



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

**BRÁULIO MATHEUS BRITO BARBOSA**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE ENTRADA NA SECAGEM  
DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SECADOR CICLÔNICO VIA  
SIMULAÇÃO NO CFX**

**CAMPINA GRANDE**

**2019**

BRÁULIO MATHEUS BRITO BARBOSA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE ENTRADA NA SECAGEM  
DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SECADOR CICLÔNICO VIA  
SIMULAÇÃO NO CFX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba.

**Área de concentração:** Modelagem e Simulação.

**Orientadora:** Profa. Ma. Morgana de Vasconcellos Araújo.

**Co-orientador:** Me. João Paulo Paes De Araújo Silva.

**CAMPINA GRANDE**

**2019**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B238i Barbosa, Bráulio Matheus Brito.  
Influência da temperatura do ar de entrada na secagem do bagaço de cana-de-açúcar em secador ciclônico via simulação no CFX [manuscrito] / Bráulio Matheus Brito Barbosa. - 2019.  
43 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.  
"Orientação : Profa. Ma. Morgana de Vasconcellos Araújo, Coordenação do Curso de Química Industrial - CCT."  
"Coorientação: Prof. Me. João Paulo Paes de Araújo Silva, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande"  
1. Secagem. 2. Cana-de-açúcar. 3. Secadores industriais.  
4. Secadores ciclônicos. I. Título  
21. ed. CDD 664.028 4

BRÁULIO MATHEUS BRITO BARBOSA

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE ENTRADA NA SECAGEM  
DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SECADOR CICLÔNICO VIA  
SIMULAÇÃO NO CFX

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Química  
Industrial da Universidade Estadual da  
Paraíba.

Aprovado em: 02/07/2019.


BANCA EXAMINADORA:

Morgana de Vasconcellos Araújo

Profa. Ma. Morgana de Vasconcellos Araújo.

DQ/CCT/UEPB

Orientadora



---

Me. João Paulo Paes De Araújo Silva

CASAL – AL

Co-orientador

Daniel Cesar De Macedo Cavalcante

Prof. Dr. Daniel Cesar de Macedo Cavalcante

CFLO/CLQUI/IF SERTÃO-PE

Examinador Externo

Márcia Ramos Luiz

Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz

DESA/CCT/UEPB

Examinadora Interna

A Deus pelo Dom da vida

Aos meus familiares

Aos meus amigos

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, pela saúde e por ter me proporcionado a oportunidade chegar até aqui.

Agradeço a minha família, meus pais Conde Ramalho Barbosa e Núbia da Silva Brito, por todo o apoio, o amor, compreensão e paciência; a minha irmã Clara Moana Brito Barbosa pelo apoio, amizade e companheirismo.

A minha querida orientadora Morgana de Vasconcellos Araújo, pela oportunidade, confiança, apoio e ensinamentos.

Aos meus estimados colegas Arthur Machado Silva, Marcelo Pereira Correia e Marinando José Dantas Júnior por todo apoio e amizade.

Aos professores Marília de Assis, Juracy Régis, Thassio Nóbrega, Tassila Pereira, Ângela Maria, Jamilly Lourêdo, Deusalete Câmara, Macio Augusto, Sara Regina, Maria da Conceição e Pablícia Oliveira por todo o apoio e ensinamentos.

A João Paulo, a Profa. Márcia e ao Prof. Daniel pela participação na banca, pelo apoio e oportunidade.

Ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF/UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande que disponibilizou a infraestrutura necessária.

A UEPB e ao curso de Química Industrial que contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste sonho, meu muito obrigado.

*“A persistência é o caminho do êxito”.*

CHAPLIN, C.

## RESUMO

O fenômeno de secagem é um processo extremamente utilizado industrialmente, seu uso é realizado para a remoção da umidade presente em alimentos, polímeros, fármacos, papel e celulose. Este processo ocorre por meio da evaporação da umidade presente em sólidos por meio do fluxo de ar de entrada e da temperatura utilizada. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma simulação numérica do parâmetro de temperatura do gás de entrada no processo de secagem do bagaço de cana por meio de um ciclone de secagem. Utilizaram-se os modelos de turbulência RNG  $k - \varepsilon$  para a fase de gás e o modelo Euleriano-Lagrangeano para o regime permanente e um modelo concentrado transiente de transferência de calor e massa para a fase particulada. Foi simulada a secagem de bagaço de cana-de-açúcar em um ciclone nas temperaturas 183°C e 247°C. A partícula de bagaço de cana foi considerada com forma irregular e constituída unicamente por água. As simulações foram realizadas por meio do *software* comercial ANSYS CFX® 15.0 e a partir dos resultados expressos, foi verificada a interação da variação de temperatura quanto ao processo de secagem no ciclone. Como resultado, foram notadas variações na distribuição da umidade no interior do ciclone e na temperatura da partícula proporcionais às variações de temperatura do ar de entrada.

**Palavras-chave:** Secagem, Ciclone, Temperatura.



## ABSTRACT

The drying phenomenon is an extremely industrially used process, its use is carried out for the removal of moisture present in food, polymers, pharmaceuticals, paper and cellulose. This process occurs by evaporating the moisture present in solids through the inlet air flow and the temperature used. The present work aims to perform a numerical simulation of the temperature parameter of the incoming gas in the drying process of the sugarcane bagasse by means of a drying cyclone. The RNG  $k - \varepsilon$  turbulence models for the gas phase and the Eulerian-Lagrangian model were used for the permanent regime and a transient concentrated mass and heat transfer model for the particulate phase. It was simulated the drying of sugarcane bagasse in a cyclone at temperatures 183°C and 247°C. The cane bagasse particle was considered to be irregular in shape and constituted solely by water. The simulations were performed using commercial software ANSYS CFX® 15.0 and from the results expressed, the interaction of the temperature variation in the cyclone drying process was verified. As a result, variations in the distribution of moisture inside the cyclone and in the particle temperature proportional to the temperature variations of the inlet air were noted.

**Keywords:** Drying, Cyclone, Temperature.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Matriz energética mundial 2016 .....	17
<b>Figura 2:</b> Matriz energética brasileira 2017 .....	18
<b>Figura 3:</b> Imagem de um Spray Dryer.....	20
<b>Figura 4:</b> Estrutura de um ciclone .....	21
<b>Figura 5:</b> Modelo de funcionamento de um ciclone.....	21
<b>Figura 6:</b> Geometria do secador ciclônico.....	24
<b>Figura 7:</b> Malha gerada sobre a geometria do secador ciclônico .....	24
<b>Figura 8:</b> Vetores de entrada e saída das partículas no ciclone .....	25
<b>Figura 9:</b> Campos de temperatura no interior do ciclone .....	35
<b>Figura 10:</b> Temperatura da partícula no interior do ciclone.....	36
<b>Figura 11:</b> Linhas de corrente no interior do ciclone para a secagem para ambos os casos. ..	37
<b>Figura 12:</b> Velocidade do ar dentro do ciclone .....	38
<b>Figura 13:</b> Velocidade da partícula dentro do ciclone.....	38
<b>Figura 14:</b> Campos de concentração mássica de água no interior do ciclone. ....	39

## NOMENCLATURA

$A$	Constante	[-]
$A_e$	Área de seção transversal de uma partícula esférica	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ne}$	Área de seção transversal de uma partícula não esférica	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Constante	[-]
$B_i$	Número de Biot	[-]
$C$	Constante	[-]
$C_D$	Coefficiente de arraste	[-]
$C_g$	Calor específico do gás	[kJ/kg K]
$C_p$	Calor específico da partícula	[kJ/kg K]
$C_{\varepsilon 2RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 1RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$	[-]
$C_{\mu RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$	[-]
$D_A$	Difusividade Cinemática	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$D_{ag}$	Difusividade de vapor de água na fase gasosa	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$D_m$	Difusividade de massa	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$d_p$	Diâmetro da partícula	[m]
$\vec{F}$	Resultante das forças que atuam sobre a partícula	[N]
$\vec{F}_D$	Força de arraste	[N]
$f_p$	Fração de partículas	[-]
$f_{H_2O}$	Fração de água no ar	[-]
$\hat{f}_t$	Fator de área superficial	[-]
$h$	Entalpia estática	[J/kg]
$h_c$	Coefficiente de transferência térmica	[W/m K]
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização	[kJ/kg]
$h_{fg0}$	Calor latente na temperatura de referência	[kJ/kg]
$h_{tot}$	Entalpia total	[J/kg]

$k$	Condutividade hidráulica	[m/s]
$K_b$	Coefficiente de condutividade do corpo	[-]
$K_m$	Coefficiente de transferência de massa	[-]
$L_C$	Comprimento característico	[m]
$M$	Teor de umidade	[kg/kg]
$M_0$	Teor de umidade inicial	[kg/kg]
$\dot{m}_p$	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]
$\bar{M}_{bs}$	Teor de umidade médio em base seca	[kg/kg]
$\bar{M}_{bu}$	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]
$P_r$	Número de Prandtl	[-]
$P_{VAP}$	Pressão de Vapor	[N/m <sup>2</sup> ]
$Q_c$	Transferência de calor convectivo	[-]
$Re_p$	Número de Reynolds da partícula	[-]
$S_e$	Área superficial de uma partícula esférica	[m <sup>2</sup> ]
$Sc$	Número de Schimidt	[-]
$Sh$	Número de Sherwood	[-]
$S_M$	Termo Fonte	[-]
$S_{ne}$	Área Superficial de uma partícula esférica	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[K]
$T_G$	Temperatura do gás	[K]

$T_p$	Temperatura da partícula	[K]
$T_{\text{hfgo}}$	Temperatura de referência	[K]
$u_g$	Velocidade do gás	[m/s]
$u_p$	Velocidade da partícula	[m/s]
$\vec{u}$	Vetor velocidade	[m/s]
$\vec{u}_p$	Vetor velocidade da partícula	[m/s]
$\bar{u}$	Vetor velocidade média	[m/s]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}_r$	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

$\sigma_{\varepsilon RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\varepsilon$	[-]
$\beta_{RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG k- $\varepsilon$	[-]
$\partial$	Variação	[-]
$\nabla \cdot$	Divergente	[-]
$\nabla$	Convergente	[-]
$\Psi$	Potencial de capilaridade	[-]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade da fase contínua	[Pa s]
$\Omega$	Velocidade angular da partícula	[rad/s]
$\mu_{ef}$	Viscosidade efetiva	[Pa s]
$\mu_T$	Viscosidade turbulenta	[Pa s]
$\phi_{ij}$	Correlação tensão-pressão	[-]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação de energia turbulenta	[m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> ]
$\delta$	Função delta de Kronecker	[-]
$\tau$	Tensor de cisalhamento	[kg/m s <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Condutividade térmica do fluido	[W/K m]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO LITERÁRIA.....</b>	<b>16</b>
2.1	CANA-DE-AÇÚCAR.....	16
2.1.1	Energias alternativas.....	17
2.1.1.1	Biomassa.....	18
2.2	SECADORES INDUSTRIAIS.....	19
2.3	SECADORES CICLÔNICOS.....	20
2.4	CFD.....	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	23
3.2	GEOMETRIA E MALHA NUMÉRICA.....	23
3.3	O MODELO MATEMÁTICO.....	26
3.3.1	Equações da fase gasosa.....	26
3.3.2	Equações de transporte da fase particulada.....	28
3.3.3	Condições de contorno.....	32
3.3.3.1	Parâmetros termofísicos.....	33
3.4	CASOS SIMULADOS.....	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
4.1	TEMPERATURA.....	35
4.2	VELOCIDADE.....	37
4.3	UMIDADE.....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária muito utilizada industrialmente. Esta funciona pela desidratação do produto e é realizada em indústrias agrícolas, alimentícias, de papel e celulose, mineral, de polímeros e farmacêutica (PONTES, 2014).

Segundo Luiz (2012), a seleção do equipamento a ser utilizado no processo de secagem é de grande importância, pois determinará o funcionamento de todo o processo juntamente com a demanda de energia gasta e a eficiência do processo.

Os secadores ciclônicos são equipamentos utilizados em processos contínuos e possuem a finalidade de executar a secagem de partículas sólidas a partir da transmissão de calor e de massa realizado pelo ar que transporta as partículas dentro do ciclone (MALDANER, 2012).

A partir da década de 70, as constantes crises energéticas e a enorme quantidade de poluentes gerados a partir de combustíveis fósseis a importância do estudo de fontes de energia renováveis, um exemplo de energia renovável é a energia gerada a partir da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar (MULLER, 2012; ODUM EC, 198-?; ODUM HT, 198-?).

O bagaço é um resíduo resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar. Após o devido tratamento, o bagaço pode ser utilizado como biomassa na cogeração de energia. Para que ocorra um melhor aproveitamento do bagaço como biomassa, é importante a redução da umidade. Com o uso de ciclones, é possível retirar esta umidade de forma rápida e eficiente, tornando melhor a trabalhabilidade com o bagaço da cana-de-açúcar (SILVA, 2016).

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta de estudo dos processos físicos e físico-químicos apresentados em escoamentos. A partir desta, é possível estudar os efeitos apresentados durante a extração da umidade no bagaço da cana-de-açúcar em um ciclone por meio da predição do sistema de escoamento dos fluidos, transferência de calor e fenômenos associados presentes nesse processo (AUGUSTO *et al.*, 2010).

Este trabalho foi realizado visando contribuir com a comunidade acadêmica e criar novas possibilidades quanto ao estudo do uso de ciclones para a secagem do bagaço de cana-de-açúcar por meio de simulações numéricas.

A problemática abordada neste trabalho é realizar a simulação e estudo dos efeitos da temperatura do ar de entrada em um secador ciclônico tendo como foco a análise da remoção de umidade de partículas de bagaço de cana-de-açúcar por meio deste secador.



## 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar numérica e termofluidodinamicamente o fenômeno de secagem em ciclone por meio da análise do parâmetro de temperatura via CFX.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os efeitos da temperatura do ar de entrada na temperatura de partículas que participam do processo de secagem realizado em ciclones.
- Simular o escoamento interno em ciclones utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), com o uso do pacote numérico comercial (ANSYS CFX® 15.0) com o intuito de simular o escoamento interno em ciclones.
- Observar a variação da umidade de um secador ciclônico devido à influência da variação de temperatura do ar de entrada.

## 2 REVISÃO LITERÁRIA

### 2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Rodrigues (2010), a cana-de-açúcar surgiu no Brasil em meados do século XVI pela necessidade de Portugal colonizar e explorar este território. A existência do solo massapê presente, principalmente na região nordeste do país e a boa cotação do açúcar no mercado europeu fez com que o produto logo se tornasse a principal atividade econômica da região.

De acordo com Leite et al. (2018), a cana-de-açúcar é uma cultura agrícola de importância mundial na produção não somente de açúcar, como também na produção de biocombustível. Após a crise do petróleo em 1973, o mercado de combustíveis impulsionou a produção canavieira gerando diversos empregos (ODUM EC, 198-?; ODUM HT, 198-?).

O bagaço da cana-de-açúcar é um importante resíduo da indústria sucroalcooleira. Resultante do processamento da cana-de-açúcar por meio da limpeza, preparo e extração do caldo. O bagaço constitui uma fração de biomassa que necessita ser tratado antes que ocorra o seu descarte ou a sua reutilização para a produção de energia (SILVA, 2016).

A eficiência da extração do caldo influencia diretamente na composição do bagaço, por isso é importante a retirada de umidade deste por meio de secadores para que se possa utilizar o material como fonte de energia, a exemplo de muitas indústrias que fazem uso unicamente da energia proveniente do bagaço resultante do processamento de cana-de-açúcar na própria indústria (FERNANDES; MIGUEL, 2011).

Segundo Vital, Luz e Lima. (2003), antes da extração do caldo, a cana-de-açúcar possui 75% de água, 10% de fibras e 15% de sólidos dissolvidos. Após a extração do caldo, estas porcentagens tornam-se: 50% de água, 46% de fibras e 4% de sólidos totais dissolvidos no bagaço. Apesar de historicamente ter sido tratado apenas resíduo, o bagaço de cana vem sendo utilizado na alimentação animal e na produção de energia, fato este que possibilitou que muitas indústrias se tornassem autossuficientes por meio da geração de energia derivada da queima do bagaço de cana, chamada de cogeração (SOUZA, 2012).

Em termos de produção, pode-se extrair 300 kg de bagaço de cana a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar, este bagaço contém 50% de umidade (bu) e contém um potencial de gerar cerca de 70kW, energia esta que é muito mais eficiente para o autoconsumo de uma usina (FARIAS, 2006).

### 2.1.1 Energias alternativas

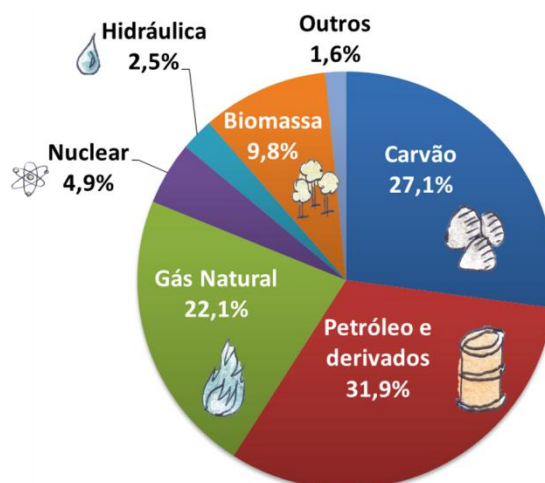
Devido à preocupação quanto aos efeitos da poluição causados pela produção de energia, pesquisas sobre alternativas energéticas estão se tornando cada vez mais frequentes. As energias alternativas são formas de energia que geram menos poluentes, pois não resultam da queima de combustíveis fósseis e por isso não emitem grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é um gás agravante do efeito estufa (NASCIMENTO, ALVES, 2016).

Além de serem menos nocivas ao meio ambiente que as fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis, as energias alternativas são de fácil renovação, este é um fator importante para suprir o crescente consumo de energia mundial (DUPONT, GRASSI, ROMITTI, 2015).

Além da emissão de poluentes, outro fato que favoreceu a redução do consumo de energia advinda de combustíveis fósseis, foram as crises do petróleo, tendo sido no início do ano de 1973 e causando grande caos em diversos países com o aumento notório do preço do petróleo em 400% devido a sua escassez no mercado (ODUM EC, 198-?; ODUM HT, 198-?). Desde então, a busca por combustíveis renováveis ganhou importância mundial afim de suprir possíveis déficits de produção de energia de combustíveis fósseis (NASCIMENTO, ALVES, 2016).

De acordo com a Figura 1, é apresentada a matriz energética mundial, na qual se pode verificar que as maiores proporções de uso são de petróleo e derivados. Pode-se notar que apesar de menor em uso que o carvão, o gás natural, o petróleo e seus derivados, o uso de biomassa como fonte de energia apresenta um valor alto se comparado à energia nuclear, energia hidráulica e outras formas de energia.

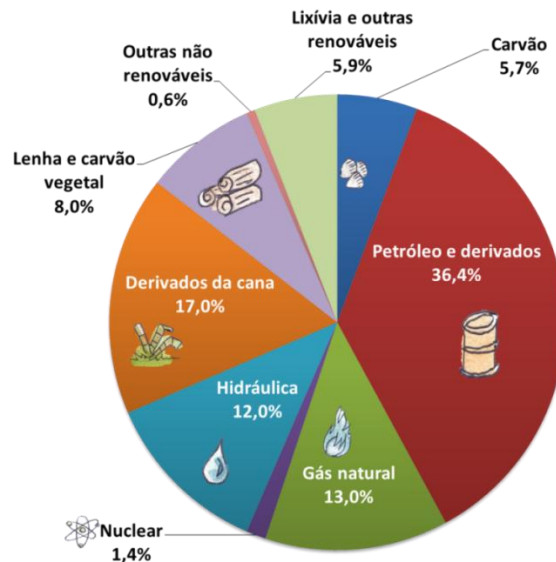
**Figura 1:** Matriz energética mundial 2016



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018)

Na Figura 2, é apresentada a matriz energética brasileira, nesta pode-se observar um grande uso de petróleo e derivados em comparação as demais formas de energia. Porém é notável que em comparação a matriz energética mundial, a matriz energética brasileira faz um uso consideravelmente alto de derivados da cana-de-açúcar, energia hidráulica e energias renováveis.

**Figura 2:** Matriz energética brasileira 2017



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2018)

É possível visualizar na figura 2 que no Brasil, o uso de energias derivadas da cana-de-açúcar apresenta um valor de 17% do uso total da energia nacional, por representar um valor tão alto em comparação as demais fontes de energia é importante o aumento da eficiência na extração da energia proveniente dos derivados de cana.

#### 2.1.1.1 Biomassa

Toda fonte de energia útil proveniente de plantas e derivados destas é classificado como biomassa. A biomassa é o resultado da atividade fisiológica das plantas que funcionam como usinas de conversão energética e que por meio do processo de fotossíntese convertem energia solar em energia química (VASCONCELOS *et al.* 2007). O uso da biomassa mostrou-se viável na década de 70 após a primeira crise do petróleo, porém na década de 80, o preço do petróleo voltou a cair e este fator gerou desinteresse na continuidade do uso de biomassa como forma de energia (MULLER, 2012; ODUM EC, 198-?; ODUM HT, 198-?).

A partir da década de 90 até 2016, o uso da biomassa como alternativa energética voltou a ser estudado graças à possibilidade de esgotamento dos combustíveis provenientes de energia não renovável e à poluição resultada por estes (NASCIMENTO; ALVES, 2016).

É notável o interesse no uso da biomassa como alternativa energética por conta da sua abundância, versatilidade ao se obter combustíveis nos estados sólidos, líquidos e gasosos e pela redução de resíduos como é o exemplo do bagaço da cana-de-açúcar (SOUZA, 2012).

## 2.2 SECADORES INDUSTRIAIS

A secagem é uma das mais comuns e antigas operações unitárias que funciona por meio da remoção de água do produto e pode ser encontrada em diversas indústrias como, por exemplo, indústrias agrícolas, alimentícias, de papel e celulose, mineral, de polímeros e farmacêutica (PONTES, 2014).

Durante o processo de secagem, é importante considerar os seguintes pontos:

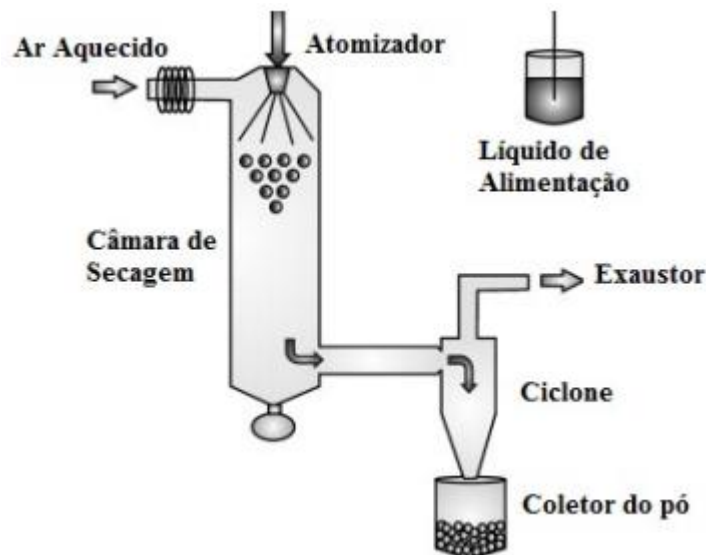
- Tipo de equipamento necessário.
- Gasto energético para realizar a secagem.
- Teor de umidade inicial do produto.
- Volume de produto a ser processado.
- Temperatura ótima a ser utilizada no processo.
- Teor de umidade final a ser obtido.
- Tempo necessário pra que ocorra a secagem do produto.

Existem diversos tipos de equipamentos que podem realizar a função de secagem, tais como os secadores pneumáticos, que usam gases quentes para transportar e secar as partículas de interesse e os secadores rotativos, em que a umidade do material é desprendida através de forças centrífugas.

O uso de secadores pneumáticos é vantajoso para o processo de secagem do bagaço de cana-de-açúcar, pois são secadores com baixo custo e que funcionam por meio da remoção de umidade realizada pelo próprio ar de secagem no decorrer do transporte da partícula é um processo de baixo custo e que pode realizar a secagem de pequenas partículas de bagaço com facilidade (SILVA, 2016).

Como exemplos de secadores pneumáticos, tem-se: secadores de bandeja, ciclone, leito fluidizado e atomizador. Estes secadores possuem seu desempenho fortemente atrelado à temperatura, a velocidade do ar de secagem e a superfície de contato do produto a ser seco (SILVA, 2006). A Figura 3 ilustra um secador atomizador presente no processo de *Spray Dryer*.

**Figura 3:** Imagem de um Spray Dryer



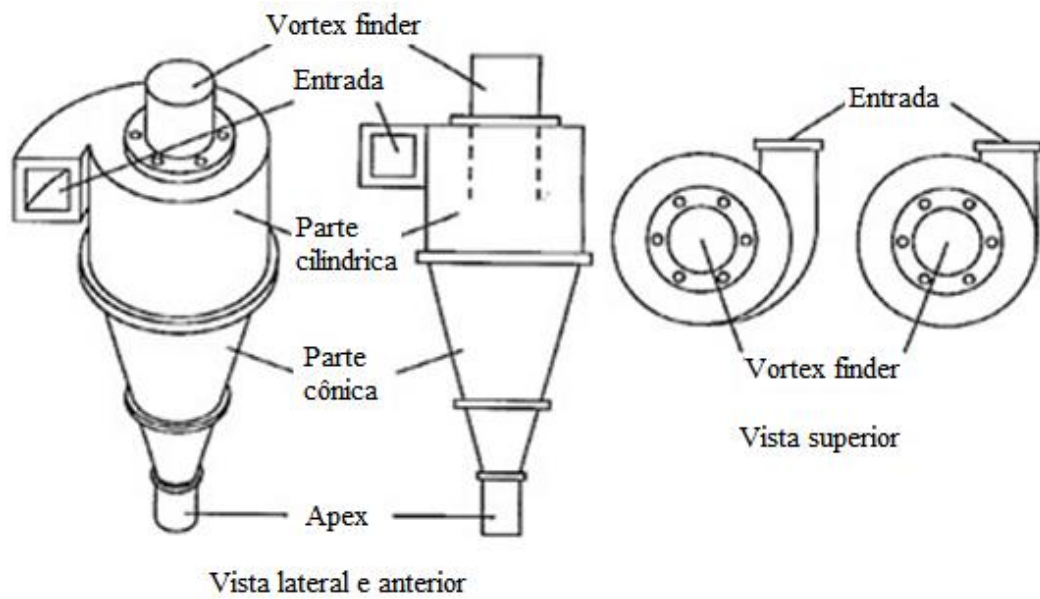
Fonte: Engel (2017)

### 2.3 SECADORES CICLÔNICOS

Os secadores ciclônicos são equipamentos utilizados em processos contínuos que possuem a finalidade de executar a secagem e a separação de partículas sólidas presentes em fluidos líquidos ou gasosos (MALDANER, 2012). Os ciclones são amplamente utilizados em processos industriais graças a sua eficácia nos processos realizados por estes e seu baixo custo com relação aos demais equipamentos industriais que exercem funções equivalentes (AGUIAR, 2018).

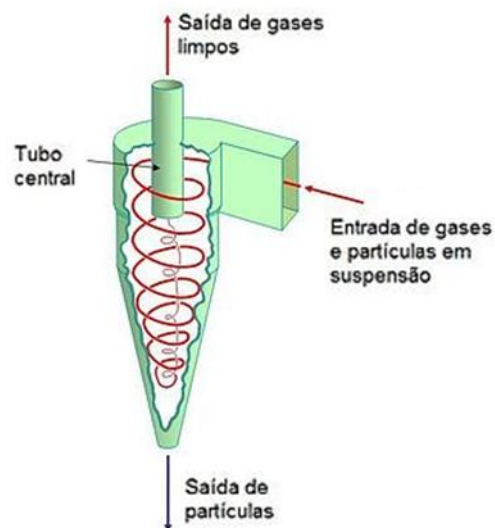
Durante o processo de secagem, o ar quente e desumidificado transporta as partículas e faz a desidratação destas. Dentro de um ciclone este processo ocorre de forma eficiente com a entrada do ar quente e a partícula a ser secada e com a saída da partícula desidratada na saída inferior, enquanto ocorre à saída de ar e água na saída superior (SILVA, 2016), conforme ilustram as Figuras 4 e 5.

**Figura 4:** Estrutura de um ciclone



Fonte: Almeida *et al* (2017)

**Figura 5:** Modelo de funcionamento de um ciclone



Fonte: Almeida *et al* (2017)

## 2.4 CFD

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma poderosa ferramenta no estudo de processos físicos e físico-químicos que apresentam escoamento. Trata-se de um modelo de estudo baseado em simulações numéricas que é capaz de prever sistemas em que ocorre o escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados (AUGUSTO *et al.*, 2010).

As simulações numéricas são realizadas por meio de programas computacionais que funcionam com a inserção de um modelo matemático para determinado problema, com a adição de variáveis e constantes para o problema e com a realização de cálculos baseados nestes dados apresentados (MITRE, 2018).

Matematicamente, o CFD funciona com a resolução de equações discretizadas de *Navier-Stokes*, em que estas equações são capazes de descrever processos de quantidade de movimento, transferência de calor e massa (SILVA, 2019).

As aplicações para o CFD podem ocorrer em diversas áreas, as mais comuns são:

- Indústria de processos: misturadores, reatores químicos;
- Eletrônica: transferência de calor em circuitos elétricos;
- Construção: ventilação de edifícios;
- Indústria automobilística: modelamento de combustão, aerodinâmica dos veículos;

Energia: melhoramento de processos de combustão.



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Um grupo de pesquisa da Universidade Estadual de Campinas vem desenvolvendo desde a década de 80 a secagem experimental de bagaço de cana de açúcar em ciclone via injeção de mistura de gases e partículas. Corrêa (2003) propuseram modificações na geometria do secador ciclônico afim de melhorar a eficiência de secagem. Silva (2016) reproduziu em CFD a geometria proposta por Corrêa (2003) e estudou diversas variáveis de processo.

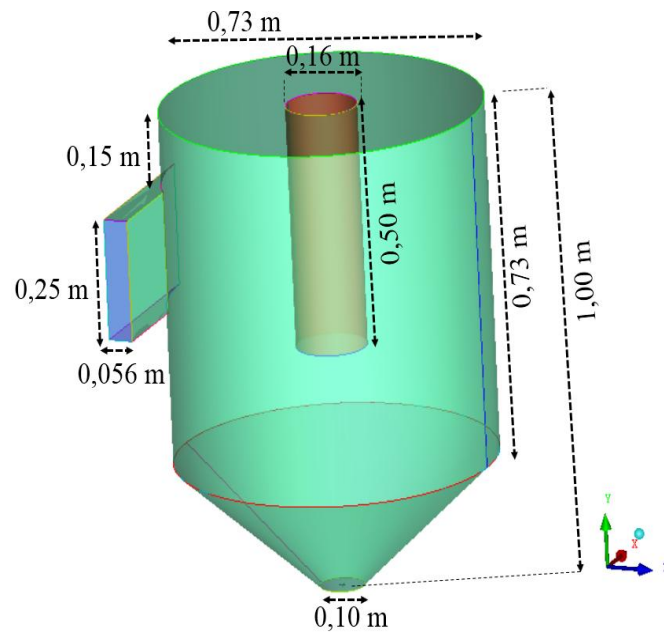
O presente trabalho consiste na reprodução do problema estudado por Silva (2016), que trata da secagem do bagaço de cana-de-açúcar em um ciclone, modificando a variável de temperatura do ar de entrada e estudando sua influência na secagem das partículas.

#### 3.2 GEOMETRIA E MALHA NUMÉRICA

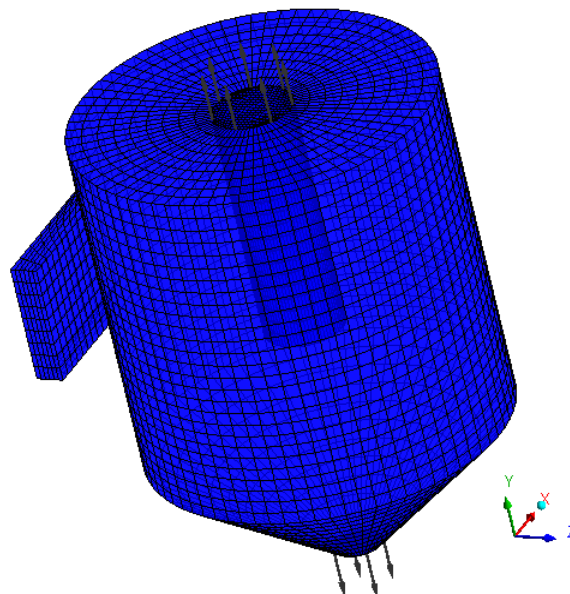
A reprodução do ciclone estudado por Silva (2016) foi realizada utilizando-se o pacote comercial ANSYS CFX® 15.0 disponibilizado no Laboratório Computacional de Térmicas e Fluido do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande.

Para gerar a malha representativa do ciclone secador, inicialmente torna-se necessário criar a geometria definindo-se pontos de referência, de acordo com o método adotado para se criar as curvas e superfícies que definem as fronteiras ou paredes do ciclone (Figura 6). A geometria foi construída no *software* ICEM CFD 15.0 e suas dimensões estão descritas na figura.

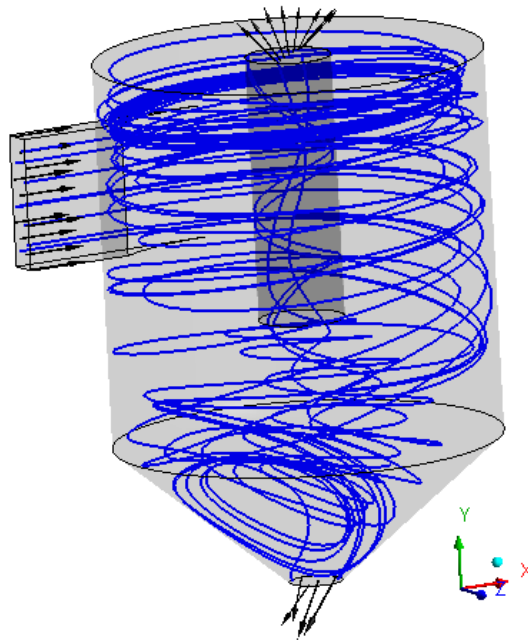
A malha sobre a geometria foi gerada a partir da estratégia de blocagem, possuindo 40 mil elementos hexaédricos (Figura 7). O número de elementos foi escolhido a partir do trabalho de Silva (2016). Para utilizar a malha no CFX foi necessário convertê-la para malha não estruturada.

**Figura 6:** Geometria do secador ciclônico

As dimensões apresentadas no secador ciclônico da figura 6 foram os mesmos utilizados por Silva (2016) para garantir a fidelidade e a eficiência dos dados e possibilitar a comparação entre os resultados apresentados pela literatura e os resultados obtidos por meio deste trabalho.

**Figura 7:** Malha gerada sobre a geometria do secador ciclônico

**Figura 8:** Vetores de entrada e saída das partículas no ciclone



A figura 8 apresenta os vetores da entrada e da saída das partículas durante o processo de secagem dentro do ciclone. Por meio desta imagem, é possível visualizar o percurso das partículas durante o processo de secagem, sua concentração durante o percurso e sua divisão nas saídas superior e inferior dentro do ciclone.

### 3.3 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.

#### 3.3.1 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-se 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 há reação química.
- Foi considerado o efeito da gravidade.
- Não foram consideradas as forças de arraste.
- Propriedades físico-químicas constantes.

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

#### a) Equação da continuidade

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

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

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

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

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

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.

### 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 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:

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

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

#### d) Equação de energia

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

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

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

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

### 3.3.2 Equações de transporte da fase particulada

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

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

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

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

Em que  $d_p$  é o diâmetro da partícula;  $\vec{v}_r$  a velocidade relativa partícula-gás;  $\hat{f}_s$  é um fator de área de seção transversal dado pela Equação  $Pr = \frac{C_{pg} \mu}{\lambda}$  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,  $\rho$  é a densidade da fase gasosa,  $\mu$  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;  $\lambda$  a condutividade térmica do fluido;  $T_G$  a temperatura do ar 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 calor e massa, 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:

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

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,  $dm_p/dt$  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:

$$P_{vapor} = P_{ref} \exp\left(A - \frac{B}{C + T}\right) \quad (30)$$

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

### 3.3.3 Condições de contorno

#### 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) 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:

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

$$\frac{dT}{dy} = 0 \quad (34)$$

### 3.3.3.1 Parâmetros termofísicos

Na Tabela 1 estão os valores das propriedades que foram definidas de acordo com os materiais utilizados no processo de secagem, que foram o ar a 25°C e partícula de bagaço de cana-de-açúcar. Durante as simulações assumiu-se que a partícula de bagaço de cana-de-açúcar era totalmente constituída de água com o objetivo de simplificar o modelo de secagem adotado.

**Tabela 1:** Valores físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem via ciclone.

Propriedades físico-químicas	Fluido: ar (25°C)	Partícula (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
Diâmetro da partícula (mm)	-	6,35
Temperatura da partícula (°C)	-	30,6
Fator de área superficial ( $\hat{f}_t$ )	-	2,78
Fator de área de seção transversal ( $\hat{f}_s$ )	-	3,89

Fonte: Silva (2016)

### 3.4 CASOS SIMULADOS

Os casos simulados neste trabalho baseiam-se na análise da variação de temperatura do ar de entrada durante o processo de secagem dentro do ciclone. Escolheu-se uma velocidade do ar de entrada ( $u_g$ ) igual a 15 m/s por este ter sido o valor que forneceu maior eficiência de secagem. O modelo matemático não conseguiu descrever o fenômeno com velocidades acima desta. O fluxo de partículas foi fixado em 6,55 g/s. As temperaturas adotadas para cada simulação foram:

- Caso 1: 183 °C;
- Caso 2: 247 °C.

As temperaturas adotadas neste trabalho são temperaturas que intercalam as temperaturas apresentadas por Silva (2016). Foram utilizados estes valores para aumentar a abrangência do estudo da variação de temperatura do ar de entrada nos ciclones durante o processo de secagem do bagaço da cana-de-açúcar em secadores ciclônicos.

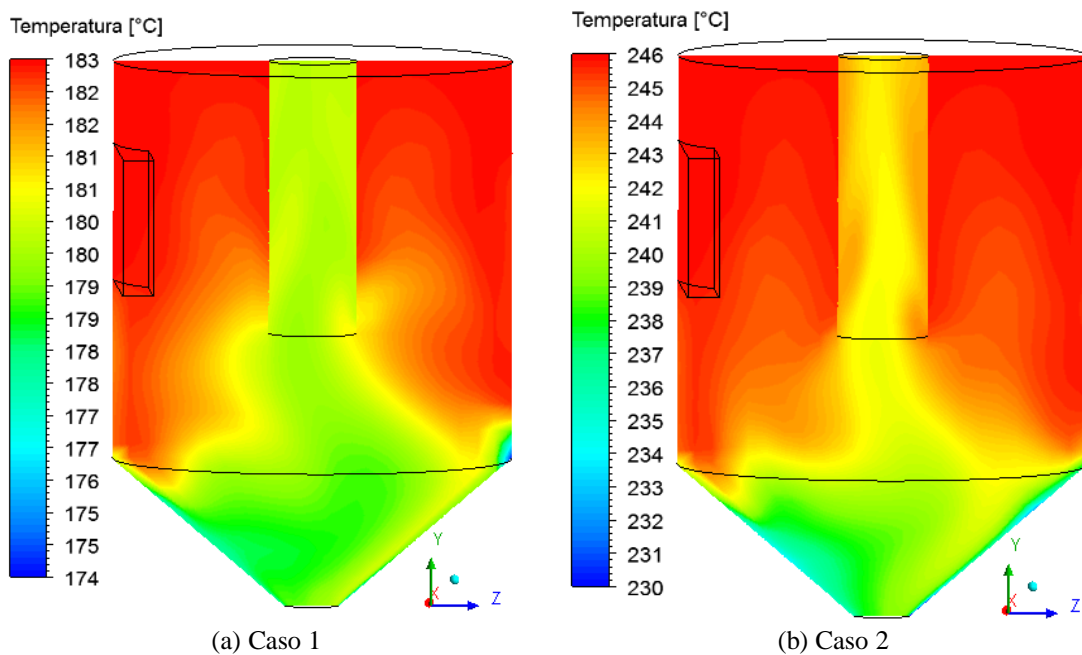
## 4 RESULTADOS

### 4.1 TEMPERATURA

A Figura 9 ilustra os campos de temperatura para as secagens que ocorreram a  $183^{\circ}\text{C}$  (Figura 7.a) e a  $247^{\circ}\text{C}$  (Figura 7.b). Gradientes de temperatura são observados em ambos os casos. A secagem com a menor temperatura apresentou baixa diferença entre a temperatura da saída inferior e da superior, que saem com valores menores do que entraram. Observa-se que parte da energia térmica foi utilizada para evaporar parte da umidade das partículas.

No caso em que a temperatura de secagem é maior, há uma diferença de alguns graus entre as saídas inferior e superior e isto é justificado pelo fato de que a temperatura do ar de entrada não é transferida de forma proporcional ao aumento da temperatura, fato este que comprova que apesar do aumento da temperatura proporcionar um maior aquecimento térmico no ciclone, os processos de transferência de calor pelos fenômenos de convecção e condução no interior do ciclone, não conseguem acompanhar este aumento durante o tempo de permanência das partículas no ciclone.

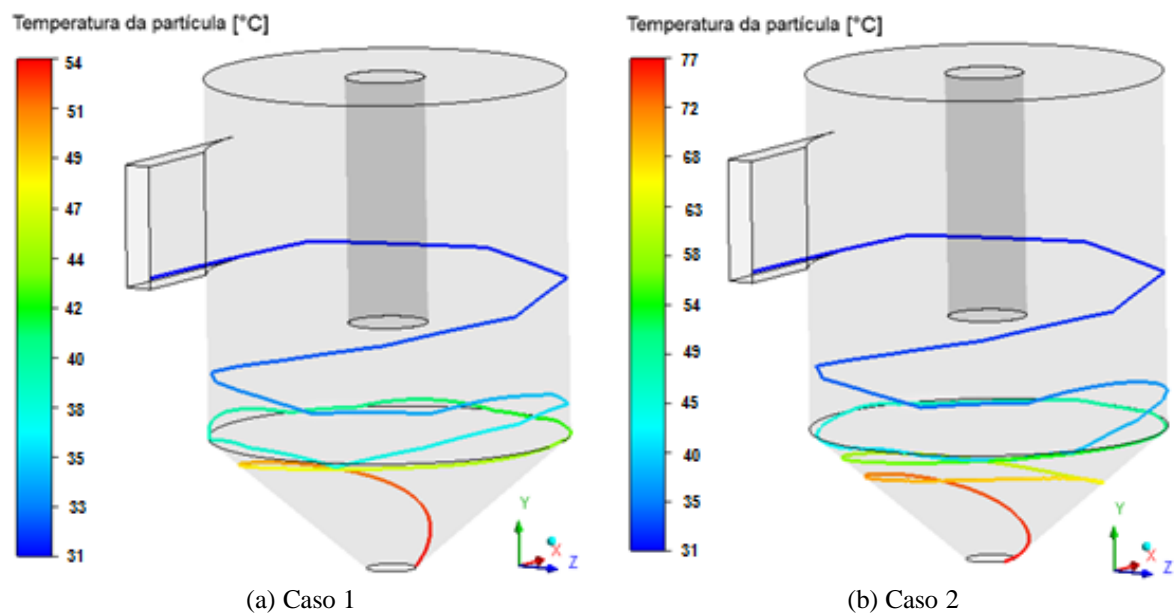
**Figura 9:** Campos de temperatura no interior do ciclone



A elevação na temperatura das partículas é observada a partir da Figura 10, em que nota-se que na secagem a  $183^{\circ}\text{C}$  a partícula elevou a sua temperatura em  $23^{\circ}\text{C}$ , entrando no ciclone a  $30,6^{\circ}\text{C}$  saindo a  $53^{\circ}\text{C}$ . Já na secagem a  $247^{\circ}\text{C}$ , a mesma partícula acresceu sua temperatura em  $46^{\circ}\text{C}$ , saindo do ciclone a  $76,6^{\circ}\text{C}$ . Este aumento de temperatura ocorre devido à transferência de calor entre o ar de entrada que entra com uma temperatura superior e a partícula que entra em menor temperatura no ciclone. A transferência de calor acontece pelos fenômenos de convecção e condução.

A partícula ao entrar no ciclone começa a receber calor do ar de entrada, como se pode verificar na Figura 10, e a temperatura da partícula varia de forma proporcional a temperatura do ar de entrada, comprovando assim a relação de troca de calor ocorrendo entre ambos.

**Figura 10:** Temperatura da partícula no interior do ciclone



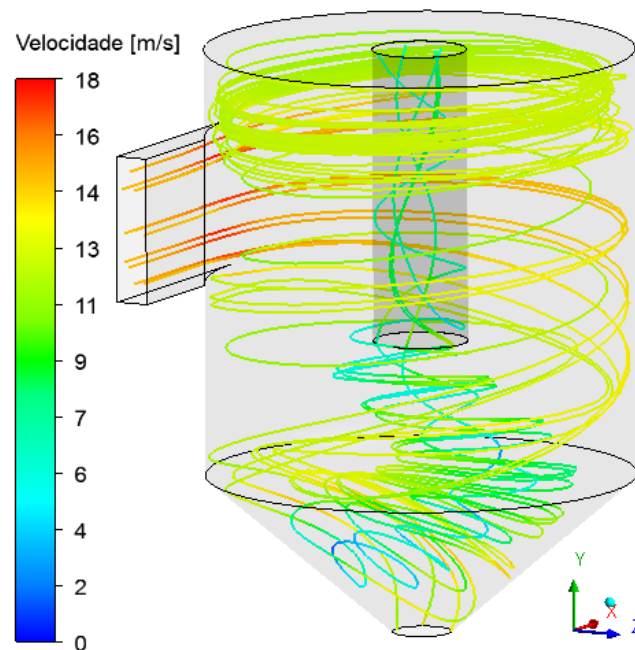
As figuras 9 e 10 demonstram a variação das temperaturas dentro do ciclone, na figura 9 é apresentado que no caso 1 e no caso 2 existe uma maior concentração de temperatura nas paredes do ciclone sendo que o caso 2 a queda de temperatura nas saídas do ciclone é muito maior que no caso 1. Na figura 10 é mostrada a variação da temperatura da partícula no interior do ciclone, nota-se o ganho de temperatura em ambos os casos, porém, o caso 2 apresenta um ganho de temperatura maior do que o caso 1 graças à temperatura mais elevada do ar de entrada. As figuras 9 e 10 apresentam resultados condizentes com a literatura.

## 4.2 VELOCIDADE

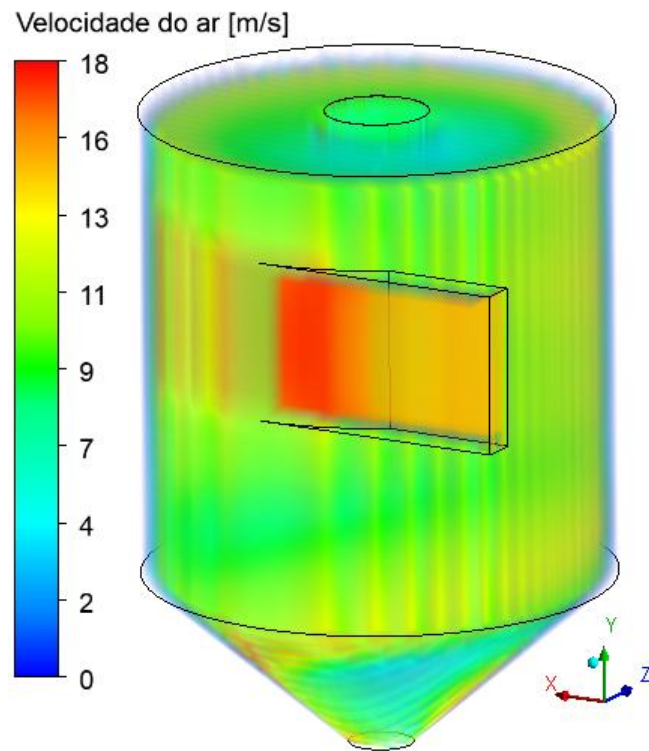
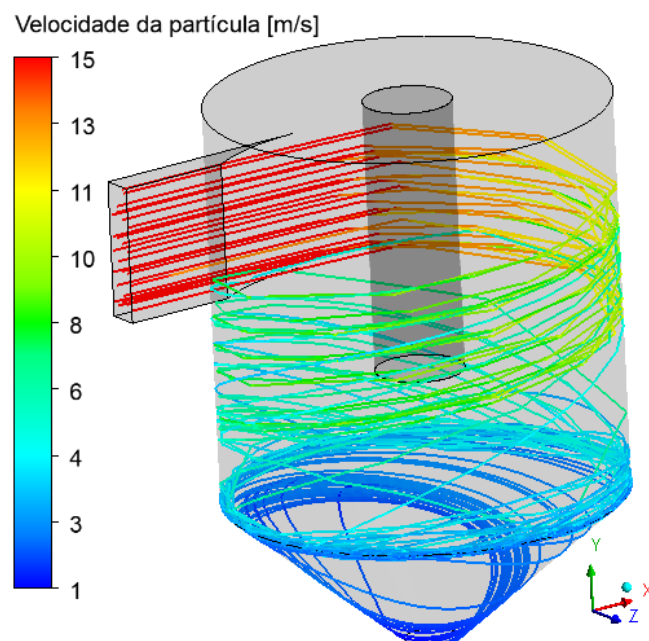
A velocidade das partículas é observada a partir de linhas de corrente (Figura 11). Lembrando que a mistura partícula/gás entrou no equipamento a 15m/s, nota-se um ligeiro aumento da velocidade de algumas partículas após a entrada. Em seguida, parte da energia cinética das partículas é perdida ao se chocar com as paredes do ciclone e sua velocidade de escoamento decai.

Os casos estudados não demonstraram variação da velocidade de escoamento, ou seja, o perfil de velocidade é semelhante nos dois casos, não havendo necessidade de demonstração de duas figuras.

**Figura 11:** Linhas de corrente no interior do ciclone para a secagem para ambos os casos.



A figura 11 apresenta o perfil de velocidade por meio de linhas de corrente no interior do ciclone. Nesta figura é perceptível que dentro do ciclone, ocorre a entrada do ar e da partícula, um pequeno aumento de velocidade no meio do ciclone graças a transferência de energia entre as partículas e nas saídas superior e inferior, ocorre a perda de velocidade das partículas. Os dados são condizentes com os apresentados pela literatura de acordo com os resultados apresentados pela variação de temperatura sem que ocorra a variação de velocidade no gás de entrada durante a inserção deste no ciclone.

**Figura 12:** Velocidade do ar dentro do ciclone**Figura 13:** Velocidade da partícula dentro do ciclone

As figuras 12 e 13 apresentam a variação da velocidade do ar de entrada e da partícula dentro do ciclone, nota-se que inicialmente as moléculas de ar e as partículas entram a uma velocidade maior e no interior do ciclone, após diversas colisões entre as moléculas e as



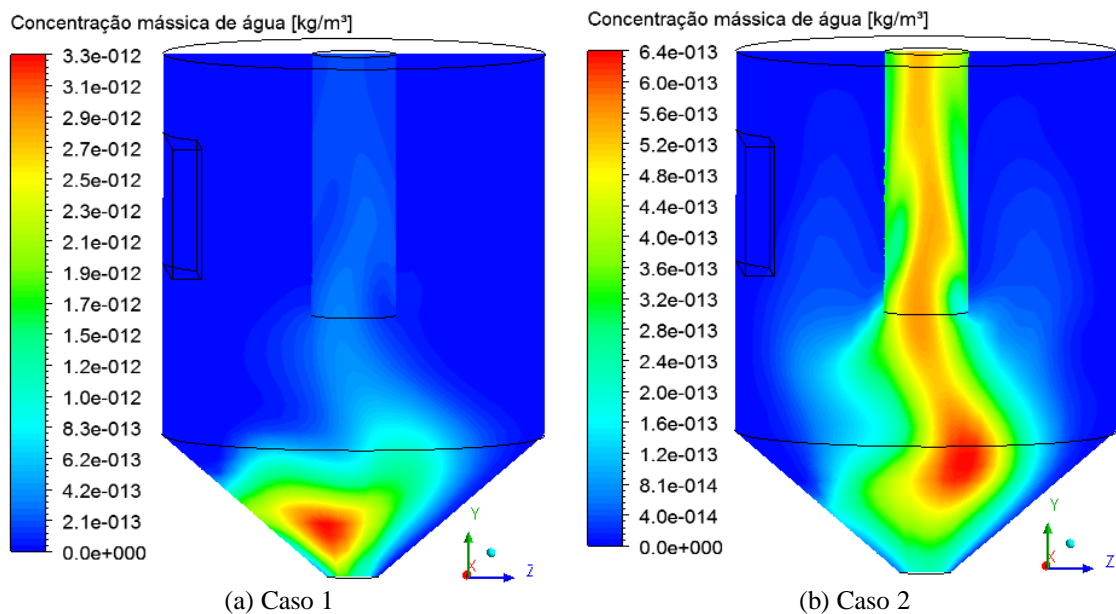
paredes do ciclone, tanto o ar quanto as partículas perdem velocidade. As variações apresentadas nas figuras 12 e 13 estão de acordo com as apresentadas na literatura.

### 4.3 UMIDADE

Considerando-se que nas condições de contorno, o ar de secagem entrou no equipamento sem a presença de umidade, os campos de concentração mássica de água ilustrados na Figura 14 exibem a transferência de umidade da partícula para o ar.

Nota-se que em menor temperatura, a maior parte umidade se concentrou na região inferior do ciclone, próximo a saída inferior, e o ar de secagem saiu com pouquíssima umidade. Já na secagem com alta temperatura o ar de secagem carregou consigo uma quantidade considerável de umidade das partículas. A secagem com maior temperatura demonstrou-se mais eficiente pelo fato de na saída inferior à concentração de massa de água ter reduzido significativamente.

**Figura 14:** Campos de concentração mássica de água no interior do ciclone.



A figura 14 demonstra a concentração mássica de água no interior do ciclone durante o processo de secagem, ao se observar o caso 1 e o caso 2, nota-se que no caso 1 a concentração mássica da água no ciclone está presente na saída inferior, no caso 2 a concentração mássica da água está presente na saída inferior e na saída superior, demonstrando assim a retirada de umidade da partícula já que a esta sai somente pela saída inferior do ciclone. Os dados apresentados na figura 14 estão condizentes com os apresentados na literatura.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados pelas simulações numéricas realizadas neste trabalho, é possível concluir que:

- Observou-se a relação do aumento de temperatura com a melhoria da eficiência do secador ciclônico quanto à desidratação da partícula por meio da verificação da concentração de umidade presente no ciclone com relação.
- Possíveis alterações de velocidade devido à variação de temperatura do gás de entrada são inexistentes ou desprezíveis de acordo com os resultados obtidos com a avaliação dos casos tratados neste trabalho.
- Observou-se o caráter tridimensional de escoamento das partículas e do gás de entrada no interior do ciclone.
- Observou-se a diferenciação do gradiente de variação da temperatura nas saídas inferior e superior do secador ciclônico devido à variação da temperatura.
- Observou-se a variação da umidade na partícula ocorrendo de acordo com a variação da temperatura do ar de entrada.
- Observou-se a eficácia do uso do CFD para simular numericamente o processo de secagem de partículas de bagaço de cana-de-açúcar no ciclone.
- Observou-se a eficácia do uso do ciclone no processo de secagem do bagaço da cana-de-açúcar no processo de produção de energia.
- É possível concluir que com o aumento da temperatura, a eficiência da retirada de umidade da partícula foi aumentada e que por meio de um processo simples como o uso do ciclone, é recomendável realizar a secagem do bagaço da cana-de-açúcar em ciclones.
- Sugestões para futuros trabalhos: estudar melhorias nas formulações matemáticas que compõem o modelo matemático utilizado neste trabalho e fazer o estudo das outras variáveis presentes no processo de secagem do bagaço da cana-de-açúcar por meio do ciclone.

## 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 L, *et al.*; **CICLONE**: Manual de montagem, operação e manutenção. Universidade do Estado do Amapá. Macapá. (2017)
- 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.
- CARVALHO, L. C. *et al.*, **CANA-DE-AÇÚCAR E ÁLCOOL COMBUSTÍVEL: HISTÓRICO, SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA ENERGÉTICA**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, N.16; p. 530, 2013.
- CORRÊA, J. L. G. **Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos**. Tese de doutorado, Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- DUPONT, F. H., GRASSI, F. ROMITTI, L. **Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, v. 19, n. 1, Ed. Especial, p. 70 – 81, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 20 maio. 2019.
- ENGEL, B. *et al.*; **Emprego do Spray Dryer na indústria de alimentos: Uma breve revisão**. Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul, v. 7, p. 02-11, 2017.
- 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.
- FERNANDES, A. S.; MIGUEL, E. R. **A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM TERMELÉTRICAS**. III ENCONTRO CIENTÍFICO E SIMPÓSIO DE EDUCAÇÃO UNISALESIANO, Educação e Pesquisa: a produção do conhecimento e a formação de Pesquisadores, Lins, 17 – 21, 2011.
- HONORATO, G. C.; **CONCEPÇÃO DE UM SECADOR ROTATÓRIO PARA SECAGEM DO CEFALOTÓRAX DO CAMARÃO**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- LEITE, M. R. *et al.* **O trabalho no corte de cana-de-açúcar, riscos e efeitos na saúde: revisão da literatura**. Rev. Saúde Publica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 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).

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

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M.; **FONTES ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS DE ENERGIA NO BRASIL: MÉTODOS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS**. Centro Universitário Ingá - Uningá/Engenharia Elétrica, Maringá-PR, 2016.

NEBRA, S. A., **Secagem pneumática de bagaço de cana**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

ODUM, H. T.; ODUM, E. C. **O DECLÍNIO PRÓSPERO: POLÍTICAS E PRINCÍPIOS**. Brasil, Editora: VOZES. Ed. 1. Cap. 10, 2012.

OLIVEIRA, A. G. *et al.*, **O crescimento do uso de fluidodinâmica computacional (CFD) nas tecnologias de destilação, FCC e coqueamento retardado na engenharia básica de abastecimento da Petrobras**, Iperó, p. 22, 2012.

PARK, K. J. B. *et al.*, **SELEÇÃO DE SECADORES: FLUXOGRAMA**. Campina Grande: Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.9, n.2, p.179-202, 2007.

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.

RODRIGUES, L. D. **A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: IMPACTOS AMBIENTAIS E O ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO COMO FERRAMENTA PARA MITIGAÇÃO**. Especialização em Engenharia ambiental. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Juiz de Fora, 2010.

SANTOS, R. V. *et al.* **COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum SPP.*) E DAS SILAGENS COM DIFERENTES ADITIVOS EM DUAS IDADES DE CORTE**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 30, n. 6, p. 1184-1189, nov./dez., 2006.

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, J. P. P. A. **SECADOR CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX**. Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica, 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.

SILVA C. V.; **Introdução ao Ansys CFX,** URI - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Campus de Erechim, Engenharia Mecânica, 2019.

SOARES M. S. *et al.* **UTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES.** REVISTA ELETRÔNICA: Artigo 287 Volume 12 - Número 01– p. 3837– 3855 - Janeiro/Fevereiro, 2015.

SOUZA, J. A. R.; **SECAGEM DE SÓLIDOS VIA CICLONES: MODELAGEM E SIMULAÇÃO.** Graduação em Engenharia de processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

VASCONCELOS, G. C. de et al. **ENERGIA LIGNOCELULOSICA DA BIOMASSA:** uma perspectiva. Cadernos de Agroecologia, [S.l.], v. 2, n. 1, may 2007. ISSN 2236-7934. Disponível em: <<http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/cad/article/view/2101>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

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