



INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO**

COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

LARYSSA NAYARA MEDEIROS BRITO

**ANÁLISE DA VELOCIDADE DE ENTRADA DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

SERRA TALHADA

2021

LARYSSA NAYARA MEDEIROS BRITO

**ANÁLISE DA VELOCIDADE DE ENTRADA DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a 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(a): Prof. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante.

SERRA TALHADA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B862 Brito, Laryssa Nayara Medeiros.

Análise da velocidade de entrada da partícula na secagem do bagaço de cana no secador ciclônico via simulação no CFX. / Laryssa Nayara Medeiros Brito. - Serra Talhada, 2021.
43 f. : il.

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 Cesar de Macedo Cavalcante.

1. Termodinâmica. 2. Simulação computacional. 3. Secador ciclônico. 4. Bagaço de cana. 5. CFX. I. Título.

CDD 536.5

LARYSSA NAYARA MEDEIROS BRITO

**ANÁLISE DA VELOCIDADE DE ENTRADA DA PARTÍCULA NA SECAGEM DO
BAGAÇO DE CANA EM SECADOR CICLÔNICO VIA SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a 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.

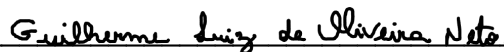
BANCA EXAMINADORA



Prof. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante
IF Sertão PE – Campus Serra Talhada
Orientador



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



Prof. Dr. Guilherme Luiz de Oliveira Neto
IFPI - Campus Floriano
Examinador Externo

Dedico este trabalho aos meus pais José Esmeraldo Brito e Damiana de Medeiros Silva Brito que me apoiaram em todas minhas escolhas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim e me darem todo o apoio em todo o meu percurso.

Ao Prof. Daniel César de Macedo, por toda a ajuda prestada não somente durante o TCC mas em diversas ocasiões ao longo do curso.

Aos professores participantes da banca examinadora e todos os professores que participaram dessa jornada pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas além de todos os momentos compartilhados.

“Não importa quanto a vida possa ser ruim,
sempre existe algo que você pode fazer, e
triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”
-Stephen Hawking

RESUMO

Atualmente os ciclones estão sendo uma fonte moderna para a secagem de diversos materiais apresentando resultados melhores quando comparado com outras fontes como a secagem pneumática. Logo, esta pesquisa propõe-se a estudar numericamente a secagem do bagaço de cana-de-açúcar usando o ciclone como secador. O modelo matemático adotado foi o Euleriano-Lagrangeano no regime permanente e o de turbulência RNG K-epsilon para a fase gás, e um modelo concentrado transiente de transferência de calor e massa para a fase particulada. Consideramos que a partícula do bagaço de cana-de-açúcar possui formas irregulares e é constituída somente por água. O modelo proposto neste trabalho foi obtido usando o software comercial Ansys CFX 15.0. Os resultados apresentados são referentes ao teor de umidade, temperatura, variações dimensionais e trajetória das partículas e distribuição de velocidade, pressão e temperatura da fase da partícula no interior do ciclone.

Palavras-chave: Simulação Computacional. Secagem. Ciclone. Bagaço-de-cana.

ABSTRACT

Currently, cyclones are a modern source for drying various materials, presenting better results when compared to other sources such as pneumatic drying. Therefore, this research proposes to numerically study the drying of sugarcane bagasse using a cyclone as a dryer. The mathematical model adopted was the Eulerian-Lagrangian in steady state and the RNG K-epsilon turbulence model for the gas phase, and a transient concentrated model of heat and mass transfer for the particulate phase. We consider that the sugarcane bagasse particle has irregular shapes and is constituted only by water. The model proposed in this work was obtained using the commercial software Ansys CFX 15.0. The results presented refer to the moisture content, temperature, dimensional variations and trajectory of the particles and the distribution of velocity, pressure and temperature of the particle phase inside the cyclone.

Keywords: Computational Simulation. Drying. Cyclone. Sugarcane bagasse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria	21
Figura 2 – Malha numérica	21

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -Temperatura no plano XY para os casos (a) 11 m/s1 (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)	31
Gráfico 2 -Pressão no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)	31
Gráfico 3 -Concentração mássica de água no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)	32
Gráfico 4 -Linhas de fluxo da partícula no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c)19 m/s (Caso 3)	32
Gráfico 5 -Trajetória das partículas em função da temperatura no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)..	33
Gráfico 6 - Campo vetorial da velocidade do ciclone no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Casos Simulados	30
Tabela 2 – Parâmetros Físicos	30

NOMENCLATURA

A	<i>Constante</i>	$[-]$
A_e	<i>Área de seção transversal de uma partícula esférica</i>	$[m^2]$
A_{ne}	<i>Área de seção transversal de uma partícula não esférica</i>	$[m^2]$
B	<i>Constante</i>	$[-]$
B_i	<i>Número de Biot</i>	$[-]$
C	<i>Constante</i>	$[-]$
C_D	<i>Coefficiente de arraste</i>	$[-]$
C_g	<i>Calor específico do gás</i>	$[kJ/kg K]$
C_p	<i>Calor específico da partícula</i>	$[kJ/kg K]$
C_{2RNG}	<i>Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$</i>	$[-]$
C_{1RNG}	<i>Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$</i>	$[-]$
C_{RNG}	<i>Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$</i>	$[-]$
D_A	<i>Difusividade Cinemática</i>	$[m^2 s^{-1}]$
D_{ag}	<i>Difusividade de vapor de água na fase gasosa</i>	$[m^2 s^{-1}]$
D_m	<i>Difusividade de massa</i>	$[m^2 s^{-1}]$
d_p	<i>Diâmetro da partícula</i>	$[m]$
F	<i>Resultante das forças que atuam sobre a partícula</i>	$[N]$
\vec{F}_D	<i>Força de arraste</i>	$[N]$
f_p	<i>Fração de partículas</i>	$[-]$
f_{H_2O}	<i>Fração de água no ar</i>	$[-]$
\hat{f}_t	<i>Fator de área superficial</i>	$[-]$
h	<i>Entalpia estática</i>	$[J/kg]$
h_c	<i>Coefficiente de transferência térmica</i>	$[W/m K]$
h_{fg}	<i>Calor latente de vaporização</i>	$[kJ/kg]$
h_{fgo}	<i>Calor latente na temperatura de referência</i>	$[kJ/kg]$
h_{tot}	<i>Entalpia total</i>	$[J/kg]$
k	<i>Condutividade hidráulica</i>	$[m/s]$
K_b	<i>Coefficiente de condutividade do corpo</i>	$[-]$
K_m	<i>Coefficiente de transferência de massa</i>	$[-]$
L_c	<i>Comprimento característico</i>	$[m]$
M	<i>Teor de umidade</i>	$[kg/kg]$
M_0	<i>Teor de umidade inicial</i>	$[kg/kg]$
\dot{m}_p	<i>Fluxo mássico de partículas</i>	$[kg/kg]$

m_a	Massa de água contida no produto	[g/s]
m_p	Massa da partícula	[kg]
m_s	Massa seca	[kg]
M_{bs}	Teor de umidade médio em base seca	[kg]
M_{bu}	Teor de umidade médio em base úmida	[kg/kg]
Nu	Número de Nusselt	[kg/kg]
P	Pressão	[-]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[Pa]
P_{Mg}	Peso molecular do gás	[atm]
P_{Mv}	Peso molecular do vapor de água	[kg/mol]
P_r	Número de Prandtl	[kg/mol]
P_{VAP}	Pressão de Vapor	[-]
Q_c	Transferência de calor convectivo	[N/m ²]
Re_p	Número de Reynolds da partícula	[-]
S_e	Área superficial de uma partícula esférica	[-]
Sc	Número de Schimidt	[-]
Sh	Número de Sherwood	[m ²]
S_M	Termo Fonte	[-]
S_{ne}	Área Superficial de uma partícula esférica	[-]
t	Tempo	[m ²]
T	Temperatura	[s]
T_G	Temperatura do gás	[K]
T_p	Temperatura da partícula	[K]
T_{hfg0}	Temperatura de referência	[K]
u_g	Velocidade do gás	[K]
u_p	Velocidade da partícula	[m/s]
\vec{u}	Vetor velocidade	[m/s]
\vec{u}_p	Vetor velocidade da partícula	[m/s]
\underline{u}	Vetor velocidade média	[m/s]
V	Volume	[m ³]
\vec{v}_r	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]

LETRAS GREGAS

σ_{RNG}	<i>Constante do modelo de turbulência RNG k –</i>	[–]
β_{RNG}	<i>Constante do modelo de turbulência RNG k –</i>	[–]
∂	<i>Varição</i>	[–]
\boxplus	<i>Divergente</i>	[–]
\boxminus	<i>Convergente</i>	[–]
ψ	<i>Potencial de capilaridade</i>	[–]
ρ	<i>Densidade</i>	[kg/m ³]
μ	<i>Viscosidade da fase contínua</i>	[Pa s]
Ω	<i>Velocidade angular da partícula</i>	[rad/s]
μ_{ef}	<i>Viscosidade efetiva</i>	[Pa s]
μ_T	<i>Viscosidade turbulenta</i>	[Pa s]
ϕ_{ij}	<i>Correlação tensão – pressão</i>	[–]
ε	<i>Taxa de dissipação de energia turbulenta</i>	[m ² s ³]
δ	<i>Função delta de Kronecker</i>	[–]
τ	<i>Tensor de cisalhamento</i>	[kg/ms ²]
λ	<i>Condutividade térmica do fluido</i>	[W/Km]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Secadores Ciclônicos	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	Descrição do Problema	21
4.2	Geometria e Malha numérica	21
4.3	Modelo Matemático	22
4.3.1	Equações da fase gasosa	22
4.3.2	Equações de transporte da fase particulada	25
4.3.3	Condições de contorno	29
4.4	Casos Simulados	30
5	Resultados e discussões	31
6	Conclusões	34
7	Agradecimentos	35
	Referências	36

1 INTRODUÇÃO

Até o início do século XIX a cana de açúcar era vista como sendo um produto típico agrícola e era uma valiosa moeda no comércio mundial sendo usada principalmente para produção de açúcar e segundo Mont'Alegre (1976/1977, p. 175-176) a abolição ocorrida em 1833 que acarretou na luta pela extinção da escravidão empreendida pela nação hegemônica foi o que acarretou na perda de competitividade do açúcar das Índias Ocidentais Britânicas, no entanto, o que realmente estava acontecendo era uma transformação no mercado mundial.

Temos como o primeiro elemento dessa transformação o fato de que o açúcar passou a ser submetido às invenções e desenvolvimentos técnicos que aconteceram na Primeira Revolução Industrial tornando um produto que era tipicamente agrícola em um produto industrial com os investimentos feitos pelas metrópoles para modernizar as produções de suas colônias sendo Cuba e Java casos notórios desses investimentos.

Segundo elemento foi o surgimento do açúcar produzido a partir da beterraba que foi descoberto na Prússia em 1796, porém se desenvolveu de maneira mais rápida na França em função do contra bloqueio inglês imposto a Napoleão que ao ver o fornecimento colonial mundial interrompido programou uma política de apoio e fez com que a França se tornasse o primeiro grande produtor europeu tendo então desenvolvido complexos açucareiros também no interior do país graças à disponibilidade de terras para o cultivo da matéria prima.

No Brasil a cana de açúcar foi introduzida por Cristóvão Colombo em 1493, no entanto, devido a descoberta do ouro e da prata no início do século XVI seu cultivo e produção foi deixado de lado e somente 30 anos depois ao surgirem ameaças as novas terras na costa brasileira os portugueses decidiram tomar a posse da terra, porém por ser uma nação pequena e com recursos escassos isto geraria grandes despesas.

Foi assim que se implantou o modelo de ocupação que os portugueses já haviam experimentado com êxito na Ilha da Madeira, a produção de açúcar, que devido ao seu alto valor, geraria recursos para a manutenção da posse da Colônia (MACHADO, 2003). Porém quem trouxe oficialmente a primeira muda de Cana para o Brasil foi Martim Affonso de Sousa que deu início ao seu cultivo na capitania de

São Vicente onde o mesmo construiu o primeiro engenho de açúcar, mas somente no Nordeste os engenhos de cana se multiplicaram.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana de açúcar, tendo grande importância para a economia do país, devido a demanda mundial por etanol, oriundo de fontes renováveis (PRATES, 2018). Sendo matéria prima essencial de diversos produtos, a cana de açúcar destaca-se pelos seus subprodutos, como é o caso do bagaço de cana. O bagaço de cana-de-açúcar é um dos subprodutos da indústria sucroalcooleira, considerado como a maior produção de resíduos da agroindústria brasileira, obtido por meio de processamento da cana-de-açúcar, dentre outras utilizações podemos citar produção e geração de energia térmica e elétrica, etanol de segunda geração, ração animal, aplicação das cinzas do bagaço na construção civil, produção de briquetes, produção de papel, entre outros.

Com tantas aplicações e um teor energético alto, o bagaço de cana de açúcar logo se tornou uma ótima opção como combustível devido a sua produção em grande escala que aumenta a cada ano. Segundo o MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) em 2019 foi relatado que existem cerca de 376 usinas sucroalcooleiras que estão cadastradas no departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia tornando o setor autossuficiente na produção de energia elétrica e ainda possibilitando a comercialização do excedente para o SIN (Sistema Integrado Nacional) (SILVA, LIMA, 2020).

Durante muito tempo o bagaço de cana foi considerado apenas um resíduo, porém diante da atual crise energética, e a necessidade de as indústrias tornarem-se autossustentáveis o bagaço vem sendo utilizado como grande fonte de energia na produção de eletricidade. Após a extração do caldo cerca de 50% da umidade fica no bagaço e apesar de ser considerado uma grande fonte de energia, o fator umidade é de extrema importância, pois quanto mais seco o bagaço, maior o potencial energético, bagaço da cana-de-açúcar também pode ser aproveitado como ração animal, adubo, matéria-prima para papel e celulose, entre outros (SILVA, 2016).

A queima do bagaço nas caldeiras produz a energia que movimenta os equipamentos das usinas, podendo gerar energia excedente que pode ser vendida às distribuidoras de energia elétrica. A demanda de bagaço é responsável pela autossuficiência das usinas sucroalcooleiras no Brasil, em relação à energia elétrica; pois inclusive na entressafra, parte do bagaço armazenado é utilizado para gerar

energia (SOUZA, 2006). Segundo os dados obtidos pela DEE - Diário Económico, ETENE referente a produção de cana de açúcar no ano de 2018 na região Nordeste 45.705.729 toneladas de cana de açúcar foram produzidas.

Levando em consideração os fatores ambientais, políticos e econômicos, as biomassas (qualquer material derivado da vida vegetal ou animal, utilizada na produção de energia e que seja renovável em um período de até 100 anos) estão sendo cada vez mais estudadas para otimizar seu potencial de utilização logo o secador ciclônico é um método muito eficiente tendo em vista que o bagaço seco apresenta um teor calorífico de 19268 KJ/Kg também apresentando a redução da umidade o que faz com que haja a redução dos gases de saída das caldeiras e do vapor da água nos gases de combustão com isso ocorre a melhoria na eficiência das caldeiras (SOSA-ARNAO, 2008).

Sendo assim o processo de secagem do bagaço de cana é de extrema importância devido à melhoria de eficiência da queima deste produto quando levado as caldeiras e geração de energia. Para este fim, o ciclone é um equipamento de pré-secagem ideal. Apresenta as vantagens de baixo custo, ausência de partes móveis e possibilidade de uso a pressões e temperaturas altas (OLIVEIRA, 2010).

2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Contribuir com o estudo numérico e termofluidodinâmico do fenômeno de secagem em ciclone secador por meio da análise da temperatura de entrada da partícula no trabalho de Silva (2016).

Para os objetivos específicos, temos:

- Apresentar uma modelagem matemática para prever a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e partícula.
- Simular a secagem de sólidos úmidos em diferentes condições operacionais. Analisar as distribuições de temperatura, pressão e velocidade do gás no ciclone durante a secagem.
- Avaliar a influência da velocidade e temperatura do gás, fração mássica de água no gás, e fluxo mássico de partículas nas cinéticas de secagem, aquecimento do produto, umidificação e resfriamento do ar.
- Aplicar o estudo do ciclone secador a secagem do bagaço de cana-de-açúcar.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os Ciclones surgiram em meados dos do século XVIII, mas foi usado somente durante a 2ª Guerra mundial nas indústrias de extração e processamento de minérios (SILVA, 2016). Ciclones são equipamentos usados normalmente para a limpeza de gases misturados a partículas sólidas e também para coletar sólidos através de força centrífuga (CORRÊA, 2003). Em 1910, E. W. Kerr foi o responsável pelo primeiro estudo sobre o processo de secagem utilizando gases de exaustão de caldeira no bagaço de cana no qual o secador consistia de uma caixa metálica na qual o bagaço possuía um movimento descendente enquanto o gás de exaustão possuía o oposto, incluindo também o uso defletores que maximizavam o contato dos gases com o bagaço (BOULET, 1975).

No processo de secagem ocorre de forma simultânea a transferência de calor que é necessária para a remoção do líquido e massa no interior do sólido e na superfície na forma de vapor entre o sólido e o agente de secagem, este mecanismo é importante pois vai mostrar a dificuldade com que ocorre o processo de secagem do produto (CARMO, 2004; Farias, 2006). O ciclone consiste numa secção cônica ligada a um corpo cilíndrico, que possui três orifícios, uma entrada e duas saídas. A entrada constitui o duto de alimentação, a saída superior, denominada overflow, é constituída de um cilindro axial, enquanto a saída inferior, underflow, fica localizada no final da seção cônica.

O funcionamento básico dos ciclones segue com a injeção de uma corrente de ar que carrega o material particulado para o interior do equipamento. Este material adquire de forma predominante velocidade tangencial, que quando em contato com as paredes do equipamento adquire escoamento espiral descendente e então são direcionadas para a saída inferior do equipamento. Há troca de calor entre o material particulado e as paredes do ciclone e também com o ar em todo o processo (CORRÊA, 2003 apud SILVA, 2016). Corrêa (2003) estudou a secagem do bagaço de cana e a influência do ciclone neste processo, de maneira teórica e experimental, analisando que a parte cônica possui uma grande influência no tempo de residência das partículas.

3.1 Secadores ciclônicos

No estudo pioneiro a nível nacional produzido por Nebra (1985) o ciclone foi empregado como uma fonte de secagem e no qual o sistema é composto por um secador pneumático e então seguido de um ciclone foi observado que grande parte da secagem do bagaço de cana acontecia no ciclone e a partir desse estudo surgiram diversos outros utilizando diversos tipos de materiais.

No trabalho produzido por Silva e Nebra (1997) onde foi estudado numericamente a secagem da borra de café levando em consideração o encolhimento da partícula, condição de deslizamento e não deslizamento e a transferência de calor entre a partícula e a parede do mecanismo utilizado e foi observado ao fazerem comparações que não houve uma diferença significativa na velocidade tangencial a qual foi obtida através das condições de deslizamento e não-deslizamento e nos perfis de temperatura no entanto ao analisarem os valores obtidos quanto o encolhimento da partícula os resultados foram extremamente satisfatórios quando comparado ao modelo onde não foi considerado o encolhimento da partícula.

No estudo realizado por Farias (2006) foi notado que as variações dos valores do diâmetro de saída inferior mostraram certa influência sobre o comportamento fluidodinâmico do ciclone, mas não apresentou a mesma influência sobre a cinética de secagem.

No trabalho de Santos (2009) obteve eficiência em remover a umidade superficial de borra de café em baixo tempo de residência, logo, pode-se sugerir o uso do equipamento como um pré-secador de partículas e em melhoria de eficiência energética de caldeiras com o uso da borra de café como combustível.

Souza (2014) analisou a influência da posição do duto de entrada no ciclone secador sobre os perfis de velocidade com o fluxo de ar e partículas no sentido anti-horário, os perfis de velocidade axial e tangencial em função da posição radial e utilizando uma malha com a mesma distribuição e número de elementos da que é utilizada para ao usado quando o duto de alimentação está posicionado no sentido horário e observou que os resultados apresentam um comportamento similar aos apresentados para o modelo em que o duto de alimentação do ciclone está posicionado no sentido horário.

Silva (2016) em sua pesquisa constatou o caráter tridimensional das fases gasosa e particulada no interior do ciclone, a presença de regiões com zonas de recirculação próximas ao duto de saída do gás e de inversão de fluxo assim como um comportamento helicoidal decrescente do gás nas proximidades da parede cilíndrica e cônica do ciclone e ascende na região próxima ao centro.

Segundo Silva (2016) as componentes de velocidades tangenciais mostraram-se ser predominante perante as componentes de velocidade axiais e Ao se variar a temperatura dos fluídos de alimentação do gás e das partículas, foi verificado que não houve influência significativa na temperatura final das misturas, e na formação de vapores na saída do secador.

No estudo de Zimmermann (2018) onde o secador ciclônico foi usado para separação do chumbo do ar foi perceptíveis que o comportamento do gás e das partículas de chumbo no interior do secador ciclônico se mostrou favoráveis à separação levando em consideração que foi possível perceber que as partículas se encontravam mais próximas da parede e o gás ao centro do equipamento.

Segundo Barbosa (2019) no seu estudo sobre a influência da temperatura do ar de entrada na secagem do bagaço de cana-de-açúcar em secador ciclônico via simulação no CFX observou a relação do aumento de temperatura com a melhoria da eficiência do secador ciclônico quanto à desidratação da partícula.

No estudo realizado por Rasi *et al* (2020) sobre a avaliação de um secador de bagaço de cana com dois estágios de secagem que utiliza o calor residual de um gerador de vapor foi possível compreender que o método proposto para a secagem do bagaço para posterior alimentação da caldeira da usina de Álcool, proporcionou melhor eficiência energética e uma grande otimização operacional com a peletização do bagaço além de um consumo de energia elétrica baixo.

3.2 Simulação Computacional

Define-se o fluido como uma substância que quando sujeita a uma força externa o mesmo possui capacidade de escoamento, logo, na fluidodinâmica é feito o estudo destes fluidos em movimento e sob a influência de diversos tipos de forças.

O CFD (Computational Fluid Dynamics) é uma ferramenta computacional que possibilita a análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, dissipação, turbulência, fluxo de partículas entre outros aspectos associados ao escoamento de fluidos.

A fluidodinâmica computacional tem como principal objetivo entender o comportamento físico do escoamento de fluidos através da simulação computacional que discretiza as equações parciais que descrevem o escoamento (SANTOS, 2009; TAVARES, 2012). O CFD consegue fazer a resolução de problemas com base em algoritmos matemáticos, uma geometria virtual e em alguns casos uma malha numérica fazendo com que não seja necessário as análises experimentais que geralmente levam muito tempo e possuem um alto custo, portanto, podemos citar como as vantagens do uso da simulação computacional a vasta área de atuação, baixo custo, a rapidez e confiança nos resultados.

Ao utilizar-se o Ansys pode-se dividir o processo de simulação em quatro etapas sendo elas:

1. A criação da geometria e definição da malha no Ansys ICEM CFD. Para a geometria é preciso fazer a divisão do domínio estudado em volumes de controle, depois são inseridos os pontos no espaço definindo cada volume finito, os limites desses volumes são posicionados entre nós adjacentes, logo, cada nó é rodeado por um volume de controle. Definem-se variáveis no centro dos volumes de controle e integram-se as equações sobre os mesmos para obter-se uma equação discreta. Enquanto a malha irá depender da estrutura e regularidade na distribuição dos pontos espaciais produzidos anteriormente chamados de pontos nodais. Podemos dizer que uma malha é estruturada se existir regularidade da distribuição dos pontos nodais e não-estruturada se houver uma distribuição irregular dos mesmos (FARIAS NETO, 2006).

2. Definição física no Ansys CFX pre. Nesta etapa são feitas as seleções necessárias para a simulação como mudanças de temperatura, pressão, velocidade entre outras.

3. Processamento no Ansys CFX Solver. Para esta etapa são rodados os casos selecionados na etapa anterior.

4. Análise dos resultados obtidos no Ansys CFX-Post. Na última etapa pode ser feita a visualização dos resultados obtidos através de gráficos.

As malhas podem ser divididas em três tipos: Estruturada, Não-Estruturada e Híbrida. A precisão da solução da simulação depende principalmente do número de elementos presentes na malha e como os mesmos estão distribuídos, no entanto é preciso haver um balanceamento pois quanto maior o refinamento da malha maior será o custo computacional devido a potência de processamento do computador. Portanto se torna uma desvantagem para trabalhos que requerem um elevado refinamento da malha pois o custo das melhorias necessárias pode se tornar muito alto.

4 MATERIAIS E METODOS

4.1. Descrição do problema

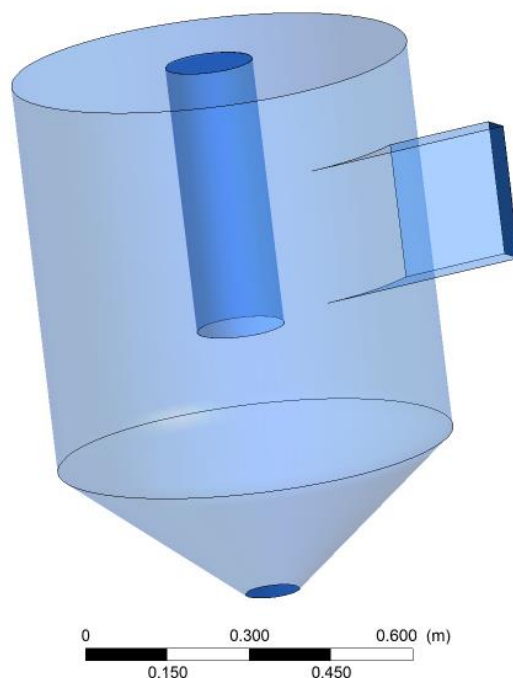
O trabalho consiste na reprodução do trabalho de Silva (2016), que estuda a secagem do bagaço de cana, modificando o diâmetro da partícula e analisando a alteração da velocidade de entrada da partícula.

4.2. Geometria e malha numérica.

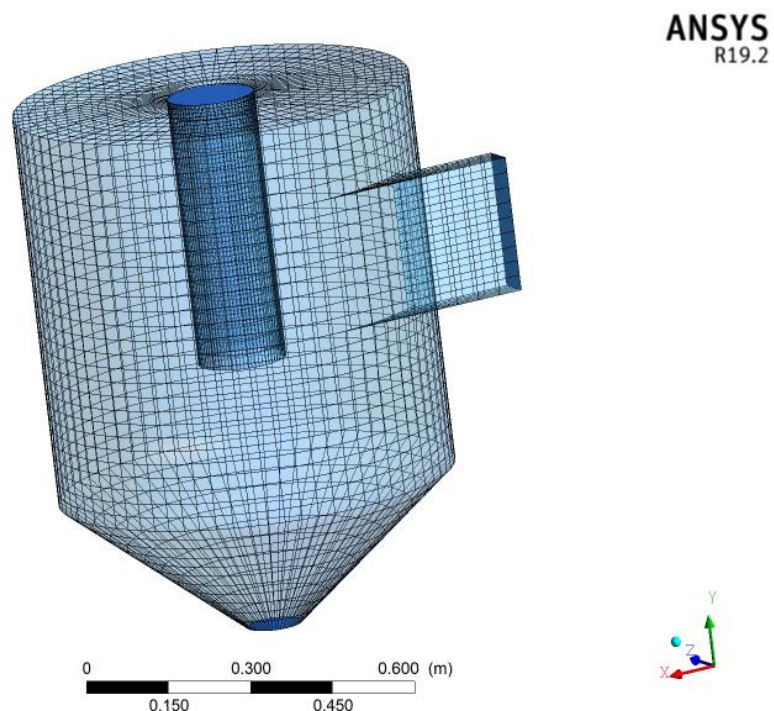
A geração da malha referente a ciclone secador foi feita seguindo as seguintes etapas:

- 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 1- Geometria



ANSYS
R19.2

Figura 2- Malha numérica

4.3. O modelo matemático

As equações e o modelo matemático utilizados nesse trabalho são os mesmos utilizados por Silva (2016) para garantir a eficiência na simulação e a fidelidade dos dados com base no funcionamento do modelo ciclônico construído a partir da malha numérica utilizada nas simulações deste trabalho.

4.3.1 Equações da fase gasosa

Foi utilizado o modelo multifásico Euleriano-Lagrangeano como modelo matemático usado para descrever o escoamento de partículas. Nesta abordagem, um conjunto de equações diferenciais ordinárias no tempo realizou o monitoramento das partículas. Então estas equações são resolvidas para se obter o comportamento das partículas enquanto atravessam o domínio de fluxo, enquanto que o comportamento da fase gasosa é descrita pelas equações de momento linear, energia, conservação de massa e matéria.

No presente trabalho 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:

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.

b) 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.

c) 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:

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

Em que:

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

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

d) 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.

e) 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.

4.3.2 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:

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

Em que, h_{fgo} é o calor latente na temperatura de referência; T_{hfgo} 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.

4.3.3 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:

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

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

b) Seções de saída do ciclone

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

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

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

4.4. Casos Simulados

Foram analisados 3 casos para um diâmetro de 5,35 mm. Para a realização das simulações, dentre variáveis escolhidas para serem alteradas durante a realização das simulações foi a velocidade de entrada do gás, sendo eles:

Tabela 1 – Casos Simulados

Caso 1	Caso 2	Caso 3
11 m/s	15 m/s	19 m/s

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

Tabela 2 - Parâmetros Físicos

Parâmetros Físicos	
Calor Latente	2.251e+06 [J/Kg⁻¹]
Difusividade Efetiva	4.07087e-05 [m²/s⁻¹]
Fluxo de Massa da Partícula	13.1 [g/s⁻¹]
Fluxo de Partículas	6.55 [g/s]
Pressão de Referência	1 [atm]
Rugosidade	0.045 [mm]
Temperatura de Entrada do Gás	483.15 [K]
Temperatura da Partícula	303,75 [K]
Tensão Superficial	0.073 [N/m⁻¹]

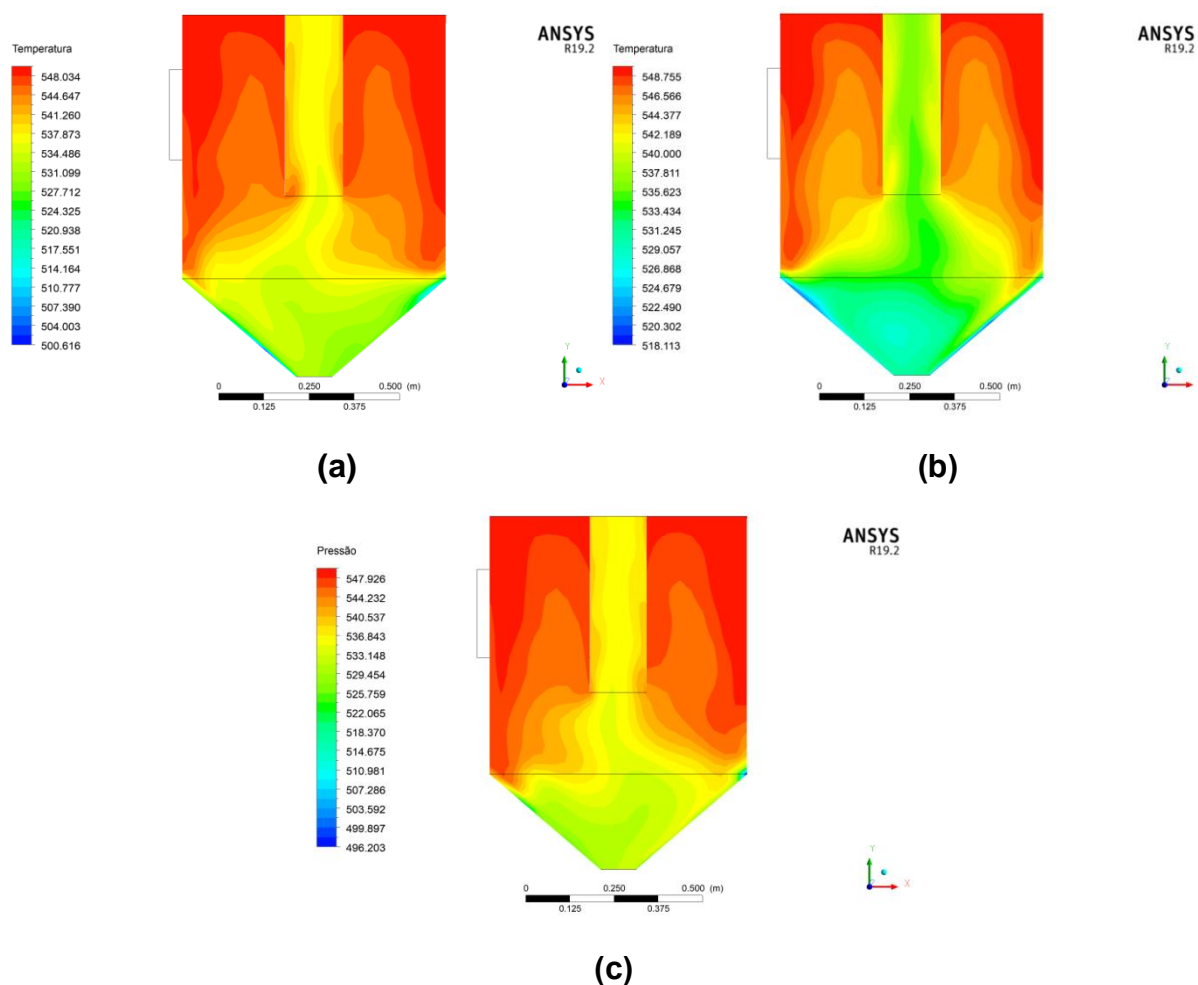
Assim diante do exposto foi analisado:

- Linhas de Velocidade da Partícula;
- Linhas de Temperatura da Partícula;
- Temperatura;
- Pressão;
- Fração Mássica de Água;

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

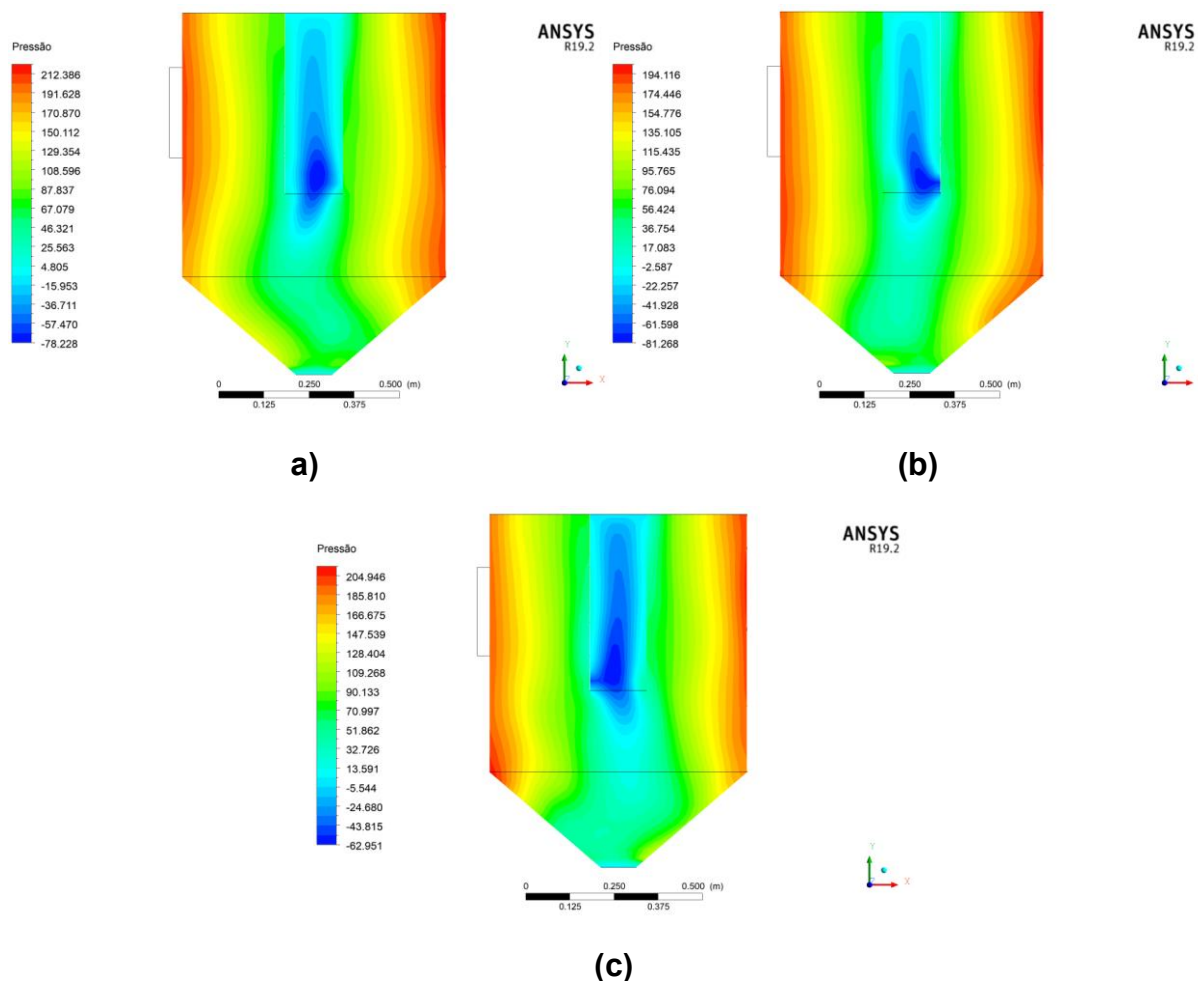
Podemos observar com o gráfico 1 que com o aumento da velocidade de entrada da partícula no secador ciclônico ocasionou um gradiente de temperatura no interior do ciclone, ou seja, com o aumento da velocidade de entrada da partícula ocorre um aumento na variação de temperatura no interior do ciclone.

Gráfico 1 - Temperatura no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3).



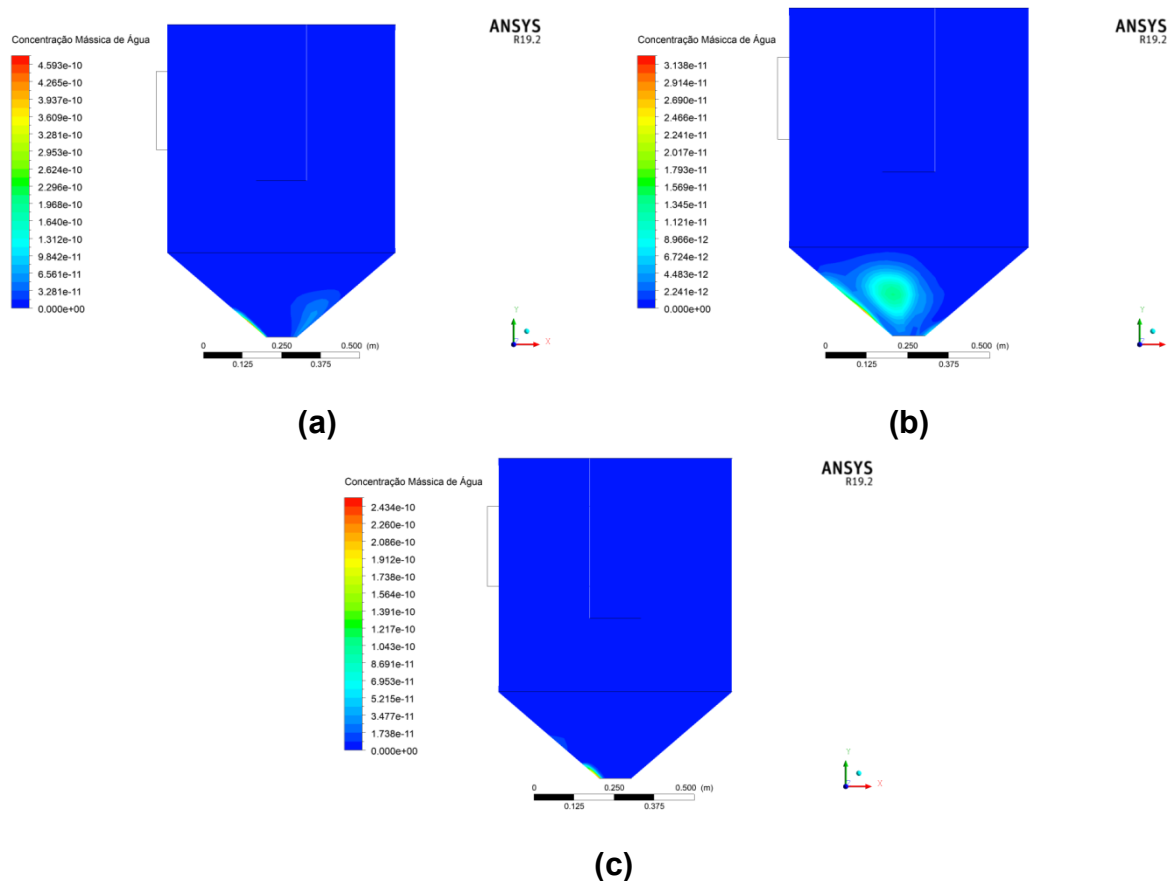
Sabemos que a pressão é definida como a força que o fluido exerce sobre a parede. Percebe-se pelo gráfico 2 que a pressão diminui de acordo com que se aproxima ao centro do ciclone, sendo este comportamento em concordância com a literatura de Silva (2016), Farias (2016) e Cavalcante (2017).

Gráfico 2 - Pressão no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3).



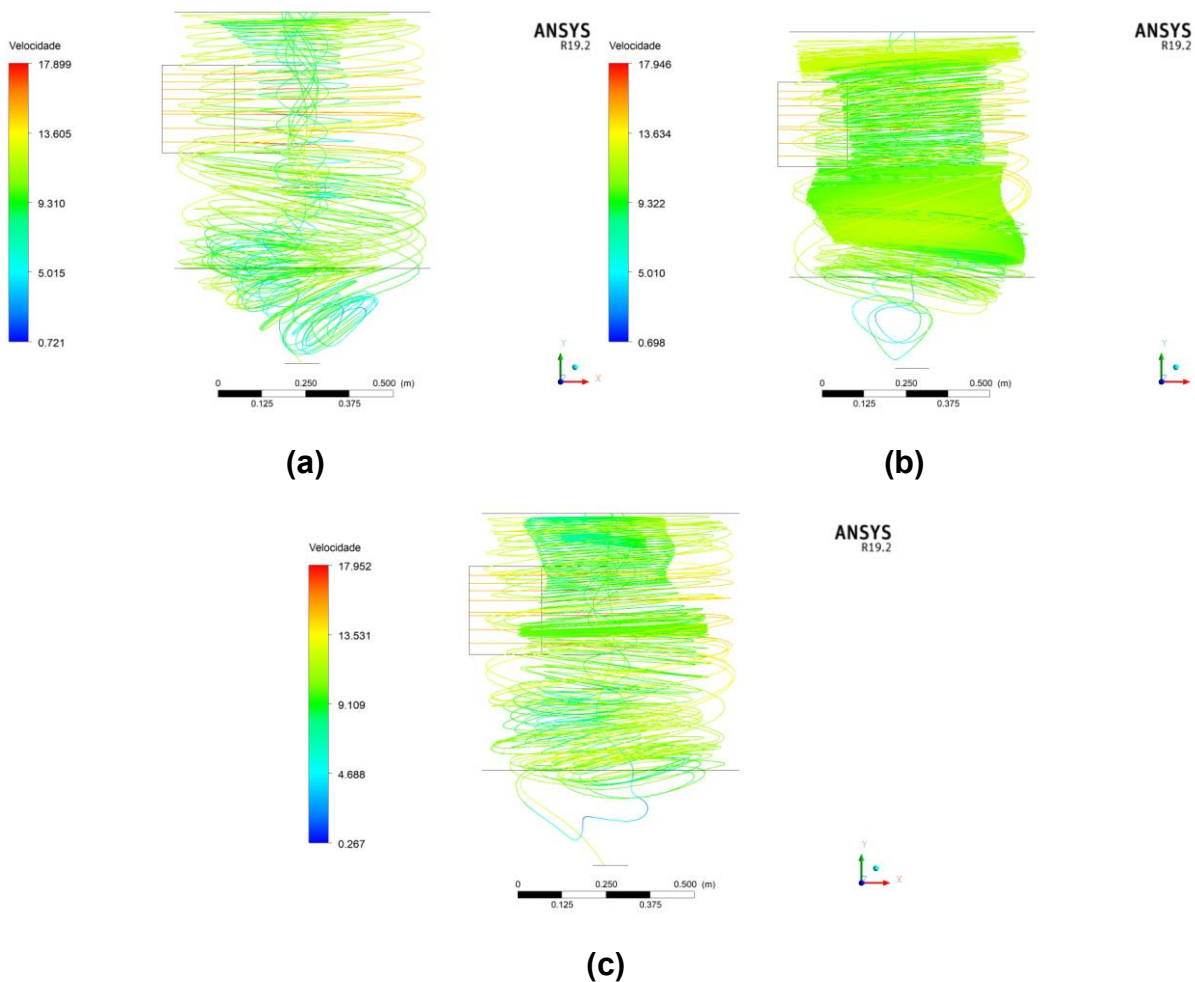
O gráfico 3 que apresenta a concentração mássica de água no interior do ciclone e sabendo que o ar entra no ciclone sem a presença de umidade é possível notar que com o aumento de velocidade de entrada da partícula temos uma diminuição na concentração mássica de água. Logo com o aumento da velocidade de entrada da partícula possui menor eficiência já que com o seu aumento ocorre a diminuição na concentração mássica de água.

Gráfico 3 - Concentração mássica de água no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3).



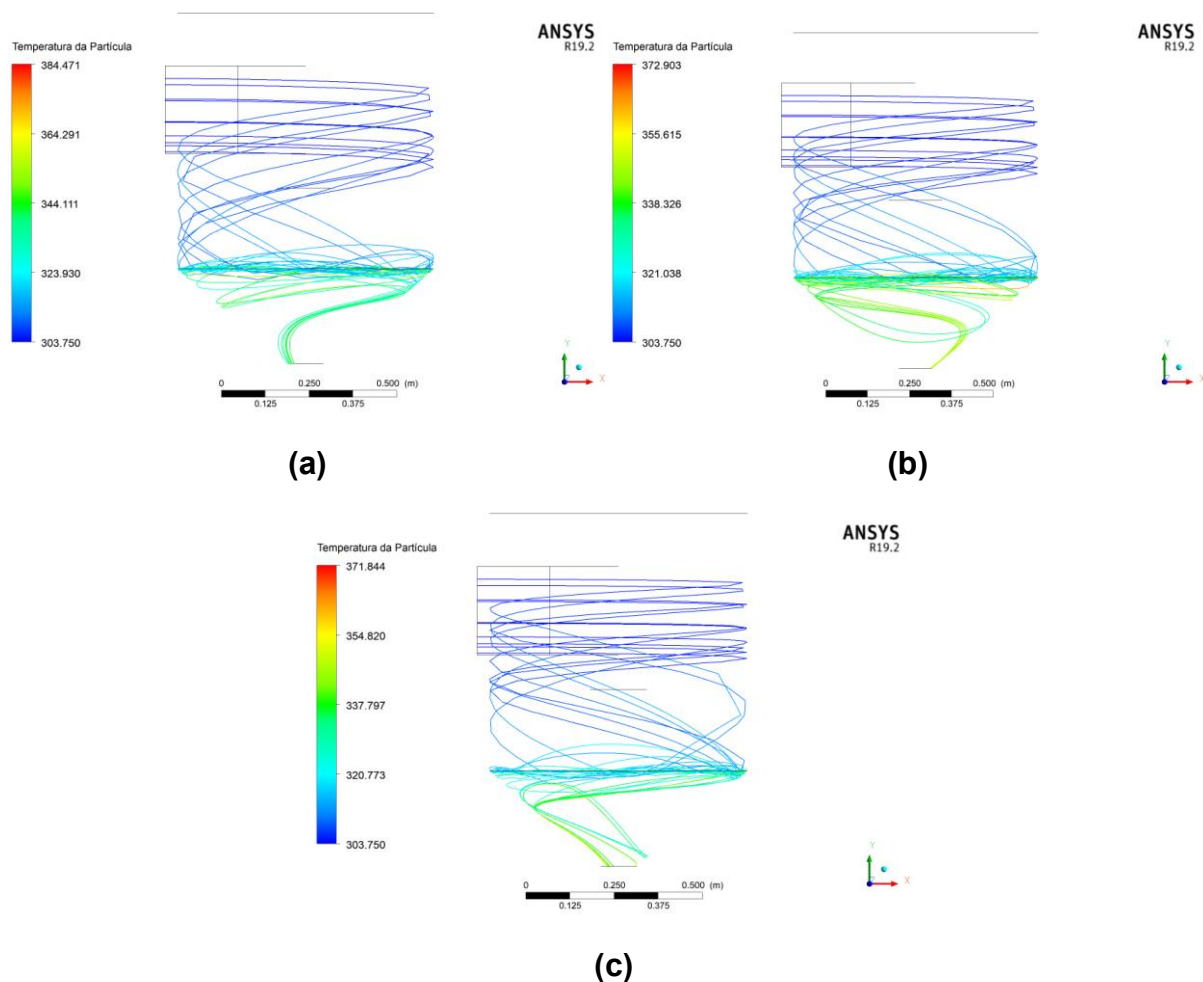
O gráfico 4 ilustra a velocidade da partícula em termos de linhas de fluxo desde a entrada no ciclone através da mesma posição para todos os casos analisados. Estes resultados indicam a presença de um comportamento helicoidal decrescente das partículas nas proximidades da parede cilíndrica e cônica do ciclone, e ascendente na região próxima ao centro do ciclone, o que é justificado pelo caráter tridimensional do escoamento das fases.

Gráfico 4 - Linhas de fluxo da partícula no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3).



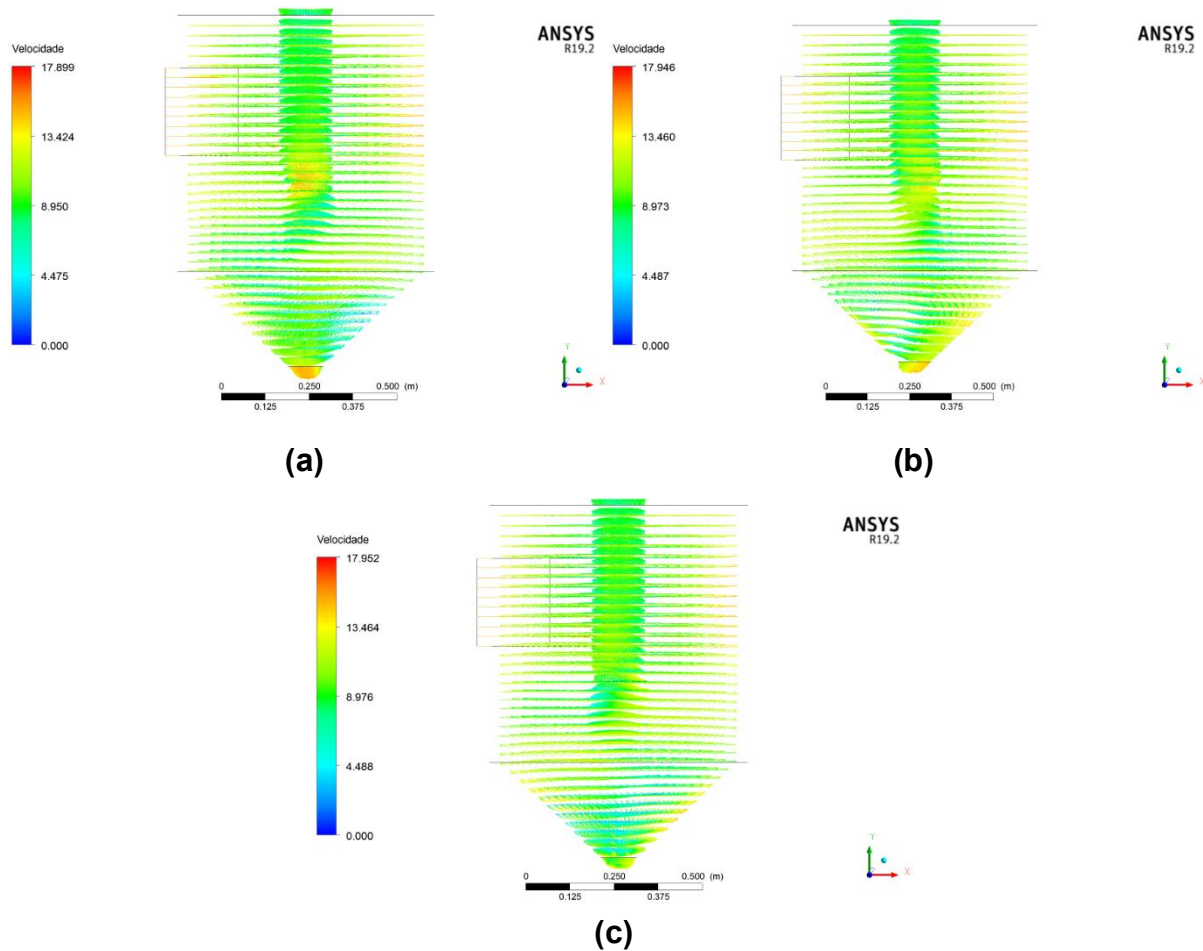
Para o gráfico 5 onde é demonstrada a trajetória da partícula em função da temperatura é possível observar o aumento da temperatura à medida que as partículas apresentam novamente o comportamento helicoidal decrescente que está relacionado com as forças de gravidade, centrífuga, centrípeta e de arraste que atuam no interior do ciclone direcionando as partículas para as paredes cilíndricas e cônicas.

Gráfico 5 – Trajetória das partículas em função da temperatura no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)



Na figura 6 observa-se o campo vetorial produzido pelo ciclone e no mesmo é possível notar que quanto maior a velocidade de entrada da partícula maior é a presença de zonas de intensidade turbilhonar do escoamento. É possível notar também que a pressão decresce radialmente na direção do centro do ciclone.

Gráfico 6 - Campo vetorial da velocidade do ciclone no plano XY para os casos (a) 11 m/s (Caso 1) (b) 15 m/s (Caso 2) e (c) 19 m/s (Caso 3)



6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados numéricos da simulação de secagem do bagaço de cana-de-açúcar apresentado anteriormente, pode-se concluir que:

- Constatou-se o caráter tridimensional do escoamento da fase particulada no interior do ciclone;
- Analisou-se que quanto maior a velocidade de entrada da partícula no ciclone menor é a quantidade de água liberada pela partícula;
- Observou-se um comportamento helicoidal decrescente das partículas nas proximidades da parede cilíndrica e cônica do ciclone e ascendente na região próxima ao centro do ciclone;
- Constatou-se que as distribuições de temperatura nas paredes do ciclone e no plano longitudinal YX acompanham um comportamento helicoidal descendente das partículas arrastadas pela corrente de ar de secagem;
- Notou-se que há uma uniformidade na distribuição da pressão ao longo de toda a parede do cilindro no entanto na região após o duto de entrada é possível observar um maior gradiente de pressão sendo provável que esta alteração ocorra por tratar de uma zona de colisão das partículas que entram no ciclone.

7 AGRADECIMENTOS

Agradeço a ESSS por ceder em seu site o Ansys versão estudante possibilitando assim o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 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.
- BOULET, W.P. Waste fuel drying and the energy, *The Sugar Journal*, Vol. 10, pp. 40-47, 1975.
- Carmo, J. E. F., “Fenômeno de difusão transiente em sólidos esferodais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande (2004).
- Corrêa, J. L. G. Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas (2003).
- Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265071>. Acesso em 14/02/2021
- 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).
- FARIAS NETO, S. R. Métodos Numéricos Aplicados a Engenharia Química. Notas de Aula do LPFI/UAEQ/UFCG, 2006.
- Jossyl, Amorim Ribeiro de Souza; Enivaldo Santos Barbosa; Josedita Saraiva de Souza; Severino Rodrigues de Farias et al. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO DUTO DE ENTRADA NO CICLONE COMO SECADOR: MODELAGEM E SIMULAÇÃO. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014, . Anais eletrônicos... Campinas, Galão, 2014. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2014/papers/influencia-da-posicao-do-duto-de-entrada-no-ciclone-como-secador-medelagem-e-simulacao?lang=pt-r>>. Acesso em: 05 nov. 2021.
- Mont'Alegre, O. Política internacional do açúcar. *Brasil Açucareiro*, p. 98-106, set. 1955
- MACHADO, F. B. P. Brasil, a doce terra – História do Setor. 2003. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b0_2wyiv80efhb2attuk4ec.pdf. Acesso em 12/02/2021.
- Nebra, S. A. “Secagem pneumática de bagaço de cana”. Tese doutorado, 129 p Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, Brasil (1985).
- Oliveira, L. F. Secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Ciência dos Alimentos, Lavras (2010).

PRATES, G. Uso da trifluralina gold nortox na cultura da cana-de-açúcar. São José do rio preto (2018). Disponível em: <http://www.Nortox.Com.Br/wp-content/uploads/2018/05/informativo-artigo-08-gustavo.Pdf> . Acesso em 10/02/2021.

Rasi, José Roberto;Bernardo, Roberto;Peloso, 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.

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.

SANTOS, J. S. T. Estudo Experimental e Numerico da Parafinacao em Escoamentos de Hidrocarbonetos em Dutos Produtores. 2009. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia Oceanica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

Silva, J. P. P. A. Secador ciclônico: modelagem e simulação via cfx. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Campina Grande(2016).

SILVA, Akleino Silvestre da. Modelagem e simulação da dessalinização de águas salobras usando um separador ciclônico térmico munido de bicos aspersores. 2016. 117f. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2015.

Silva, M. A., Nebra, S. A., “Numerical simulation of drying in a cyclone”, Drying Technology, Vol. 15, n. 6/8, pp. 1731-1741 (1997).

SILVA, Ramires Nogueira da; LIMA, Francisco Espedito de. Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração.(2020).Revista Geama. Disponível em:
<http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/3029/482483745>. Acesso em 15/02/2021.

SOUZA, R. R. Panorama, oportunidades e desafios para o Mercado Mundial de Álcool Automotivo. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOSA ARNAO, J. H. Caldeiras aquatubulares de bagaço: estudo do sistema de recuperação de energia. 2007. 233 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande.

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

ZIMMERMANN, M. da 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.