



Universidade Federal  
de Campina Grande

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**



**JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA**

**SECADOR CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX**

CAMPINA GRANDE - PB

Outubro, 2016

**JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA**

**SECADOR CICLÔNICO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIA CFX**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador (s):** Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

CAMPINA GRANDE - PB

Outubro, 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

### FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S586s Silva, João Paulo Paes de Araújo.  
Secador ciclônico: modelagem e simulação via CFX / João Paulo Paes de Araújo Silva. – Campina Grande, 2016.  
83 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.  
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".  
Referências.
1. Secagem. 2. Secador Ciclônico. 3. Cana-de-Açúcar (Bagaço). 4. Simulação Numérica. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Farias Neto, Severino Rodrigues de. III. Título.
- CDU 66.047 (043)

**JOÃO PAULO PAES DE ARAÚJO SILVA**

Dissertação Aprovada em 13/10/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Orientador

UFCG/CCT/PPGEM/UAEM



---

**Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**

Orientador

UFCG/CCT/PPGEM/UAEQ



---

**Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias**

Examinadora Externa

UFCG/CDSA/UATEC



---

**Dr. José Nilton Silva**

Examinador Externo

UFCG/CCT/UAEQ

## DEDICATÓRIA

*A minha família por todo o incentivo, carinho e apoio incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde, por me fazer corajoso e acreditar na vitória.

A família, meus pais José Renan e Maria Bernadete, por todo apoio e amor em cada instante; aos meus irmãos Junior, Beatriz e Lays, pelo companheirismo e amizade incondicional.

A cômjuge Elisabelle, pelo amor e inspiração em cada momento dessa caminhada.

Aos orientadores, Prof. Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima e Prof. Severino Rodrigues de Farias Neto, pelo incentivo, motivação e confiança depositada em mim durante toda essa trajetória.

Ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF/UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande, que colocou à disposição toda infraestrutura necessária.

Ao CNPq, FINEP, CAPES e UFCG pelo financiamento deste trabalho.

A UFCG e a Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica que contribuíram de alguma forma para a concretização desta missão.

*“Não existe um caminho para a felicidade. A felicidade é o caminho.”*

**Mahatma Gandhi**

## RESUMO

SILVA, João Paulo Paes de Araújo. **Secador Ciclônico: Modelagem e Simulação via CFX**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Dissertação (Mestrado).

Nos últimos anos o ciclone vem sendo utilizado como uma tecnologia de secagem moderna. Neste sentido, nesta pesquisa propõe-se estudar numericamente a secagem do bagaço de cana-de-açúcar usando o ciclone como secador. Adotou-se os modelos 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. Considerou-se a partícula de bagaço de cana-de-açúcar com forma irregular e constituída somente de água. A solução do modelo proposto foi obtida usando o software comercial Ansys CFX 15.0. Resultados do teor de umidade, temperatura, variações dimensionais e trajetória das partículas, e distribuição de velocidade, pressão e temperatura da fase gás no interior do ciclone são apresentadas e analisadas. Verificou-se que o campo de temperatura e pressão, bem como o campo vetorial no interior do ciclone obtidos numericamente apresentaram boa concordância com dados experimentais disponibilizados na literatura e que as cinéticas de secagem, aquecimento, variações dimensionais e tempo de permanência das partículas (bagaço de cana-de-açúcar) são afetadas pelas condições de entrada do gás de secagem.

**Palavras-Chave:** Secagem, bagaço de cana-de-açúcar, ciclone, simulação numérica.



## ABSTRACT

SILVA, João Paulo Paes de Araújo.  
**Dryer Cyclonic : Modeling and Simulation Via CFX.** Campina Grande: Post-Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, 2016, Master's Thesis.

In recent years, cyclones have been used as a modern drying technology. In this sense, this research proposes a numerical study to describe drying of sugarcane bagasse, using the cyclone as dryer. To this end, it was adopted the RNG-K epsilon model in steady state. The Reynolds stress model was adopted to describe turbulence of the gas phase, while the lumped model in transient state was adopted to describe heat and mass transfer of the particulate phase (sugarcane bagasse). It was considered the particle sugarcane bagasse with irregular shape and consists of water only, in order to simplify the model. The solution of the model was obtained using commercial software Ansys CFX 15.0. Moisture content results, temperature, dimensional variations and trajectory of the particles, and distribution of velocity, pressure and temperature of the gas phase inside the cyclone are presented and analyzed. It was found that the temperature and pressure field and the vector field within the numerically obtained cyclone showed good agreement with experimental data available in the literature and that the kinetics of drying, heating, dimensional variations and particle residence time (sugarcane bagasse) are affected by the inlet condition of the drying gas.

**Key-words:** Drying, sugarcane bagasse, cyclone, numerical simulation, CFX.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral .....	2
1.2. Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 2 .....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Cana-de-açúcar .....	4
2.1.1. Subprodutos.....	5
2.1.2. Bagaço como fonte de Energia Elétrica .....	7
2.2. Secagem: Conceitos e Fundamentos. ....	9
2.2.1. Curvas da secagem .....	9
2.2.2. Mecanismos de migração de umidade .....	11
2.3. Secagem do bagaço da cana-de-açúcar .....	15
2.4. Tipos de secadores .....	16
2.5. Ciclones .....	17
2.5.1. Princípios fundamentais .....	17
2.5.2. Secagem via ciclone .....	20
2.6. Escoamento multifásico.....	24
2.6.1. Fundamentos .....	24
2.7. Fluidodinâmica computacional .....	25
CAPÍTULO 3 .....	30
MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. Descrição do problema .....	30
3.2. Malha numérica .....	30
3.3. O modelo matemático.....	32
3.3.1. Equações da fase gasosa.....	32
3.3.2. Equações de transporte da fase particulada.....	35
3.3.3. Condições de contorno .....	39
3.4. Casos simulados .....	41
CAPÍTULO 4 .....	42
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1. A malha numérica .....	42

4.2. Análise termofluidodinâmica do escoamento no ciclone.....	42
4.2.1. Efeito da velocidade de entrada do gás de secagem.....	42
4.2.2. Efeito da temperatura de entrada do gás de secagem.....	54
4.2.3. Efeito do fluxo mássico de partículas.....	61
4.2.4 Efeito da fração mássica de água no ar de secagem .....	68
CAPÍTULO 5 .....	76
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
5.1 Conclusões.....	76
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	77
REFERÊNCIAS .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Porcentagem de energia armazenada por elemento constituinte da cana-de-açúcar. Fonte: Caldas <i>et al</i> (2011).....	7
Figura 2.2 - Esquema da cinética de aquecimento de um sólido no processo de secagem. Fonte: Farias (2002). .....	11
Figura 2.3 - Secador rotativo. Fonte: <a href="http://www.lippel.com.br/secadoresrotativos.html">www.lippel.com.br/secadoresrotativos.html</a> .....	17
Figura 2.4 - Esquema de um secador pneumático. Fonte: <a href="http://bragante.br.tripol.com/desidratacao.html">bragante.br.tripol.com/desidratacao.html</a> , Desidratação dos alimentos (1: filtro de ar; 2: secador; 3: aquecimento indireto cogeração de ar quente; 4: bico de aquecimento; 5: condutor de ar aquecido; 6: moinho de.....	18
Figura 2.5 - Esquema do escoamento em um ciclone. Fonte: Corrêa (2003).....	21
Figura 2.6 - Etapas diretas da simulação computacional utilizando o Ansys CFX .....	28
Figura 2.7 - Tipos de malhas computacionais. Fonte: Adaptado de Santos (2010) .....	29
Figura 3.2 - Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado no trabalho de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012) .....	32
Figura 3.3 - Modelo de blocagem do ciclone usado no presente trabalho. ....	32
Figura 3.4 - Representação da malha numérica do ciclone utilizada no presente trabalho. ....	33
Figura 4.1- (a) Detalhe da parte superior do ciclone; (b) Representação da malha do ciclone secador; (c) Detalhe da seção de entrada do ciclone.....	43
Figura 4.2- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para diferentes velocidades de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2); (c, f) 10,0 m/s (Caso 3). ....	45
Figura 4.3- Linhas de fluxo e velocidade do gás ao longo de sua trajetória para diferentes velocidades de entrada do gás, (a) 15,0 m/s (Caso 1), (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). ....	47
Figura 4.4 - Trajetórias das partículas, em função da velocidade das partículas para os casos em que a velocidade de entrada do gás de secagem são: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). ....	47
Figura 4.5- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as velocidades de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2) e (c, f) 10,0 m/s (Caso 3).....	49
Figura 4.6- Campo vetorial da velocidade do gás sobre os planos longitudinais YZ (a, b, c) para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). ....	50
Figura 4.7- Campo de pressão sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as velocidade de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2) e (c, f) 10,0 m/s (Caso 3).....	51
Figura 4.8- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15 m/s (Caso 1); (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). ....	52

Figura 4. 9- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). .....	52
Figura 4. 10- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1); (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3). .....	53
Figura 4. 11- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para a temperatura de entrada do gás secagem: (a, d) 216°C (Caso 1) ; (b, e) 277°C (Caso 4) e (c, f) 150°C (Caso 5). .....	55
Figura 4. 12- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as temperaturas de entrada do gás secagem: (a, d) 216°C (Caso 1) ; (b, e) 277°C (Caso 4); (c, f) 150°C (Caso 5). .....	56
Figura 4. 13- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5). .....	58
Figura 4. 14- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5). .....	58
Figura 4. 15- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1) ; (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5). .....	59
Figura 4. 16- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5). .....	59
Figura 4. 17- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5). .....	60
Figura 4. 18- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para os fluxos mássicos de partículas: (a, d) 6,55 g/s (Caso 4); (b, e) 13,1 g/s (Caso 6) e (c, f) 19,65 g/s (Caso 7). .....	62
Figura 4. 19- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para os fluxos mássicos de partículas: (a, d) 6,55 g/s (Caso 4); (b, e) 13,1 g/s (Caso 6) e (c, f) 19,65 g/s (Caso 7). .....	64
Figura 4. 20- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7). .....	65
Figura 4. 21- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7). .....	65
Figura 4. 22- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7). .....	66
Figura 4. 23- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7). .....	66

Figura 4. 24- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7) .....	67
Figura 4. 25- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a, d) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b, e) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c, f) 0,02 kg/kg (Caso 9).....	69
Figura 4. 26- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a, d) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b, e) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c, f) 0,02 kg/kg (Caso 9).....	72
Figura 4. 27- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9) .....	73
Figura 4. 28- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9). .....	73
Figura 4. 29- Tempo de permanência da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9).....	74
Figura 4. 30- Diâmetro da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 Kg/Kg (Caso 4); (b) 0,01 Kg/ Kg (Caso 8) e (c) 0,02 Kg/Kg (Caso 9). .....	74
Figura 4. 31- Temperatura da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9). .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1- Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem. .....	40
Tabela 3.2- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.....	41
Tabela 4.1- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.....	44
Tabela 4. 2 - Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.....	54
Tabela 4. 3 - Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.....	61
Tabela 4. 4- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.....	68

## 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]
$C_{\varepsilon 2 RNG}$	Constante do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$	[-]
$C_{\varepsilon 1 RNG}$	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]
$h_{fgo}$	Calor latente na temperatura de referência	[kJ/kg]



$h_{tot}$	Entalpia total	[J/kg]
$k$	Condutividade hidráulica	[m/s]
$K_b$	Coefficiente de condutividade do corpo	[-]
$K_m$	Coefficiente de transferência de massa	[-]
$L_C$	Comprimento característico	[m]
$M$	Teor de umidade	[kg/kg]
$M_0$	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]
$M_{bs}$	Teor de umidade médio em base seca	[kg/kg]
$M_{bu}$	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]
$T_{hfgo}$	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- $\varepsilon$	[-]
$\partial$	Varição	[-]
$\nabla \cdot$	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]

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o homem já fazia uso da secagem num processo que visava à preservação de alimentos. Era comum secar cereais pela ação do sol e ventos, bem como carnes e peixes. Posteriormente, com o domínio das técnicas de secagem, o ser humano foi obtendo melhores resultados tanto no processo de secagem quanto no de armazenamento. Desde então, a secagem tem sido alvo de diversas pesquisas proporcionando o surgimento de novas tecnologias visando à otimização destes processos, à melhoria da qualidade do produto e o menor custo operacional.

A necessidade da produção de alimentos torna-se necessária à medida que a densidade demográfica aumenta. Conseqüentemente, surge a necessidade de aperfeiçoar tanto a produção agrícola quanto os processos a ela inerentes. Portanto, em decorrência da produção em larga escala e conseqüente preocupação com o armazenamento e conservação dos produtos, foi observado que a secagem por métodos convencionais não mais atendia a tal necessidade. A situação exigia cada vez mais o desenvolvimento e otimização do processo de secagem. Diante disso, surgiram diversos tipos de secadores que funcionam tanto de forma contínua como em batelada, de acordo com o processo a ser adotado, como secadores de fluxo cruzado, de fluxo concorrente e contra-corrente.

Neste sentido, vem destacando-se os secadores ciclônicos, que são equipamentos que promovem a separação do sólido e/ou líquido de uma corrente gasosa, empregando o princípio da força centrífuga, no qual o fluido entra no equipamento por uma entrada tangencial realizando movimentos circulares. Devido à ausência de partes móveis, baixa necessidade de manutenção e por possuírem capacidade de operar em altas pressões (100 bar) e temperaturas (1300 K), estes dispositivos são um dos meios mais economicamente viáveis em processos de separação (PERICLEOUS, 1987; WANG *et al.*, 2003; YALCIN *et al.*, 2003; ALTMAYER *et al.*, 2004). O ciclone vem sendo utilizado desde o início do séc. XX em diversas aplicações industriais como: controle de poluição do ar; redução de emissões de gases poluentes; classificação de partículas na indústria de cimento e de alimento; e mais recentemente na secagem de biomassa.

Atualmente, o ciclone é alvo de bastante estudo por pesquisadores. Em seu interior, o caráter tridimensional do escoamento é consequência da presença de zonas de recirculação; escoamento ascendente e descendente; reversão de fluxo; alta intensidade turbilhonar; e presença de vórtices (CORRÊA, 2003; SOUZA, 2012). Estas características tornam complexa a obtenção de um modelo matemático que seja capaz de prever o comportamento do escoamento no interior do ciclone. Entretanto, observou-se um grande avanço na área computacional: no conjunto *hardware* e *software*, o que, pelo emprego de técnicas robustas, vem favorecendo a resolução de modelos matemáticos bastante complexos e representativos de comportamento termofluidodinâmico

O ciclone também pode ser classificado como um “pré-secador”, a depender da destinação do produto. As partículas com um teor de umidade inicial em torno de 50% chegam a um valor de saída em torno de 20-30% (base úmida) (CORRÊA, 2003). Na indústria sucroalcooleira a aplicação industrial de um secador de bagaço pode ser economicamente viável utilizando-se dos gases quentes de escape da própria caldeira, em que o próprio bagaço é o combustível. A secagem para valores menores que 20-30% é inviabilizada devido aos atuais equipamentos, como as caldeiras, que atualmente estão em uso, pois não foram projetadas para queimar partículas tão secas.

A biomassa constituída pelo bagaço da cana seco tem inúmeras aplicações, sendo sua utilização como alternativa energética a de maior proveito para o setor sucroalcooleiro. Nas últimas décadas as usinas procuraram se adaptar a geração de energia elétrica para a venda externa. Esta questão, colocada também em nível internacional, inclui desdobramentos tais como a necessidade de um gerenciamento melhor do sistema de cogeração na planta, incluindo o controle de custos (BARBOSA, 1992) e pesquisa de novas tecnologias na combustão do bagaço, e na própria geração de energia elétrica. O Brasil é o maior produtor mundial de biomassa proveniente da cana-de-açúcar e o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (GOMES, 2015).

## **1.1. Objetivo geral**

O presente trabalho propõe-se estudar numericamente a termofluidodinâmica de um secador ciclônico via CFX.

## 1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos pode-se citar:

- 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.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, na atualidade, é uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo tropical, gerando centenas de milhares de empregos diretos e indiretos. É uma importante fonte de renda e desenvolvimento, pois é a principal matéria prima para a fabricação do açúcar, etanol e aguardente, além de ser utilizada como forrageira na forma *in natura*.

Foi em meados do séc. XVII que, incentivado o cultivo de cana pela metrópole, o Brasil tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Perdeu esta posição durante muitas décadas, mas, com o advento do pró-alcool, programa do governo que substituiu parte do consumo de gasolina por etanol, o Brasil voltou a se destacar no cenário internacional.

A cana-de-açúcar *Saccharum* ssp. é uma planta da família *Poaceae* e pertence a classe monocotiledôneas. As principais espécies surgiram na Nova Guiné, Índia e China. Entretanto, as variedades cultivadas no Brasil e no mundo são híbridos multiespecíficos. O nome usual da espécie está relacionado ao fato de que todas as variedades de cana são híbridas resultantes de cruzamento entre diferentes espécies de cana-de-açúcar (ANDRADE *et al.*, 2007).

Em razão da falta de resistência a baixas temperaturas, a cultura se adapta melhor numa faixa de latitude de 35°N a 30°S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1000 m. No Brasil, a cana-de-açúcar constitui uma cultura tradicional, com alta produção por unidade de área, 70 a 200 ton/ha. Sua expansão ocorre, por ser uma cultura de implantação e manejo simples, exigindo poucos tratos culturais. A cana-de-açúcar, na região central do Brasil, pode ser plantada durante todo o ano, porém há algumas restrições que se referem à disponibilidade hídrica e suas características da variedade quanto à maturação e ao seu ciclo (ANDRADE *et al.*, 2007).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 5,0 milhões de hectares de área plantada, que produzem cerca de 330 milhões de ton/ano, 27% da produção mundial. O setor sucroalcooleiro constitui o principal agronegócio brasileiro, atualmente a produção anual é de 22 milhões de toneladas de açúcar e 13 bilhões de litros de álcool. Além de se posicionar como o maior produtor e exportador de açúcar de cana, é também o maior produtor e consumidor de álcool. Sendo o Brasil o único país a introduzir, em larga escala, o álcool como combustível alternativo ao petróleo (ANDRADE *et al.*, 2007).

O setor sucroalcooleiro movimenta em torno de 10% do PIB brasileiro, sendo aproximadamente 55% da safra destinada a produção de etanol, equivalente a 250 mil barris diário, que corresponde a 3% da produção diária de petróleo da Arábia Saudita. Além disso, o bagaço de cana de açúcar viabiliza a produção de energia limpa, o que tem possibilitado a muitas usinas desenvolver projeto de certificação de créditos de carbono, através do mecanismo de desenvolvimento limpo, (MDL). No Brasil, a agroindústria da cana de açúcar tem adotado políticas de preservação ambiental que são exemplos mundiais na agricultura. Já existem diversas usinas brasileiras que comercializam crédito de carbono, dada à eficiência ambiental. Além da importância econômica, destaca-se ainda a questão social. A estimativa, hoje, é de cerca de 1,5 milhão de pessoas estão envolvidas na atividade sucro-alcooleira no Brasil (ANDRADE *et al.*, 2007).

### **2.1.1. Subprodutos**

O bagaço de cana também é subproduto da indústria de aguardente na qual constitui um setor significativo na economia brasileira, uma vez que são produzidos 1,6 bilhão de litros por ano, sendo 90% de aguardente industrial e 10% de aguardente artesanal. A exportação brasileira constitui 11 milhões de litros de aguardente por ano. No Brasil, a produtividade média de colmos gira em torno de 68,5 ton/ha (CHAVES *et al.*, 2007).

Em se tratando de cana para forragem, obtêm-se do peso total da área plantada: 75% de colmos, e 25% de ponteiro e folhas laterais. Do ponteiro: 10% do peso total, aproximadamente, corresponde ao palmito. Entretanto os pequenos produtores de cana de açúcar utilizam esta parte, que é normalmente descartada, para alimentação animal.



Os pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) descobriram que é possível extrair um palmito da cana para alimento humano, com sabor, textura e valor protéico praticamente igual ao do palmito comum (CHAVES *et al.*, 2007).

A composição química de colmos de cana-de-açúcar se relaciona com as características genéticas da variedade. Os colmos são compostos de caldo e fibra. O caldo contém cerca de 25% de sólidos solúveis, dos quais se destacam a sacarose. Observa-se que a composição da cana de açúcar é muito variável quantitativamente, porém qualitativamente é semelhante em todas as variedades sendo a composição uma variável influenciada pelo clima, solo, adubação, estágio de desenvolvimento da cultura e variedade.

A riqueza em sacarose varia em 13-18%, e o teor de fibra varia de 7% até 17%, sendo este último muito importante para a manutenção energética das indústrias que processam a cana-de-açúcar. Um teor de fibra muito baixo acarreta numa baixa produtividade de energia, acarretando no aumento de custos de produção. Entretanto, quanto maior o teor de fibras, maior o esforço, dos ternos de moendas, para a extração da sacarose, ocasionando um maior desgaste nos dentes das moendas. Portanto, o canavial deverá ser planejado levando-se em conta um dos principais fatores, o teor de fibras, sempre procurando manter este teor ao longo da safra em torno de 12,5% (CHAVES *et al.*, 2007).

O componente atualmente mais valioso desta cultura é a sacarose, pois dela se obtêm os dois produtos de maior exploração, o açúcar e o álcool etílico. O rendimento médio mundial da cultura é de 53 toneladas/ha de colmos com teores de sacarose de 10 a 18% e 11 a 16% de fibras. A cana-de-açúcar é altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química e possui alta taxa de acumulação de biomassa, que se deve ao alto índice de área foliar e intensa atividade fotossintética (CALDAS *et al.*, 2011).

Após a definição da área de plantio, é necessário escolher a variedade a ser plantada. A definição de qual variedade plantar é uma decisão técnica e administrativa. É técnica por que depende do ambiente, tipo de solo e clima; é administrativa por que é necessário observar que a época de colheita da cana é função do ciclo da variedade. Em termos de época de colheita, considera-se que canas a serem colhidas nos meses de

abril, maio e junho são classificadas de precoces e cana a serem colhidas em julho, agosto e setembro são consideradas de um ciclo médio; e aquelas a serem colhidas em outubro e novembro são classificadas de tardias.

### 2.1.2. Bagaço como fonte de Energia Elétrica

O conceito de biomassa para energia é relativamente recente e tem sido alvo de controvérsias e discussões, haja vista a sua possível concorrência com a produção de alimentos. Entretanto, devido as constantes crises no fornecimento de petróleo, bem como a possibilidade de sua escassez, à inconstância dos preços e, principalmente, aos efeitos danosos dessa fonte ao meio ambiente, o desenvolvimento de culturas bioenergéticas visando à produção de energia e energéticos tem se mostrado como alternativa viável, sustentável e racional para suprir parte da demanda atual de petróleo e seus derivados, principalmente no setor de transportes. Na Figura 2.1 está representada a quantidade energética de elementos da cana-de-açúcar como bagaço, sacarose e palhas.

Figura 2. 1 - Porcentagem de energia armazenada por elemento constituinte da cana-de-açúcar. Fonte: Caldas *et al.* (2011).



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. Possui um elevado poder calorífico inferior (PCI) 7563 kJ/kg de bagaço e com 50% de umidade após a extração do caldo (SOUZA, 2012). Basicamente, este produto é constituído por fibras moídas: 46% de fibras, 50% de água e 4% de sólido dissolvido.

A produção de eletricidade através da utilização do bagaço de cana como fonte energética é altamente dependente da variável umidade presente na mistura binária

composta por bagaço e água. Quanto mais seco o bagaço estiver, maior o seu potencial energético durante a combustão. Portanto, ressalta-se a importância de ciclones como secadores ou pré-secadores, adaptados para esta finalidade, uma vez que o mesmo possui diversas aplicações.

Por muito tempo, tratado apenas como resíduo, atualmente, o bagaço de cana vem sendo muito utilizado para produção de energia por meio da co-geração, tornando as usinas de açúcar e álcool energeticamente autossustentáveis. Vale aqui dizer que, de uma tonelada de cana de açúcar pode-se obter, aproximadamente, 300 kg de bagaço com 50% de umidade ( $M_{bu}$ ) contendo um potencial de gerar 70 kW/h, energia esta, muito mais que suficiente para o autoconsumo de uma usina (NEBRA, 1985; CORRÊA *et al.*, 2002; FARIAS, 2006).

Além de ser um insumo de grande potencial energético com poder calorífico inferior PCI igual a 7563 kJ/kg de bagaço, com 50% de umidade ( $M_{bu}$ ), o bagaço da cana-de-açúcar também pode ser aproveitado como ração animal, adubo, matéria-prima para papel e celulose, entre outros.

Os pré-secadores surgem como uma ótima alternativa em substituição a outros secadores, tais como: leito fluidizado; tambores rotativos; e secadores de correia. Algumas de suas vantagens são: significativo aumento no tempo de residência do sólido; intensa troca de calor e massa devido à alta velocidade relativa entre o ar de secagem e o sólido; fácil limpeza; longa vida útil; inexistência de partes móveis; e baixos custos de operação e manutenção (KORN, 2001).

Numa unidade produtora de açúcar ou usina, obtêm-se a partir da moagem de uma tonelada de colmos os seguintes produtos e subprodutos: 100 kg de açúcar; 250-300 kg de bagaço; 550-660 kg de vapor; e 70 kW/h de energia. Numa unidade produtora de álcool ou destilaria autônoma, obtêm-se a partir da moagem de uma tonelada de colmos os seguintes produtos e subprodutos: 75 litros de álcool; 250-300 kg de bagaço; e 70 kW/h de energia (CHAVES *et al.*, 2007).

Canas de boa combustibilidade apresentam menores teores de matéria estranha vegetal depois de queimadas e, portanto, oferecem maiores facilidades de limpeza pela máquina. Uma boa queima pode eliminar até 90% de matéria vegetal. Além disso, em

se tratando de matéria-prima, deve-se atentar para o desempenho e a sua qualidade. O uso das queimadas em canaviais propicia um aumento significativo dos cortes manual ou mecânico, a diminuição de matérias estranhas vegetais na matéria-prima para o processamento e a eliminação de animais peçonhentos ou insetos que possam atacar os trabalhadores.

## **2.2. Secagem: Conceitos e Fundamentos.**

Secagem corresponde à remoção total ou parcial de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, envolvendo simultaneamente a transferência de calor e massa. Além de ser uma operação unitária frequentemente utilizada. A secagem tem, em relação ao consumo de energia, um custo bastante elevado. Desta forma, vários trabalhos tem sido realizados no sentido de otimizar este processo (Silva, 1991).

A quantidade relativa de umidade de um corpo recebe a denominação de teor de umidade. O teor de umidade de um corpo pode ser definido de duas maneiras: teor de umidade em base úmida ( $M_{bu}$ ) e teor de umidade em base seca ( $M_{bs}$ ). O teor de umidade em base úmida ( $M_{bu}$ ) é a razão da massa de água contida no sólido por sua massa total, durante o processo de secagem,

$$M_{bu} = m_a / m \quad (2.1)$$

onde,  $m_a$  corresponde a massa de água contida no produto e  $m$  é a massa de água ( $m_a$ ) mais a massa seca ( $m_s$ ).

O teor de umidade em base seca  $M_{bs}$ , é a razão entre a massa de água contida no produto e sua massa seca.

$$M_{bs} = m_a / m_s \quad (2.2)$$

### **2.2.1. Curvas da secagem**

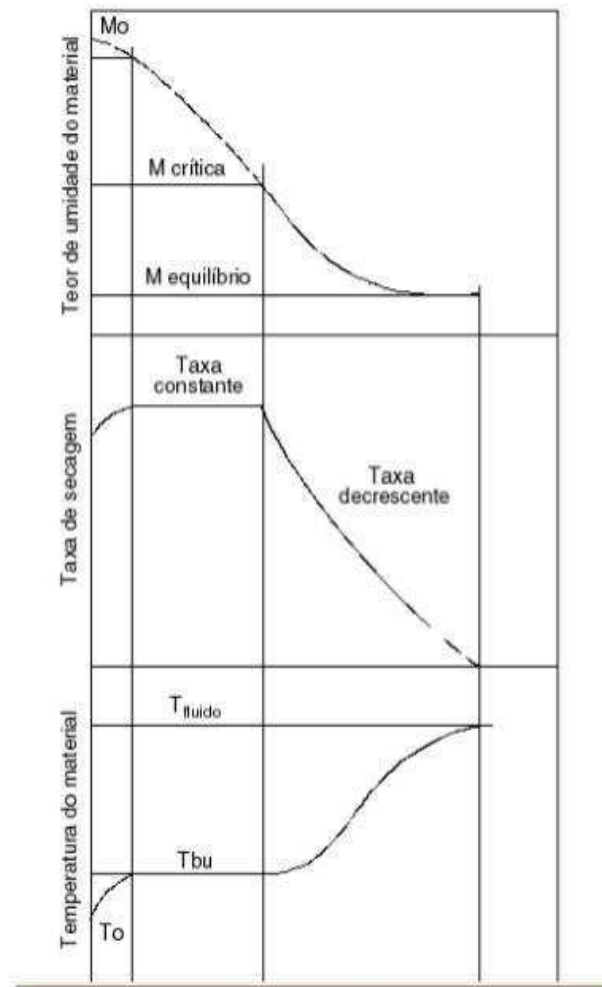
Durante o processo de secagem, os materiais sólidos podem possuir ou atingir diversos teores de umidade: teor de umidade inicial, teor de umidade crítico e o teor de umidade de equilíbrio estão esquematizados na Figura 2.2. Esta figura ilustra as curvas de redução de teor de umidade  $M$  do produto, evolução da temperatura  $T$  do produto e velocidade de secagem ( $dM/dt$ ), ao longo do tempo. A evolução das transferências

simultâneas de calor e massa no decorrer do processo de secagem, faz com que este seja dividido em 3 períodos.

Analisando os três períodos, tem-se:

- a) O período I representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto aumentando a pressão de vapor de água e a taxa de secagem. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa. Por ser um período de curta duração, sendo insignificante em relação ao período total de secagem, é chamado de período de acomodação (ALONSO, 2001; FARIAS 2002).
- b) No segundo período II, ainda há uma grande quantidade de água disponível no interior do produto. Este período caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A pressão de vapor de água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar, caracterizando que a transferência de massa e de calor se compensa e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Este período continua, enquanto houver quantidade de água suficiente no interior do produto migrando à superfície para acompanhar a perda de evaporação.
- c) O terceiro período caracteriza-se pela diminuição da água que migra no interior do produto à superfície, diminuindo, assim, a taxa de secagem. Isto quer dizer que a quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; neste caso a temperatura do produto tende a aumentar, aproximando-se da temperatura do ar de secagem. O fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, a taxa de secagem é nula e o processo é encerrado.

Figura 2. 2- Esquema da cinética de aquecimento de um sólido no processo de secagem.  
Fonte: Farias (2002).



### 2.2.2. Mecanismos de migração de umidade

Em Brooker *et al.* (1992) é possível ver que dentre os mecanismos físicos para descrever a transferência de umidade no interior dos sólidos, destacam-se:

- i) Movimento de líquido devido a gradiente de concentração de umidade (difusão líquida);
- ii) Movimento devido a pressão osmótica;
- iii) Movimento de vapor devido a gradientes de concentração e de temperatura (difusão de vapor);
- iv) Movimento de vapor devido a gradientes de temperaturas (difusão térmica);

- v) Movimentos de líquido devido à capilaridade;
- vi) Movimento de líquido devido à gravidade

Alonso (2001) e Park *et al.* (2007) reportam que os mecanismos mais importantes de migração de umidade são:

- i) Difusão líquida, devido à existência do gradiente de concentração;
- ii) Difusão de vapor, que ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor causado pelo gradiente de temperatura;
- iii) Escoamento de líquido e de vapor, que ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura.

Sobre o tratamento teórico da secagem no interior de sólidos, Steef e Singh (1980) defendem o transporte de umidade se dá como sendo uma combinação dos movimentos de umidade por difusão do líquido e de vapor. Brooker *et al.* (1992) consideram apenas os movimentos de difusão líquida. É possível ainda, constatar na literatura, os transportes por efusão, transporte de vapor por termo-difusão, transporte de líquidos por forças capilares, pressão osmótica, por gravidade e por difusão superficial (FORTES e OKOS, 1980; STRUMILLO e KUDRA, 1986; FARIAS, 2002; NASCIMENTO, 2002; BROOKER *et al.*, 1992; LIMA, 1995).

De acordo com Lima (1999), existem vários modelos e teorias que descrevem a perda de umidade no processo de secagem de um produto:

- Modelos empíricos e semi-empíricos;
- Modelos difusivos;
- Modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Os modelos empíricos e semi-empíricos, geralmente são utilizados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada delgada de partículas. Os modelos empíricos são baseados em uma correlação direta entre o teor de umidade e o tempo de secagem e os semi-empíricos são baseados na lei do resfriamento de Newton.

Os modelos difusivos são baseados na difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto. Nestes modelos, as taxas de transferência de calor e massa são descritas como

sendo uma função da posição e do tempo de secagem, considerando também as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna.

Nos modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis é assumida a existência de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto. A seguir são descritas algumas das diversas teorias de transferência de calor e massa em sólidos capilares porosos.

### **2.2.2.1 Teoria da difusão líquida**

Matematicamente, a teoria da difusão líquida baseia-se na Lei de Fick, onde é estabelecido que o fluxo de umidade no interior do sólido é gerado por um gradiente de concentração, ou seja:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m \nabla M) \quad (2.3)$$

onde,  $M$  corresponde ao teor de umidade,  $t$  o tempo e  $D_m$  é a difusividade de massa. O termo entre parêntesis define a taxa de difusão de água por unidade de área, ou seja, fluxo de água em relação a um determinado referencial (SILVA, 2007).

### **2.2.2.2. Teoria da capilaridade**

A capilaridade é a propriedade que possui o fluido de subir ou descer nas paredes de um tubo de pouco diâmetro. Quando um líquido entra em contato com uma superfície sólida, esse vai estar sujeito a duas forças: a força de adesão e força de coesão. A força de adesão é a atração entre as moléculas diferentes, ou seja, a força entre moléculas do líquido e as moléculas do tubo sólido. A força de coesão é a atração intermolecular entre moléculas semelhantes, atua no sentido de manter o líquido em sua forma original.

A tendência do líquido de subir pelo capilar é resultante da diferença de pressão gerada pela interface curva entre a fase líquida e a fase gasosa. Esta diferença de pressão ou potencial capilar é proporcional ao gradiente de concentração da umidade, em condições isotérmicas (FARIAS, 2002). Todavia, na secagem de sólidos particulados o



fluxo de água é determinado pelas forças capilares, independentes da concentração de água.

Matematicamente, o escoamento capilar é representado por:

$$j_x = -K \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.4)$$

onde,  $J_x$  corresponde ao fluxo capilar do líquido [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ];  $K$  a condutividade hidráulica [ $\text{m}/\text{s}$ ];  $\psi$  o potencial de capilaridade [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] e  $x$  a direção do fluxo de umidade.

### **2.2.2.3. Teoria da condensação-evaporação**

A teoria da condensação-evaporação considera que a migração de umidade ocorre apenas na fase vapor (FORTES e OKOS, 1980; FARIAS, 2002). As equações governantes dessa teoria são derivadas dos balanços de massa e energia. Para o balanço de massa, admite-se que o movimento é de vapor através do sólido e, para o balanço de energia, considera-se o fluxo de calor através da condução adicionado ao calor envolvido na adsorção e/ou absorção de umidade pelo produto.

### **2.2.2.4. Teoria de Luikov**

Segundo a literatura, Luikov foi o pioneiro, em 1934, a estudar o fenômeno de difusão térmica de umidade, estabelecendo que o gradiente de temperatura e o gradiente de pressão são também forças-motrizas para a transferência de umidade nos sólidos (FARIAS, 2002; CARNEIRO, 1995; SILVA 1991).

Para o desenvolvimento de sua teoria, Luikov utilizou os princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis. Nesta teoria todos os tipos de transferência são chamados de difusão e considera o aquecimento interno e a transferência de massa em um corpo poroso capilar. As equações que expressam estes mecanismos são similares à lei de Fick e induz que o transporte das moléculas de vapor de água, ar e líquido ocorrem simultaneamente (SILVA, 2010).

### **2.2.2.5. Teoria de Fortes e Okos**

De acordo com Fortes e Okos (1980), a diferença principal entre a sua teoria e as anteriores é que a força-motriz para a transferência isotérmica, tanto do líquido quanto do vapor, é um gradiente do teor de umidade de equilíbrio e não do teor de umidade. Esta força motriz para a transferência de líquido e vapor é o gradiente de potencial químico, que é função da temperatura, da umidade relativa e do teor de umidade de equilíbrio. Nesta teoria, não é considerado o fenômeno de encolhimento e pressão total (FARIAS, 2002; LIMA, 1999; OLIVEIRA, 2006).

### **2.3. Secagem do bagaço da cana-de-açúcar**

De acordo com a literatura, o pioneiro em estudos de secagem de bagaço de cana de açúcar foi o professor E. W. Kerr, em 1910 (CORRÊA, 2003). Isto se deve a crise energética ocorrida nesta década em virtude da diminuição da produção mundial de petróleo e consequente aumento do preço deste combustível fóssil, denominado “Primeiro (1973) e Segundo (1979) Choques do Petróleo”.

Como mencionado, a indústria sucroalcooleira é o grande setor responsável pela produção do resíduo sólido conhecido como bagaço de cana-de-açúcar no processamento de açúcar e do álcool. O bagaço é produzido durante o processo de extração do caldo que pode ser por moagem ou difusão. Dentre as vantagens da secagem do bagaço de cana-de-açúcar, pode-se destacar: aumento da temperatura das fornalhas, aumento do poder calorífico inferior (PCI), facilidade na estocagem, diminuição de emissão de cinzas para o meio ambiente, entre outras.

O teor de umidade do bagaço atualmente possui um limite máximo de 50 % (b.u.), o que permite seu uso posterior como combustível para a produção de energia, tanto na forma de vapor quanto, o excedente, na forma de eletricidade através de geradores localizados na própria unidade sucroalcooleira. Portanto, devido à grande possibilidade de utilização deste subproduto, ele deixou de ser visto como apenas um resíduo sólido.

Através do processo de secagem, o teor de umidade é diminuído para até 20-30% utilizando-se de um ciclone secador. Neste processo, a remoção de umidade ocorre com a evaporação através da transferência simultânea de calor e massa entre as fases

dispersa e gasosa. O calor é cedido à fase dispersa por meio de mecanismos de convecção, condução e radiação, através da fase gasosa (SOUZA, 2012).

A secagem do bagaço de cana facilita o transporte, armazenamento e conservação do mesmo, porém sua principal função é o aumento da eficiência energética em sua combustão. A equação abaixo mostra como o PCI varia com o teor de sacarose,  $s$ , e umidade,  $X'$  (CORRÊA, 2003).

$$PCI = 4,184(4250 - 7,5.s - 48,5X') \quad (2.5)$$

onde  $PCI$  é dado em  $kJ/kg$ ,  $s$  e  $X'$  em fração mássica.

Do ponto de vista de produção de vapor, sabe-se que a umidade contida no bagaço após a moagem, na faixa de 50%, limita a eficiência das caldeiras e requer grandes excessos de ar, o que propicia a perda de calor sensível através dos gases de chaminé.

Corrêa (2003) aponta um aumento de eficiência da caldeira com a secagem do bagaço, resultando em menor gasto das fontes energéticas disponíveis. Neste trabalho, o autor reporta o cultivo de cana-de-açúcar no sul da Turquia, onde se utiliza beterraba na fabricação do açúcar, devido à potencialidade energética da cana.

## 2.4. Tipos de secadores

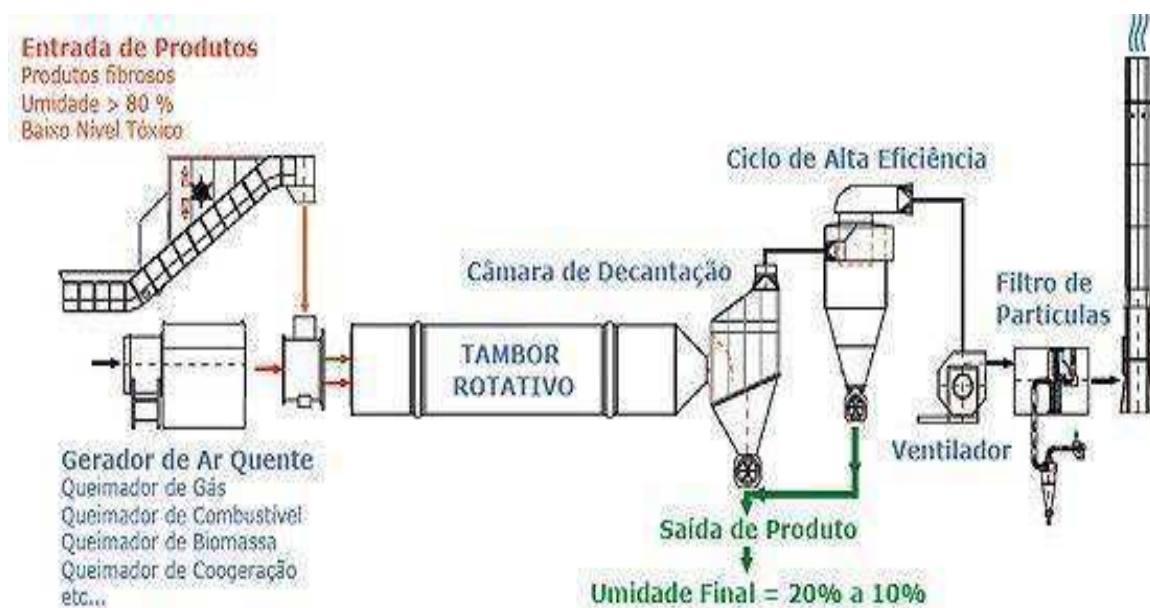
Existem diversos tipos de secadores que podem ser citados, tais como: secadores de bandeja, tipo coluna, de leito fluidizado, de correia, pneumático, atomizador (Spray-Dryer), ciclone, entre outros. Esses secadores, normalmente denominados de secadores convectivos, têm seu aproveitamento energético fortemente influenciado pela temperatura e pela velocidade do ar de secagem.

Os equipamentos de secagem do bagaço de cana-de-açúcar mais utilizados são os secadores rotativos e os pneumáticos (CORREA, 2003; NEBRA, 1985) esquematizados nas Figuras 2.3 e 2.4. Os secadores rotativos têm o seu funcionamento por meio de um tambor rotativo com um eixo horizontal; dentro deste, estão montadas várias pás que favorecem a troca térmica entre os gases quentes e o material a ser submetido à secagem. Vale destacar que para estes tipos de secadores, o produto a ser

seco deve ser particulado e resistente ao choque entre as partículas ou com as paredes destes secadores.

Nos secadores pneumáticos, o produto a ser desidratado é introduzido em um sistema de transporte por tubulações onde o próprio ar de secagem, à medida que transporta o produto, vai evaporando a água nele contido; o fluxo de ar é ajustado de maneira a classificar as partículas (os menores e mais leves, que secam mais rápido são transportadas pelo ar de secagem até a saída, enquanto as maiores e mais úmidas permanecem por mais tempo em suspensão). A descarga dos sólidos é feita através de uma saída do equipamento e o fluxo de ar, que ainda contém partículas sólidas, vai para um ciclone para a separação final. Como vantagem, estes secadores apresentam um tempo de permanência das partículas maior e com uma menor perda de carga.

Figura 2.3- Secador rotativo. Fonte: [www.lippel.com.br/secadoresrotativos.html](http://www.lippel.com.br/secadoresrotativos.html).



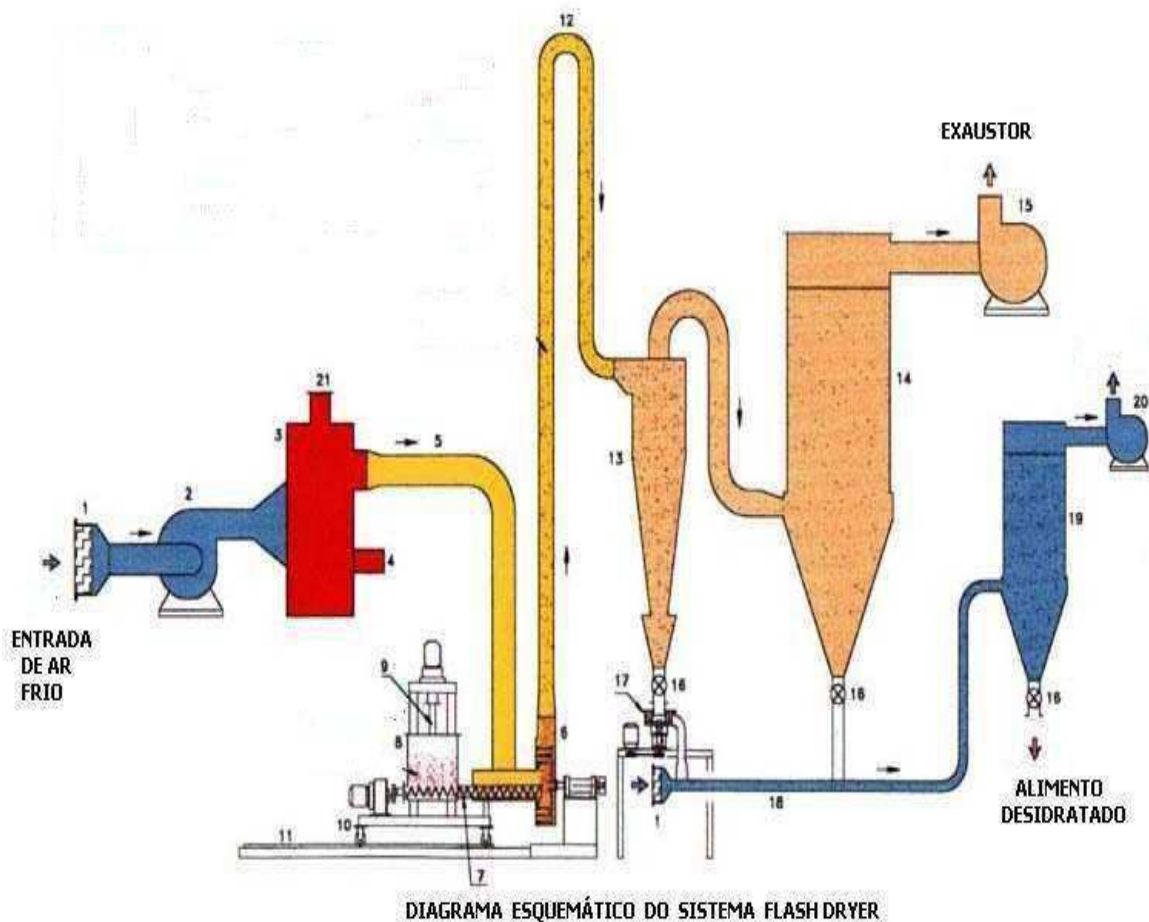
## 2.5 Ciclones

### 2.5.1. Princípios fundamentais

Os ciclones foram patenteados no final do século XVIII, mas a sua utilização industrial só ocorreu após a 2ª Guerra Mundial nas indústrias de extração e processamento de minérios. Desde então, são também utilizados de maneira

diversificada nas indústrias química, metalúrgica, têxtil, petroquímica, de alimento, de bioengenharia, dentre outras (SILVA, 1989).

Figura 2.4- Esquema de um secador pneumático. Fonte: [bragante.br.tripol.com/desidratação.html](http://bragante.br.tripol.com/desidratação.html), Desidratação dos alimentos (1: filtro de ar; 2: secador; 3: aquecimento indireto cogeração de ar quente; 4: bico de aquecimento; 5: condutor de ar aquecido; 6: moinho de desintegrador; 7: rosca de alimentação; 8: taque de produto; 10: transportador; 12: tubo condutor; 13: ciclone de separação e recuperação; 14: filtro; 16: válvula rotativa; 17: desintegrador secundário; 18: transportador pneumático tubular; 19: ciclone filtrante; 20: ventilador; 21: exaustão de gases).



O ciclone clássico consiste basicamente de uma seção cônica ligada a um corpo cilíndrico. O ciclone possui três orifícios, sendo, uma entrada e duas saídas. A entrada, ajustada para promover uma alimentação tangencial, constitui o duto de alimentação. As saídas são localizadas nos extremos. A saída superior é constituída de um duto cilíndrico axial (overflow) e a saída inferior está localizada no final da seção cônica (underflow).

O funcionamento do ciclone consiste em um conjunto de partículas carregada por uma corrente gasosa que entra de forma tangencial pela parte superior da seção cilíndrica. O campo de velocidade do gás dentro de um ciclone é constituído por linhas de fluxo em forma de espirais descendentes próximos à parede e ascendente no centro. A componente tangencial de velocidade é a dominante, cuja ordem de grandeza é igual a da velocidade do gás na entrada do equipamento; a componente vertical tem ordem de grandeza, aproximadamente 1/10 da tangencial e a componente radial, 1/100 da componente tangencial (CORREA, 2003).

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

Na Figura 2.5 percebe-se que as partículas estão submetidas às forças: de gravidade, de empuxo, de arraste, centrífuga, centrípeta, e tangencial. O peso pode chegar a ser 1000 vezes maior que a força de empuxo, tornando-a desprezível nas presentes considerações (CORREA, 2003; SOUZA, 2012).

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

Na região central deste equipamento, o fluxo de gás muda de uma espiral descendente para uma espiral ascendente pelo tubo central (duto de overflow) no qual os gases saem para a atmosfera. O fluxo das correntes que saem pelo tubo underflow e overflow, dependem: do diâmetro do duto de saída inferior underflow, queda de pressão do equipamento, e principalmente, do tipo de família do ciclone (SVAROVSKY, 2000; HSIEH E RAJAMANI, 1991).

Os ciclones possuem como característica principal a relação entre as suas medidas geométricas, associadas com o diâmetro do corpo cilíndrico. Esta proporcionalidade existente entre as dimensões geométricas é muito importante no processo de separação, pois está diretamente relacionada com a capacidade de separação destes equipamentos (CRUZ, 2008).

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

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

### **2.5.2. Secagem via ciclone**

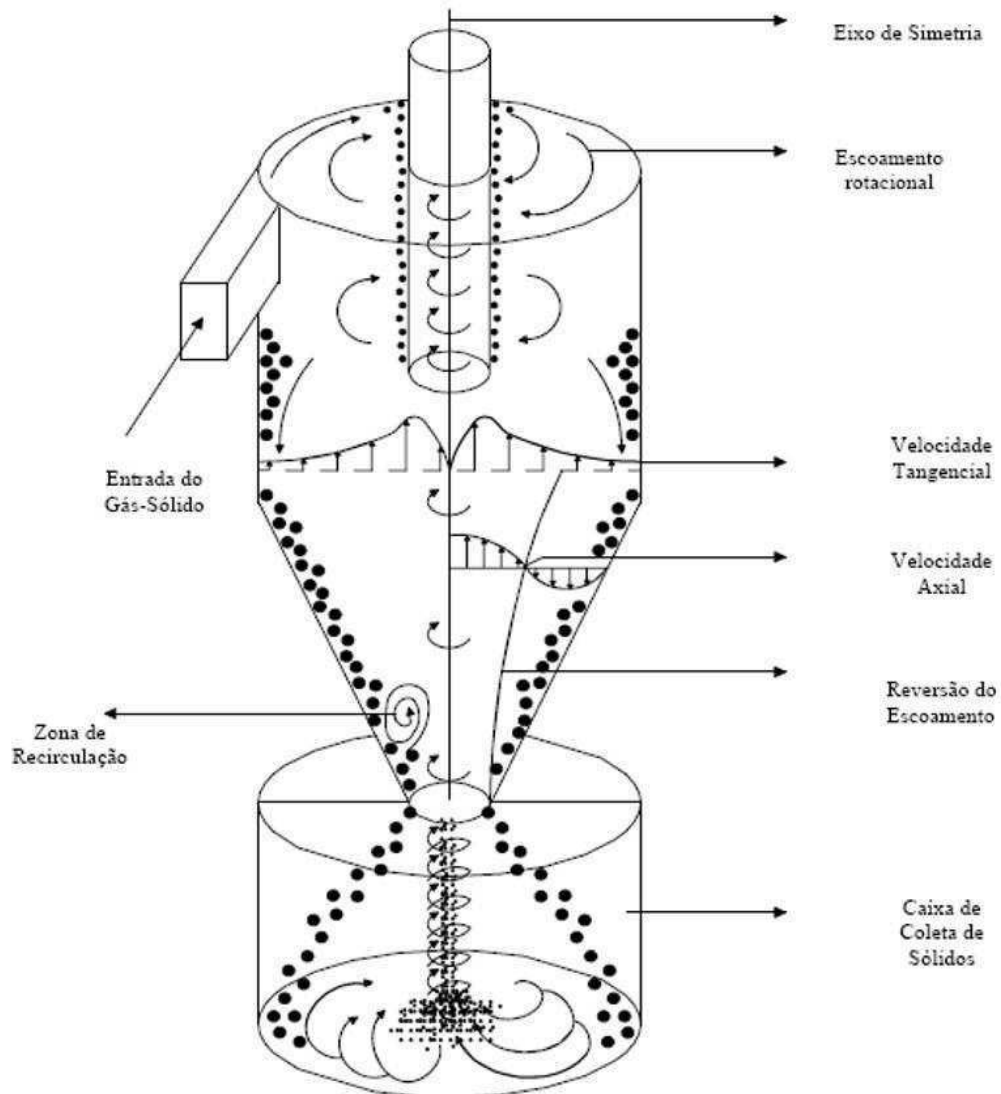
O trabalho de Nebra (1985) foi o pioneiro em nível de Brasil utilizando o ciclone para efetuar a secagem do bagaço de cana-de-açúcar. Nesse trabalho, foi desenvolvido um modelo teórico de secagem em um secador pneumático industrial acoplado a um ciclone, funcionando com mistura de tamanho e formas de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, a fim de avaliar as perdas de carga e de calor no interior do sistema.

Silva (1991) estudou experimentalmente a secagem de borra de café em um ciclone. Desenvolveu um modelo teórico para a secagem em ciclone constituído pelas equações de conservação de quantidade de movimento, de energia e de massa. Verificou que os resultados numéricos obtidos apresentaram concordância com os experimentais, inferindo que o modelo utilizado e este equipamento são eficientes para este tipo de partícula.

CreMASCO (1994) estudou experimentalmente o campo de velocidade do ar com e sem a presença de sólidos (microesferas de vidro e plástico), e o tempo de residência de sólidos em um reator ciclônico. O autor desenvolveu um modelo teórico que descreve os campos de velocidade das fases fluida e particulada e o tempo de residência, com base na equação de conservação da quantidade de movimento. O

modelo matemático proposto permitiu a obtenção dos perfis de velocidades tangencial muito próximos dos observados experimentalmente e os de velocidade axial se ajustando melhor na região de escoamento descendente.

Figura 2.5- Esquema do escoamento em um ciclone. Fonte: Corrêa (2003).



Gonçalves (1996) estudou a secagem de resíduo da indústria processadora de suco de laranja em um ciclone comparando o seu desempenho com o de um secador pneumático. Como conclusão, verificou que o ciclone é mais eficiente e menos oneroso que o secador pneumático na secagem do resíduo da laranja.

Dibb (1997) estudou a influência da geometria do ciclone e o comportamento fluidonâmico do escoamento gás-partículas no interior do ciclone, visando encontrar a melhor geometria do ciclone para ser usado como secador. Para esse estudo, o



parâmetro escolhido foi o tempo de residência das partículas, visto que, para a função de aquecedor ou secador, quanto maior o tempo de residência, maior será o nível de aquecimento ou secagem do produto no ciclone.

Corrêa *et al.* (2002) estudaram teórica e experimentalmente a secagem de bagaço de-cana-de-açúcar em um ciclone. Esses autores estudaram a influência da parte cônica do ciclone e mostraram que esta possui uma grande influência sobre o tempo de residência das partículas.

Corrêa (2003) estudou a secagem de bagaço-de-cana de açúcar em um ciclone, teórica e experimentalmente, variando a sua geometria, a fim de aumentar o tempo de residência das partículas. Ele construiu dois equipamentos que se diferenciavam na parte cônica. Como resultado, observou grande diferença do escoamento e do tempo de residência nos equipamentos. Nesse trabalho foram realizadas simulações do perfil de velocidade com o uso de técnicas de CFD utilizando o código computacional CFX 4.4.

Peres *et al.* (2004) estudaram numericamente o escoamento de um gás com particulados em um ciclone industrial utilizado como separador, com entrada em voluta. Esse estudo foi desenvolvido com técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) utilizando o código comercial CFX para a obtenção da solução das equações governantes empregando o esquema de interpolação de alta ordem. Como conclusão, verificou-se a forte e importante influência da fase particulada sobre o comportamento fluidodinâmico do escoamento gasoso.

Corrêa *et al.* (2004) estudaram a influência das dimensões de um ciclone secador sobre o tempo médio de residência de partículas. O estudo foi desenvolvido com técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando o código comercial CFX 4.4. Foi adotado o modelo Lagrangeano, onde as partículas foram tratadas individualmente, não havendo interações entre elas. Foi assumido o acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC com esquema de interpolação “upwind”.

Bernardo (2005) estudou o escoamento de gás (monofásico) e o escoamento gás-sólido (bifásico) em ciclone numa indústria de cimento, com diferentes entradas do duto de alimentação (entrada tangencial) com inclinações, para cima, de 300, 450 e 600 utilizando técnicas de CFD (software CFX), com a finalidade de avaliar os campos de

pressão e de velocidade e a eficiência dos ciclones. Neste trabalho, verificou-se uma queda de pressão ao se passar do sistema monofásico para o sistema bifásico, efeito este devido à presença da fase particulada no escoamento.

Farias (2006) estudou numericamente a secagem do bagaço de cana-de-açúcar utilizando um ciclone. Foi adotado o modelo de transporte de partícula Lagrangeano. Os resultados mostraram que a cinética de secagem apresentava um período de acomodação seguido de outro de secagem à taxa decrescente e que a secagem dependia da forma do duto de alimentação e do diâmetro de descarga das partículas.

Farias *et al.* (2006) estudaram a influência da seção de entrada do ciclone no processo de secagem do bagaço de cana-de-açúcar utilizando-se o programa computacional CFX-3D versão 4.4 para as simulações. Verificou-se que a cinética de secagem e a temperatura das partículas foram afetadas pela forma da entrada tangencial da entrada do ciclone. Nesse trabalho, desenvolveu-se três malhas representativas do ciclone que se diferenciavam em relação à geometria do duto de alimentação do equipamento (entrada retangular vertical, entrada retangular horizontal e entrada quadrada).

Ji *et al.* (2009) estudaram a eficiência de coleta em um ciclone separador em função da concentração de partículas (carbonato de cálcio) variando desde 5 mg/m<sup>3</sup> a 2000 mg/m<sup>3</sup> e da velocidade de admissão do gás, cuja variação foi de 10 a 25 m/s. Verificaram que, para uma velocidade do gás no duto de alimentação de 20 m/s, diâmetro da partícula igual a 5 µm e uma concentração de partículas igual a 1000 mg/m<sup>3</sup>, obteve-se uma eficiência de 96%. Nesse trabalho, os experimentos foram realizados sob pressão atmosférica e temperatura ambiente, com tamanho das partículas variando 0,6 a 40 µm. Observou-se também que as partículas com diâmetro igual ou superior a 10 µm, são removidas pelo separador ciclônico.

Oliveira (2010) estudou a influência do teor de umidade inicial do bagaço de cana-de-açúcar após a moagem, do armazenamento no pátio e após o processo de secagem em dois ciclones secadores. Analisou igualmente a influência da geometria do ciclone variando a altura, o ângulo da seção cônica e o diâmetro da saída inferior (underflow). Os resultados mostraram a independência do teor de umidade inicial do bagaço de cana-de-açúcar no processo final de secagem.

## 2.6. Escoamento multifásico

### 2.6.1. Fundamentos

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversos problemas de natureza física e de engenharia como, por exemplo, nas indústrias químicas, alimentícia, de petróleo, e em ciclones e hidrociclones. É necessário e importante o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que predigam o comportamento de processos multifásicos, sob condições peculiares, a fim de compreender os fenômenos envolvidos nestes processos e desenvolver melhores tecnologias.

Segundo Ranade (2002), fluxos multifásicos envolvem vários regimes e modelos de fluxo, que dependem das condições operacionais e da geometria do equipamento. É possível classificar estes modelos em dois grupos:

- a) Modelo pseudo-homogêneo: neste modelo, há um equilíbrio entre as fases (os fluidos e as partículas estão em equilíbrio de pressão, temperatura e turbulência e possuem a mesma velocidade). Com exceção da fração volumétrica, todas as quantidades transportadas são iguais para todas as fases, o que resulta na utilização de uma única equação de conservação de quantidade de movimento e na possibilidade de se considerar uma equação de conservação da massa para cada fase e, desta forma, avaliar as distribuições de fração volumétrica de cada fase. No entanto, este modelo só é válido quando as quantidades transportadas das diferentes fases atingem o equilíbrio em distâncias suficientemente curtas. Isto porque em situações nas quais a força de arraste (exercida pela fase contínua sobre a dispersa) é grande e não existem forças de campo (gravitacional), a taxa de transferência interfacial é grande (Paladino, 2005).
- b) Modelo não-homogêneo: para este modelo, é assumido que para cada fase, a pressão, a temperatura a velocidade e a turbulência são distintas, resultando na utilização de um sistema de equações de conservação para cada fase.

Ainda, de acordo com Ranade (2002), com relação ao modelo não-homogêneo, existem diversas aproximações matemáticas com o objetivo de descrever os processos que envolvem escoamentos multifásicos, dos quais três destes modelos merecem destaque:

- **Modelo Lagrangeano:** neste modelo, considera-se que o fluxo total da fase particulada é modelado pelo traçado de um número pequeno de partículas através da fase contínua e as partículas são tratadas como se fossem arrastadas individualmente pelo gás. Este procedimento é aplicável à análise de fluxo em regime estacionário. Nesta abordagem, as equações da fase contínua são escritas com modificações para permitir a interação entre as duas fases. Isto é feito através da adição de termos fontes que descreve o efeito da fase dispersa na fase contínua. Este termo descreve a transferência de momento entre as duas fases devido às forças de arraste e da gravidade sobre a partícula.
- **Modelo Euleriano:** nesta abordagem, é assumido que as fases contínua e dispersa estão continuamente interpenetradas, o que resulta na completa resolução das equações de Navier-Stokes para as duas fases. A interpenetração das fases está relacionada ao fato de que em um volume de controle pode coexistir duas ou mais fases e a quantidade relativa presente de cada fase é dada pelo valor da fração volumétrica neste volume de controle. Ainda neste modelo, os termos de transferência (massa, calor, momento e energia) podem ser modelados usando o modelo Lagrangeano.
- **Modelo Euleriano-Lagrangeano:** nesta aproximação, o transporte de partículas da fase dispersa é realizado pela fase contínua e as equações de Navier-Stokes são resolvidas para a fase contínua. O acoplamento entre o movimento da fase contínua e da fase dispersa e a determinação do movimento da partícula, são obtidos pelo transporte de partículas, via lei de arraste.

## **2.7. Fluidodinâmica computacional**

Define-se fluido como uma substância capaz de escoar quando sujeito a uma força externa. O conceito de fluidodinâmica está ligado ao estudo dos fluidos em movimento sujeito a diversos tipos de forças. Como exemplo, tem-se os escoamentos externos situados ao redor de superfícies e os escoamentos internos presentes em tubulações.

Em se tratando de escoamentos multifásicos, é na interface entre as fases contínuas, ou entre uma fase contínua e outra dispersa que ocorrem as transferências de massa, energia e quantidade de movimento. A modelagem matemática destes processos

se torna algo complexo e a solução analítica quase impossível devido às não-linearidades das equações diferenciais parciais que governam tais escoamentos. Para sua solução se utilizam de métodos numéricos computacionais capazes de encontrar respostas aproximadas

A Fluidodinâmica Computacional (ou CFD – *Computational Fluid Dynamics*) trata-se de uma poderosa ferramenta na análise de problemas em sistemas que envolvem desde fluidos em escoamentos: como a análise de turbulência e aerodinâmica em geometrias diversas; bem como transferência de calor: difusão, convecção e radiação em superfícies; além de outros fenômenos associados com reações químicas, como por exemplo, a combustão interna em motores do ciclo Diesel e Otto. As técnicas de CFD baseiam-se no entendimento do comportamento físico do escoamento de fluidos em um volume de controle através de simulação computacional, que discretiza as equações parciais que descrevem o escoamento (equações de conservação da energia, massa e quantidade de movimento) utilizando uma geometria virtual ou malha computacional (FORTUNA, 2000; TAVARES, 2012)

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

- a) Pré-processamento compreende-se da definição da geometria ou domínio de estudo que se pretende trabalhar; da geração da malha dividindo o domínio em pequenos subdomínios responsáveis por receber os cálculos referente às soluções das equações de conservação pelos métodos numéricos; e da definição das propriedades do domínio de estudo (densidade, viscosidade, vazão volumétrica de cada fase, etc.), bem como as condições iniciais e de contorno do escoamento;
- b) Solver: nesta etapa as técnicas numéricas de solução são implementadas para resolver os problemas físicos do caso em estudo. Ocorre a transformação do sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas que será resolvido por métodos numéricos, podendo ser diretos (Eliminação de Gauss e Decomposição LU) ou iterativos (Método de Gauss Seidel, Método de Jacobi e Método das Sobre-Relaxações Sucessivas).

- c) Pós-processamento: aqui os dados encontrados através da etapa anterior são organizados e trabalhados através de gráficos, imagens, etc., para uma melhor interpretação dos resultados.

Existem vários *softwares* comerciais que utilizam a técnica de CFD, tais como: FLUENT, CFX, PHOENICS, etc.

O pacote computacional Ansys CFX<sup>®</sup> é um aplicativo bastante utilizado em análises de problemas diversos pertencente ao ramo da fluidodinâmica. Possui vários recursos de trabalho: o módulo ICEM CFD onde pode-se criar a geometria do problema que se deseja trabalhar e a definição de sua malha, que será o domínio de estudo; o módulo CFX, subdividido em dois submódulos (CFX-Pre e CFX-Solver) responsáveis pelas etapas de entrada de dados e processamento, e por último o módulo CFD Post onde se faz a interpretação e análise dos resultados. Na Figura 2.6, mostra-se as etapas diretas para uma simulação computacional com o Ansys CFX. A sua linguagem de programação baseia-se em FORTRAN e trabalha diretamente com a resolução de equações de conservação sobre a região de interesse (TAVARES, 2012).

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos. Os pontos são considerados onde essas linhas se interceptam e servem de orientação para o cálculo de propriedades físicas baseado num modelo matemático. Uma malha computacional nada mais é que uma representação ou a “discretização” do plano físico utilizado na simulação numérica (DEL FRARI, 2009).

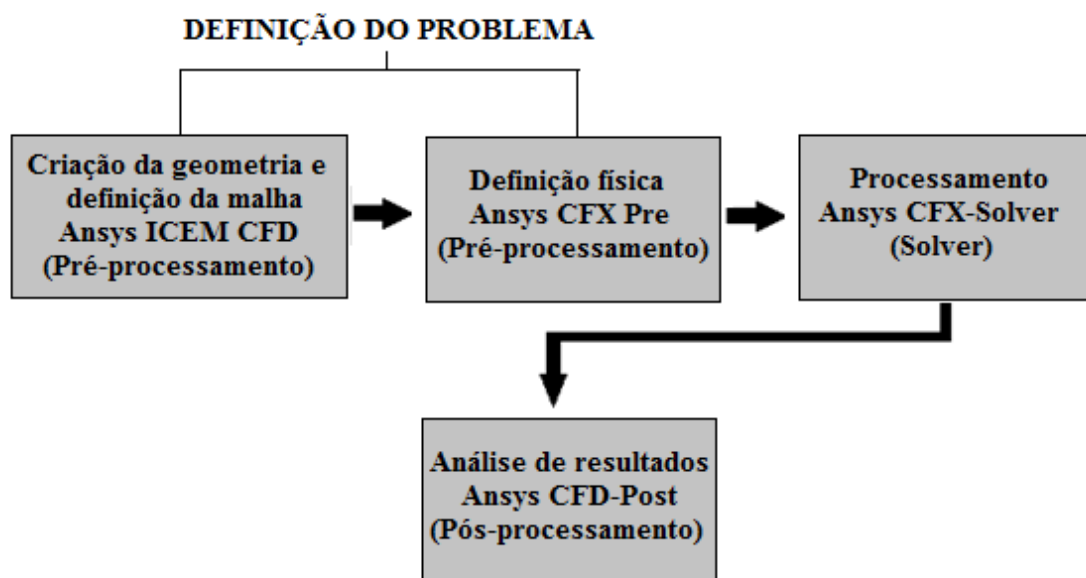
Segundo Maliska (2004), os métodos para geração de malha são divididos em dois:

- a) Manual: desenha-se a geometria que se deseja discretizar numa folha de papel milimetrado, identificando as coordenadas de cada ponto formado pelas intersecções das linhas que representam a região da geometria. Essas coordenadas são informadas ao computador que automaticamente são lidas formando a malha computacional da geometria;
- b) Automáticos: são dois, os algébricos que empregam diferentes tipos de interpolação e são bastante versáteis e rápidos, e os diferenciais, assim chamados por empregarem equações diferenciais, são mais gerais, mas, em contrapartida,

apresentam tempo de computação sensivelmente maior e uma maior elaboração matemática.

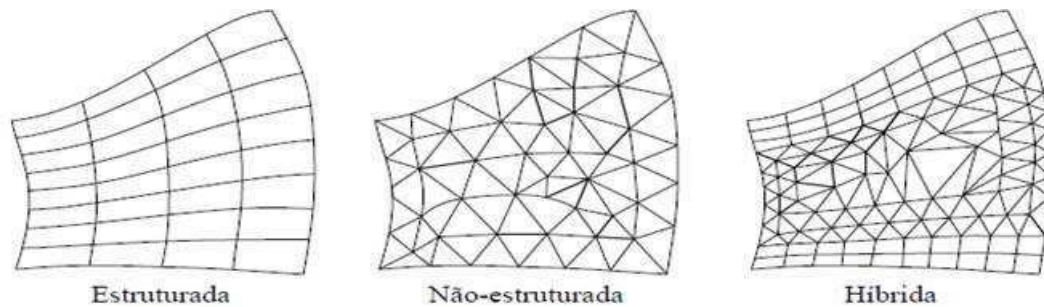
Bortoli (2000) classifica as malhas computacionais, Figura 2.7, em dois tipos: malhas estruturadas, onde cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma sequência natural, e a malha não-estruturada, quando tem-se o número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação. Existe ainda outro tipo de classificação, as malhas híbridas, que consiste na utilização simultânea de malhas estruturadas e não-estruturadas.

Figura 2. 6- Etapas diretas da simulação computacional utilizando o Ansys CFX.



Com relação às malhas estruturais, essas apresentam uma simples implementação requerendo menor capacidade de armazenamento, mais importante ainda é que nesse tipo de malha são geradas menos células do que em uma malha não-estruturada, entretanto, apresentam como desvantagem a flexibilidade em se ajustar em geometrias menos complexas. Malhas não-estruturadas se ajustam com grande facilidade a geometrias complexas, mas demanda uma capacidade de armazenamento em maior.

Figura 2. 7- Tipos de malhas computacionais. Fonte: Adaptado de Santos (2010).



A precisão da solução em um problema de CFD depende fortemente do número de elementos presentes na malha e como estes estão distribuídos. Em geral, a precisão da solução melhora com o aumento do número de elementos da malha, até que um certo limite seja atingido. Contudo, é necessário balancear a precisão da solução, através do refinamento da malha, com o custo computacional. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise, sendo assim a geração da malha tem se tornado a etapa mais importante e que demanda mais tempo na análise em CFD (SANTOS, 2010).



# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Descrição do problema

O fenômeno estudado no presente trabalho corresponde à secagem do bagaço de cana-de-açúcar em um ciclone. Este ciclone equivale ao equipamento modificado utilizado por Corrêa (2003), ilustrado na Figura 3.1, também usado para secar o bagaço de cana de açúcar. A mistura ar quente mais partículas de bagaço de cana-de-açúcar úmido alimenta o ciclone secador através de um duto retangular.

Vale ressaltar que tanto Corrêa (2003), como Farias (2006) e Souza (2012), estudaram a secagem de sólidos em um ciclone considerando um sistema multifásico, sendo a fase contínua o ar e a fase dispersa as partículas de bagaço de cana-de-açúcar. Em Souza (2012), além de se levar em consideração os sistemas bifásicos mencionados, foi considerado o sistema multicomponente: mistura da fase contínua, ar mais vapor de água [(ar + (H<sub>2</sub>O)<sub>v</sub>] e a mistura binária da fase dispersa, sólido mais água [partículas + (H<sub>2</sub>O)<sub>L</sub>]. A Figura 3.1 representa o ciclone e suas dimensões utilizado no presente trabalho.

### 3.2. Malha numérica

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. De posse da geometria é definida a estratégia de blocagem (Figura 3.2), que assegura o refinamento ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do ciclone e em regiões onde os gradientes de velocidade, pressão e/ou temperatura forem importantes. Foram utilizadas várias blocagens até se chegar àquela que foi utilizada nas simulações.

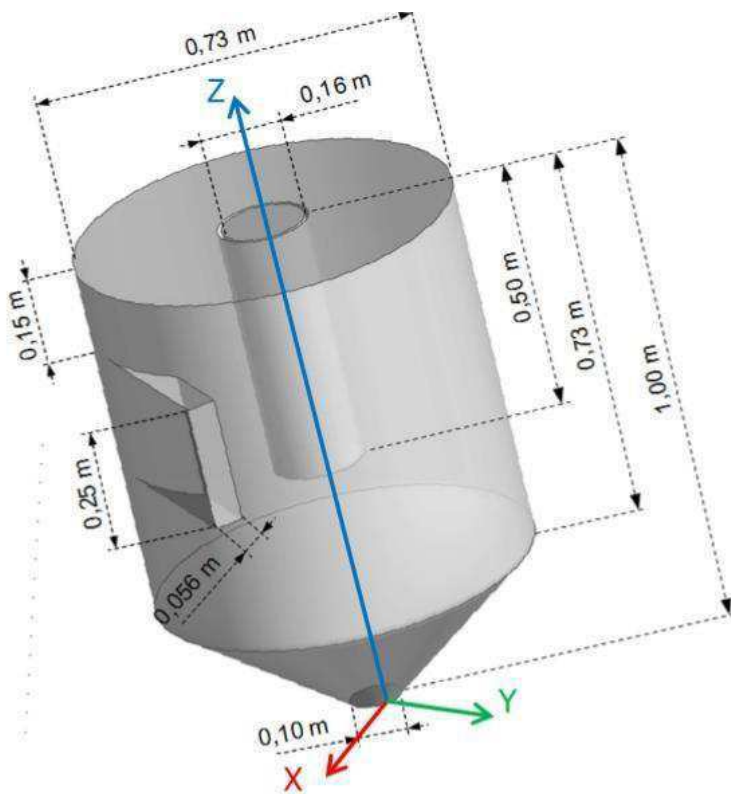


Figura 3.1 - Modelo geométrico do ciclone usado no presente trabalho baseado nos trabalhos de Corrêa (2003), Farias (2006) e Souza (2012).

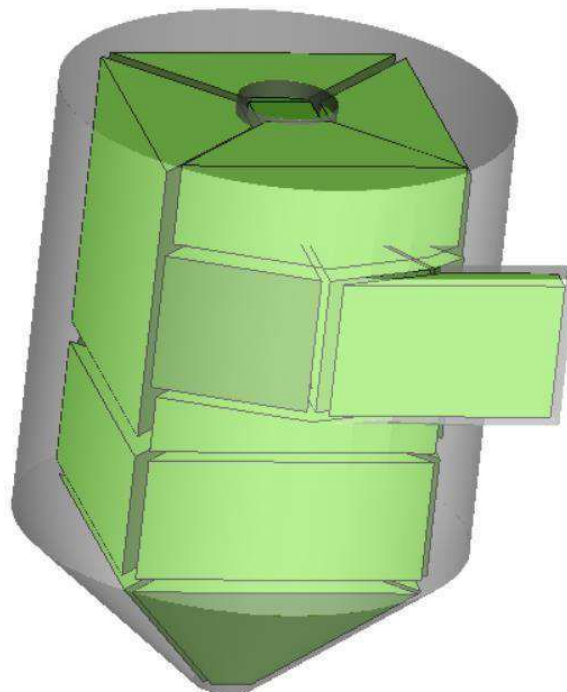


Figura 3.2 - Modelo de blocagem do ciclone usado no presente trabalho.

Na Figura 3.3 está representada a malha numérica utilizada nas simulações. Informações adicionais sobre a malha numérica encontram-se no capítulo 4.

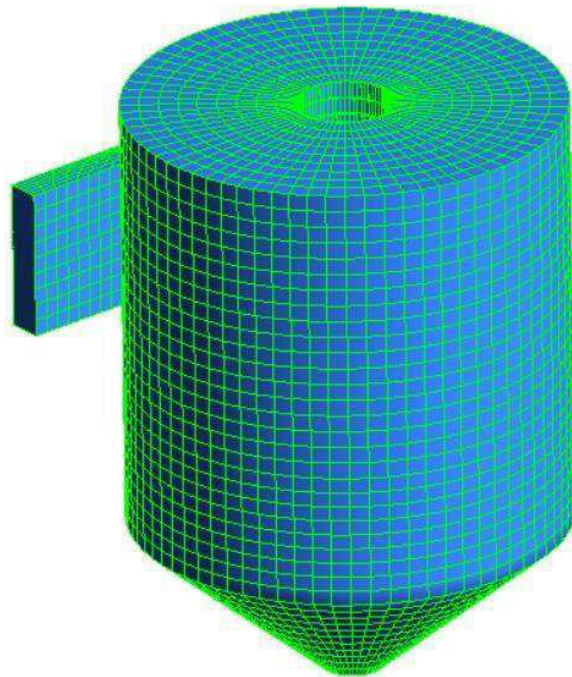


Figura 3.3 - Representação da malha numérica do ciclone utilizada no presente trabalho.

### **3.3. O modelo matemático**

#### **3.3.1 Equações da fase gasosa**

O modelo matemático usado para descrever o escoamento de partículas corresponde ao modelo multifásico Euleriano-Lagrangiano. Nesta abordagem o monitoramento das partículas é realizado por meio de um conjunto de equações diferenciais ordinárias no tempo. Estas equações são então 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 conservação de massa, momento linear, energia e matéria.

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

- i) regime permanente;

- ii) não há reação química;
- iii) foi considerado o efeito da gravidade;
- iv) não é considerado as forças de não arraste;
- v) as propriedades físico-químicas são constantes.

Com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear (Equação 3.1 e 3.2) reduzem-se a:

**a) Equação da continuidade**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

onde,  $\rho$  é a densidade da fase contínua e  $\vec{u}$  é o vetor velocidade.

**b) Equação de momento linear**

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3.2)$$

onde,  $S_M$  é o termo fonte, que incorpora as forças de corpo e de rotação;  $P$  é a pressão e  $\tau$  representa o tensor cisalhamento dado por:

$$\tau = \mu_{ef} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3.3)$$

onde,  $\delta$  é a função Delta de Kronecker e  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva.

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_T \quad (3.4)$$

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

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

onde,  $C_\mu$  é uma constante empírica e igual a 0,09,  $k$  a energia cinética turbulenta e  $\varepsilon$  a dissipação de energia cinética turbulenta. Esses últimos parâmetro são dados pelo modelo de turbulência utilizado.

### c) Modelo de turbulência

O modelo RNG (*Renormalized group Theory*) foi recentemente proposto como uma outra variação do modelo  $k - \varepsilon$ , denominada RNG  $k - \varepsilon$ . Mostrando-se adequado à previsão de escoamentos em regiões internas de camadas limite (baixo número de Reynolds) sem a inclusão de termos de correção, o modelo RNG  $k - \varepsilon$  oferece um pouco de melhoria 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 as mesmas do modelo  $k - \varepsilon$  padrão, mas as constantes do modelo são diferentes. A equação para a dissipação turbulenta é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1 RNG} P_{db}) \quad (3.6)$$

onde:

$$C_{\varepsilon 1 RNG} = 1,42 - \frac{\eta \left( 1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{\left( 1 + \eta^3 \beta^{RNG} \right)} \quad (3.7)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_K}{\rho \varepsilon C_{\mu RNG}}} \quad (3.8)$$

### d) Equação de energia

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda T) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \vec{\tau}) \quad (3.9)$$

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

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{u}^2 \quad (3.10)$$

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

### e) Equação de transferência de massa

$$\nabla \cdot [\rho(\vec{u}Y_A - D_A(\nabla Y_A))] = 0 \quad (3.11)$$

onde,  $Y_A$  corresponde a fração mássica do componente A e  $D_A$  corresponde a difusividade cinemática.

### 3.3.2. Equações de transporte da fase particulada

A equação que representa a equivalência ou interação entre a fase gasosa e a fase particulada é dada pela 2ª lei de Newton, ou seja,

$$\vec{F} = m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (3.12)$$

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

$$\vec{F} = \vec{F}_D = \frac{1}{8} \pi d_p^2 \hat{j}_s \rho C_D |\vec{v}_r| \vec{v}_r \quad (3.13)$$

onde  $d_p$  é o diâmetro da partícula;  $\vec{v}_r$  a velocidade relativa partícula-gás;  $\hat{j}_s$  é um fator de área de seção transversal dado pela Equação 3.21 e  $C_D$  o coeficiente de arraste definido pela correlação semi-empírica de Ishii/Zuber:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} + (1 + 0,1 \text{Re}_p^{0,75}) \quad (3.14)$$

Válida para  $0,2 \leq Re_p \leq 1000$ , sendo o número de Reynolds da partícula definido por:

$$Re = \frac{\rho |\vec{v}_r| d_p}{\mu} \quad (3.15)$$

onde,  $\rho$  é a densidade da fase gasosa;  $\mu$  a viscosidade da fase gasosa  $\vec{v}_r$  o vetor e velocidade relativa

A correlação de Ishii/Zuber é aplicada a partículas esféricas, sendo necessário adotar um procedimento de correção da partícula esférica para não esférica, 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:

$$\hat{f}_s = \frac{A_{ne}}{A_e} \quad (3.16)$$

$$\hat{f}_t = \frac{S_e}{S_{ne}} \quad (3.17)$$

onde,  $A_{ne}$  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 a partícula-ar de secagem é expressa empregando 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:

$$Q_c = \mu d_p \lambda Nu (T_G - T_p) \quad (3.18)$$

onde,  $T_p$  é a temperatura da partícula;  $\lambda$  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:

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda} \quad (3.19)$$

onde,  $h_c$  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,  $Re_p$ , dado pela correlação de Ranz e Marshall, citado no manual do CFX 15.0 (2015), como segue:

$$Nu = 2 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.20)$$

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

$$Pr = \frac{C_{pg} \mu}{\lambda} \quad (3.21)$$

- **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 dada por:

$$Q_m = \sum \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (3.22)$$

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

$$h_{fg} = h_{fg0} + \int_{T_{hfg0}}^T (C_p - C_g) dT \quad (3.23)$$

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



Neste modelo, é suposto que a umidade e a temperatura têm 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 3.24) de transferência de massa ou calor menor que 0,1, para transferência de calor, onde 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:

$$Bi = \frac{h_c L_c}{k_b} \quad (3.24)$$

onde,  $h_c$  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:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho D Sh \frac{PM_v}{PM_g} \log \left( \frac{1 - X_e}{1 - X_g} \right) \quad (3.25)$$

onde,  $D$  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:

$$Sh = \frac{K_m L_c}{D_{ag}} \quad (3.30)$$

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

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

$$Sh = 2 + 0,6Re_p^{1/2} Sc_p^{1/3} \quad (3.31)$$

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

$$Sc_c = \frac{\mu}{\rho D_{ag}} \quad (3.32)$$

onde,  $\mu$  é viscosidade dinâmica e  $\rho$  a densidade, ambas da fase fluida.

A (Equação 3.25) é aplicada quando a temperatura da partícula está abaixo do ponto de bolha, caso contrário emprega-se a seguinte equação:

$$\frac{dm_p}{dt} = - \frac{Q_c}{Q_m} \quad (3.33)$$

onde,  $dm_p/dt$  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 a vaporização.

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

$$P_{vapor} = P_{ref} e^{\text{XP} \left( A - \frac{B}{C + T} \right)} \quad (3.34)$$

onde, 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:

$$u_x = u_y = u_z = 0 \quad (3.35)$$

$$Q = 0 \quad (3.36)$$

### 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:

$$P = P_{atm} \quad (3.37)$$

$$\frac{dT}{dy} = 0 \quad (3.38)$$

### c) Seção de entrada

Foi adotada uma condição prescrita de velocidade, temperatura e fração de água no ar quente, bem como o fluxo mássico de partículas conforme ilustra a Tabela 3.2

#### 3.3.3.1. Parâmetros termofísicos

Na Tabela 3.1 estão os valores das propriedades que não foram alteradas durante as simulações. Estas propriedades foram definidas de acordo com os materiais utilizados no processo de secagem, que foram o ar a 25°C e partícula de bagaço de cana-de-açúcar. Durante as simulações assumiu-se que a partícula de bagaço de cana-de-açúcar era totalmente constituída de água com o objetivo de simplificar o modelo de secagem adotado.

Tabela 3. 1- Dados físico-químicos utilizados nas simulações do processo de secagem.

Propriedades físico-químicas	Fluido: ar (25°C).	Partícula (bagaço de cana-de-açúcar)
Densidade (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 ( $f_t$ )	-	2.78

Fator de área de seção transversal ( $f_s$ )	-	3.89
--	---	------

### 3.4 Casos simulados

Na Tabela 3.2 são apresentados os valores de cada propriedade escolhida para variar durante o processo. Os casos 1, 2 e 3 possuem, no início das simulações, todos os valores das variáveis definidas, como apresentado na Tabela 3.2. O restante dos casos de 4 a 9 terão os valores definidos durante a realização das simulações, de acordo com os resultados apresentados e de interesse. Por exemplo, a velocidade escolhida para simular os casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9 será a que melhor apresentar os resultados nos casos 1, 2 e 3. A temperatura do gás de entrada escolhida para simular os casos 6, 7, 8 e 9, será a que apresentar os melhores resultados entre os casos de 1 a 5. E, por fim, o fluxo mássico de partículas escolhido para os casos 8 e 9, foram escolhidos com base nos resultados dos casos de 3 a 7.

Tabela 3.2- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.

Caso	Velocidade do gás de entrada - $u_g$ (m/s)	Temperatura do gás de entrada - $T_G$ (°C)	Fluxo mássico de partículas - $\dot{m}_p$ (g/s)	Fração de água no ar - $f_{H_2O}$
1	15,0	216	6,55	0,00
2	12,5	216	6,55	0,00
3	10,0	216	6,55	0,00
4	(-)	277	6,55	0,00
5	(-)	150	6,55	0,00
6	(-)	(-)	13,1	0,00
7	(-)	(-)	19,65	0,00
8	(-)	(-)	(-)	0,01
9	(-)	(-)	(-)	0,02

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. A malha numérica

Os resultados numéricos foram gerados com auxílio de uma malha estruturada baseada nas dimensões do ciclone secador usado por Corrêa (2003) (Figura 3.1). A presente malha é constituída por 402.700 elementos hexaédricos, resultante de vários refinamentos visando proporcionar resultados numéricos que independam da malha. Na Figura 4.1 estão representadas a malha e detalhes da seção de entrada e saídas superior e inferior do ciclone. Observa-se nesta figura uma distribuição uniforme dos elementos para uma melhor captura do comportamento das fases no interior do ciclone.

### 4.2. Análise termofluidodinâmica do escoamento no ciclone

Com o objetivo avaliar o comportamento das propriedades no ciclone relacionadas ao escoamento e a transferência de calor e massa. Foram definidos 9 casos para a realização das simulações. As variáveis escolhidas para serem alteradas durante a realização das simulações foram:

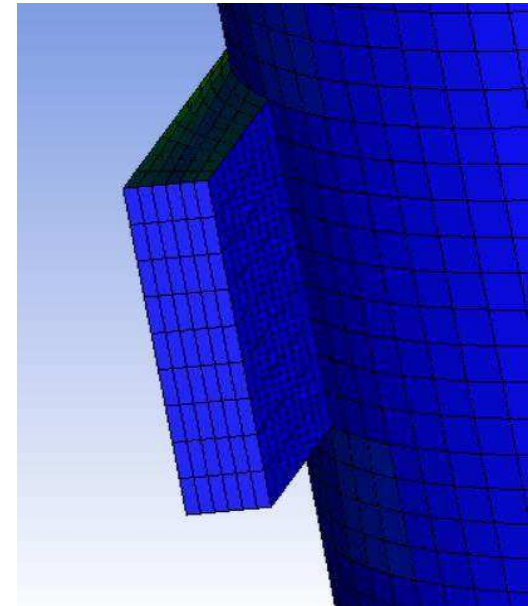
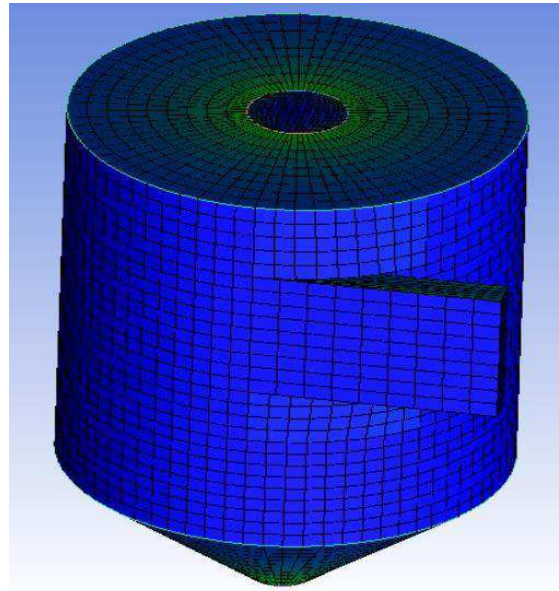
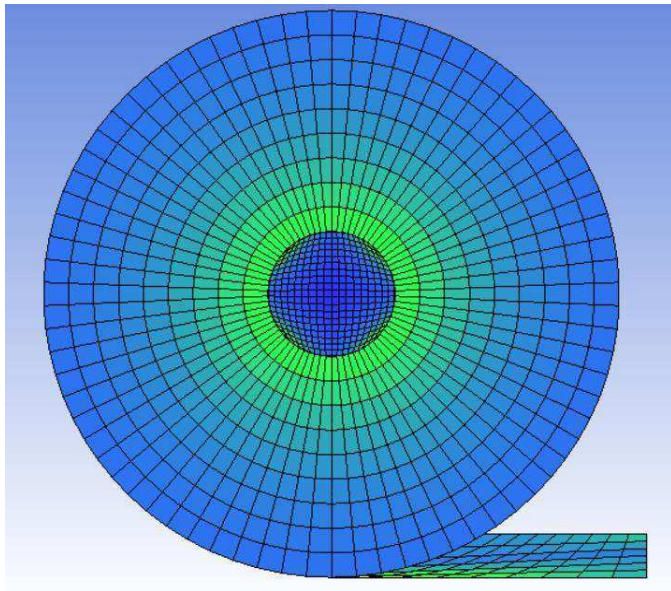
- a) Velocidade de entrada do gás;
- b) Temperatura de entrada do gás;
- c) Fluxo mássico de partículas;
- d) Fração mássica de água na corrente da gasosa.

Dentre os critérios de escolha dos melhores casos estão a presença de uma maior troca térmica, evaporação de água da partícula, diminuição do diâmetro médio da partícula e um maior tempo de permanência das partículas no ciclone, o que proporciona uma maior ocorrência de evaporação da água presente na partícula, e conseqüentemente uma maior fração de água liberada através da corrente gasosa.

#### 4.2.1. Efeito da velocidade de entrada do gás de secagem

Nesta seção a variável a ser analisada é a velocidade de entrada do gás de secagem, para os seguintes casos: 15 m/s (caso 1), 12,5 m/s (caso 2) e 10,0 m/s (caso 3).

Figura 4. 1- (a) Detalhe da parte superior do ciclone; (b) Representação da malha do ciclone secador; (c) Detalhe da seção de entrada do ciclone.



Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de cada parâmetro para estes casos simulados.

Tabela 4.1- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.

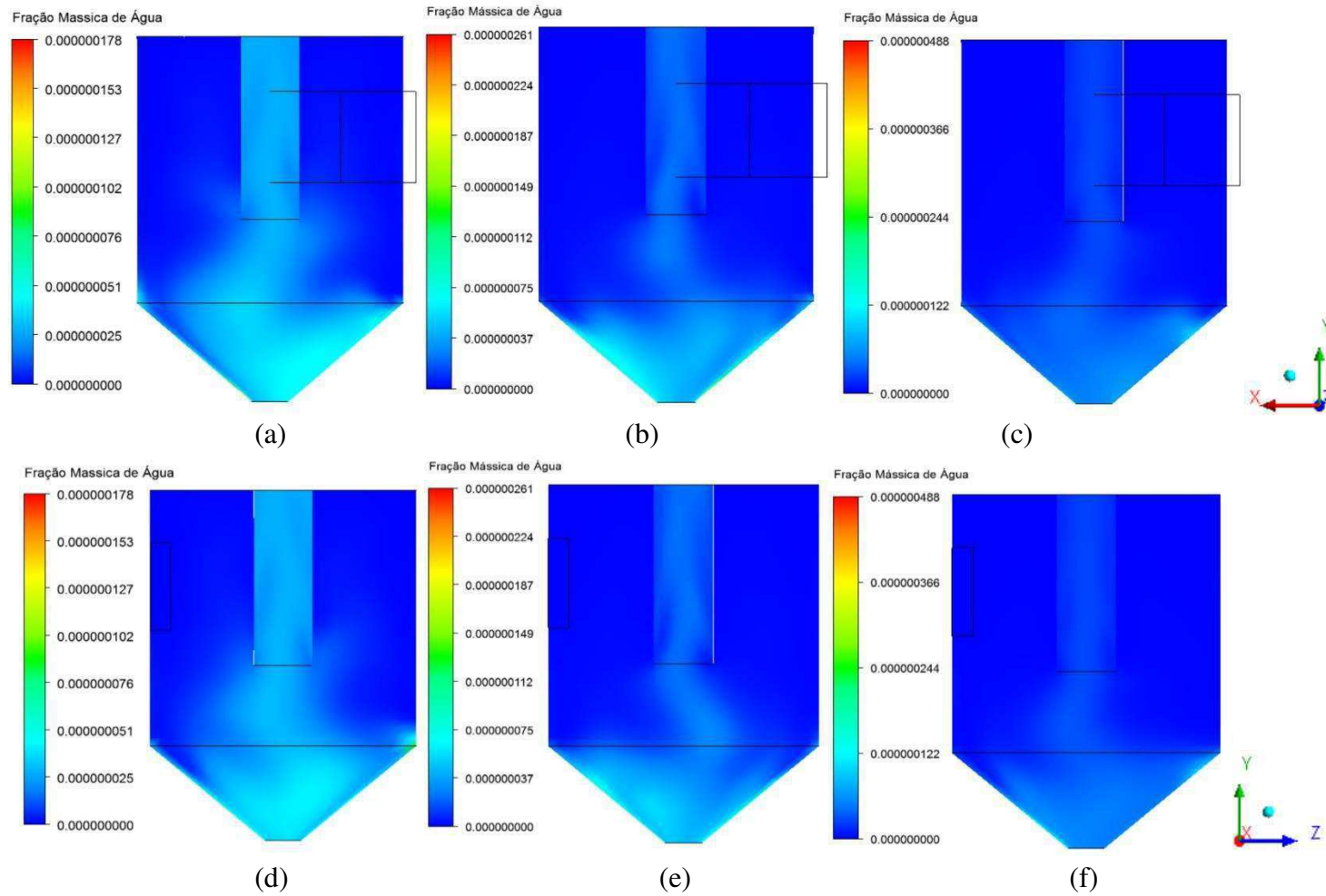
Caso	Velocidade do gás de entrada - $u_g$ (m/s)	Temperatura do gás de entrada - $T_G$ (°C)	Fluxo mássico de partículas - $\dot{m}_p$ (g/s)	Fração de água no ar - $f_{H_2O}$
1	15,0	216	6,55	0,00
2	12,5	216	6,55	0,00
3	10,0	216	6,55	0,00

A Figura 4.2 apresenta o gradiente de fração mássica de água nos planos longitudinais YX e YZ. A fração mássica presente no tubo central é composta de vapor de água que se desprende da partícula durante o seu movimento circular no interior do ciclone para o caso 1, 2 e 3. É possível perceber, observando na Figura 4.2 que o tubo central de saída do ciclone (overflow) para o caso 1 apresenta uma maior gradiente de concentração de vapor de água que para os casos 2 e 3. O gradiente de concentração de água no caso 2 é maior que para o caso 3, sendo também nítida a diferença do caso 2 para o caso 3, uma vez que este último caso foi o que menos liberou vapor de água.

Analisando a Fig. 4.2, é possível perceber, ainda, que a região cônica do ciclone, que constitui a região em que a partícula permanece por maior tempo no interior do ciclone, possui um gradiente de fração mássica proporcional ao gradiente de fração mássica na região do tubo central do ciclone para os casos analisados.

Conclui-se que quanto maior a velocidade de entrada das partículas, maior é a liberação de água para o estado gasoso. Uma das possíveis causas para este fenômeno é o fato de que uma maior velocidade proporciona um maior número de voltas da partícula no interior do ciclone, o que resulta numa melhor troca térmica com o gás de secagem.

Figura 4. 2- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para diferentes velocidades de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2); (c, f) 10,0 m/s (Caso 3).





A Figura 4.3 ilustra a velocidade do gás em termos de linhas de fluxo do gás desde a entrada no ciclone através da mesma posição para os casos 1, 2 e 3 analisados. Estes resultados indicam a presença de um comportamento helicoidal decrescente do gás 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 no interior do equipamento também observado por Corrêa (2003) e Farias (2006) utilizando as mesmas dimensões do ciclone utilizada neste trabalho. Observa-se claramente que o comportamento fluidodinâmico é diretamente afetado pela forma como o fluido entra no ciclone.

Ainda na Figura 4.3, percebe-se que ocorreu uma concentração maior no número de voltas das linhas de fluxo do gás para os casos 1 e 2, diferentemente do caso 3, que obteve um número menor de voltas. Comprovando que a trajetória do gás é afetada pela velocidade de entrada do gás: caso 1 com velocidade de entrada do gás de 15,0 m/s; caso 2 com velocidade de entrada do gás de 12,5 m/s; e caso 3 com velocidade de entrada do gás de 10,0 m/s. É possível observar que para o Caso 3, além das linhas de fluxo terem um menor número de voltas, elas se concentraram na parte inferior da região cilíndrica do ciclone, o que pode ser atribuído a menor velocidade de entrada do gás (10,0 m/s) comparado ao caso 1 (15,0 m/s) e caso 2 (12,5 m/s). Portanto, como constatado em Souza (2012), observa-se que um aumento da velocidade do gás de secagem proporciona o surgimento de maior número de voltas da corrente gasosa possibilitando, assim, um aumento da intensidade turbilhonar, ou seja, um aumento do momento angular em relação ao momento axial.

A Figura 4.4 apresenta a trajetória de 15 partículas partindo de diferentes posições para os casos 1 (a), caso 2 (b) e caso 3 (c). Estes resultados indicam a presença de um comportamento helicoidal decrescente das partículas nas proximidades das paredes cilíndrica e cônica do ciclone. Este tipo de comportamento já era esperado, tendo em vista a grande diferença de densidade entre as fases gasosa (ar) e particulada (bagaço de cana-de-açúcar). Este comportamento está relacionado com as forças de gravidade, centrífuga, centrípeta e de arraste atuando no interior do ciclone direcionando as partículas para as paredes cilíndricas e cônicas.

Svarovsky (2000) e Farias (2006) atribuem este tipo de comportamento a intensa mistura turbulenta causada pelo fluxo de ar que entra no ciclone pelo duto de

Figura 4. 3- Linhas de fluxo e velocidade do gás ao longo de sua trajetória para diferentes velocidades de entrada do gás, (a) 15,0 m/s (Caso 1), (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).

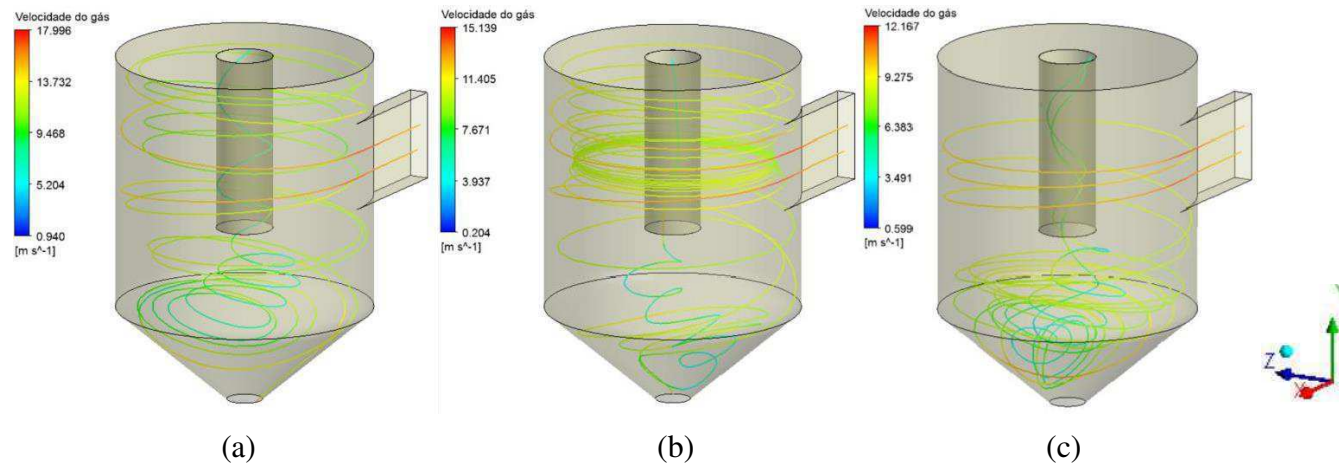
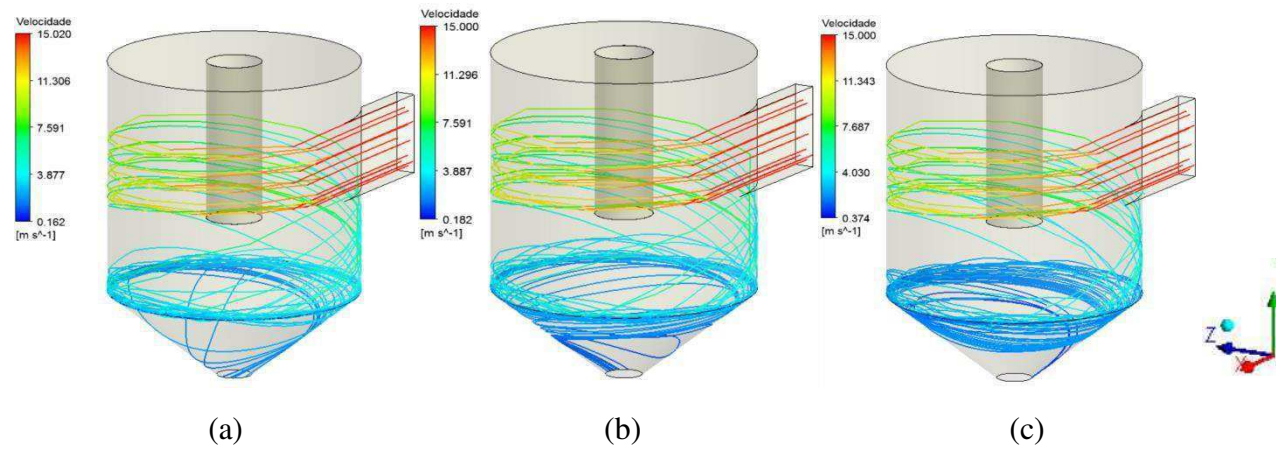


Figura 4. 4 - Trajetórias das partículas, em função da velocidade das partículas para os casos em que a velocidade de entrada do gás de secagem são: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).



alimentação promovendo uma dispersão radial das partículas nas proximidades da parede cilíndrica em direção à saída inferior do ciclone. Percebe-se ainda que, a trajetória das partículas não é afetada fortemente pela velocidade de entrada do gás, uma vez que não houve alterações significantes nas trajetórias das partículas na Figura 4.4 para os casos 1, 2 e 3.

Na Figura 4.5 observa-se que a distribuição de temperatura da fase gasosa acompanha o comportamento helicoidal descendente das partículas arrastadas pela corrente de ar de secagem, pois é possível observar que o gradiente de temperatura se localizou na parte cônica do ciclone para os três casos (caso 1, 2 e 3). Comportamento semelhante foi observado em Souza (2012) que, segundo o mesmo é nesta região cônica que as partículas permanecem por um período maior de tempo proporcionando uma maior troca térmica com o ar de secagem. Percebe-se que quanto maior for a velocidade do gás de entrada, maior é o gradiente de temperatura sobre os planos longitudinais XY e ZY, provavelmente devido a alta velocidade de entrada proporcionar um aumento na intensidade turbilhonar no interior do ciclone, provocando assim um maior contato do gás com as partículas.

A Figura 4.6 apresenta o campo vetorial de velocidade do gás sobre o plano longitudinal YZ para os casos 1, 2 e 3. É possível perceber que, quanto maior a velocidade desta fase na entrada do ciclone, maior é a presença de vórtices, zonas de reversão de fluxo e intensidade turbilhonar do escoamento. Dentro dos casos avaliados, a presença de vórtices é maior para o caso 1, sendo notável a presença de vórtices na região superior cilíndrica. Na Figura 4.7 percebe-se pelos gradientes de pressão sobre os planos longitudinais YX e YZ que a pressão decresce radialmente em direção ao centro do ciclone a partir das paredes cilindro-cônico.

Nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 tem-se a trajetória das partículas partindo da mesma posição de entrada para os casos 1, 2 e 3 em função do tempo de permanência, diâmetro médio da partícula e temperatura da partícula. É possível perceber que o tempo de permanência da partícula dura em torno de 2,00 s para os três casos observados. O ganho de temperatura das partículas para os três casos observados foi em torno de 30 °C, fazendo com que a temperatura de saída da partícula fosse em torno de 60 °C. Foi possível perceber uma pequena diminuição do tamanho das partículas.

Figura 4. 5- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as velocidades de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2) e (c, f) 10,0 m/s (Caso 3).

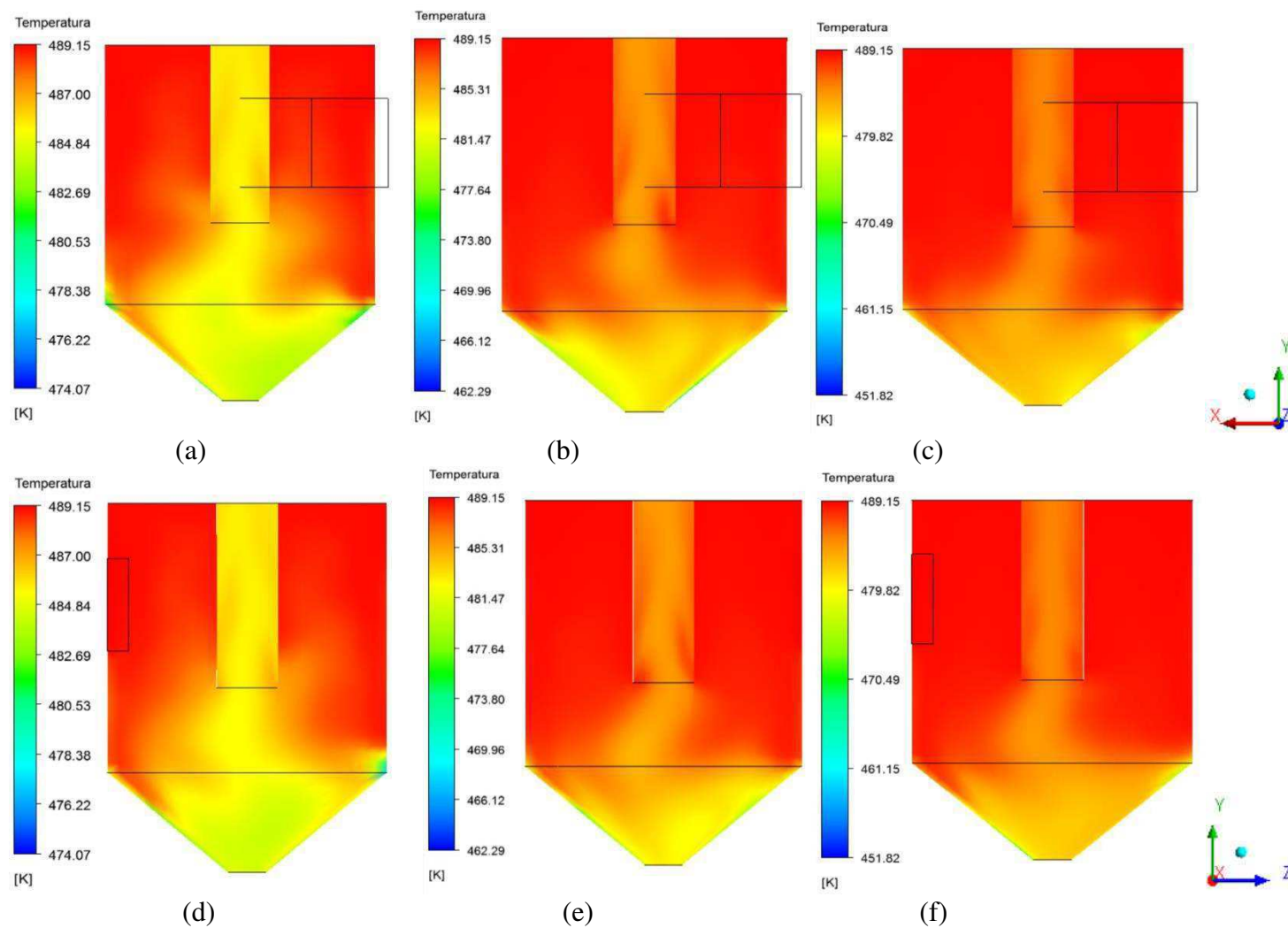


Figura 4. 6- Campo vetorial da velocidade do gás sobre os planos longitudinais YZ (a, b, c) para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).

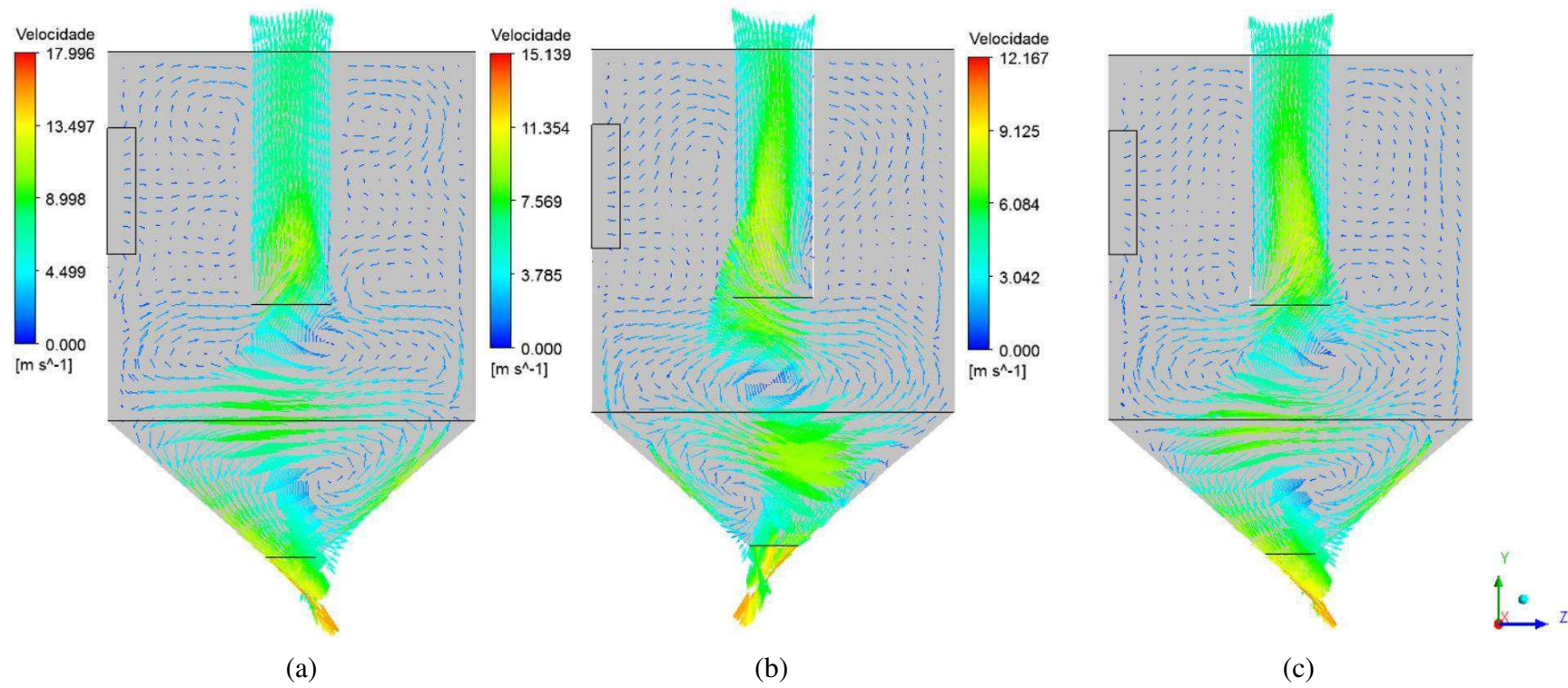


Figura 4. 7- Campo de pressão sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as velocidade de entrada do gás secagem: (a, d) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b, e) 12,5 m/s (Caso 2) e (c, f) 10,0 m/s (Caso 3).

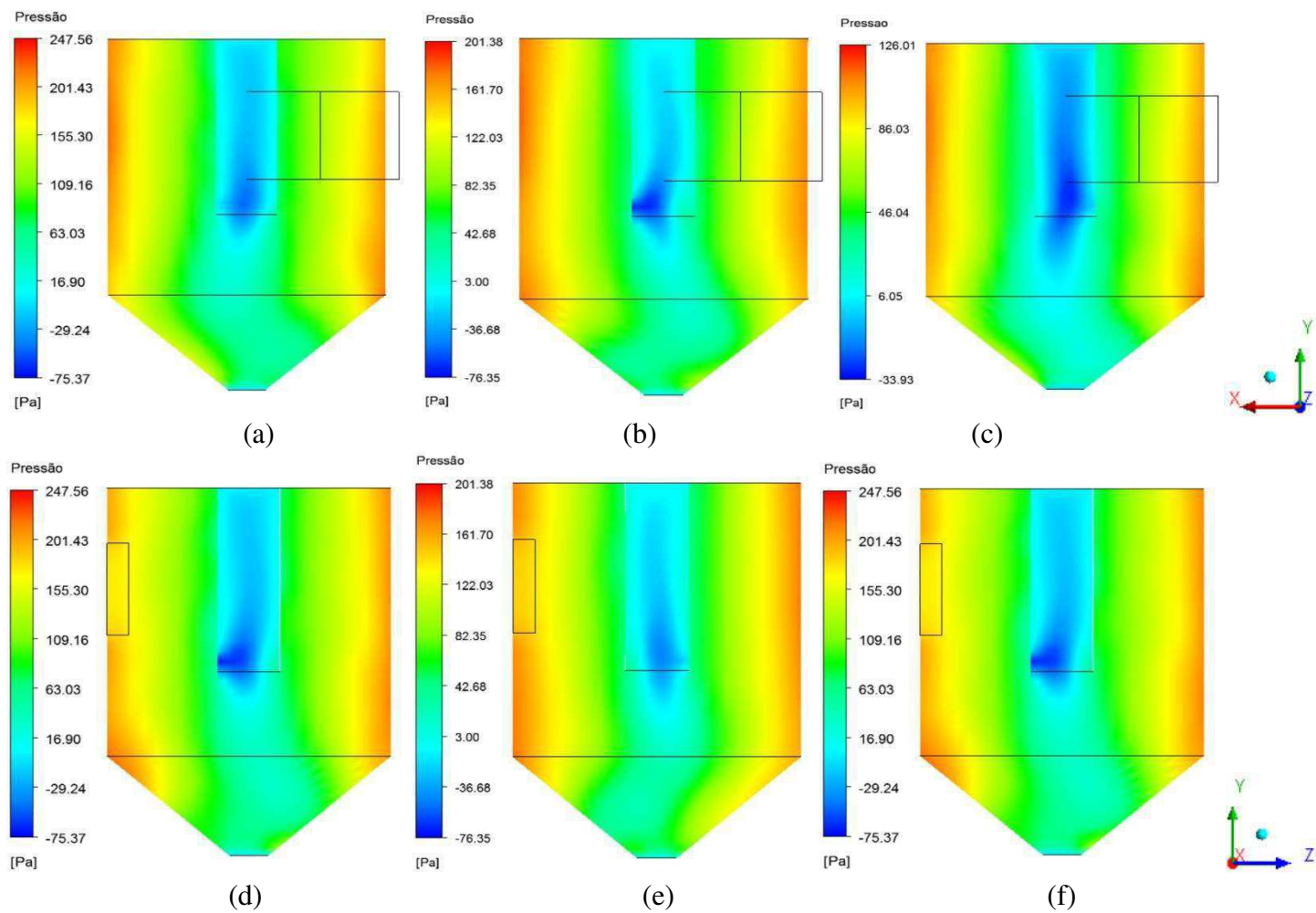


Figura 4.8- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15 m/s (Caso 1); (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).

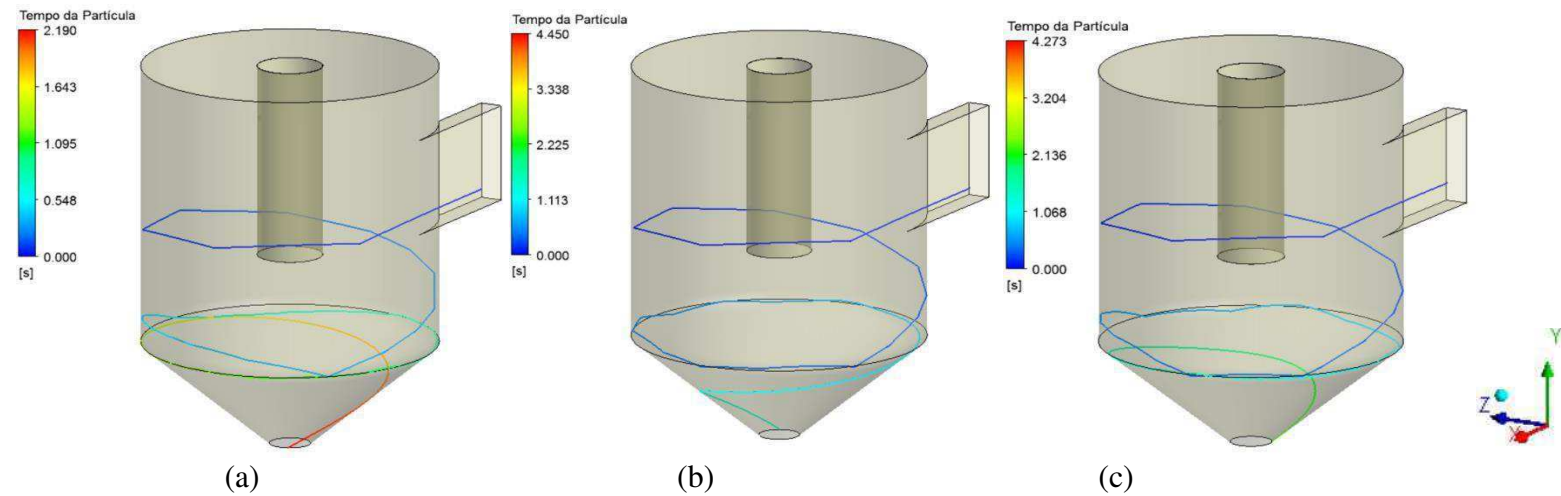


Figura 4. 9- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1) ; (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).

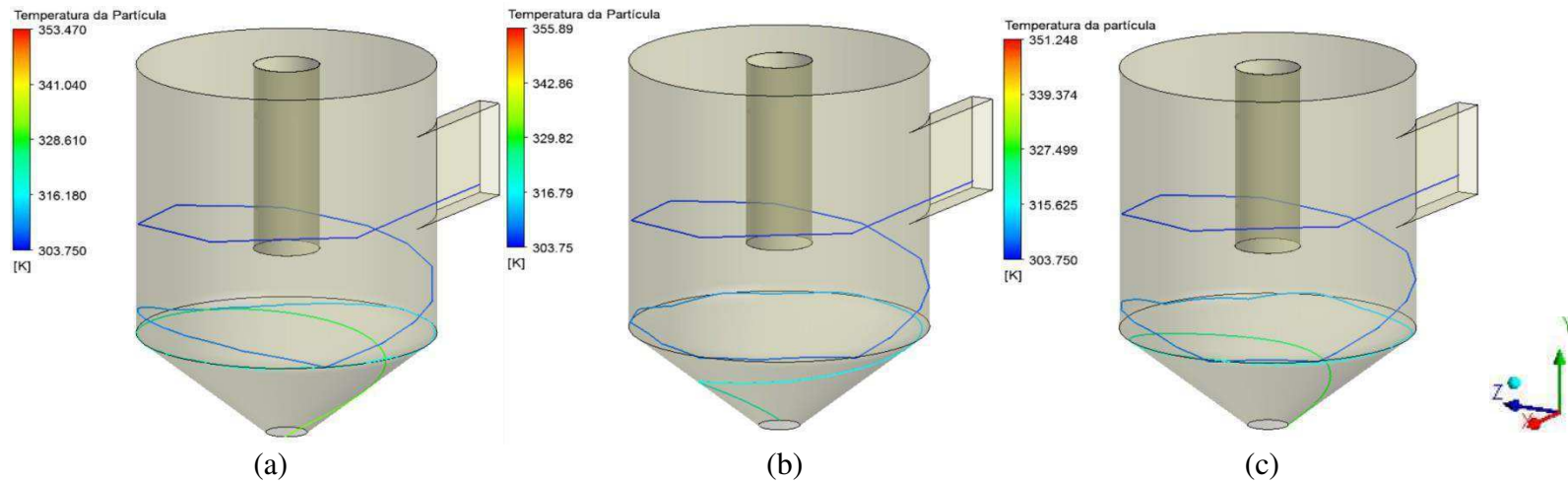
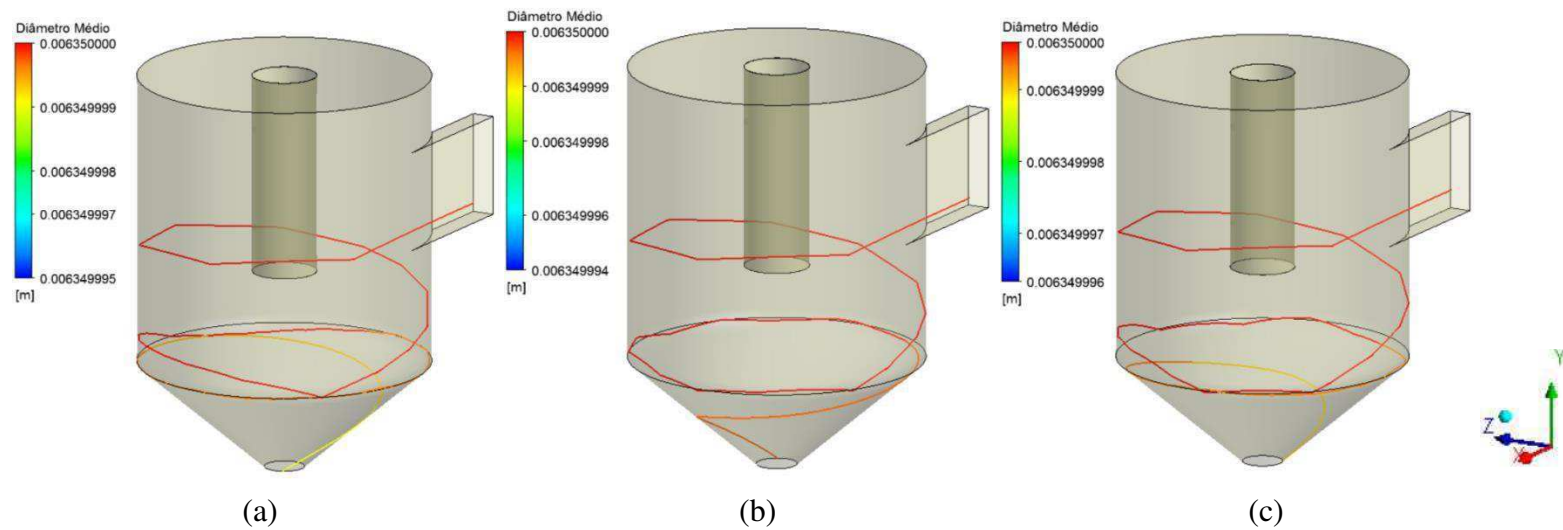


Figura 4. 10- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as velocidades de entrada do gás de secagem: (a) 15,0 m/s (Caso 1); (b) 12,5 m/s (Caso 2) e (c) 10,0 m/s (Caso 3).





#### 4.2.2. Efeito da temperatura de entrada do gás de secagem

Nesta etapa dos resultados foi realizada uma análise da influência da variação da temperatura do gás de secagem no comportamento das fases gasosa e particulada no interior do ciclone. Entretanto de acordo com os resultados analisados na seção 4.2.1, a velocidade escolhida para simular o restante dos casos foi a maior velocidade: 15,0 m/s. Portanto nesta presente seção são apresentados os resultados dos casos 1, caso 4 e caso 5 que possuem respectivamente temperaturas de entrada do gás de 216, 277 e 150°C como apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.

Caso	Velocidade do gás de entrada - $u_g$ (m/s)	Temperatura do gás de entrada - $T_G$ (°C)	Fluxo mássico de partículas - $\dot{m}_p$ (g/s)	Fração de água no ar - $f_{H_2O}$
1	15,0	216	6,55	0,00
4	15,0	277	6,55	0,00
5	15,0	150	6,55	0,00

Na Figura 4.11 é possível perceber que ocorre para as três temperaturas de entrada do ar de secagem a evaporação da água presente nas partículas. A fração de água proveniente da evaporação das partículas no interior do ciclone é separada através da saída superior do ciclone, como é possível ver nos planos longitudinais YX e YZ, da Figura 4.11.

A Figura 4.12 apresenta o campo de temperatura para os planos longitudinais YX e YZ no interior do ciclone para as três temperaturas do ar de secagem. É possível perceber, como pode ser observado nas Figuras 4.12 a 4.17, que a região onde predomina a presença das partículas (região cônica ou saída inferior) e o vapor de água (saída superior) são as regiões que possuem menores temperaturas na distribuição se comparada à região onde predomina o ar quente.

Figura 4. 11- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para a temperatura de entrada do gás secagem: (a, d) 216°C (Caso 1) ; (b, e) 277°C (Caso 4) e (c, f) 150°C (Caso 5).

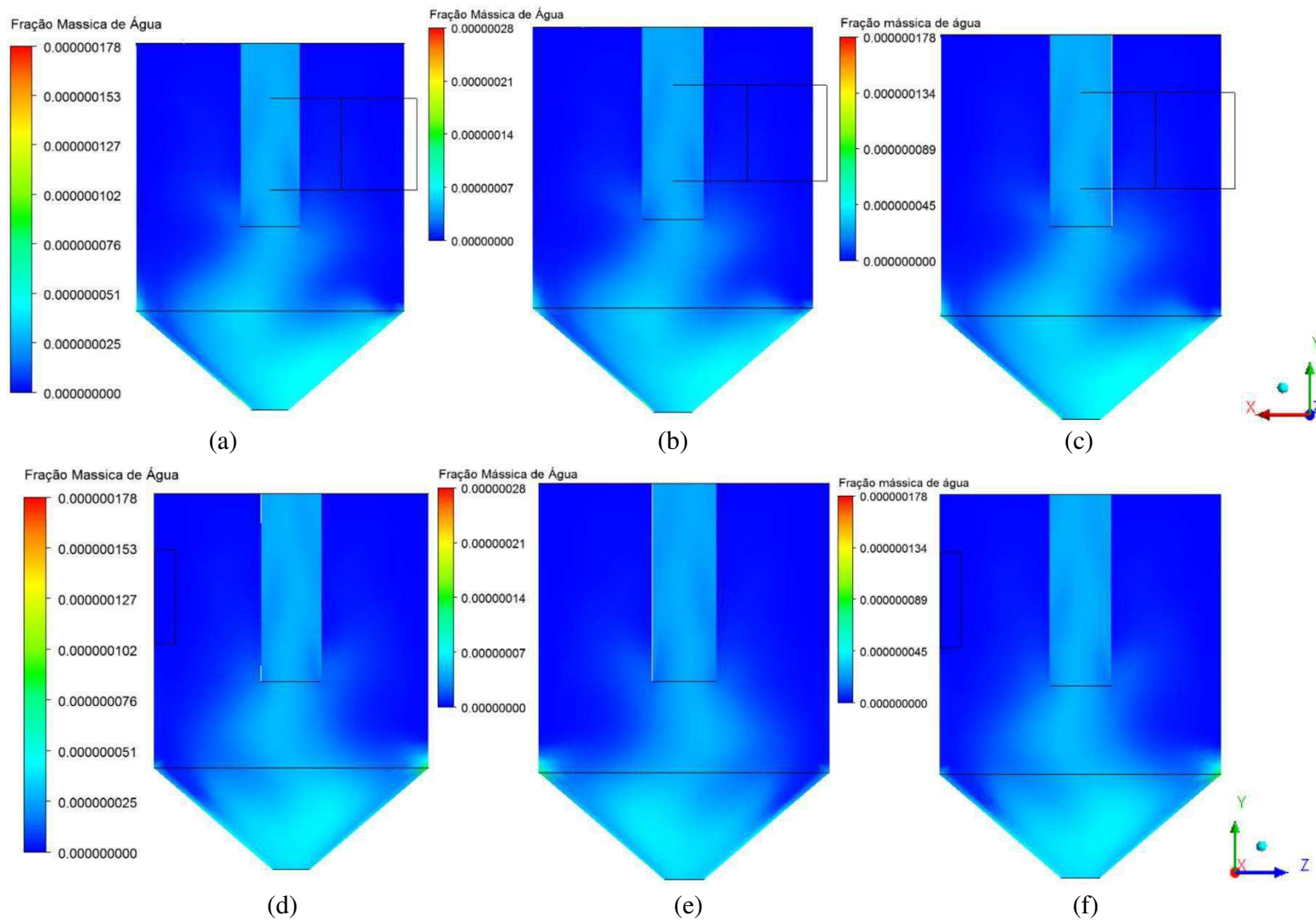
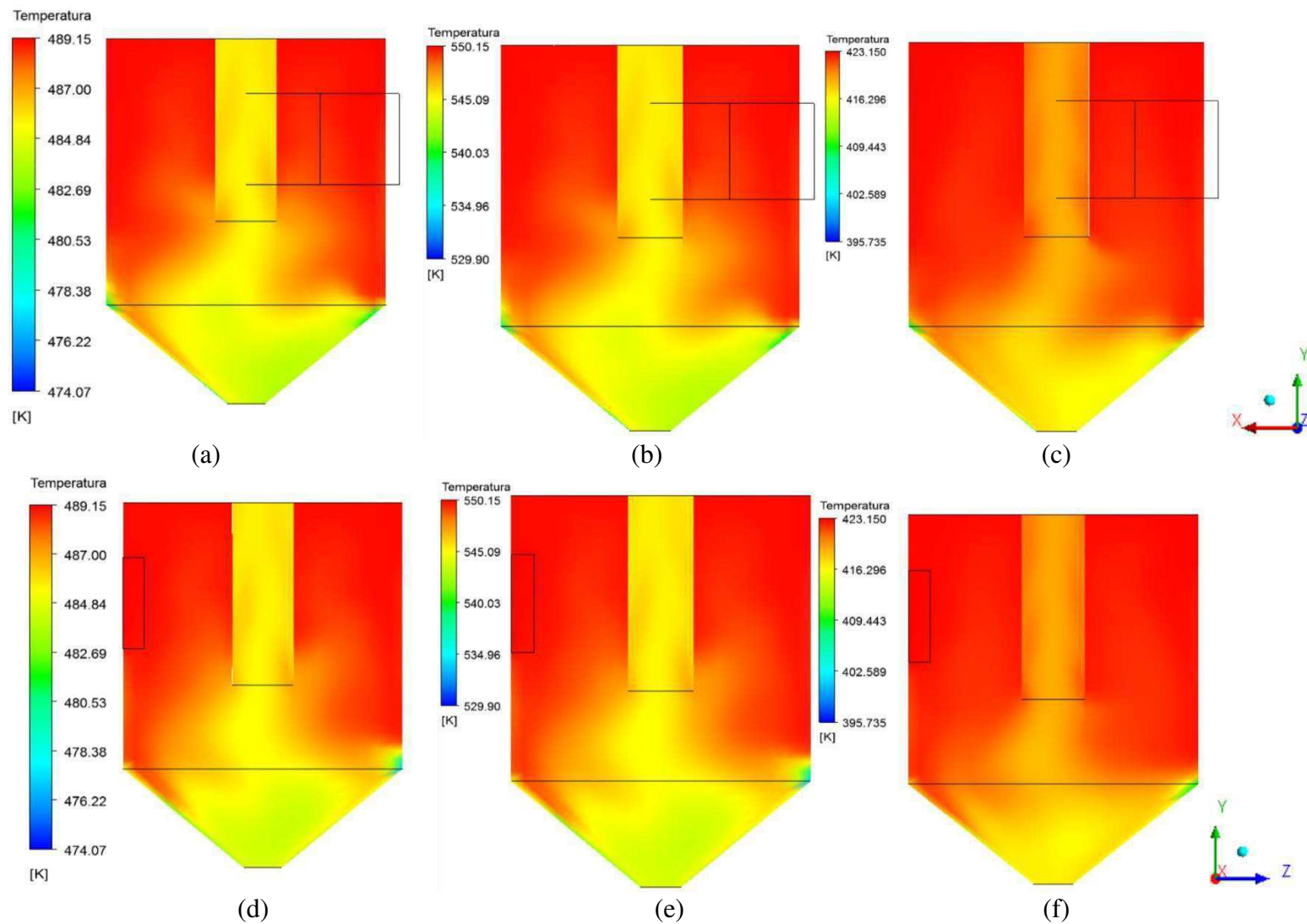


Figura 4. 12- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as temperaturas de entrada do gás secagem: (a, d) 216°C (Caso 1) ; (b, e) 277°C (Caso 4); (c, f) 150°C (Caso 5).



Na Figura 4.13 estão presentes os campos de temperatura sobre as paredes do ciclone para os casos 1, 4, e 5, que se diferenciam pelas temperaturas do ar de secagem: 216°C, 277°C e 150°C. Observa-se que a distribuição de temperatura sobre estas superfícies acompanha o movimento helicoidal descendente do ar de secagem juntamente com as partículas. Estas figuras corroboram o que foi discutido sobre os campos de temperatura nos planos longitudinais YX e YZ da Figura 4.12, ou seja, as partículas permanecem por um determinado período em movimento circulatório nas proximidades das paredes da região cônica do ciclone proporcionando uma troca térmica entre fluido-partícula, fluido-superfície cônica e/ou partícula-superfície cônica. A troca de calor que se efetua entre a partícula e a superfície cônica, quando, em uma pequena fração de tempo, ocorre o choque das partículas com esta superfície.

A Figura 4.14 ilustra a distribuição do campo de pressão sobre as paredes do ciclone. O campo de pressão representa as forças que o fluido exerce sobre as paredes do ciclone, induzidas pelo fluxo de fluido que entra pela entrada tangencial, por unidade de área. Observa-se que a distribuição de pressão se mantém praticamente uniforme ao longo de toda parede do cilindro, com exceção da região após o duto de entrada na qual se observa uma zona que é severamente castigada pelo choque direto das partículas e do gás, onde se observa valores mais expressivos de pressão. Segundo Farias (2006), esta região sofre um desgaste devido ao fenômeno do choque das partículas sendo uma região que merece atenção durante a etapa de projeto, principalmente quando se tratar de uma partícula bastante abrasiva.

Na Figura 4.15 tem-se a trajetória da partícula partindo da mesma posição de entrada para os casos 1, 4 e 5 em função do tempo de permanência da partícula no interior do ciclone. De acordo com os resultados observados, é possível perceber que, para a mesma posição de partida, o Caso 1 foi o que a partícula ficou por um maior período de tempo no interior do ciclone.

O fato de haver tempos de permanência diferentes para os três casos, resulta em diferentes perfis de temperatura e de diâmetro médio ao longo do interior do ciclone para os respectivos casos. Como no caso 1 a partícula permaneceu por um maior tempo dentro do ciclone, 2,19 s, isto reflete nos resultados apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17 que ilustram respectivamente a variação da temperatura da partícula e do seu diâmetro médio ao longo do seu percurso dentro do ciclone.

Figura 4. 13- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5).

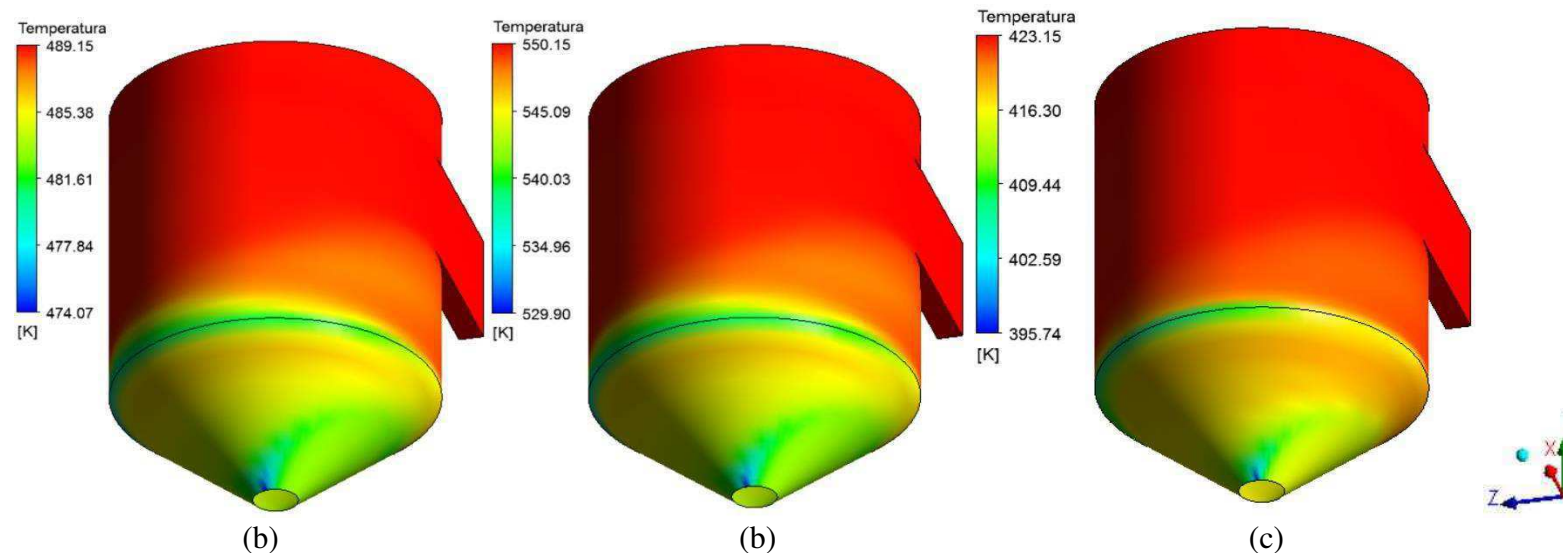


Figura 4. 14- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5).

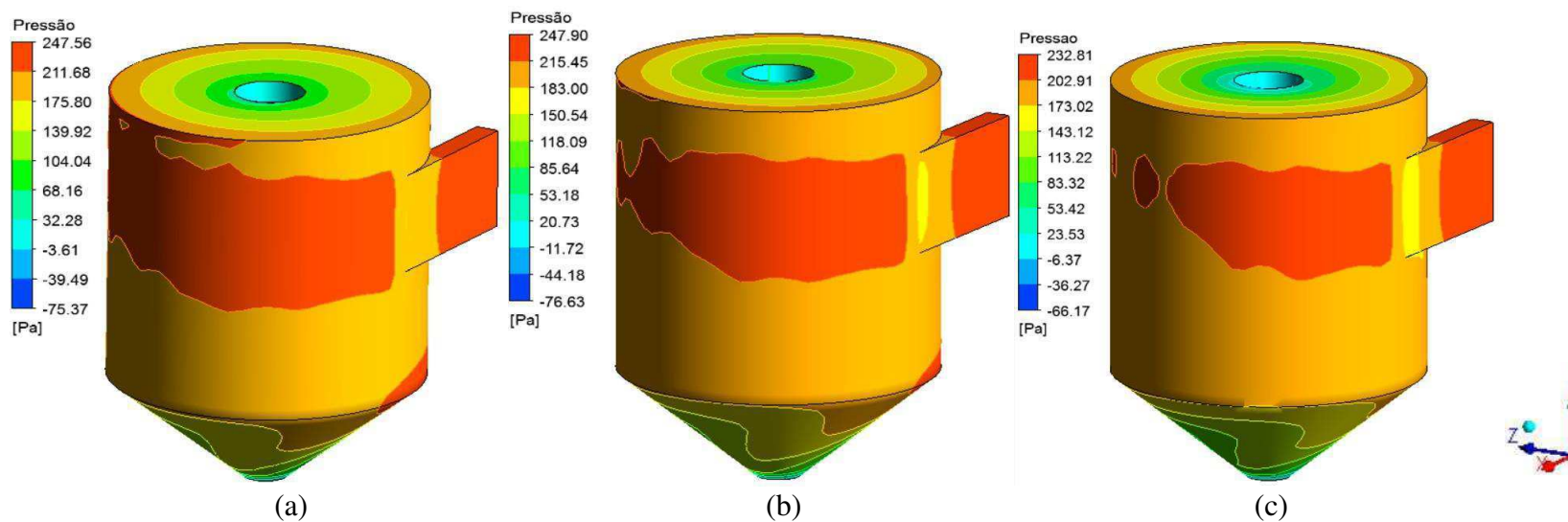


Figura 4. 15- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1) ; (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5).

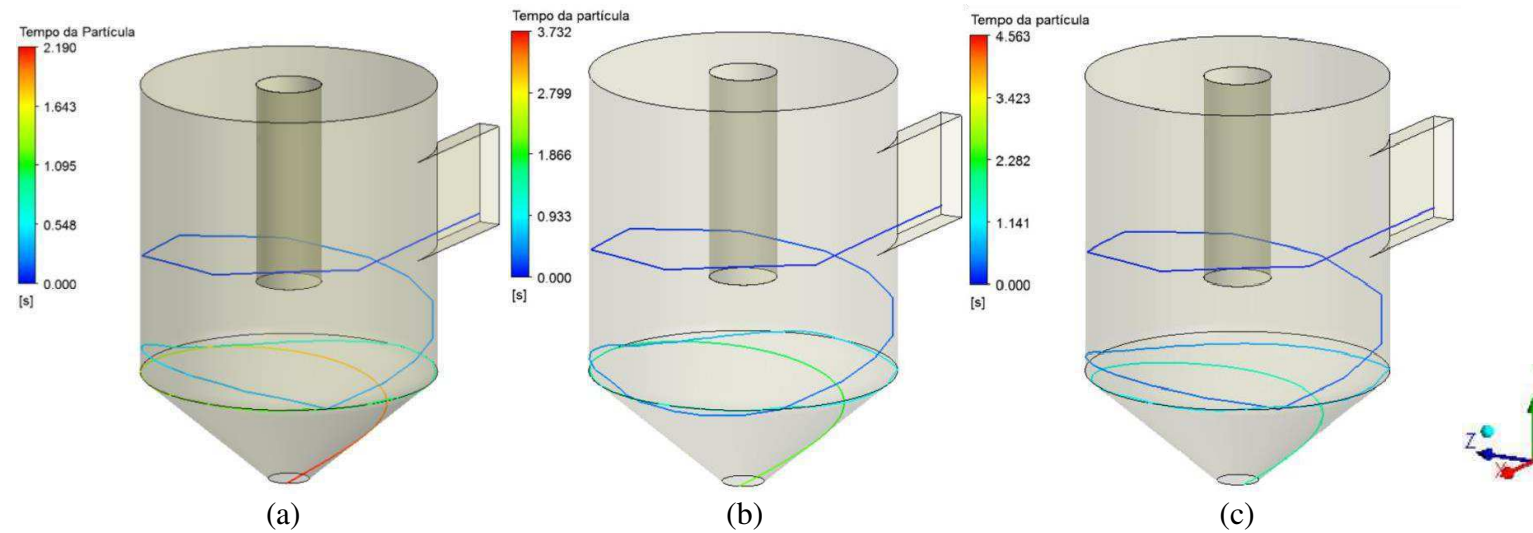


Figura 4. 16- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5).

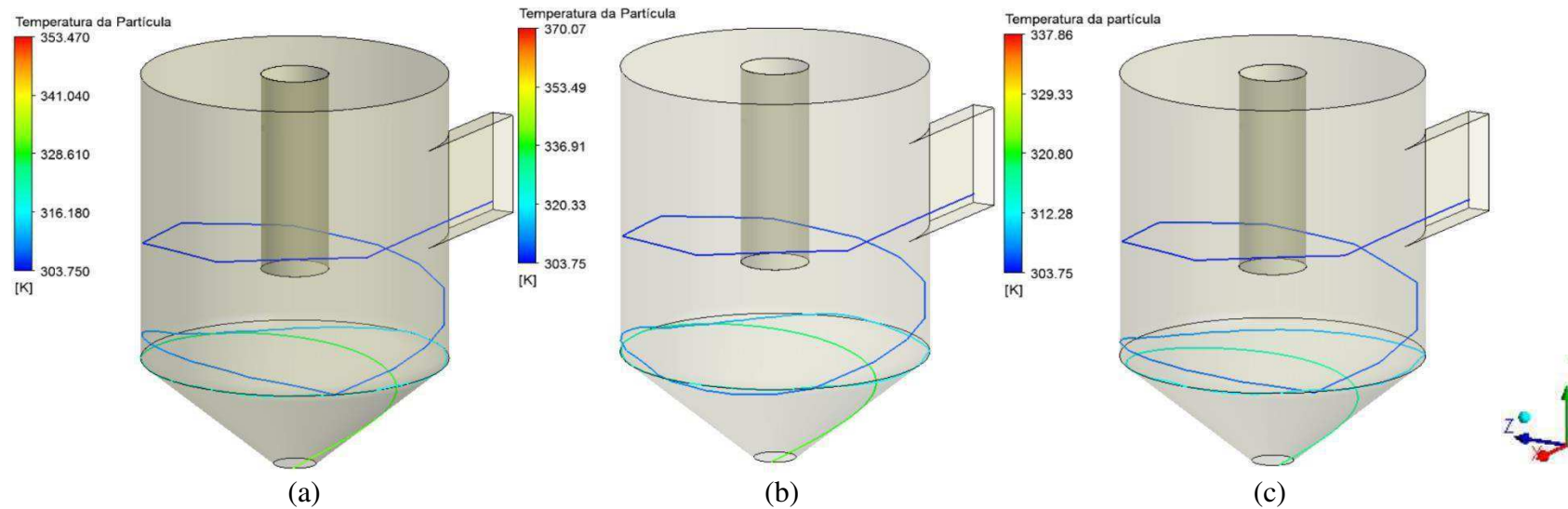
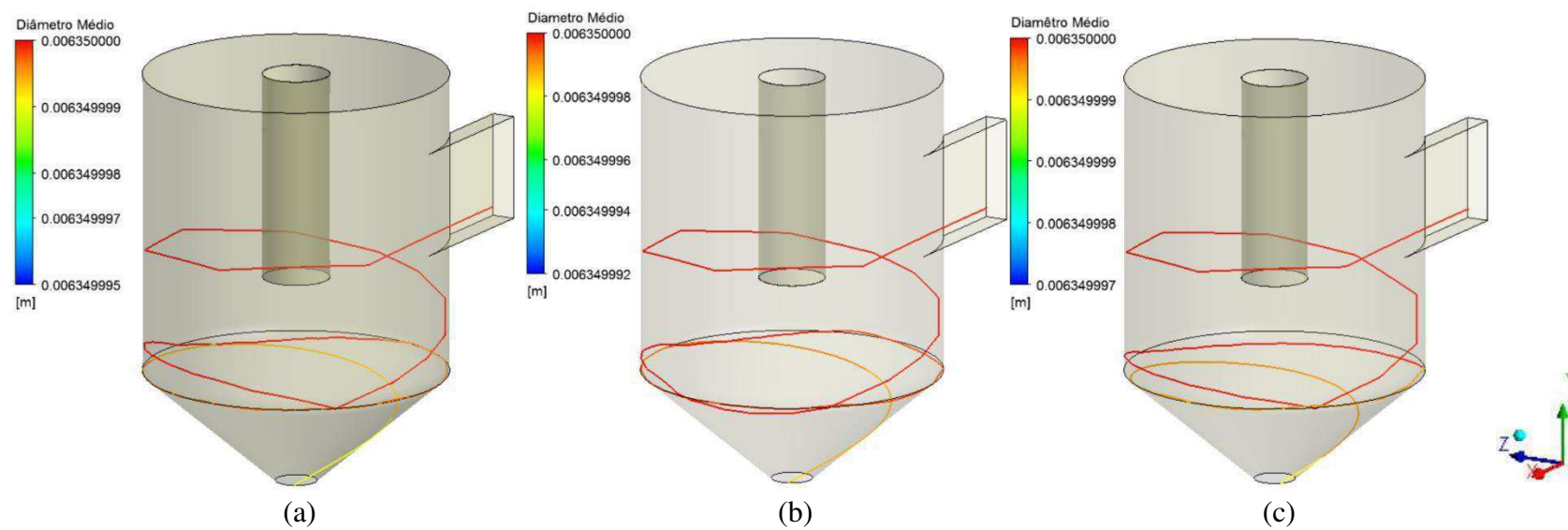


Figura 4. 17- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para as temperaturas do gás de secagem: (a) 216°C (Caso 1); (b) 277°C (Caso 4) e (c) 150°C (Caso 5).



### 4.2.3. Efeito do fluxo mássico de partículas

Nesta etapa dos resultados foi realizada uma análise da influência da variação do fluxo mássico das partículas no comportamento das fases gasosa e particulada no interior do ciclone. Entretanto de acordo com os resultados analisados na seção 4.2.2, a temperatura escolhida para simular o restante dos casos foi a maior temperatura: 277°C. Portanto nesta presente seção são apresentados os resultados dos casos 4, 6 e 7 que possuem respectivamente um fluxo mássico de partículas de 6,55 g/s, 13,1 g/s e 19,65 g/s como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3 - Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.

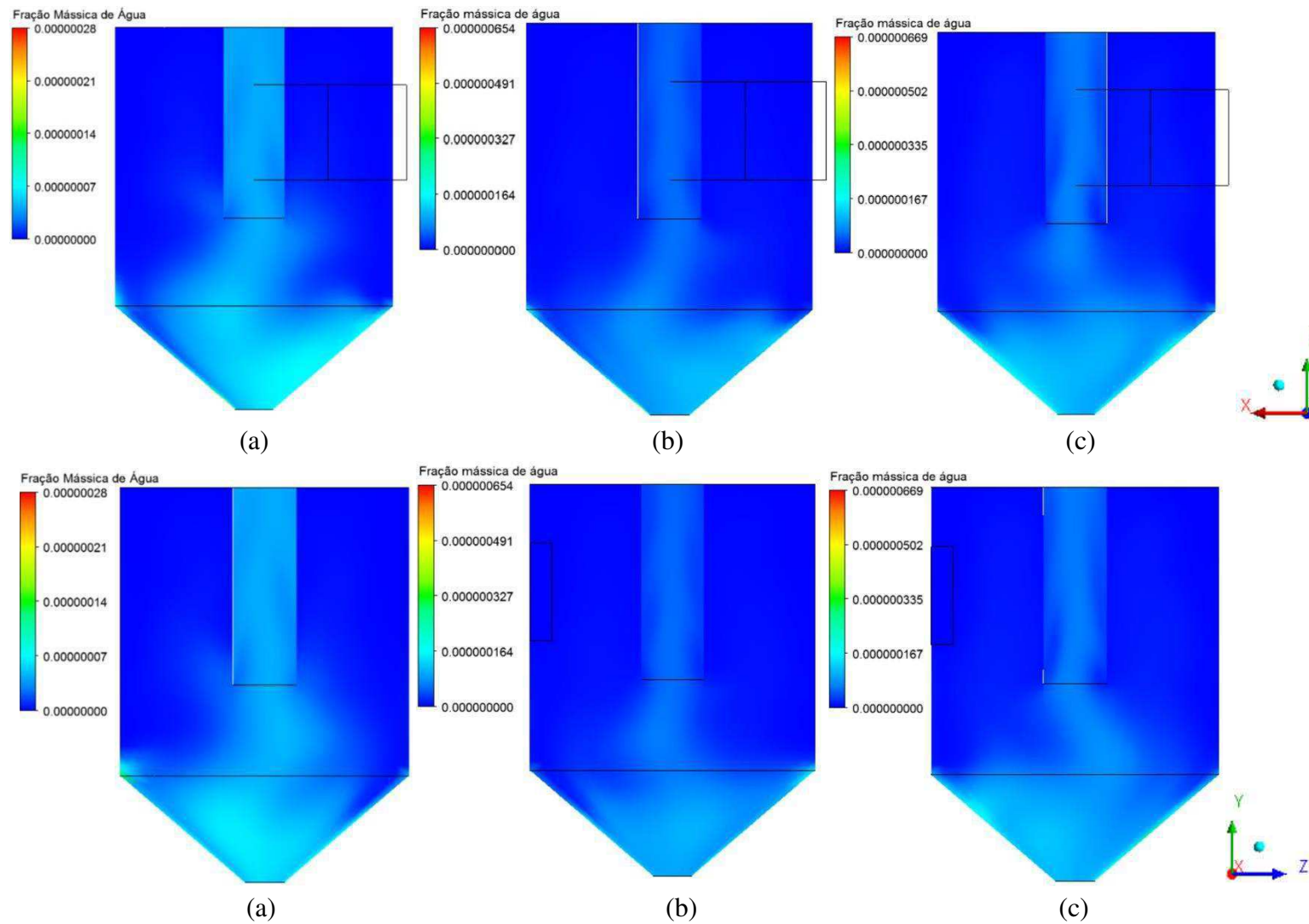
Caso	Velocidade do gás de entrada - $u_g$ (m/s)	Temperatura do gás de entrada - $T_G$ (°C)	Fluxo mássico de partículas - $\dot{m}_p$ (g/s)	Fração de água no ar - $f_{H_2O}$
4	15,0	277	6,55	0,00
6	15,0	277	13,1	0,00
7	15,0	277	19,65	0,00

A Figura 4.18 apresenta a concentração de água liberada pela partícula durante o seu movimento circulatório no dentro do ciclone para os casos 4, 8 e 9, que se diferenciam pela quantidade de fluxo mássico de partículas. É possível ver nestas figuras que o tubo central de saída do ciclone para o caso 4 (menor fluxo mássico) apresenta uma maior concentração de água quando comparado aos casos 6 e 7 (maiores fluxos mássicos), e que os gradientes de fração mássica de água no interior do ciclone para os casos 6 e 7 são pequenos. Este fenômeno ocorre provavelmente devido ao fato de que quanto maior for o fluxo mássico de partículas, maior a quantidade requerida de calor para evaporar a água das partículas. Como nos três casos analisados a quantidade de calor fornecida foi a mesma, é possível notar a diferença de cada caso na quantidade de água evaporada através da Figura 4.18.

A Figura 4.19 apresenta o campo de temperatura para os planos longitudinais YX e YZ no interior do ciclone para os três fluxos mássicos de partículas (caso 4: 6,55 g/s; caso 6: 13,1 g/s e caso 7: 19,65 g/s). É possível perceber que a região onde predomina a presença das partículas (região cônica



Figura 4. 18- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para os fluxos mássicos de partículas: (a, d) 6,55 g/s (Caso 4); (b, e) 13,1 g/s (Caso 6) e (c, f) 19,65 g/s (Caso 7).



ou saída inferior) e o vapor de água (saída superior) são regiões que possuem uma menor temperatura comparada a região onde predomina o ar quente de secagem, provavelmente devido a ser nessas regiões onde ocorre a maior quantidade de troca térmica. O mesmo caso que liberou menos vapor de água, Caso 6, foi o caso que na Figura 4.18 apresentou um menor gradiente de temperatura sobre os planos longitudinais YX e YZ.

Na Figura 4.20 está presente o campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para os três casos 4, 6, e 7, que se diferenciam pelos fluxos mássicos de partículas: 6,55 g/s, 13,1 g/s e 19,65 g/s. Observa-se que a distribuição de temperatura sobre estas superfícies acompanha o movimento helicoidal descendente do ar de secagem juntamente com as partículas. Estas figuras confirmam o que foi discutido nos campos de temperatura sobre os planos longitudinais YX e YZ dos casos anteriores, ou seja, as partículas permanecem por um determinado período em movimento circulatório nas proximidades das paredes da região cônica do ciclone proporcionando uma troca térmica entre o fluido-partícula, fluido-superfície cônica e /ou partícula-superfície cônica. A troca de calor que se efetua entre a partícula e a superfície cônica se dá em uma pequena fração de tempo, ocorre o choque das partículas com esta superfície.

É possível ainda, perceber, que o gradiente de temperatura sobre as paredes do ciclone foi maior quando se utilizou um menor valor da vazão mássica (Caso 4), e que o mesmo gradiente de temperatura foi menor quando se utilizou o maior valor de vazão mássica, que foi o Caso 7 com 19,65 g/s. Provavelmente devido a um aumento da massa de partículas no interior do ciclone, o que afeta a troca de calor e conseqüentemente a evaporação no processo de secagem.

A Figura 4.21 ilustra a distribuição do campo de pressão sobre as paredes do ciclone. O campo de pressão representa as forças que o fluido exerce sobre as paredes do ciclone, induzidas pelo fluxo de fluido que entra pela entrada tangencial, por unidade de área. Observa-se que a distribuição de pressão se mantém praticamente uniforme ao longo de toda parede do cilindro, com exceção da região após o duto de entrada na qual se observa uma zona que é severamente castigada pelo choque direto das partículas e do gás, onde se observa valores mais expressivos de pressão. Segundo Farias (2006) esta região sofre um desgaste devido ao fenômeno do choque das partículas sendo uma região que merece atenção durante a etapa de projeto, principalmente quando se tratar de uma partícula bastante abrasiva.

Nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 tem-se a trajetória das partículas partindo da mesma posição de entrada para os casos 4, 6 e 7 em função do tempo de permanência da partícula no interior do ciclone, diâmetro médio da partícula e temperatura da partícula. O fato de haver tempos de permanência diferente para os três casos, resulta em diferentes perfis de temperatura e de diâmetro médio ao longo do interior do ciclone para os respectivos casos.

Figura 4. 19- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para os fluxos mássicos de partículas: (a, d) 6,55 g/s (Caso 4); (b, e) 13,1 g/s (Caso 6) e (c, f) 19,65 g/s (Caso 7).

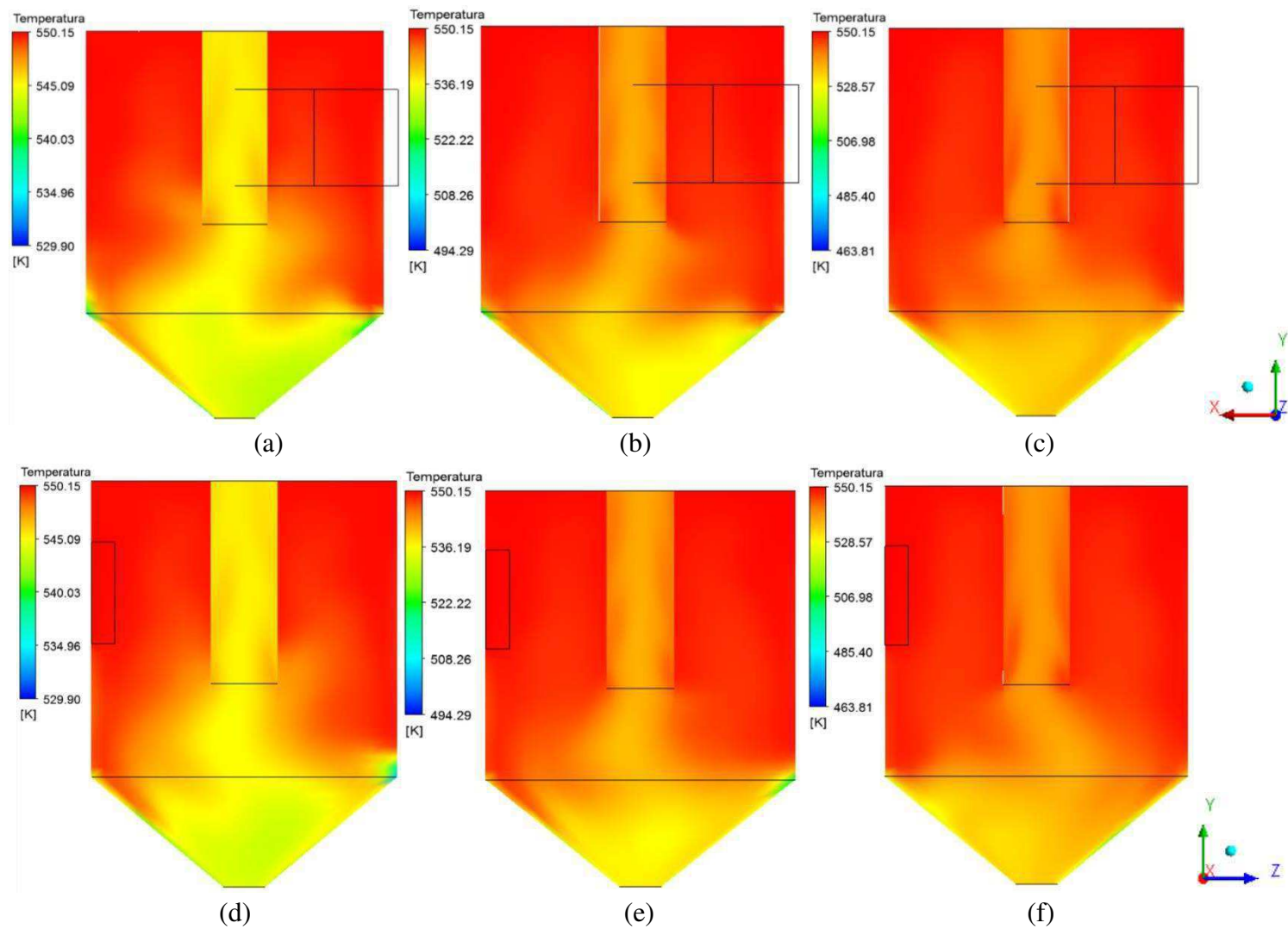


Figura 4. 20- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7).

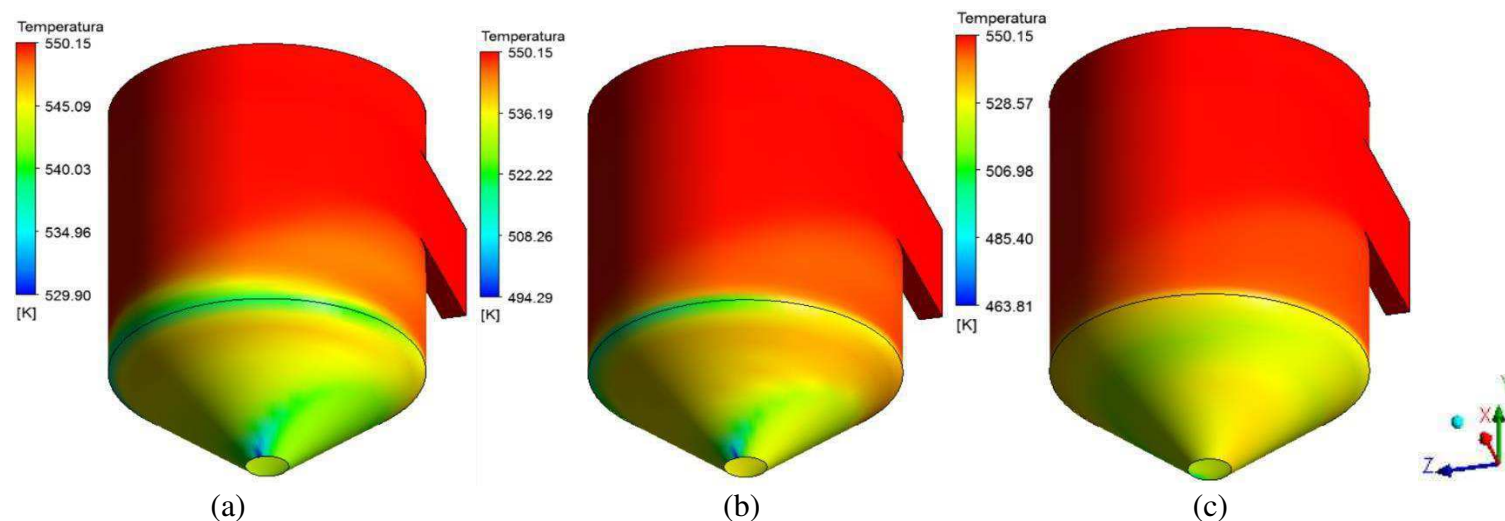


Figura 4. 21- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7).

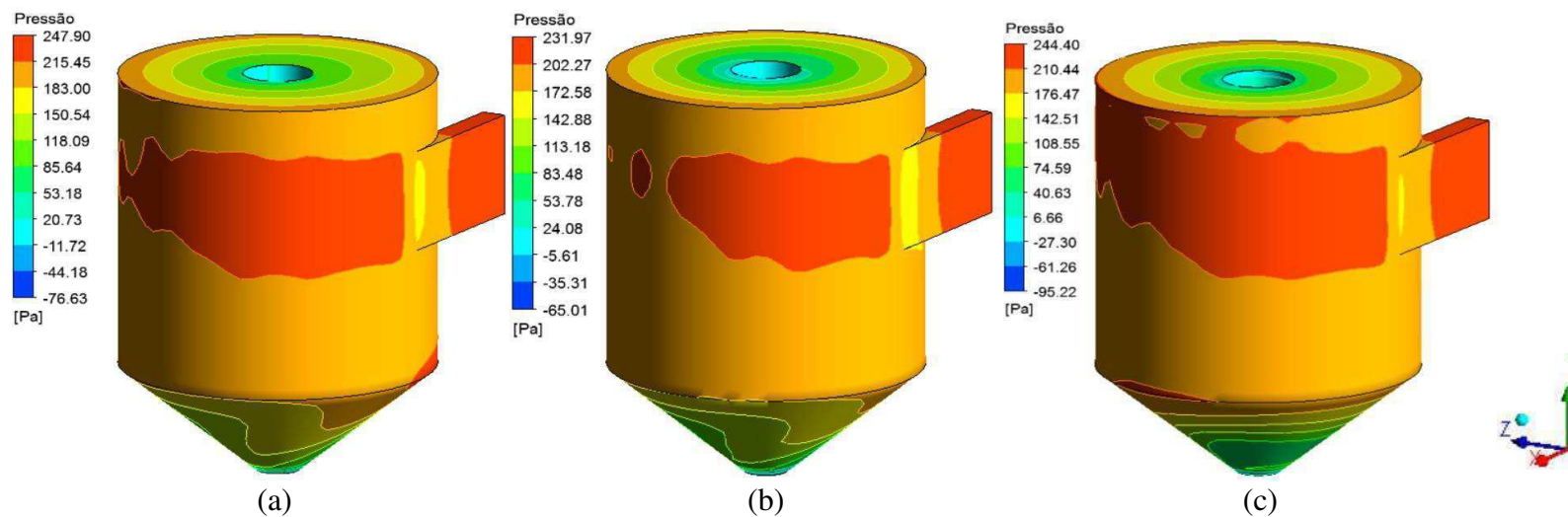


Figura 4. 22- Tempo de permanência da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7).

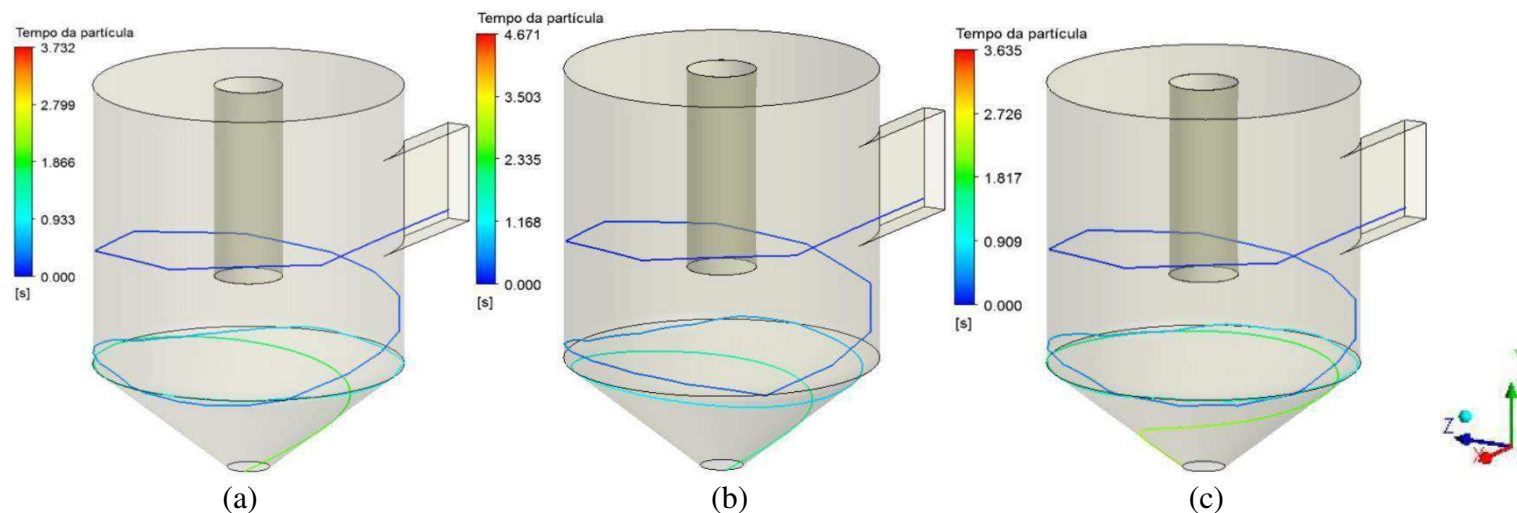


Figura 4. 23- Diâmetro da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7).

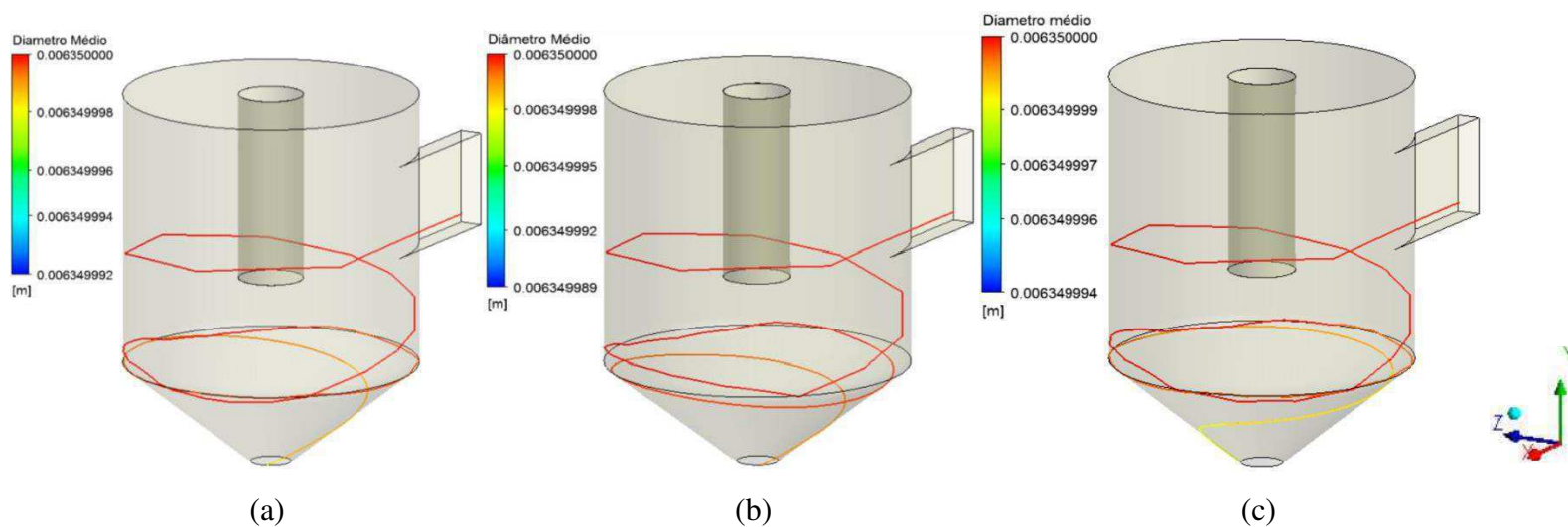
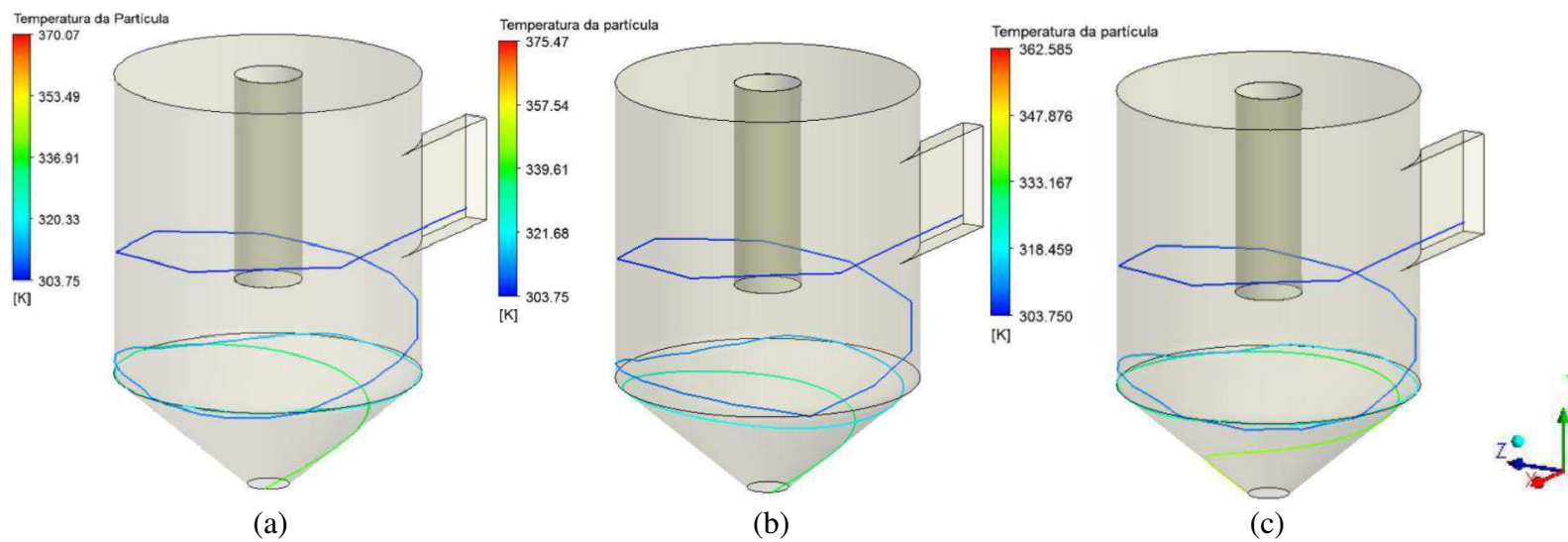


Figura 4. 24- Temperatura da partícula ao longo de suas trajetórias no interior do ciclone para os fluxos mássicos de partículas: (a) 6,55 g/s (Caso 4); (b) 13,1 g/s (Caso 6) e (c) 19,65 g/s (Caso 7).



#### 4.2.4 Efeito da fração mássica de água no ar de secagem

Nesta etapa dos resultados foi realizada uma análise da influência da variação da fração mássica de água no ar de secagem na entrada do secador ciclônico no comportamento da fase gasosa e particulada no interior do ciclone. Entretanto, com base nos resultados analisados na seção 4.2.3, o fluxo mássico de partículas escolhido para simular o restante dos casos foi o de 6,55 g/s. Portanto nesta presente seção são apresentados os resultados dos casos 4, 8 e 9 que possuem respectivamente fração mássica do ar de secagem de 0,00 kg/kg, 0,01 kg/kg e 0,02kg/kg como apresentado na Tabela 4.4.

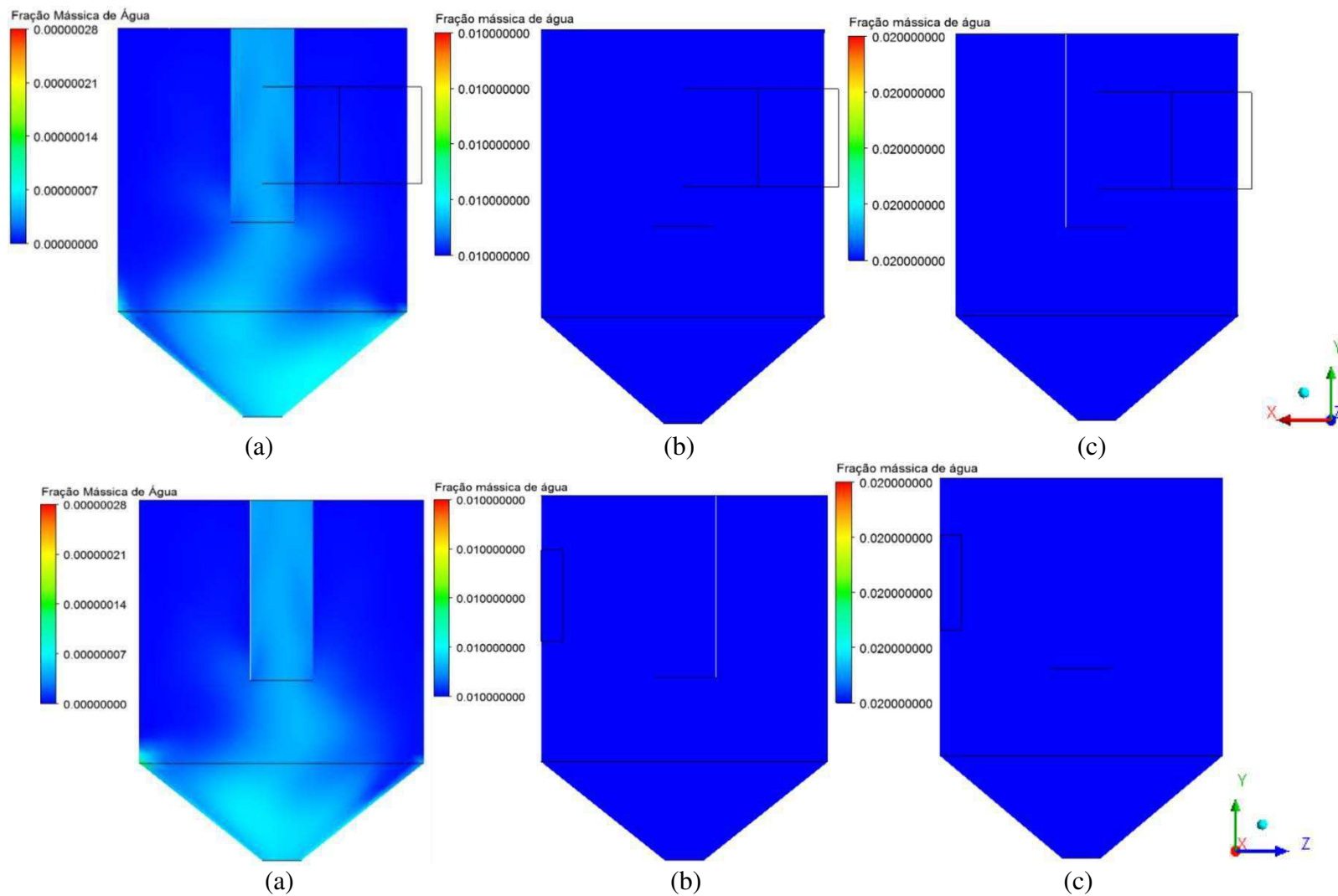
Tabela 4. 4- Dados das condições de contorno na seção de entrada do duto de alimentação no início das simulações.

Caso	Velocidade do gás de entrada - $u_g$ (m/s)	Temperatura do gás de entrada - $T_G$ (°C)	Fluxo mássico de partículas - $\dot{m}_p$ (g/s)	Fração de água no ar - $f_{H_2O}$	Umidade relativa do ar - $U_R$
4	15,0	277	6,55	0,00	0,00
8	15,0	277	6,55	0,01	1,58 %
9	15,0	277	6,55	0,02	3,12 %

A figura 4.25 apresenta a fração mássica de vapor de água que se desprende da partícula durante o movimento das partículas no interior do ciclone para os casos 4, 8 e 9. É possível perceber que a quantidade de água que se desprende das partículas para o caso 4 é bastante superior que para os casos 8 e 9. Este fenômeno acontece provavelmente devido ao fato de o ar já entrar no ciclone com determinada saturação de água, proporcionando uma menor evaporação de água.

A Figura 4.26 ilustra o campo de temperatura para os planos longitudinais YX e YZ do ciclone para as três frações mássicas do ar de secagem. É possível que a região onde predominam a presença das partículas (região cônica ou saída inferior) e o vapor de água e/ou ar que transferiu calor para as partículas (saída superior) são as regiões que possuem uma menor temperatura comparada à região onde predomina o ar quente de secagem, provavelmente devido a ser nessas regiões onde ocorre a maior quantidade de troca térmica. Para os três casos, os gradientes de temperatura sobre os planos longitudinais YX e YZ apresentaram os mesmos perfis.

Figura 4. 25- Fração mássica de água no interior do ciclone sobre os eixos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a, d) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b, e) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c, f) 0,02 kg/kg (Caso 9).





Na Figura 4.27 está presente o campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para os casos 4, 8, e 9, que se diferenciam pelas fração mássica do ar de secagem. Observa-se que a distribuição de temperatura sobre estas superfícies acompanha o movimento helicoidal descendente do ar de secagem juntamente com as partículas. Estas figuras confirmam o que foi discutido nos campos de temperatura sobre os planos longitudinais YX e YZ dos casos anteriores, ou seja, as partículas permanecem por um determinado período em movimento circulatório nas proximidades das paredes da região cônica do ciclone proporcionando uma troca térmica entre o fluido-partícula, fluido-superfície cônica e/ou partícula-superfície cônica. A troca de calor que se efetua entre a partícula e a superfície cônica, quando, em uma pequena fração de tempo, ocorre o choque das partículas com esta superfície. Nota-se que o perfil de temperatura apresentou o mesmo comportamento para os três casos.

Na Figura 4.28 é possível constatar a distribuição do campo de pressão sobre as paredes do ciclone. De forma semelhante ao que foi verificado por em Farias (2006), a distribuição de pressão é assimétrica em consequência da não simetria da velocidade tangencial. O campo de pressão representa as forças que o fluido exerce sobre as paredes do ciclone, induzidas pelo fluxo de fluido que entra pela entrada tangencial, por unidade de área.

Observa-se, ainda, na Figura 4.28 que a distribuição de pressão se mantém praticamente uniforme ao longo de toda parede do cilindro, com exceção da região após o duto de entrada na qual se observa uma zona que possui uma maior gradiente de pressão. Provavelmente devido à região receber o choque das partículas que entram no ciclone. Segundo Farias (2006) esta região sofre um desgaste mais acentuado devido ao fenômeno do choque das partículas, sendo, portanto, uma região que merece notável atenção durante a etapa de projeto, principalmente quando se tratar de uma partícula bastante abrasiva.

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 tem-se a trajetória das partículas partindo da mesma posição de entrada para os casos 4, 8 e 9 em função do tempo de permanência da partícula no interior do ciclone, diâmetro médio da partícula e temperatura da partícula. O fato de haver tempos de permanência diferente para os três casos, resulta em diferentes perfis de temperatura e de diâmetro médio ao longo do interior do ciclone para os respectivos casos. Contudo, foi possível perceber que o diâmetro da partícula diminuiu à medida que a sua temperatura aumentou durante o seu percurso no interior do ciclone.

Figura 4. 26- Campo de temperatura sobre os planos longitudinais YX (a, b, c) e YZ (d, e, f) para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a, d) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b, e) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c, f) 0,02 kg/kg (Caso 9).

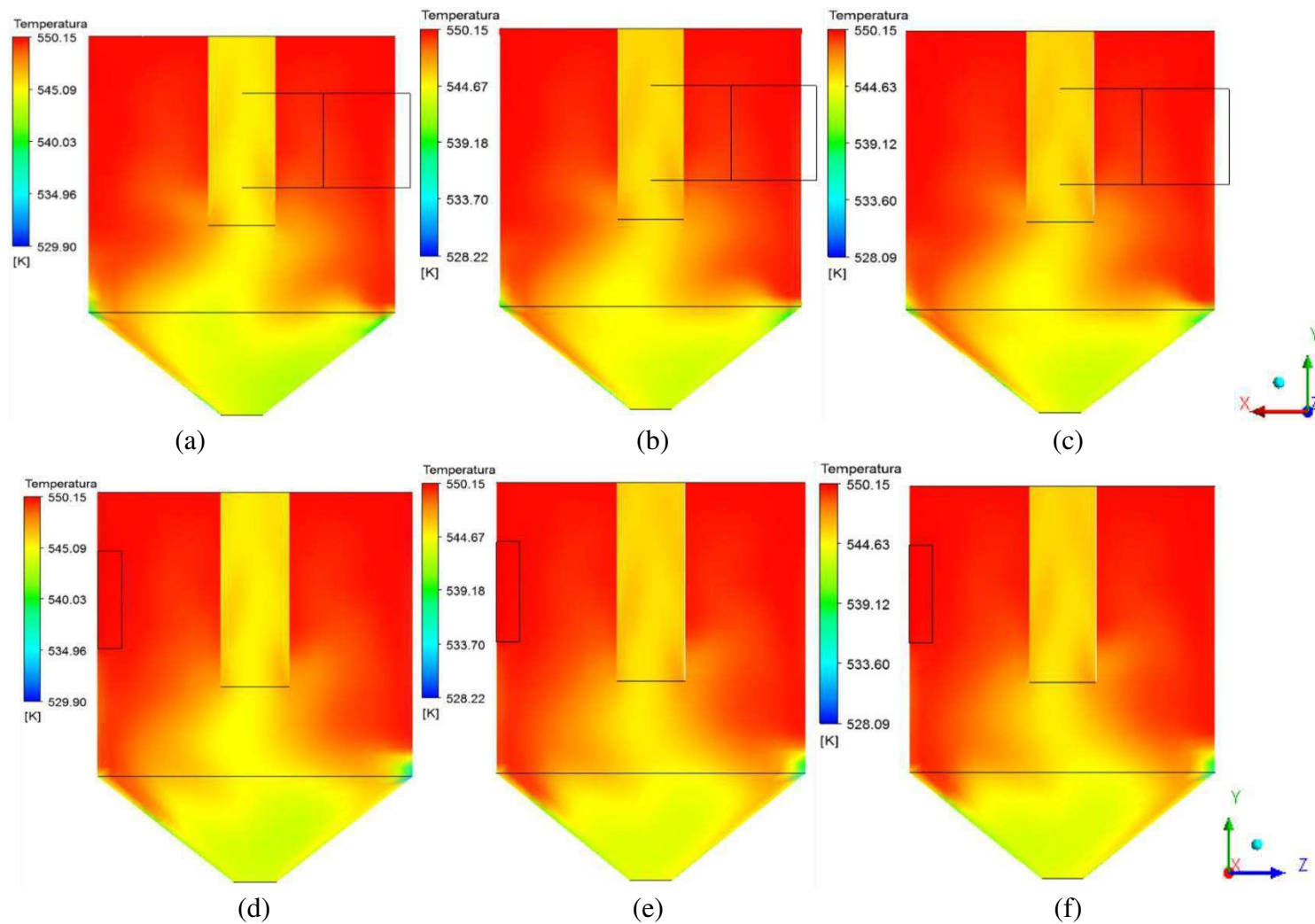


Figura 4. 27- Campo de temperatura sobre as paredes do ciclone para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9).

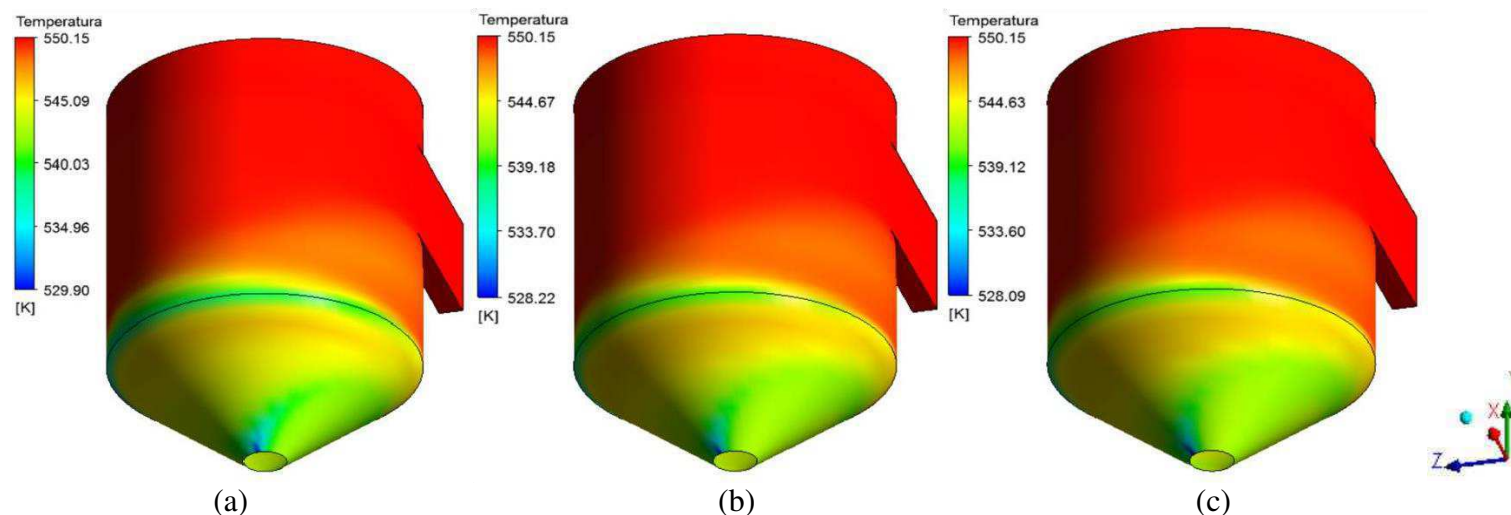


Figura 4. 28- Campo de pressão sobre as paredes do ciclone para as frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9).

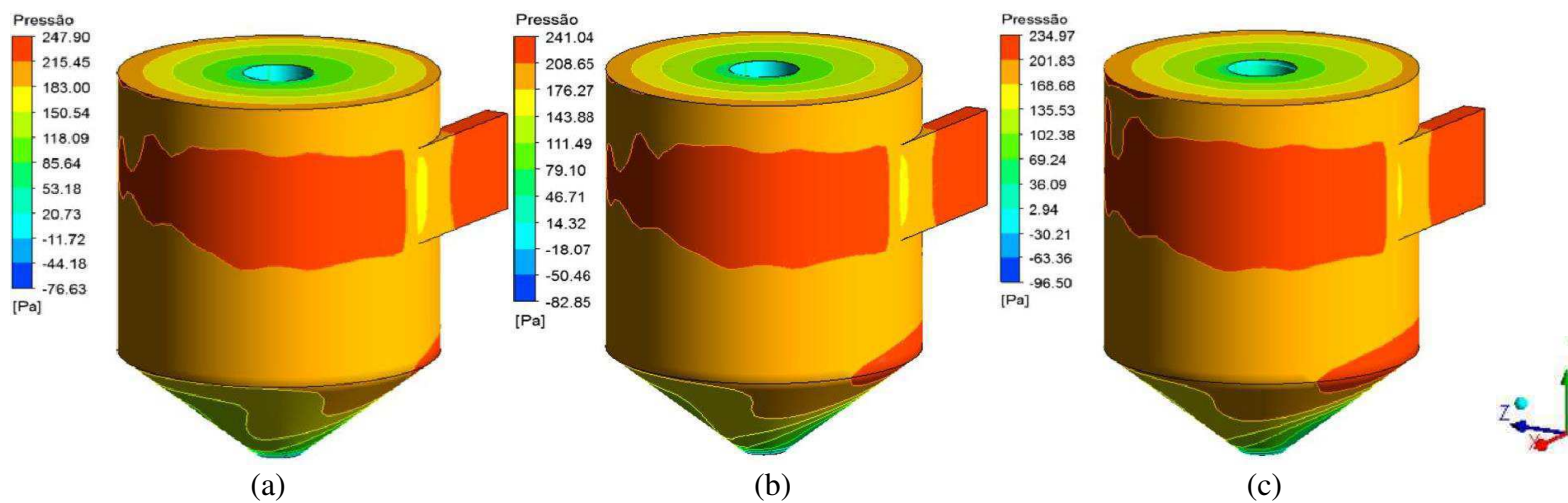


Figura 4. 29- Tempo de permanência da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/ kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9).

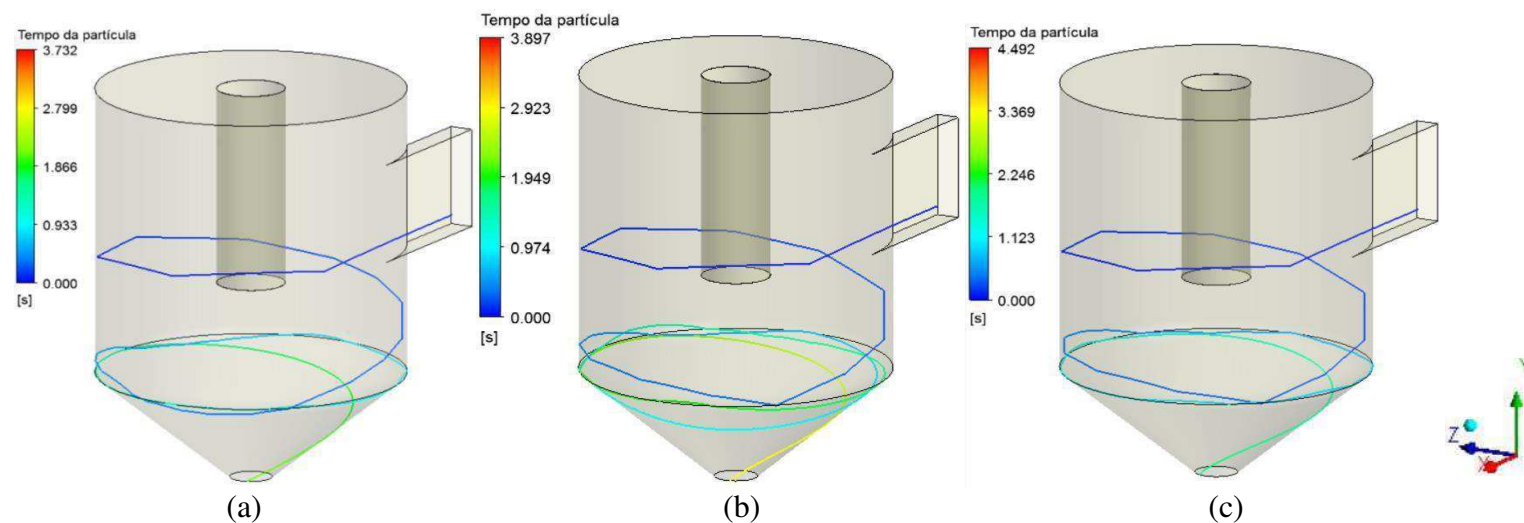


Figura 4. 30- Diâmetro da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 Kg/Kg (Caso 4); (b) 0,01 Kg/ Kg (Caso 8) e (c) 0,02 Kg/Kg (Caso 9).

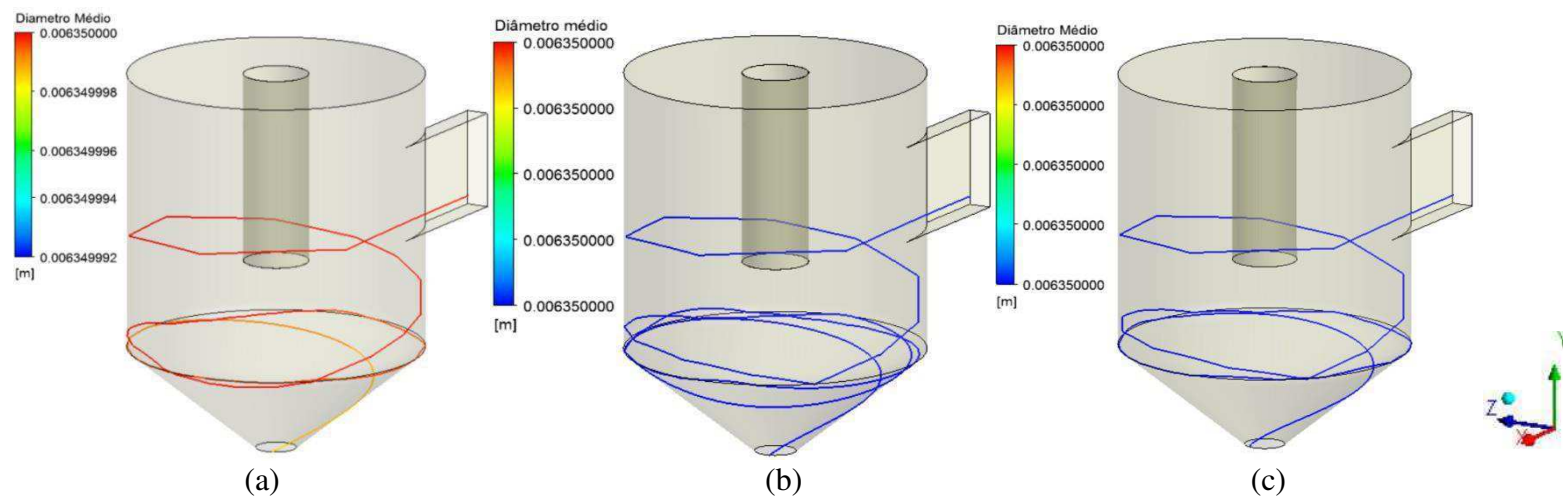
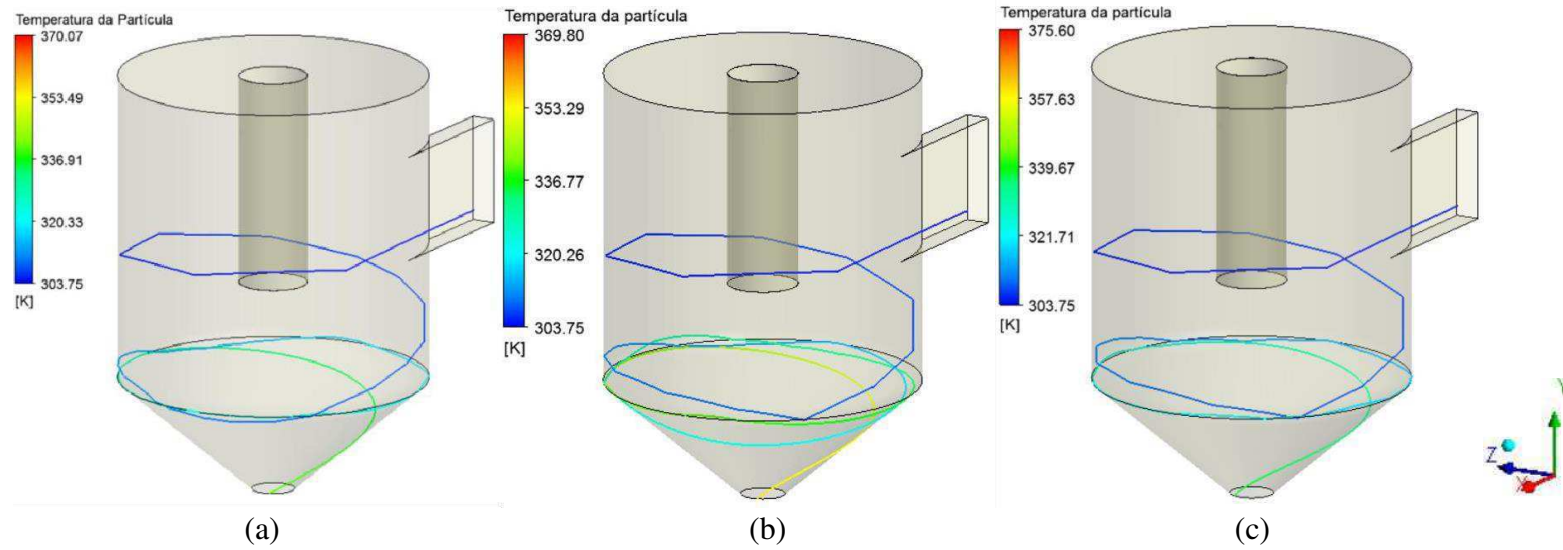


Figura 4. 31- Temperatura da partícula ao longo de sua trajetória no interior do ciclone para frações mássicas de água no ar de secagem de: (a) 0,00 kg/kg (Caso 4); (b) 0,01 kg/kg (Caso 8) e (c) 0,02 kg/kg (Caso 9).



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusões

Em relação aos resultados numéricos da simulação de secagem do bagaço de cana-de-açúcar pode-se concluir que:

- Observou-se o caráter tridimensional do escoamento das fases gasosa e particulada no interior do ciclone, como também a presença de regiões com zonas de recirculação próximo ao duto de saída do gás (vortex finder) e de inversão de fluxo no interior do ciclone.
- Constatou-se que quanto maior a velocidade de entrada do gás no ciclone, uma maior quantidade de água se desprende da partícula passando para a fase vapor durante o movimento no interior do ciclone.
- Constatou-se a presença de um comportamento helicoidal decrescente do gás nas proximidades da parede cilíndrica e cônica do ciclone, e ascendente na região próxima ao centro do ciclone.
- Observa-se que um aumento da velocidade do gás de secagem proporciona o surgimento de maior número de voltas da corrente gasosa possibilitando, assim, um aumento da intensidade turbilhonar, ou seja, um aumento do momento angular em relação ao momento axial.
- A velocidade de entrada 15,0 m/s de corrente de ar de secagem mostrou-se adequada ao processo de secagem do bagaço de cana-de-açúcar nas condições avaliadas.
- Observou-se que as distribuições de temperatura tanto nas paredes do ciclone quanto nos planos longitudinais YX e YZ acompanham o comportamento helicoidal descendente das partículas arrastadas pela corrente de ar de secagem.
- Observou-se que a distribuição de pressão se mantém praticamente uniforme ao longo de toda parede do cilindro, com exceção da região após o duto de entrada na qual se observa uma zona que possui uma maior gradiente de pressão, provavelmente devido à região receber o choque das partículas que entram no ciclone.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para pesquisas futuras pode-se citar:

- Realizar um estudo com ciclones em séries e avaliar o processo de secagem;
- Estudar numericamente a secagem de outros produtos a exemplo da borra de café e da casca de laranja em ciclone secador;
- Avaliar a influência do comprimento e diâmetro do tubo de saída superior, tanto na fluidodinâmica quanto nas cinéticas de secagem e de aquecimento das partículas.

## REFERÊNCIAS

Akpinar, E.; Midill, A.; Bicer, Y., Single Layer Drying Behaviour of Potato Slices in a Convective Cyclone Dryer and Mathematical Modeling. *Energy Conversion and Management*, vol.44, no 10, p. 1689-1705, (2003).

Alves, L. M. Métodos dos Elementos Finitos. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, (2007).

Alonso, L. F. T., Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, São Paulo (2001).

Andrade, L. A. B.; Ferreira, R. G. S.; Ferreira, G. D. S. Cultivo de Cana de Açúcar para Produção de Cachaça, Viçosa, CPT, 2007.

Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S., Leclerc, J. P. Comparison of Different Models of Cyclone Prediction Performance for Various Operating Conditions Using a General Software. *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 43, pp 511-512 (2004).

Barbosa, R. D., Secagem de Bagaço de Cana em Sistema Pneumático. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1992).

Bernardo, S., Estudo dos escoamentos gasoso gás-sólido em ciclones pela aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp (2005).

Bortoli, Á. L. Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS, (2000).

Brooker, D. B.; Arkema, F. W. B.; Hall, C. W., Drying and storage of grains and oilseeds. New York, AVI Book (1992).



Caldas, C.; Borém A.; Santos, F. Bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. – 2 ed, Viçosa, MG: Os editores, 2011.

Carneiro, M. J. M. Modelagem matemática da secagem de pescado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campinas, Campinas (1995).

Chaves, J. B. P.; Lima, F. Z.; Lopes, J. D. S. Cachaça – Produção Artesanal de Qualidade. Viçosa – MG, CPT, 2007.

Creiasco, M. A., Estudo sobre o escoamento gás-partículas em um reator ciclônico. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas (1994).

Cruz, O. C. Desempenho de um hidrociclone de geometria “rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2008.

Corrêa, J. L. G. Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas (2003).

Corrêa, J. L. G.; Graminho, D. R.; Silva, M. A.; Nebra, S. A. The cyclone dryer – a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 21, n° 1, (2004).

Del Frari, R. V. Malhas Computacionais para Simulação Numérica de Escoamentos de Fluidos entre Cilindros com Excentricidade, X Encontro Gaúcho de Educação Matemática, Ijuí-RS, (2009).

Dibb, A., Comportamento fluidodinâmico do ciclone em diferentes geometrias. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP (1997).

Dibb, A., Silva, M. A., Cyclone as a dryer – the optimum geometry. *Proceedings of the First Inter-American Drying Conference (IADC)*, pp. 396-403, Itu, São Paulo, Brasil (1997).

Farias, S. N., “Secagem de sólidos esferodais usando o método de Galerkin”, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, (2002).

Farias, F. P. M.; Lima, A. G. B.; Neto, Farias Neto, S. R. Influência da forma geométrica do duto de alimentação de um ciclone como secador. Proceedings of the 11<sup>th</sup> Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering (2006).

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).

Fortes, M.; Okos, M. R., Advances in drying, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, Chapter five: Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains, vol. 1, p. 119-154 (1980).

FORTUNA, A. O. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações. São Paulo: Editora USP, (2000).

Franco, N. B. Cálculo Numérico. São Paulo: Person Prentice Hall, (2006).

Gonçalves, E. C., Secagem ciclônica do resíduo da indústria processadora de laranja. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1996).

Gomese, M. A. Destoxificação de Hidrolisados Lignocelulósicos Visando à Obtenção de Etanol 2G. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, 2015.

Hsieh, K. T. e Rajamani, R. K., Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow. AIChE Journal, Vol. 37, nº 5, pp. 735-746 (1991).

Ji, Zhongli; Xiong Z.; Wu, X.; Chen, H.; Wu, H., Experimental investigations on a cyclone separator performance at a extremely low particle concentration, Powder Technology (2009).

Lima, A. G. B., Estudo da secagem e dimensionamento de secagem de casulos do bicho-da-seda. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 195 p. (1995).

Lima, A. G. B., Fenômeno de difusão esferodais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1999).

Maliska, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

Nascimento, J. J. S., Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 199 p. (2002).

Nebra, S. A., Secagem pneumática de bagaço de cana. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1985).

Oliveira, L. F., Secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Lavras, MG (2010).

Oliveira, L. F.; Tosato, P. G.; Fagner, M.; Ribeiro, M.; Fonseca, B. E.; Carvalho, A. G. S.; Corrêa, J. L. G., Secagem de bagaço de cana obtido em duas condições diferentes de teor de umidade. XIX Congresso de Pós-Graduação da UFLA (2010).

Oliveira, V. A., Transferência de calor e massa no interior de sólidos com forma esferoidal prolata via termodinâmica dos processos irreversíveis. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (2006).

PALADINO, E., E. Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial. 263p. Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, (2005).

Park, K. J.; Antonio, G. C.; Oliveira, R. A.; Park, K. J. B. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. FEAGRI, UNICAMP, Campinas (2007).

Patankar, S. V. Numerical heat transfer and fluids flow. Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences, 196p., Ed. Taylor & Francis, (1980).

Pericleous, K. A., M. Mathematical Simulation fo Hydrocyclones, Appl Math. Modeling, Vol 11, pp. 242-255 (1987).

Peres, A. P.; Mori, M.; Meier, H. F., Simulação do escoamento gás particulados em um ciclone industrial utilizando CFD. XXV CILAMCE, Recife, (2004).

Ranade, V.V., Computacional flow modeling for chemical reactor engineering process systems series”, v.5, Academic Press, Pune, India (2002).

Ruggiero, M. A. G.; Lopes, V. L. R. Cálculo numérico: Aspectos teóricos e computacionais. 2 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, (1996).

Santos, J. S. S.; Farias Neto, S. R.; Lima, A. G. B.; Crivelaro, K. C. O. Transporte de óleos pesados em catenárias via técnica core-flow – Modelagem e Simulação, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, (2010).

Silva, C. M. D. P. S., Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem e desenvolvimento de software com aplicação à secagem de banana. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (2010).

Silva, C. M. D. P. S. ; Silva, W. P.; Gomes, J. P. ; Nascimento, P. L. ; O. Farias, V. S., Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation”, In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, v. 1. p. 1-10 (2011).

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, M. A., Estudo da secagem em ciclone. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1991).

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

Silva, W. P.; Precker, J. W.; Lima, A. G. B.; Drying Kinetics of Lima Bean (*Phaseolus lunatus*) Experimental Determination and Prediction by Diffusion Models. *International Journal of Food Engineering*, v.5, n.3, p. 1-21 (2009).

Silva, W. P. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (2007).

Souza, J. A. R. Secagem de sólidos via cyclone: modelagem e simulação. Tese de Doutorado, Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

Steffe, J. F.; Singh, R. P. Liquid diffusivity of rough rice components. *Transactions of the ASAE*, v.23, n° 3, pp. 767-774 (1980).

Strumillo, C.; Kudra, T., *Drying: Principles, applications and design*. Gordon and Science Publishers, New York (1986).

Svarovsky, L., *Solid-liquid separation*. Editora Butterworth, England, Fourth Edition (2000).

Tavares, D. P. S. escoamento trifásico não-Isotérmico em oleodutos horizontais com vazamento: Modelagem e simulação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, (2012).

VEERSTEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 503p., 2 ed., England: Ed. Pearson Education Limited, (2007).

Wang, B.; Xu, D. L.; Xiao, G. X.; Chu, K. W.; Yu, A. B. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. In: 3<sup>o</sup> International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Austrália.

Yalcin, T.; Kaukolinen, E.; Byers, A. Axial inlet cyclone for mineral processing applications. *Minerals Engineering*, vol. 16, pp 1375-1381 (2003).