina e, em menor quantidade, extrativos removíveis por solventes polares ou apolares (como terpenos, alcaloides, compostos fenólicos, açúcares, óleos essenciais, etc.) e minerais, tais como silício, cálcio, potássio, ferro, fósforo, alumínio, sódio e magnésio (SANTOS, 2011). A utilização da biomassa como alternativa energética enfrenta desafios como: custo, eficiência energética de sua cadeia produtiva e a dificuldade em avaliar quais resíduos são reutilizáveis para a geração de energia e quais são destinados a usos alternativos como alimentação animal, controle de erosão, fertilizante e medicinal (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

A celulose é o principal componente da biomassa lignocelulósica, representando de 40 a 80% de sua composição. É um polímero de cadeia longa cuja unidade monomérica é a glicose (ALMEIDA, 2008). Os seis grupos hidroxila que compõem a unidade de celulose formam ligações intramoleculares e intermoleculares, e devido à presença dessas ligações de hidrogênio, a celulose se apresenta na forma de cristais brancos insolúveis em água e solventes orgânicos.

Portanto, é um polímero linear que compõe a parede celular das plantas (FERREIRA, 2014).

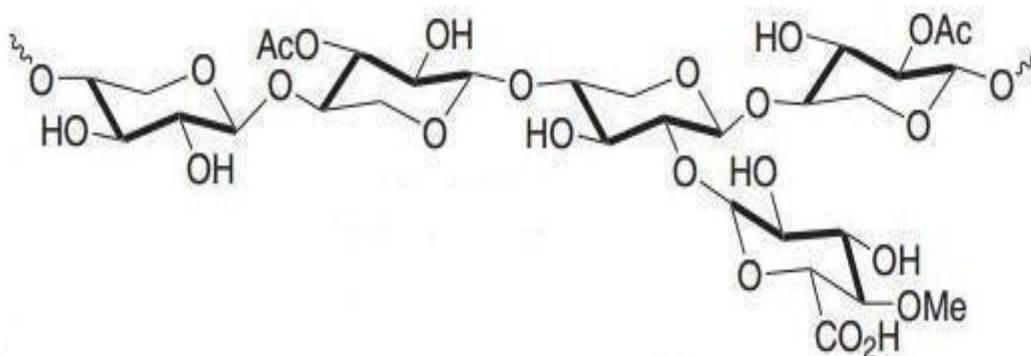
Figura 1- Estrutura da celulose, formada por monômeros de glicose.



Fonte: Adaptado de Silva, Morais (2008)

A hemicelulose é o segundo componente mais abundante na biomassa, representando de 15 a 40% de sua composição. É um polissacarídeo amorfo muito complexo que também está presente nas paredes celulares das plantas. As cadeias poliméricas de hemicelulose contêm glicose, galactose, manose, xilose, anabinose e ácido glucurônico, que podem ser lineares ou ramificadas (ALMEIDA, 2008; SANTOS, 2011).

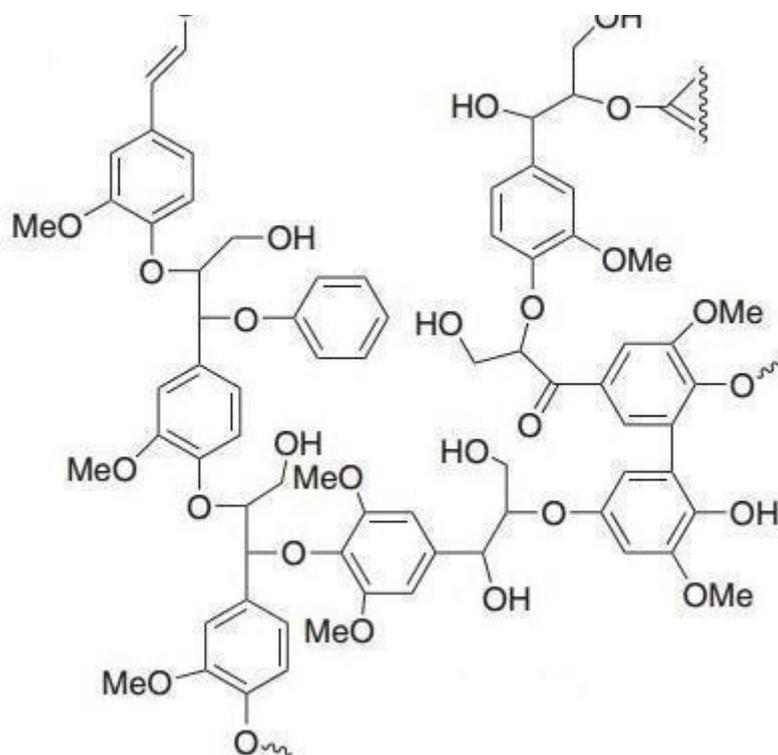
Figura 2 - Estrutura polimérica da hemicelulose.



Fonte: Adaptado de Silva, Morais (2008)

A lignina é o terceiro componente mais abundante na biomassa, representando de 10 a 30% de sua composição. Tem uma estrutura tridimensional polifenólica altamente ramificada e amorfa. Está presente na parede celular formando um complexo lignocelulósico com a celulose. Sua estrutura bastante complexa inclui guaiacol, siringol e hidroquinona (ALMEIDA, 2008).

Figura 3 - Estrutura polimérica da Lignina



Fonte: Adaptado de Silva, Morais (2008)

Como é uma substância muito complexa, a lignina é difícil de converter em outros produtos. No entanto, é uma importante fonte de insumos aromáticos para a indústria química e é uma fonte significativa de carbono na natureza (FERREIRA, 2014).

A Tabela 1 ilustra a distribuição das principais matrizes poliméricas que constituem algumas biomassas. Portanto, a natureza e a estrutura complexa desses compostos poliméricos são fatores decisivos para o uso eficaz da biomassa como uma alternativa viável de energia renovável.

Tabela 1- Composição percentual de algumas biomassas

<b>Biomassa</b>	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lignina</b>
<b>Bagaço de cana</b>	36	47	17
<b>Faia</b>	48	28	24
<b>Cereja</b>	42	34	24
<b>Bordo</b>	40	38	22
<b>Carvalho</b>	35	40	25
<b>Casca verde-oliva</b>	22	33	45
<b>Pinho</b>	50	27	23
<b>Álamo</b>	48	30	22
<b>Bagaço de cana</b>	41,3	22,6	18,3
<b>Fibra de coco</b>	47,7	25,9	17,8
<b>Casca de coco</b>	36,3	25,1	28,7
<b>Sabugo de milho</b>	40,3	28,7	16,6
<b>Pé de milho</b>	42,7	23,6	17,5
<b>Resíduo de Algodão</b>	77,8	16,0	0
<b>Casca de Milho</b>	33,3	26,9	14,0
<b>Casca de Amendoim</b>	35,7	18,7	30,2
<b>Casca de Arroz</b>	31,3	24,3	14,3
<b>Palha de Arroz</b>	37,0	22,7	13,6
<b>Madeira</b>	39,7	24,0	24,7
<b>Palha de trigo</b>	30,5	28,9	16,4
<b>Farelo de cevada</b>	23,0	32,7	24,4
<b>Casca de aveia</b>	30,5	28,6	23,8
<b>Eucalipitus globulus</b>	46,3	17,1	22,9
<b>Eucalipitus grandis</b>	40,2	16,7	26,9
<b>Palha de sorgo</b>	34	44	20

Fonte: Adaptado de Santos (2011)

Rocha et al. (2004) explicam que a biomassa é uma combinação de polímeros de celulose, lignina e hemicelulose, com a composição variando de acordo com a natureza da biomassa. A biomassa pode ser direcionada para quatro processos: pirólise, gaseificação, liquefação e combustão. A composição específica de cada biomassa determina a composição final dos produtos da pirólise, que são gás, bio-óleo e carvão. Os processos de pirólise, gaseificação e combustão variam de acordo com a temperatura, tempo de residência no reator e a atmosfera, seja inerte ou com oxigênio, utilizados.

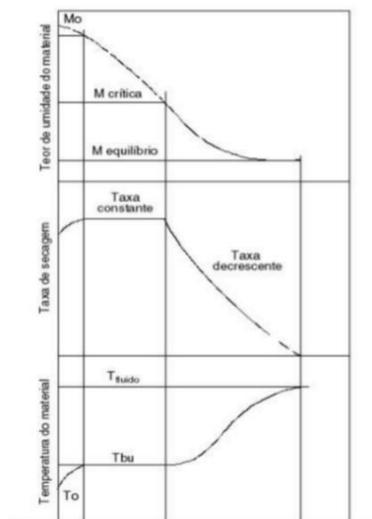
### 3.5. Secagem

A secagem é o processo de remoção de umidade ou líquido de um objeto ou substância. Isso pode ser alcançado por meio de vários métodos e dispositivos.

No processo de secagem de um produto, duas ocorrências fundamentais ocorrem simultaneamente. Em primeiro lugar, existe a indispensável transferência de calor que facilita a remoção do líquido. Em segundo lugar, há a transferência interna de massa que ocorre na forma de líquido e/ou vapor, bem como na superfície do produto na forma de vapor. Esse fenômeno foi amplamente estudado por VILLAR (1999), FARIAS (2002) e CARMO (2004).

### 3.6. Curvas de secagem

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



Fonte: (FARIAS, 2002).

Durante todo o processo de dessecação, os sólidos podem se manifestar ou chegar em vários graus de umidade: o teor de umidade inicial, o teor crítico de umidade e o teor de umidade de equilíbrio, todos apresentados na Figura 2.1. Esta figura mostra as curvas que indicam a redução do teor de água, da umidade do produto (M), da evolução da temperatura do produto (T) e da velocidade de secagem ( $dM/dt$ ) ao longo do tempo. A progressão simultânea das transferências de calor e massa durante o processo de dessecação exige sua divisão em três fases distintas (SILVA, 2016).

O período I marca o início do processo de secagem. Esta fase é caracterizada por uma escalada gradual na temperatura do produto, o que posteriormente leva a um aumento na pressão do vapor e na velocidade de secagem. Essas elevações persistem até o ponto em que a transferência de calor é equivalente à transferência de massa. Como esse é um período relativamente breve que não contribui significativamente para o processo geral de secagem, ele é chamado de período de acomodação (ALONSO, 2001; FARIAS 2002).

Durante o segundo período, uma quantidade significativa de água ainda está presente no produto. Esta fase é marcada por uma taxa de secagem constante. A pressão do vapor de água na superfície do produto permanece constante e é equivalente à pressão do vapor de água na temperatura do produto. Da mesma forma, a temperatura do produto permanece constante e é equivalente à temperatura do termômetro de ar úmido, o que significa que a massa e a transferência de calor estão equilibradas e, como tal, a taxa de secagem é constante. Esse período continua até que água suficiente migre para a superfície dentro do produto, o que facilita a evaporação (SILVA, 2016).

O terceiro período testemunha um declínio na quantidade de água que migra do interior para a superfície do produto, diminuindo assim a taxa de secagem. Isso implica que a quantidade de água presente na superfície do produto é reduzida, levando a uma diminuição na transferência de massa. A transferência de calor não é balanceada pela transferência de massa e, conseqüentemente, a temperatura do produto tende a aumentar, aproximando-se da temperatura do ar de secagem. O fator limitante durante esse estágio é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. Quando o produto atinge o ponto de equilíbrio de umidade em

relação ao ar de secagem, a taxa de secagem se torna zero, significando a conclusão do processo (SILVA, 2016).

### **3.7. Secagem do bagaço**

Em 1910, o professor E. W. Kerr foi pioneiro nos estudos de secagem do bagaço de cana-de-açúcar utilizando um secador de aço com dimensões de 1,2 m x 1,8 m e altura de 6,0 m, conforme documentado na literatura (CORRÊA, 2003).

A crise energética da década de 1970 levou a um interesse renovado na secagem do bagaço de cana-de-açúcar, pois os registros dessa prática entre 1910 e 1970 eram limitados. Essa crise foi precipitada pelo declínio da produção global de petróleo e consequente aumento no custo do combustível fóssil, comumente chamado de “Primeiro (1973) e Segundo (1979) Choque do Petróleo” (SOUZA, 2012).

Entre os benefícios da secagem do bagaço de cana-de-açúcar estão o aumento da temperatura do forno, o aumento do menor poder calorífico (PCI), a facilidade de armazenamento e a redução das emissões de cinzas no meio ambiente, conforme descrito na literatura (SOUZA, 2012).

### **3.8. Secadores Industriais**

A secagem é um processo antigo e muito difundido que envolve a remoção de água de um produto, sendo aplicada em várias indústrias como a agricultura, alimentação, papel e celulose, mineração, polímeros e indústria farmacêutica (PONTES, 2014).

Ao conduzir o processo de secagem, é essencial levar em consideração:

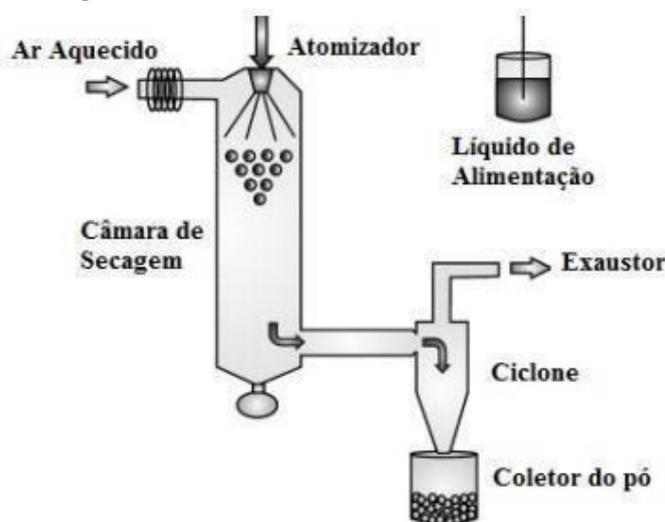
- O tipo de equipamento necessário.
- O consumo de energia para a secagem.
- A umidade inicial do produto.
- A quantidade de produto a ser processado.
- A temperatura ideal para o processo.
- A umidade final desejada.
- O tempo necessário para a secagem do produto.

Existem vários tipos de equipamentos capazes de realizar a secagem, como os secadores pneumáticos, que usam gases aquecidos para transportar e secar as partículas, e os secadores rotativos, que removem a umidade do material por meio de forças centrífugas.

Os secadores pneumáticos são vantajosos para a secagem do bagaço de cana-de-açúcar, pois são econômicos e operam removendo a umidade com o próprio ar de secagem durante o transporte das partículas. Este processo de baixo custo pode secar facilmente pequenas partículas de bagaço (SILVA, 2016).

Alguns exemplos de secadores pneumáticos incluem: secadores de bandeja, ciclones, leitos fluidizados e atomizadores. A eficácia desses secadores está fortemente ligada à temperatura, à velocidade do ar de secagem e à superfície de contato do produto a ser seco (SILVA, 2006). A Figura 4 apresenta um secador atomizador usado no processo de Spray Dryer.

Figura 4 - Estrutura de um ciclone



Fonte: Almeida *et al* (2017)

### 3.9. Secadores Ciclônicos

Os secadores ciclônicos são um tipo de equipamento de secagem usado em várias indústrias. Eles utilizam separadores ciclônicos para separar o agente de secagem do material seco, melhorando a eficiência da coleta de produtos acabados. Após serem patenteados no final do século XVIII sua utilização industrial só veio

ocorrer após a segunda guerra mundial onde foi aplicado no processamento de minérios.

Os secadores ciclônicos são ferramentas aplicadas em processos contínuos que têm a tarefa de realizar a secagem e a separação de partículas sólidas presentes em fluidos líquidos ou gasosos (MALDANER, 2012). O uso de ciclones em processos industriais é vasto devido à sua efetividade nos processos conduzidos por eles e seu baixo custo comparado a outros equipamentos industriais com funções equivalentes (AGUIAR, 2018).

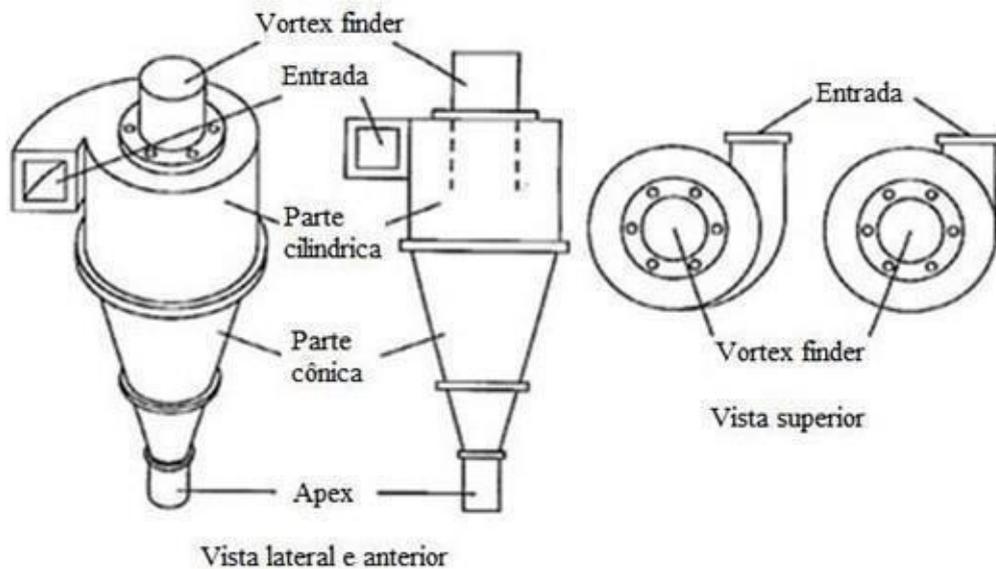
O trabalho de Nebra (1985) sobre a utilização do ciclone como mecanismo de secagem em um sistema de usina de álcool e açúcar é um esforço pioneiro no Brasil. Por meio desta pesquisa, observou-se que a maior parte da secagem do bagaço de cana-de-açúcar ocorreu dentro do ciclone após um secador pneumático. Como resultado, outros estudos sobre o uso de ciclones como secadores para diversos materiais surgiram posteriormente. (FARIAS, 2006). O custo benefício apresentado por esse equipamento faz com que ele seja amplamente difundido em diversos processos industriais

De forma simplificada, pode-se afirmar que o funcionamento do ciclone envolve a introdução de uma corrente de gás carregada de material particulado através de uma entrada tangencial localizada próxima ao ápice do ciclone. Esse fluxo então adota uma trajetória em espiral descendente. A força de arrasto da fase gasosa impulsiona as partículas em uma trajetória em espiral situada na periferia, causando uma colisão com a parede interna do aparelho. Conseqüentemente, os sólidos também seguem o exemplo e assumem um movimento espiral descendente ao lado da parede, acabando por se acumular na base do ciclone. Na seção central do dispositivo, o gás faz a transição de uma espiral descendente para uma espiral ascendente, comumente chamada de núcleo, e sai pelo duto superior, também conhecido como tubo de saída de gás ou tubo de tração, em um estado purificado. (CORRÊA, 2003).

No decorrer do processo de secagem, o ar quente e desumidificado conduz as partículas e desidrata as mesmas. Este processo ocorre de maneira eficiente dentro de um ciclone com a entrada do ar quente e da partícula que será seca e com a saída

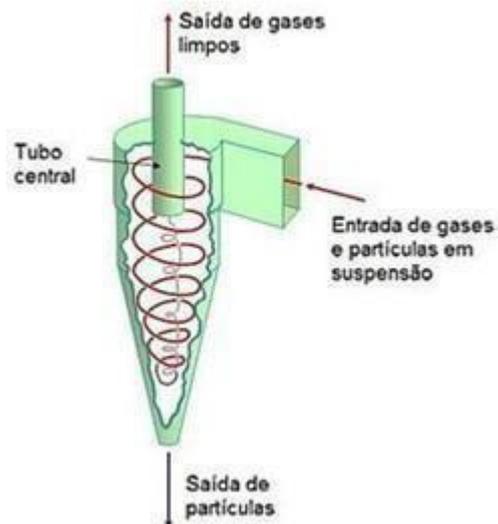
da partícula desidratada na parte inferior, enquanto ocorre a saída de ar e água na parte superior (SILVA, 2016), como demonstrado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Estrutura de um ciclone



Fonte: Almeida *et al* (2017)

Figura 6 - Modelo de funcionamento de um ciclone



Fonte: Almeida *et al* (2017)

Na investigação de Zimmermann (2018) utilizando o secador ciclônico, observou-se que a maneira pela qual as partículas de gás e chumbo se comportavam dentro do equipamento era propícia a uma separação efetiva. Evidentemente, descobriu-se que as partículas estavam mais próximas da parede, enquanto o gás

ocupava o centro do aparelho. Essa descoberta sugere que o processo de separação foi realmente favorável.

Barbosa (2019) realizou um estudo sobre o impacto da temperatura do ar de entrada durante o processo de secagem do bagaço de cana-de-açúcar em um secador ciclônico. Por meio de simulação no CFX, o pesquisador descobriu uma correlação entre o aumento da temperatura e o aumento da eficiência do secador de ciclones em relação à desidratação de partículas.

A investigação realizada por Rasi et al (2020) referente à avaliação de um secador de bagaço de cana-de-açúcar de secagem em dois estágios que emprega resíduos de calor de um gerador de vapor, revelou que a técnica sugerida para secar o bagaço, para facilitar sua posterior alimentação na caldeira da usina de álcool, proporcionou eficiência energética superior e otimização operacional substancial, juntamente com consumo mínimo de eletricidade.

Comumente, durante a produção da cana-de-açúcar, a fibra triturada (bagaço) é imersa em água e enviada diretamente para as caldeiras, que por meio das estações de co-geração, fornecem eletricidade, trabalho mecânico e energia térmica, necessários para o processo completo de produção de açúcar e álcool. Cada tonelada de bagaço de cana esmagado produz aproximadamente 255 Kg de bagaço com umidade de 50% (AGUIAR, 2018).

A queima direta do bagaço torna o processo altamente ineficiente e origina problemas, devido à alta umidade e à baixa densidade do resíduo a ser queimado. O alto teor de umidade do resíduo pode causar uma ignição fraca e a redução da temperatura de combustão, que impede a queima dos produtos de reação e, conseqüentemente, afeta a qualidade desta (LUIZ, 2012). É necessário investigar novas tecnologias que favoreçam o processo de queima para gerar excedentes.

A secagem do bagaço facilita o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005). Devido à baixa densidade do bagaço in natura (que ocupa um grande volume) e ao alto custo de transporte, na maioria das vezes, é economicamente inviável a utilização de resíduos agrícolas como o principal combustível em grandescentrais de energia. Seu uso em pequenas centrais de energia elétrica locais tem a desvantagem de altos custos em investimentos específicos e uma eficiência térmica menor em comparação com uma usina grande.

Uma alternativa para aumentar o potencial energético do bagaço é através de uma pré-secagem, pois o bagaço seco tem um alto poder calorífico (19268 KJ/Kg). Ao mesmo tempo, a redução da umidade também resulta na diminuição do volume dos gases de saída da caldeira e a redução do vapor da água nos gases de combustão resulta em temperaturas de combustão mais elevadas, melhorando a eficiência da caldeira (SOSA-ARNAO, 2008). Paiva, Nebra e Gallo (1998) comprovaram que há um aumento de 27,7% de eficiência energética ao alimentar a caldeira com bagaço a 20% de umidade, em comparação com a mesma situação de alimentação de bagaço a 50% (b.u.). Sosa-Arnao e Nebra (2009) concluíram que os sistemas de geração de vapor acoplados a um secador de bagaço, quando comparados a dois geradores de vapor usados nas caldeiras de bagaço brasileiras, possuem uma maior eficiência, ou seja, um melhor desempenho termodinâmico.

No processo de secagem, a eliminação da umidade geralmente ocorre pela evaporação da mesma através da transferência simultânea de massa e calor entre as fases sólida e gasosa. Essa operação pode ser parte de um processo industrial, ou ser a última ou única etapa a ser desenvolvida. O calor pode ser fornecido à fase sólida por uma fonte externa, através dos mecanismos de convecção, condução, radiação, ou até mesmo dielectricamente dentro do sólido. Pode também ocorrer como combinação de mais de um dos mecanismos acima (CORRÊA, 2003).

O ciclone é, na verdade, um simples coletor mecânico que usa forças centrífugas para a separação de partículas por meio de um fluxo de gás, podendo remover partículas maiores que 5  $\mu\text{m}$  de uma fase gasosa com maior eficiência (CORRÊA et al., 2004). E também é atrativo para operações a altas temperaturas e/ou pressões. É um dispositivo que apresenta algumas vantagens, pois é relativamente barato para ser fabricado, econômico durante sua operação, simples e adaptável a diversas condições de operação (CHEN; WANG, 2001).

O princípio de operação do ciclone (Figura 4) consiste, inicialmente, na injeção de uma corrente gasosa contendo material particulado por uma entrada tangencial próxima ao topo do dispositivo. Esta corrente adquire um fluxo em espiral descendente. A força de arrasto da fase gasosa direciona a partícula a uma trajetória em espiral na periferia, colidindo com a parede interna do equipamento.

Os sólidos são então conduzidos a um movimento também em espiral descendente, junto à parede, sendo coletados na parte inferior do ciclone. Na região

central do equipamento, o gás passa de um movimento espiral descendente para um movimento espiral ascendente, conhecido como núcleo, saindo "limpo" pelo duto superior, também chamado de tubo de saída do gás ou duto de exaustão (CORRÊA, 2003).

### **3.10. Fluidodinâmica Computacional (CFD)**

O fluido é caracterizado como uma entidade material que, ao aplicar uma força externa, exibe a capacidade de fluir. Como tal, o campo da dinâmica dos fluidos se preocupa com o exame do comportamento dessas substâncias fluidas em movimento, especificamente sob a influência de diversas formas de forças externas (SILVA, 2016; FOX et al., 2014).

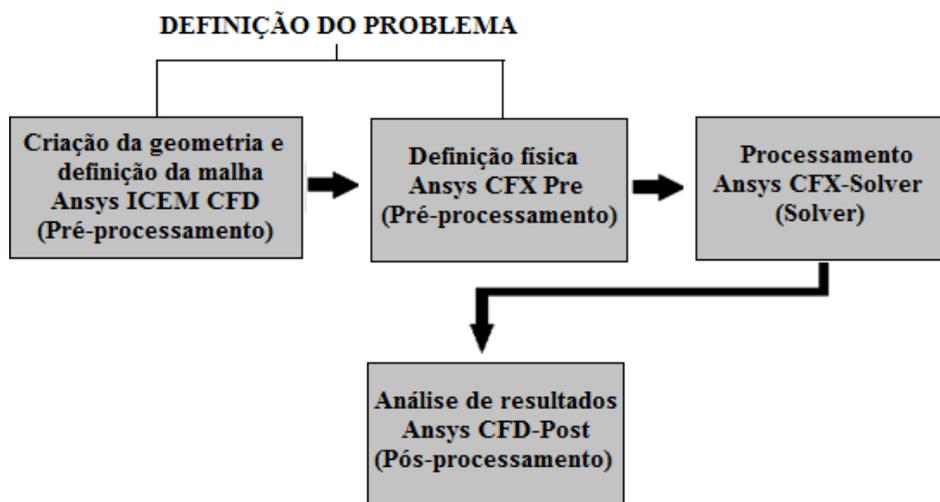
O CFD (Computational Fluid Dynamics) é um instrumento computacional que facilita o exame de sistemas que abrangem os fenômenos de fluxo de fluido, transferência de calor, dissipação, turbulência, fluxo de partículas e outros aspectos relacionados à dinâmica de fluidos.

O objetivo principal da dinâmica de fluidos computacional (CFD) é compreender os fenômenos físicos do fluxo de fluido por meio de simulações de computador, que discretizam as equações parciais que explicam o fluxo (SANTOS, 2009; TAVARES, 2012). O CFD pode resolver problemas matemáticos baseados em algoritmos, utilizando geometria virtual e, em alguns cenários, malhas numéricas, o que elimina a necessidade de análises experimentais demoradas e caras (AUGUSTO et al., 2010). Portanto, os benefícios da utilização de simulações de computador em vários campos de atividade incluem baixo custo, velocidade e confiança nos resultados.

### **3.11. Programa Ansys**

O ANSYS CFX é um programa de simulação numérica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) amplamente utilizado na engenharia para a análise de fluidos e transferência de calor em sistemas complexos. Ele permite a simulação de uma variedade de fenômenos físicos, como escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas, turbulência, eletromagnetismo, entre outros.

O programa possui uma interface gráfica amigável, que permite aos usuários definir a geometria do problema, especificar as condições de contorno, selecionar os modelos físicos e numéricos, definir as propriedades do material e executar a simulação. O ANSYS CFX utiliza um método numérico de elementos finitos para resolver as equações governantes do problema, fornecendo soluções precisas e confiáveis. Sua linguagem de programação é baseada em FORTRAN na qual está diretamente relacionada a solução de equações de conservação e regiões de interesse (TAVARES, 2012).



Fonte: (TAVARES, 2012).

Uma malha computacional (também conhecida como malha de computação) é uma técnica usada em simulações numéricas para discretizar o espaço em pequenas regiões, chamadas células, e aproximar soluções de equações diferenciais parciais. Essas células são conectadas por vértices, formando uma grade ou malha.

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

- O processo inicial envolve determinar a configuração geométrica ou área de estudo a ser analisada; criar uma malha e subdividir o domínio em pequenas seções, que serão responsáveis por conduzir os cálculos necessários para resolver equações de conservação por meio de métodos numéricos; e definir as características do domínio de estudo (tais como densidade, viscosidade, fluxo volumétrico de cada fase, etc.), juntamente com

as condições iniciais e de contorno do fluxo.

- Durante a fase de resolução, serão empregadas abordagens numéricas para resolver os aspectos físicos do cenário em análise. O conjunto de equações diferenciais parciais é transformado em um sistema de equações algébricas, passíveis de serem solucionadas por métodos numéricos. Esses métodos podem ser classificados como diretos (incluindo Eliminação Gaussiana e Decomposição LU) ou iterativos (como Método de Gauss-Seidel, Método de Jacobi e Método de Sobre-Relaxação Sucessiva).
- Na fase de pós-processamento, os dados obtidos na etapa precedente são organizados e analisados utilizando gráficos, imagens, e outros recursos, com o objetivo de aprimorar a interpretação dos resultados. Isso envolve comparar os resultados da simulação com dados experimentais ou com soluções analíticas conhecidas para verificar se o modelo está reproduzindo com precisão o fenômeno físico em estudo.

Muitas vezes, o processo de simulação é iterativo, com ajustes sendo feitos no modelo, nas condições de contorno ou na malha com base nos resultados obtidos. Essas iterações são importantes para melhorar a precisão e a validade da simulação.

#### **4. METODOLOGIA**

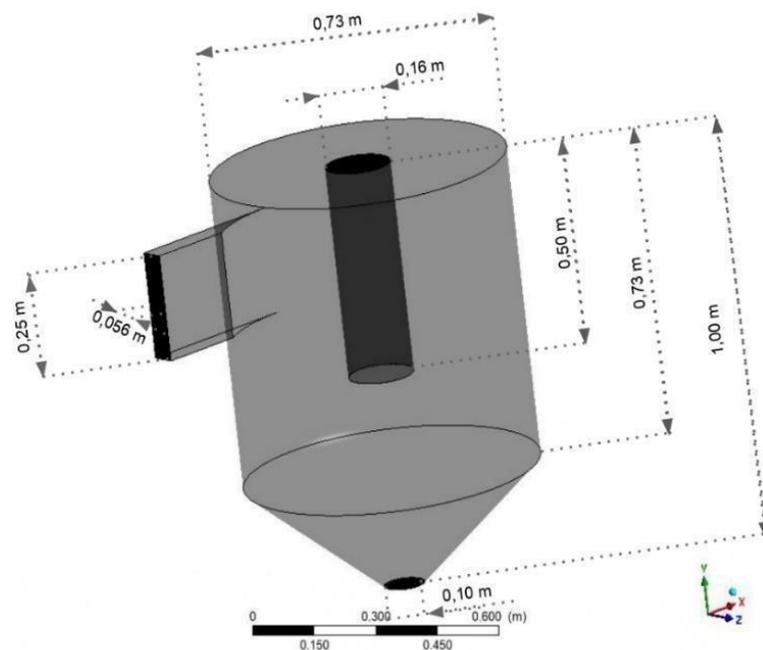
O estudo busca a reprodução do trabalho proposto por Silva (2016), fazendo as devidas modificações em temperatura de entrada do gás e realizando a coleta dos dados provenientes das novas análises da influência na secagem das partículas.

Para produzir uma malha que represente com precisão o secador de ciclone, a etapa inicial é estabelecer a geometria definindo pontos de referência de acordo com a metodologia empregada para criar as curvas e superfícies que estabelecem a borda ou a parede do ciclone. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando uma malha

estruturada baseada nas dimensões do secador ciclônico, conforme empregado por Corrêa (2003). A geração da malha foi realizada a partir dos seguintes passos:

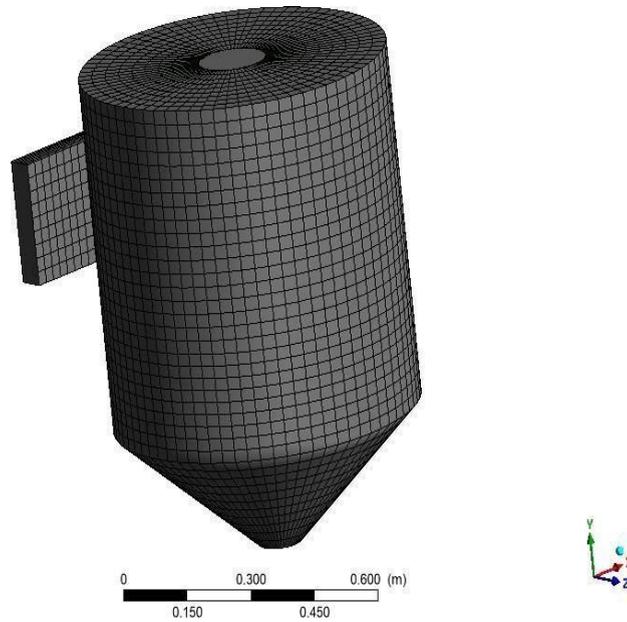
- Definição de um conjunto de pontos e curvas para representar a geometria;
- Escolha de um conjunto de blocos por meio de divisão, junção, definições de borda, modificações das faces e movimentos nos vértices, possuindo 40 mil elementos hexaédricos.
- A quantidade de inlets (entradas) são uma entrada e a quantidade de outlets (saídas) são duas no modelo geométrico estudado. Assim mostrado nas figuras 9 e 11.

Figura 7- Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado nos trabalhos de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012).



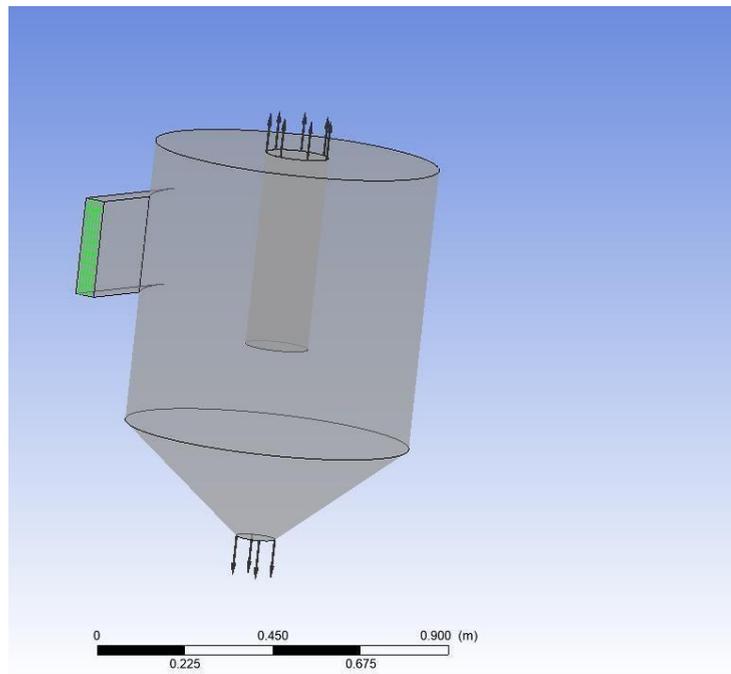
Fonte: Silva (2016)

Figura 8 - Mostra a grade numérica usada na simulação.



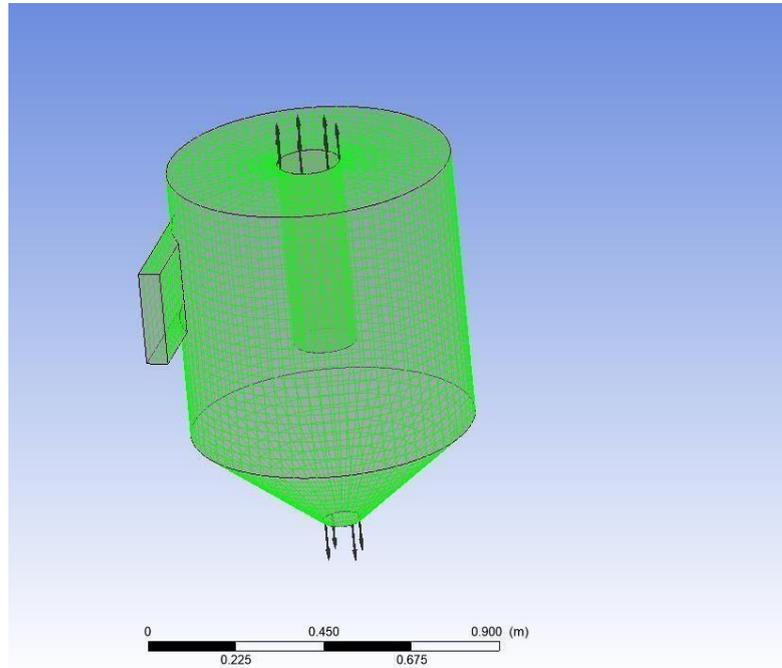
Fonte: Silva (2016)

Figura 9 - Mostra a entrada tangencial do ciclone secador.



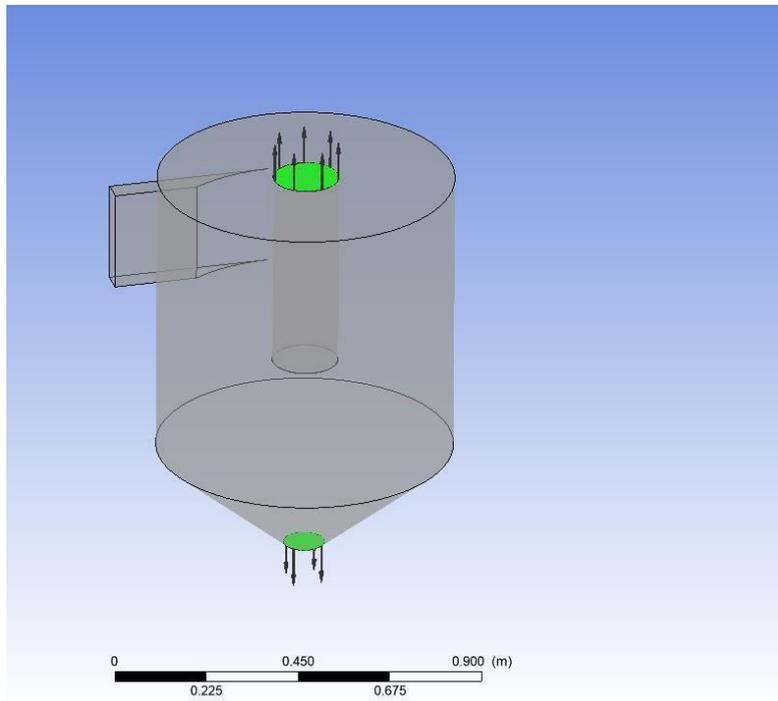
Fonte: Silva (2016)

Figura 10 - Mostra as paredes do ciclone secador.



Fonte: Silva (2016)

Figura 11 - Mostra a saída inferior e superior do ciclone secador.



Fonte: Silva (2016)

#### 4.1. O modelo matemático

- **Equações da fase gasosa**

O estudo apresentado usufrui da metodologia empregada por Silva (2016) para garantir a eficácia na simulação. O modelo matemático empregado para representar o fluxo de partículas corresponde ao modelo multifásico Euler-Lagrangiano. Esse método envolve o monitoramento temporal de partículas por meio de um conjunto de equações diferenciais ordinárias, que são posteriormente resolvidas para determinar o comportamento das partículas dentro do domínio do fluxo. Além disso, o comportamento da fase gasosa é descrito por equações de conservação de massa, momento linear, energia e matéria, que são levadas em consideração neste estudo.

No trabalho apresentado foram levadas em considerações as seguintes considerações para a fase gasosa:

- Regime permanente;
- Não ocorre reação química;
- Foi considerado o efeito da gravidade;
- Não são consideradas as forças de arraste;
- As propriedades físico-químicas são constantes.

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

- **Equação da continuidade**

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (01)$$

Em que,  $\rho$  é a densidade para a fase contínua e  $u$  é o vetor velocidade.

- **Equação momento linear**

$$\nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \tau + S_M \quad (02)$$

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

$$\tau = \mu_{ef}(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) - \frac{2}{3}\delta\cdot\nabla\vec{u} \quad (03)$$

Em que,  $\delta$  é a função Delta de Kronecker e  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva demonstrada pela fórmula:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_T \quad (04)$$

Em que,  $\mu$  é a viscosidade da fase contínua e  $\mu_T$  a viscosidade turbulenta expressa por:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (05)$$

Em que,  $C_\mu$  é uma constante empírica com igual a 0,09,  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\varepsilon$  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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial X_K} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_K - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho E + C_{\varepsilon 3 RNG} P_{\varepsilon b}) \quad (6)$$

onde:

$$C_{\epsilon 1RNG} = 1,42 - \frac{n \left(1 - \frac{n}{4,38}\right)}{(1 + n^3 \beta^{RNG})} \quad (07)$$

$$n = \sqrt{\frac{P_K}{\rho \epsilon C_{\mu RNG}}} \quad (08)$$

- **Equação de energia**

$$\nabla(\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla(\lambda T) + \nabla(\vec{u} \cdot \tau) \quad (09)$$

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

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{u}^2$$

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

- **Equação de transferência de massa**

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

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

- **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;  $u_p$  o vetor velocidade da partícula e  $F$  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,

$$\vec{F} = \vec{F}_p = \frac{1}{8} \pi d_p^2 f_s \rho C_D |\vec{V}_r| \vec{V}_r \quad (13)$$

Em que  $d_p$  é o diâmetro da partícula;  $v_r$  a velocidade relativa partícula-gás;  $f_s$  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:

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

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

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

Em que,  $\rho$  é a densidade da fase gasosa,  $\mu$  a viscosidade da fase gasosa e  $v_r$  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,  $f_s$ , e o fator de área superficial,  $f_t$ , 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:

$$Q_c = \mu d_p \lambda N_u (T_G - T_P) \quad (18)$$

Em que,  $T_P$  é a temperatura da partícula;  $\lambda$  a condutividade térmica do fluido;  $T_G$  a temperatura do gás e  $N_u$  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:

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

O número de Prandtl mede a relação entre a transferência de 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:

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

Em que,  $h_{fgo}$  é o calor latente na temperatura de referência;  $Th_{fgo}$  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:

$$Sh = \frac{K_m L_c}{D_{ag}} \quad (26)$$

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:

$$Sh = 2 + 0,6Re_p^{1/2}Sc^{1/3} \quad (27)$$

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

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{ag}} \quad (28)$$

Em que,  $\mu$  é viscosidade dinâmica e  $\rho$  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:

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{-Q_c}{Q_m} \quad (29)$$

Em que,  $\frac{dm_p}{dt}$  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:

$$P_{\text{vapor}} = P_{\text{ref}} e^x \left( A + \frac{B}{C + T} \right) \quad (30)$$

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

## Condições de contorno

### a) Paredes do ciclone

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

$$u_x = u_y = u_z = 0 \quad (31)$$

$$Q = 0 \quad (32)$$

### b) Sessões 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:

$$P = P_{atm} \quad (33)$$

$$\frac{dT}{dy} = 0 \quad (30)$$

### c) Sessão de entrada

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

## 4.2. Casos Simulados

Foram analisados 3 casos para três temperaturas de 323,15 K, 333,15 K e 343,15 K. Para a realização das simulações, dentre variáveis escolhidas para serem alteradas durante a realização das simulações foi a temperatura de entrada do gás, sendo eles:

Tabela 2 – Casos Simulados

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Temperatura (K)</b>		
<b>6,35 mm</b>	323,15 K	333,15 K	343,15 K

Fonte: Autoria própria (2024)

As demais variáveis mantendo-se constante, os valores utilizados podem ser conferidos na tabela 2

Tabela 3 – Parâmetros físicos que se mantiveram constantes durante o estudo e seus respectivos valores.

<b>Parâmetros Físicos</b>	
<b>Calor latente</b>	2,251e+06 [J/Kg <sup>-1</sup> ]
<b>Difusividade Efetiva</b>	4,07087e-05 [m <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup> ]
<b>Fluxo de Massa da Partícula</b>	13,1 [g/s <sup>-1</sup> ]
<b>Fluxo de Partículas</b>	6,55 [g/s]
<b>Pressão de Referência</b>	1 [atm]
<b>Rugosidade</b>	0,045 [mm]
<b>Diâmetro da partícula</b>	6.35 [mm]
<b>Temperatura da Partícula</b>	303,75 [K]
<b>Tensão superficial</b>	0,073 [N/m <sup>-1</sup> ]

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4 - Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem.

Propriedades físico-químicas	Fluido: ar (25°C)	Partículas (Bagaço de cana-de-açúcar)
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	1,185	958,37
Condutividade Térmica (W/m.k)	3,7673 x 10 <sup>-2</sup>	0,215
Calor latente de vaporização (J/kg)	-	2,251 x 10 <sup>6</sup>
Difusividade (m <sup>2</sup> /s)	4,0787 x 10 <sup>-5</sup>	-
Peso Molecular (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)	-	2.89

Fonte: Autoria própria (2024)

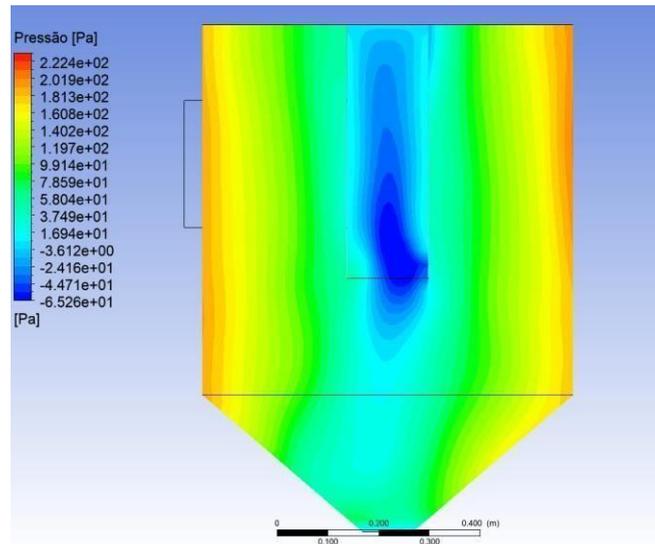
Os seguintes critérios foram usados para selecionar o melhor caso para estudo

- Temperatura;
- Pressão;
- Linhas de Fluxo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

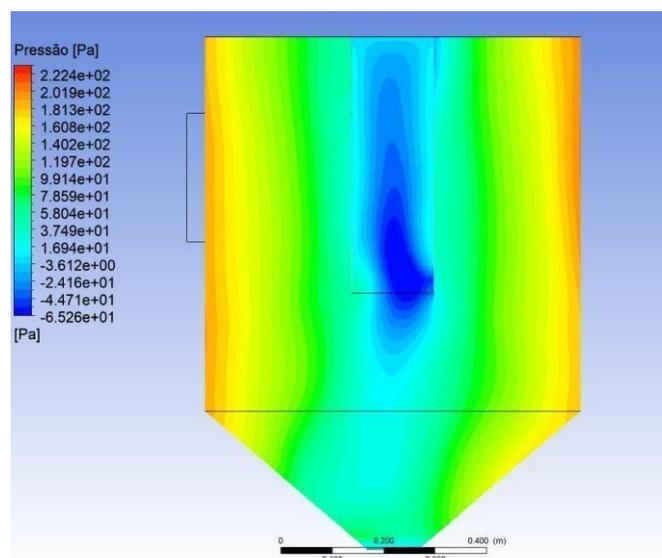
### 5.1. Análise da pressão

Figura 12 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35 mm.



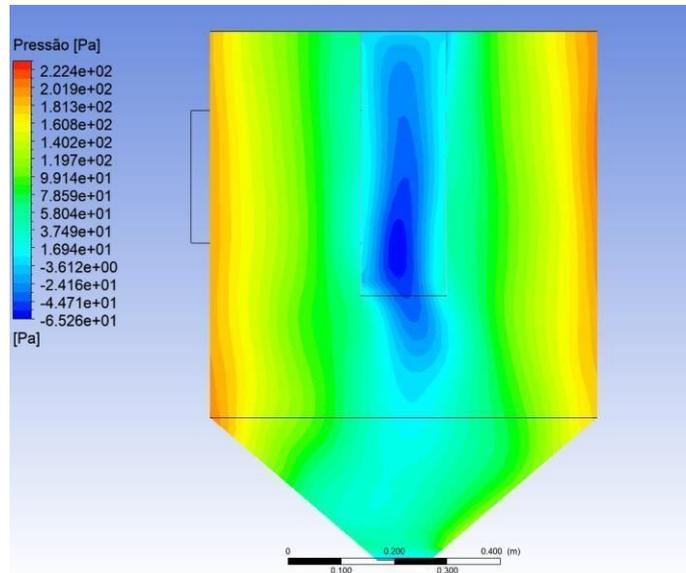
Fonte: autoria própria (2024)

Figura 13 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35 mm.



Fonte: autoria própria (2024)

Figura 14 – Pressão no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35 mm.



Fonte: autoria própria (2024)

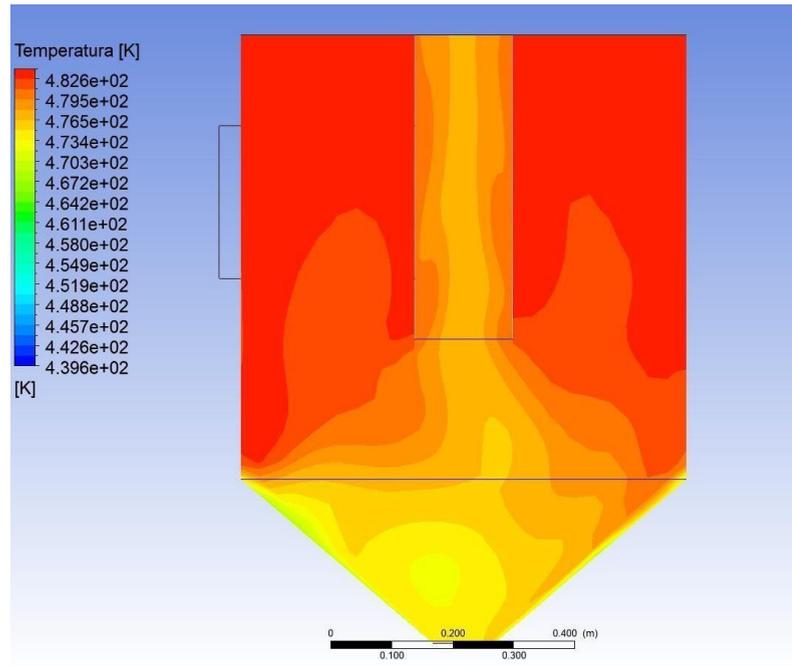
Nas figuras 12, 13, 14, pode-se observar através dos gradientes de pressão ao longo do plano longitudinal YX que a pressão diminui radialmente na direção ao centro do ciclone a partir das paredes do cilindro-cônico gerando um espaço com pressão negativa devido à alta velocidade do ar no interior do secador, especialmente em regiões próximas às paredes do ciclone, podendo gerar pressões negativas.

Isso pode indicar uma variação significativa ao longo do plano YX, aonde isso pode sugerir uma distribuição mais específica da pressão influenciando no comportamento do fluxo de ar no ciclone secador.

A existência de condições de pressão negativa em regiões específicas do ciclone indicando que nessas áreas está abaixo da pressão atmosférica padrão, isto pode influenciar o comportamento do fluxo de ar dentro do ciclone. Nessas áreas com pressão negativa, o ar que circula próximo a região pode ser atraído em direção aquela região afetando toda a dinâmica global do sistema, isso é bastante relevante visto que o controle preciso do fluxo de ar é essencial.

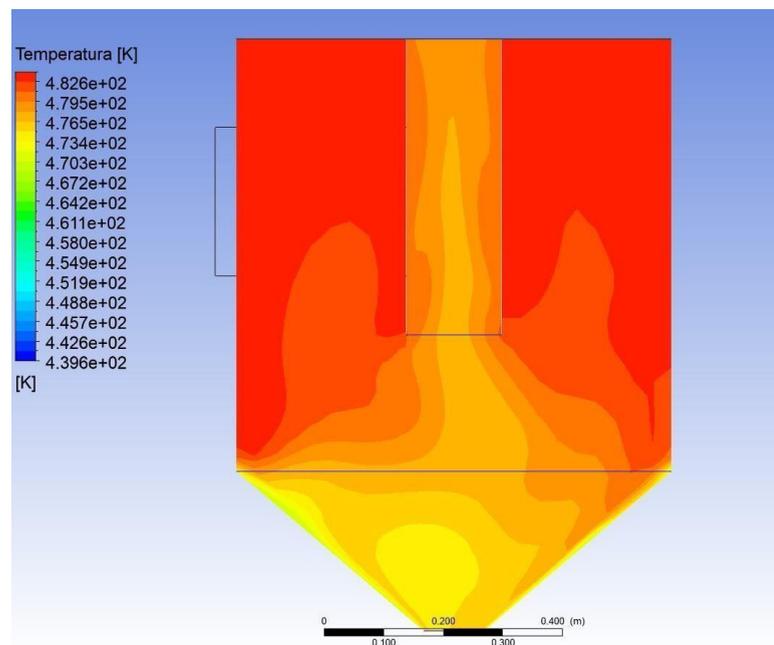
## 5.2. Análise da temperatura

Figura 15 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



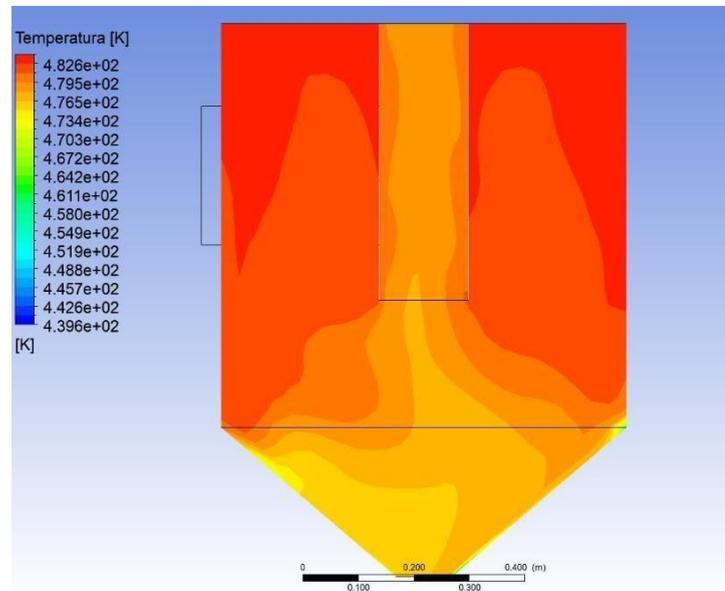
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 16 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 17 – Temperatura no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



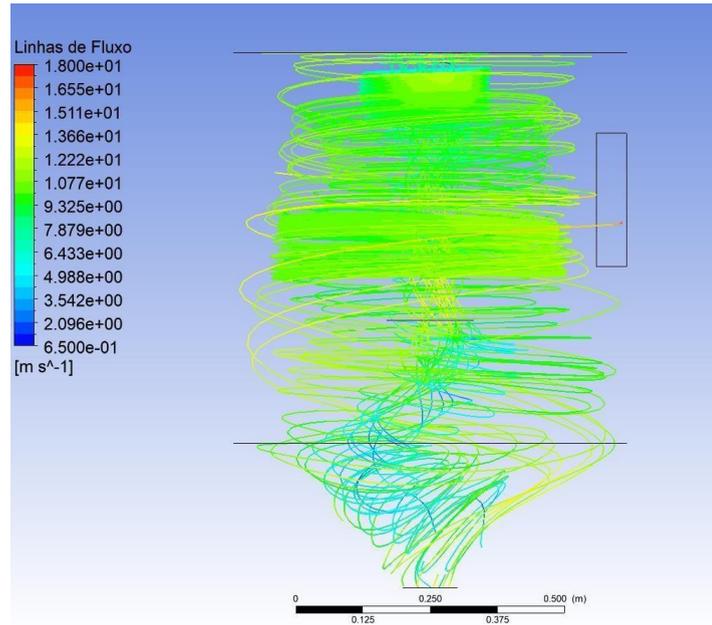
Fonte: Autoria própria (2024)

Nas figuras 15, 16, 17, é possível observar que a distribuição de temperatura na fase gasosa segue um comportamento helicoidal que descende das partículas arrastadas pelo fluxo de ar seco, é possível observar que o gradiente de temperatura está localizado no cone do separador pois existe uma concentração de partículas aonde elas ficam mais tempo ali trocando calor com o ar seco.

A distribuição de um gradiente de temperatura localizado no cone do separador sugere que, onde ocorre um ponto crítico em termos de troca térmica. O fato de as partículas ficarem um bom tempo no cone do separador implica que esse local em específico é onde ocorre uma troca de calor maior com o ar seco.

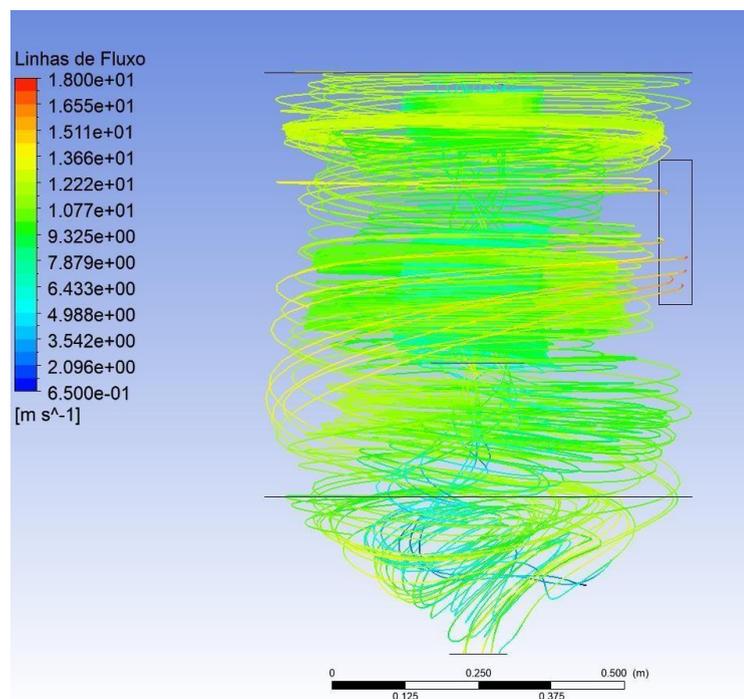
### 5.3. Análise das Linhas de Fluxo

Figura 18 – Linhas de fluxo da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 323,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



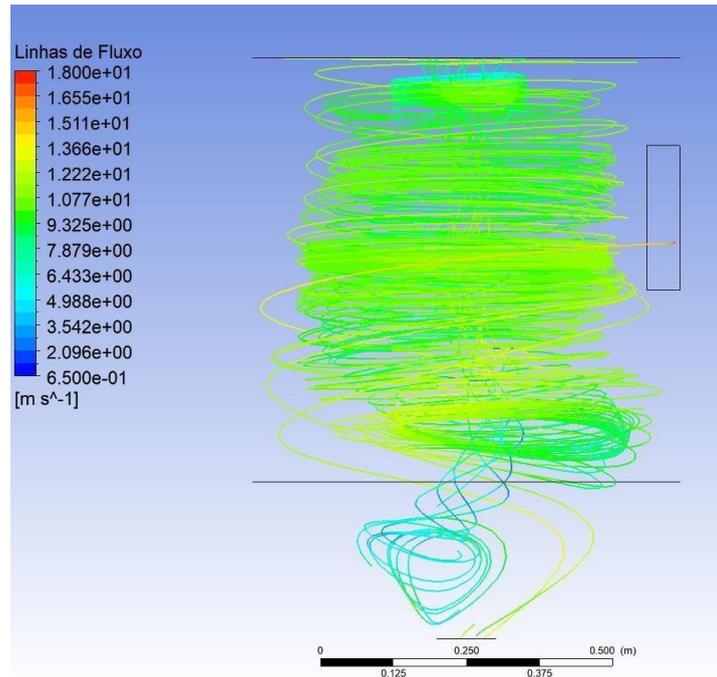
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 19 – Linhas de fluxo da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 333,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 20 - Linhas de fluxo da partícula no interior do ciclone sobre o eixo longitudinal YX, para uma temperatura de entrada da partícula de 343,15 K e um diâmetro de 6.35mm.



Fonte: Autoria própria (2024)

As linhas de fluxo indicam que a conduta em espiral do gás, apresenta uma inclinação descendente nas proximidades das superfícies cilíndricas e cônicas do ciclone, visto isso elas estão de acordo com as literaturas de Silva (2016) , Corrêa (2003) e Farias (2006).

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, a partir dos resultados é possível ver o comportamento helicoidal do gás com uma tendência descendente próximo às paredes cilíndricas e cônicas do ciclone secador, além de demonstrar uma tendência ascendente próximo ao centro do ciclone, é causado pelos princípios fundamentais do movimento do fluido no interior do ciclone. A rotação do ciclone cria um gradiente de pressão e velocidade ao longo do seu raio, induzindo a circulação espiral característica. Nas proximidades das paredes, a tendência descendente ocorre devido à convergência do fluxo, enquanto a tendência ascendente próxima ao centro é resultado da divergência do fluxo. Esses efeitos combinados resultam no padrão espiral observado no comportamento do gás dentro do ciclone.

Essa análise dos gradientes de pressão indica uma variação bem significativa ao longo do plano longitudinal YX, visto que, esse gradiente sugere uma distribuição específica de pressão que pode influenciar o comportamento do fluxo de ar no interior do ciclone.

A afirmação de que a pressão diminui em direção ao centro do ciclone, partindo das paredes do cilindro-cônico, sugere uma influência central da geometria na dinâmica do fluxo, diminuição essa que pode estar relacionada à curvatura das paredes e à velocidade do ar no interior do secador. A diminuição de pressão com a alta velocidade do ar no interior do ciclone secador sugere uma relação entre esses dois fatores. A velocidade do ar pode ser um componente-chave na criação do gradiente de pressão no qual foi observado e na geração de condições de pressão negativa.

A análise da trajetória das partículas em relação à temperatura revelou 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 e previsto pelas literaturas de Silva (2016), Corrêa (2003) e Farias (2006).

## REFERÊNCIAS

AGUIAR P. G., et al; **Análise Da Eficiência Individual De Coleta De Particulados De Magnesita Em Ciclone Lapple**. Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química, Montes Claros, 2018.

ALMEIDA, M. B. B. DE. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. p. 149, 2008.

ALMEIDA L, et al; **CICLONE: Manual de montagem, operação e manutenção**. Universidade do Estado do Amapá. Macapá. 2017.

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 de tratamentos térmicos de bebidas em garrafas**. Braz. J. Food Technol., Campinas, v. 13, n. 4, p. 260-270, out./dez. 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**. 2019. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial)- Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2019.

CHAVES, J. B. P. et al.. **Cachaça – Produção Artesanal de Qualidade**. Viçosa – Minas Gerais, CPT, 2007. 321 p. ISBN 978-85-7601-936-7.

CHEN, C.; WANG, L. F. S. Cost-benefit analysis of electrocyclone and cyclone. **Resources, Conservation and Recycling**, England, v. 31, n. 4, p. 285-292, Apr. 2001.

CONAB - **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 11, n. 1 abril 2023.

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

CORRÊA, J. L. G. et al. Cyclone as a sugar cane bagasse dryer. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, Pequim, v. 12, p. 826-830, Dec. 2004a.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, p. 1–29, 2008.

FARIAS, F. P. M. **Estudo teórico da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos**. Tese de Doutorado, Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

FERREIRA, N. DE L. **Pirólise De Biomassa Lignocelulósica Utilizando Diferentes Catalisadores Para Produção De Bio-Óleo**. 2014. 121 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

FERNANDES, Amábili Sierra; MIGUEL, Emiliana Ridolphi. A importância da utilização do bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia em termelétricas. **III Encontro Científico e Simpósio de Educação Unisalesiano**, v. 21, 2011.

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

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. São Paulo: Nacional, 1969.  
Guedes, C. L. B., Adão, D. C., Quessada, T. P., Borsato, D., Galão, O. F., Di Mauro, E., Pérez, J. M. M., & Rocha, J. D.. (2010). **Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina**. *Química Nova*, 33(4), 781–786. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000400003>.

LEITE, Marcell Rocha et al. O trabalho no corte de cana-de-açúcar, riscos e efeitos na saúde: revisão da literatura. **Revista de Saúde Pública**, v. 52, 2018.

LUIZ, M. R. **ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum*)**. Tese de doutorado, Engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

MALDANER L. H. **Uso de ciclones para coleta de material particulado gerado no beneficiamento de madeira**. Graduação em Engenharia ambiental. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2012.

MINTZ, S. W. **O poder amargo do açúcar: produtores escravizados, consumidores proletarizados**. Recife, PE: Editora Universitária UFPE, 2003.

PAIVA, S. M. E.; NEBRA, S. A.; GALLO, W. L. R. Análise exergética comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras de bagaço de cana. In: BRAZILIAN CONGRESS OF ENGINEERING AND THERMAL SCIENCES, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1998. p. 347 -352.

PILETTI, N. **História do Brasil**. São Paulo: Ática, 1996.

PONTES, T. G. **AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM DO AÇÚCAR DA USINA MONTE ALEGRE**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

RASI, José Roberto; Bernardo, Roberto; Pelloso, José Anthero Catanio. **Avaliação de um secador de bagaço de cana com dois estágios de secagem que utiliza o calor residual de um gerador de vapor: um estudo de caso**. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v.6, n.8, p.56324-56344, aug 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/14732/12190> Acesso em: 09 nov 2021.

ROCHA, J. D.; MESA PÉREZ, J. M.; CORTEZ, L. A. B. **Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa**. Energia na Indústria de Açúcar e Álcool. 2004.

RODRIGUES, Luciana Deotti. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação.** Juiz de Fora-MG, UFJF, 2010.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas.** 2. ed. [S. l.]: UFV, 2011. 637 p. ISBN 978-85-6024-939-8.

SANTOS, J.C. P. **Secagem da borra de café em secador ciclônico.** 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavra, 2009.

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, J. O. **INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA VIA CICLONE SECADOR: SIMULAÇÃO.** Graduação em Engenharia química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, M. K., **Estudo da modelagem numérica tridimensional de ciclones do tipo Lapple para separação gás-óleo.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2006.

SOSA-ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço: estudo do sistema de recuperação de energia.** 2008. 232 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

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.

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.

SOUZA, Jossyl Amorim Ribeiro de et al. **Secagem de sólidos via ciclones: modelagem e simulação.** 2012.

TAVARES, D. P. S, de A - **Escoamento Trifásico Não-Isotérmico em Oleodutos Horizontais com Vazamento: Modelagem e Simulação.**

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.

VITAL A. M. L; LUZ; F. LIMA, M.; **Cana-de-Açúcar - Aspectos Agronômicos e Biológicos.** 2003.

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.

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

ZIMMERMANN, M. dá S. **Processo de separação chumbo/ar usando separador ciclônico: modelagem e simulação**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.