

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE UM ALIMENTADOR CICLÔNICO PARA PIV

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Marcel Amaro e Andrade de Moraes
Souza e Silva

Orientador: Marcos de Mattos Pimenta

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

**Silva, Marcel Amaro e Andrade de Moraes Souza e
Estudo de um alimentador ciclônico para PIV /
M.A.A.M.S. e Silva. – São Paulo, 2011.
48 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Partículas (Física nuclear) 2. Mecânica dos fluídos
computacional 3. Instrumento óptico I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II. t.**

RESUMO

O propósito deste trabalho de formatura é estudar um alimentador ciclônico de partículas, que tem por finalidade auxiliar na obtenção de imagens de melhor qualidade em medições por método Particle Image Velocimetry (PIV).

Para este estudo, será descrito o funcionamento do método PIV e a importância das partículas traçadoras, além da definição de um modelo de estudo e sua simulação em CFD.

Para tanto, o modelo será desenvolvido e simulado utilizando-se os aplicativos SolidWorks e Fluent, respectivamente. Como resultado da simulação, espera-se obter os campos de velocidades do fluido no interior do alimentador para avaliar seu comportamento. Baseando-se nos resultados, uma melhoria no projeto é proposta.

ABSTRACT

The purpose of this graduation work is to study a cyclone particle seeder, which is meant to assist in obtaining better quality images in Particle Image Velocimetry (PIV) measurements.

For this study, the working principle of the PIV method and the significance of the tracing particle will be described, besides the definition of a study model and its simulation in CFD.

The model will be developed and simulated using the softwares SolidWorks and Fluent, respectively. As result of the simulation, is expected to obtain the velocity flow fields within the seeder to evaluate its behavior. Based on the result, an improvement of the project is proposed.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de medição PIV.....	12
Figura 3.2 - Imagem antes do processamento.....	13
Figura 3.3 - Imagem após processamento.....	14
Figura 3.4 - Representação esquemática.....	16
Figura 3.5 - Pico de correlação.....	17
Figura 3.6 - Seção de um bocal Laskin.....	20
Figura 3.7 - Leito fluidizado.....	21
Figura 3.8 - Alimentador ciclônico.....	22
Figura 4.1 - Seção transversal do cilindro.....	25
Figura 4.2 - Alimentador do tipo ciclônico.....	25
Figura 4.3 - Desenho do protótipo.....	27
Figura 4.4 - Desenho do protótipo (vista explodida).....	27
Figura 4.5 - Simulação ilustrativa em FloXpress.....	28
Figura 4.6 - Janelas de interface do Fluent.....	30
Figura 4.7 - Interface do Gambit.....	30
Figura 5.1 - Vista frontal de mesh-2.....	34
Figura 5.2 - Vista de topo de mesh-2.....	34
Figura 5.3 - Vista lateral de mesh-2.....	35
Figura 5.4 - Vista isométrica de mesh-2.....	35
Figura 5.5 - Perfil de velocidades na saída.....	36
Figura 5.6 - Perfil de velocidades a 70 mm acima do fundo.....	36
Figura 5.7 - Campo de velocidades na saída.....	37
Figura 5.8 - Campo de velocidades em uma seção transversal do cilindro.....	38
Figura 5.9 - Campo de velocidades em seção paralela ao eixo Z.....	39
Figura 5.10 - Vista global do escoamento.....	39
Figura 5.11 - Malha da melhoria proposta.....	40
Figura 5.12 - Comparação das velocidades no eixo Z a 5 mm do fundo.....	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Comportamento de partículas em escoamento turbulento.....	23
Tabela 3.2 - Partículas traçadoras em escoamento gasoso.....	23
Tabela 4.1 - Dimensões principais do modelo.....	26
Tabela 5.1 - Características das malhas	33
Tabela 5.2 - Características da simulação de mesh-alternative.....	40

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	2
1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 MÉTODO <i>PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY</i> (PIV)	11
3.1.1 CONFIGURAÇÃO	12
3.1.2 CORRELAÇÃO	14
3.1.3 FONTE DE ILUMINAÇÃO	17
3.1.4 CÂMERA	18
3.2 PARTÍCULAS TRAÇADORAS	18
3.2.1 TAMANHO	19
3.2.2 ALIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS LÍQUIDAS	20
3.2.3 ALIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS	20
3.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS LÍQUIDAS E SÓLIDAS	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1 MODELO CONSTRUTIVO	24
4.1.1 PARÂMETROS INICIAIS	24
4.1.2 DESENHO EM CAD	26
4.1.3 SIMULAÇÃO ILUSTRATIVA	28
4.2 SIMULAÇÕES EM CFD	29
4.2.1 SOFTWARE	29
4.2.2 MALHA	30
4.2.3 SIMULAÇÕES NO FLUENT	31
5. RESULTADOS	33

5.1	MODELO PROPOSTO	33
5.2	PROPOSTA DE MELHORIA	40
6.	CONCLUSÃO	42
7.	BIBLIOGRAFIA	43
	ANEXO A.....	45

1. INTRODUÇÃO

Métodos de medição óptica são muito usados em diversas aplicações devido à sua propriedade pouco intrusiva, ou seja, possibilidade de medir campos de velocidades em escoamentos com mínima interferência no mesmo. Dentre esses métodos, destaca-se o método Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry - PIV*), que faz uso de partículas traçadoras para a obtenção de campos de vetores em duas dimensões.

Na obtenção de imagens de melhor qualidade e conseqüentemente de medições mais precisas, é dada importância à escolha adequada das partículas traçadoras. O alimentador do tipo ciclônico é relativamente novo em comparação aos usuais bocais Laskin (Melling 1997), portanto as propriedades construtivas do mesmo serão usadas como base a fim de reduzir as modificações em bancadas de testes.

O modelo será considerado satisfatório se, ao final da simulação, for observado o comportamento ciclônico do escoamento de ar no interior do alimentador. Considerando que as partículas traçadoras possuem densidade próxima à do ar, é possível ser assumido que o escoamento seria capaz de carregar as partículas depositadas no alimentador, deste modo sendo o comportamento das partículas efetivamente avaliado.

2. OBJETIVOS

A proposta deste trabalho de formatura é estudar um alimentador ciclônico de partículas para ser usado em medições pelo método PIV, sendo desenvolvidos um modelo genérico e seu estudo em fluidodinâmica computacional (CFD), de modo a comprovar o escoamento ciclônico no interior do alimentador.

Utilizando-se do software SolidWorks para o desenho do modelo, e dos softwares Gambit e Fluent para a construção da malha e simulação do modelo, pode-se avaliar a efetividade das hipóteses impostas no modelo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração deste trabalho de formatura, serão feitas considerações sobre o funcionamento do método PIV, sua estrutura e componentes principais. Será discutida também a influência das partículas traçadoras nas imagens resultantes, além de descritas como são realizadas as alimentações de partículas líquidas e sólidas. Por fim, será apresentado o material usado para as partículas traçadoras.

3.1 Método *Particle Image Velocimetry* (PIV)

O estudo de escoamentos é um importante ramo da engenharia, através do qual é possível conhecer propriedades e informações do escoamento. Para tanto, diversos métodos de medição podem ser aplicados.

Particle Image Velocimetry (PIV), também conhecido como Velocimetria por Imagem de Partículas, é um método de medição óptica que permite a captura de perfis instantâneos de velocidades através do rastreamento de partículas presentes no fluido. Este método já existe há mais de 20 anos, e deriva de métodos como *Laser Speckle Velocimetry* (LSV) e *Laser Doppler Velocimetry* (LDV) (Adrian, 2004). Características importantes deste método são (Raffel et al, 2007):

- Propriedade pouco intrusiva, que permite o uso em escoamentos com ondas de choque ou camadas limites próximas a paredes, evitando o uso de tubos de Pitot ou outros tipos de métodos intrusivos;

- Medição de velocidade indireta através de partículas traçadoras (adicionadas ou já presentes no escoamento), assumindo que as partículas foram selecionadas de modo que só causem uma pequena interferência ao escoamento dentro de certa margem;

- Medição do campo completo e não apenas medições pontuais, como na maioria dos métodos de medição, por exemplo, *Laser Doppler Velocimetry* (LDV).

Aplicações para este método vão desde o estudo em túneis de vento e de motores de combustão interna (Meyden, 2009; Yamakawa et al, 2003) até componentes biomecânicos (Ferrara et al, 2010).

3.1.1 Configuração

Uma instalação de medição em PIV consiste de uma câmera, um laser de alta potência e um arranjo óptico para converter a luz do laser em um plano iluminado, como pode ser observado na figura 3.1. Partículas traçadoras são iluminadas em um plano do escoamento ao menos duas vezes dentro de um pequeno intervalo de tempo conhecido. A luz refletida pelas partículas traçadoras é capturada pela câmera para análise de correlação.

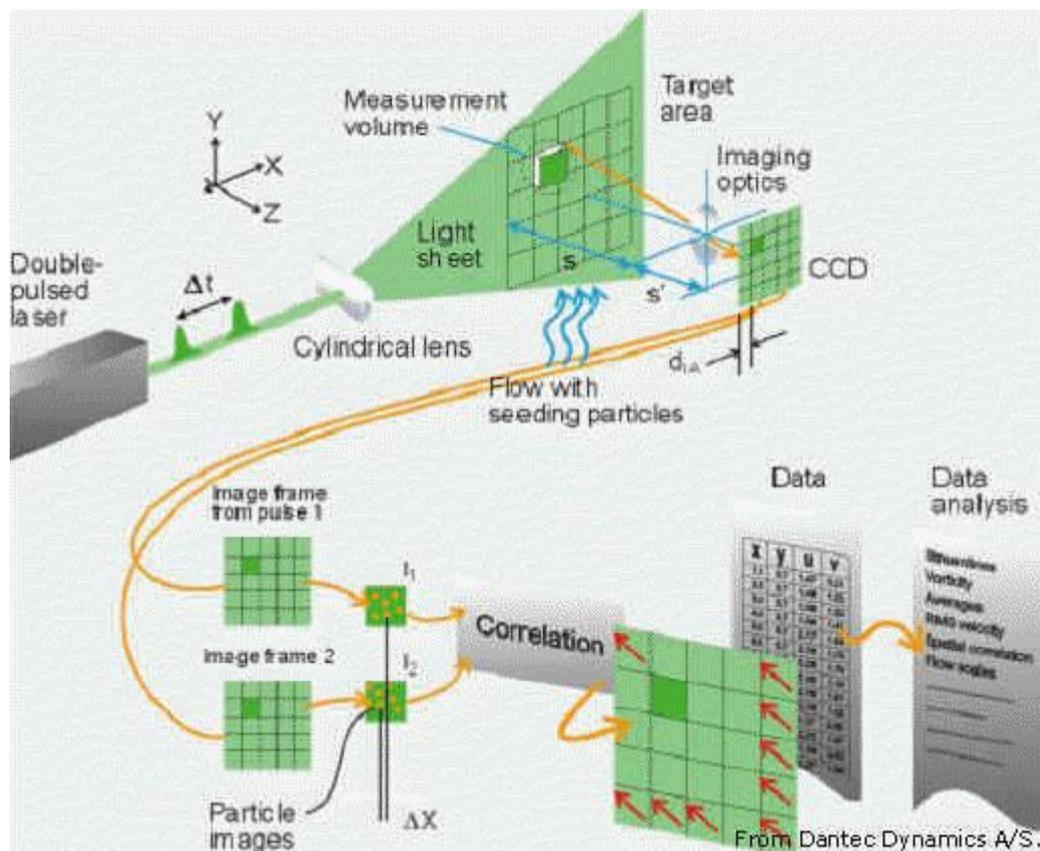


Figura 3.1 - Esquema de medição PIV (Meyden, 2009)

As imagens são divididas em diversas subáreas chamadas “áreas de interrogação”, onde pode ser assumido que as partículas se moveram homogeneamente entre as duas iluminações. Levando em conta o tempo entre as duas imagens e certa deformação das áreas de interrogação, as mesmas são correlacionadas (Jensen, 2004) através de softwares computacionais como o PIVview e o campo de velocidades pode então ser gerado.

Exemplos de medições (Meyden, 2009) podem ser vistos na figura 3.2 (antes do processamento) e na figura 3.3 (depois do processamento).

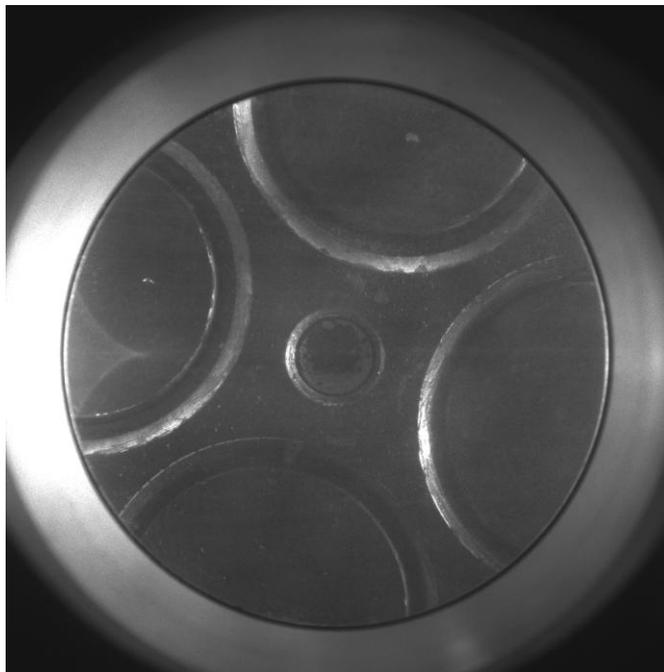


Figura 3.2 - Imagem antes do processamento

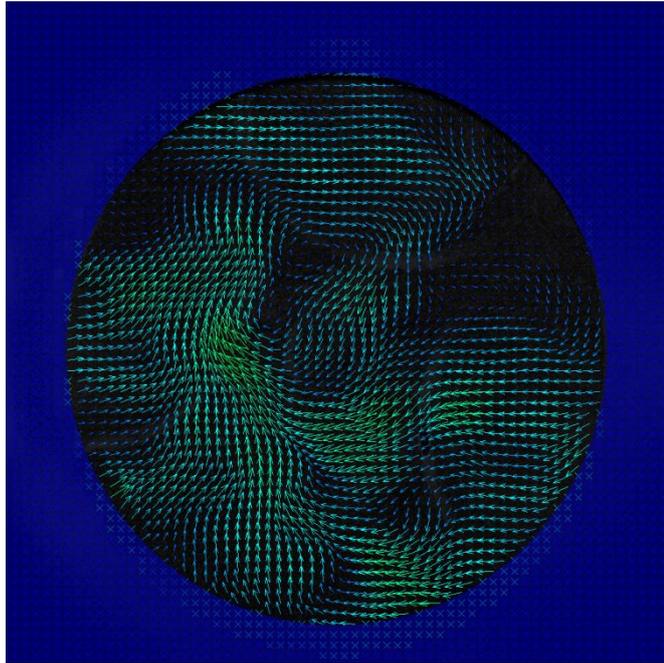


Figura 3.3 - Imagem após processamento

A qualidade da imagem é influenciada basicamente por três parâmetros:

- Fonte de iluminação;
- Câmera;
- Partículas traçadoras.

Dentre os fatores que determinam a qualidade da medição obtida, os dois primeiros serão descritos, e então será dada atenção especial às partículas traçadoras e sua influência.

3.1.2 Correlação

Como não é possível reconhecer o deslocamento de cada partícula individualmente, um certo número de partículas deve estar presente em cada área de interrogação. Por métodos estatísticos como auto-correlação ou correlação cruzada, o

vetor deslocamento local médio das partículas traçadoras entre duas imagens sucessivas pode ser determinado para cada área de interrogação.

Quando as duas iluminações são obtidas em uma imagem, é aplicada auto-correlação. O caso mais comum é quando as duas iluminações são obtidas em duas imagens separadamente, e neste caso é utilizada correlação cruzada. Além disso, o número de áreas de interrogação determina o número de vetores obtidos.

O campo de intensidade de imagem ou distribuição de intensidade $I(\bar{x}, \bar{\Gamma})$ é determinado para uma área de interrogação e é dado por (Meyden, 2009):

$$I(\bar{x}, \bar{\Gamma}) = \sum_{i=1}^N V_0(\bar{X}_i) \tau(\bar{x} - \bar{x}_i) \quad (3.1)$$

onde N é o número de partículas na área de interrogação e:

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad \bar{x}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}, \quad \bar{\Gamma} = \begin{pmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_N \end{pmatrix} \text{ com } \bar{X}_i = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix},$$

onde \bar{x} representa as coordenadas em uma área de interrogação do plano da imagem, \bar{x}_i é o vetor posição da partícula no plano da imagem, $\bar{\Gamma}$ descreve os vetores coordenadas de todas as partículas i no volume de interrogação do plano de medição, e \bar{X}_i são as coordenadas da partícula no volume de medição. Como o plano iluminado pelo laser possui uma espessura, \bar{X}_i consiste de três coordenadas, enquanto \bar{x}_i possui apenas duas coordenadas, já que o plano da imagem é bidimensional.

A posição da partícula e a posição da imagem da partícula são relacionadas por um fator de ampliação M tal que $X_i = x_i/M$ e $Y_i = y_i/M$. O fator de ampliação é igual a $M = z_0/Z_0$ onde z_0 é a distância entre o plano da imagem e a lente da câmera e Z_0 é a distância entre a lente da câmera e o plano do objeto, como pode ser observado na figura 3.4 (Raffel et al, 2007). A função de transferência V_0 representa a energia luminosa da imagem de uma partícula e sua conversão em um sinal eletrônico, e a função de propagação de pontos τ descreve a resposta do sistema de

imagem para um objeto. É assumido que as imagens das partículas não se sobrepõem em uma área de interrogação.

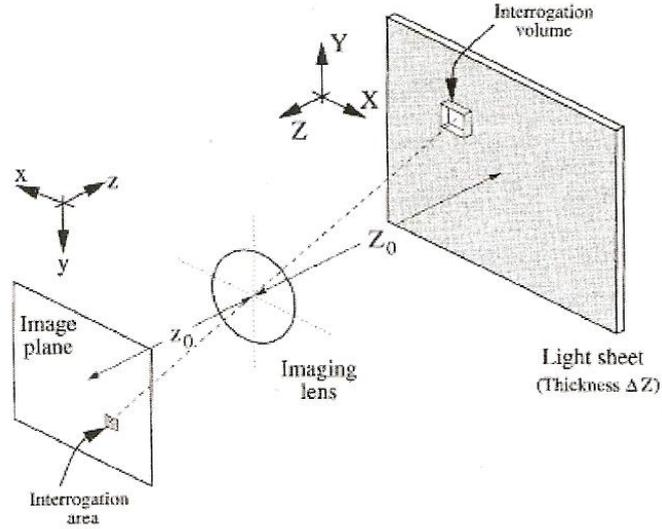


Figura 3.4 - Representação esquemática

Para efeito de correlação cruzada, o campo de intensidade de imagem para a segunda iluminação é dado por:

$$I'(\bar{x}, \bar{\Gamma}) = \sum_{j=1}^N V_0'(\bar{X}_j + \bar{D}) \tau(\bar{x} - \bar{x}_j - \bar{d}) \quad (3.2)$$

onde \bar{D} é o deslocamento de todas as partículas em um volume de interrogação e \bar{d} é o deslocamento de uma partícula individualmente.

A função de correlação cruzada $R_{II}(\bar{s}, \bar{\Gamma}, \bar{D})$ é a média espacial do campo de intensidade de imagem da primeira iluminação multiplicado pelo campo de intensidade de imagem da segunda iluminação e pode ser escrito como (Raffel et al, 2007):

$$R_{II}(\bar{s}, \bar{\Gamma}, \bar{D}) = \frac{1}{a_I} \sum_{i,j=1} V_0(\bar{X}_i) V_0(\bar{X}_j + \bar{D}) \cdot \int_{a_I} \tau(\bar{x} - \bar{x}_i) \tau(\bar{x} - \bar{x}_j + \bar{s} - \bar{d}) d\bar{x} \quad (3.3)$$

onde a_I é a área de interrogação e \bar{s} é o vetor separação, sendo as coordenadas no plano de correlação. O vetor separação é dado por $\bar{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix}$.

A função de correlação cruzada R_{II} pode ser decomposta em três termos: R_D , R_F e R_C . O termo R_D representa a correlação de partículas idênticas na primeira e na segunda iluminação, e apresenta o seu máximo quando a distância \bar{s} é igual ao deslocamento \bar{d} (*correlation peak*). O deslocamento médio das partículas dentro do volume de interrogação é então determinado pela distância \bar{s} entre o centro do plano de correlação e a posição do maior pico de correlação R_D . Os termos R_F e R_C representam a interferência média de correlações aleatórias e a correlação média no volume de interrogação, respectivamente, e o conjunto pode ser observado na figura 3.5.

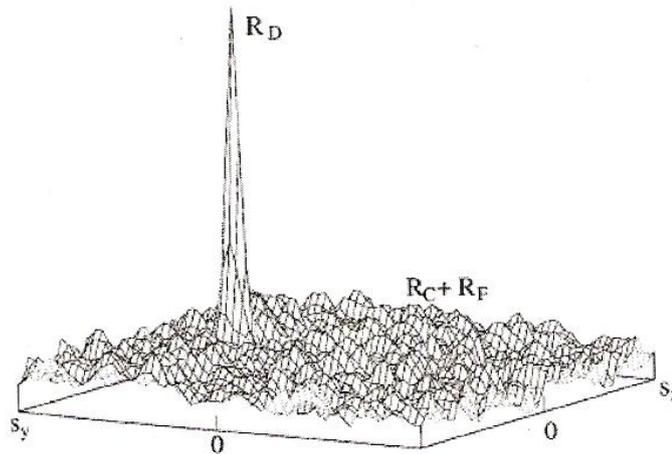


Figura 3.5 - Pico de correlação

Este método de correlação cruzada não é o único existente, porém é o mais utilizado em softwares de análise como PIVview.

3.1.3 Fonte de Iluminação

Lasers são comumente usados devido a sua habilidade de emitir luz monocromática com uma alta densidade de energia. Características desejáveis em lasers para PIV são:

- Energia por pulso mais alta possível (consequentemente mais luz refletida);
- Compatibilidade entre luz emitida e margem de comprimentos de onda detectados pela câmera;
- Habilidade do laser de emitir dois pulsos sucessivos dentro de um curto e regulável intervalo de tempo.

3.1.4 Câmera

Os sensores mais frequentemente usados em câmeras digitais são *Charged Coupled Device (CCD)* e *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)*. O sensor CCD converte luz (fótons) em carga elétrica (elétrons), portanto o sinal é convertido de analógico para digital. O sensor CMOS utiliza, para cada pixel, diversos transistores para amplificar e transportar a carga através de fios, deste modo o sinal já é digital. Ainda que as imagens de uma câmera com sensores CCD sejam de melhor qualidade que as de uma câmera com sensores CMOS, câmeras com sensores CMOS são mais adequadas para imagens em alta velocidade (Hain et al, 2007).

3.2 Partículas traçadoras

O papel das partículas traçadoras é fundamental no funcionamento adequado do método PIV. É a luz refletida pelas partículas em cada iluminação e capturada pela câmera nas imagens que será utilizada para correlação em computador e resultará nos campos vetoriais correspondentes.

É importante que as partículas sejam adicionadas ao escoamento de uma forma homogênea. A influência do tamanho e do modo de alimentação é discutida a seguir.

3.2.1 Tamanho

O tamanho das partículas possui grande importância no resultado. Aumentar o tamanho das partículas aumenta a reflexão de luz; ao passo que reduzi-lo aumenta sua propriedade de acompanhar o escoamento. Além disso, as partículas devem possuir a mesma densidade (ou mais próxima possível) da densidade do fluido estudado, reduzindo o erro entre a velocidade local da partícula e do escoamento. O *velocity lag*, definido como a diferença entre a velocidade da partícula e a velocidade local, pode ser derivado da lei de Stokes e é definido como (Raffel et al, 2007):

$$U_s = d_p^2 \frac{\rho_p - \rho_f}{18\mu} a \quad (3.4)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula, ρ_p e ρ_f são as densidades da partícula e do fluido, μ é a viscosidade dinâmica e a é a aceleração local; e assumindo partículas esféricas em um fluido viscoso sob baixo número de Reynolds. Para garantir um bom acompanhamento das partículas com o fluido, o *velocity lag* deve ser baixo.

A difração também desempenha um papel importante na qualidade das imagens. A luz refletida por uma partícula pequena não aparece como um ponto na imagem, mas forma um padrão de difração de Airy (Raffel et al, 2007). O diâmetro d_{diff} , que é o menor diâmetro possível para uma dada configuração, é dado por:

$$d_{diff} = 2.44f_{\#}(1 + M)\lambda \quad (3.5)$$

onde $f_{\#}$ é a razão entre a distância focal e o diâmetro de abertura da câmera, M é a ampliação e λ é o comprimento de onda do laser.

Portanto, o diâmetro da partícula d_i é definido como (Raffel et al, 2007):

$$d_i = \sqrt{(Md_p)^2 + d_{diff}^2} \quad (3.6)$$

3.2.2 Alimentação de partículas líquidas

Usualmente, a alimentação de partículas líquidas é feita através de nebulizadores como o bocal Laskin. O bocal Laskin consiste de um tubo cilíndrico imerso em um recipiente preenchido com óleo, através do qual ar pressurizado é injetado (Meyden, 2009); sendo que o tubo possui quatros furos posicionados transversalmente. O ar pressurizado cria no óleo pequenas bolhas contendo partículas finamente atomizadas devido à força cisalhante entre o ar e o metal. As bolhas com partículas de óleo explodem na superfície e liberam as partículas de óleo no escoamento. O fluxo de geração de partículas pode ser aumentado utilizando vários bocais Laskin em um mesmo reservatório (Melling, 1997).

A figura 3.6 apresenta a seção transversal de um bocal Laskin, com a vista inferior da alimentação.

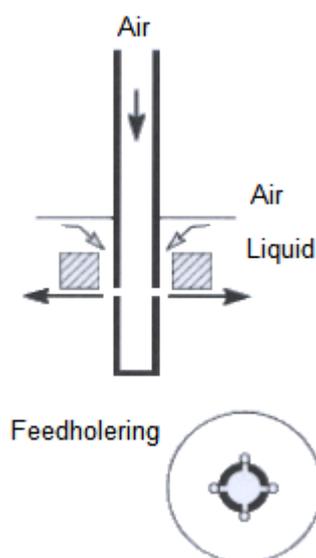


Figura 3.6 - Seção de um bocal Laskin

3.2.3 Alimentação de partículas sólidas

Para alimentação de partículas sólidas, geralmente são utilizados alimentadores ciclônicos ou leitos fluidizados (Melling, 1997). Nos leitos fluidizados (figura 3.7), as partículas sólidas são depositadas no alimentador e, através de um

fluxo de ar, são suspensas. No entanto, as partículas tendem a se agregar devido a fatores umidade do gás e das partículas e conseqüentemente há variação no tamanho das partículas. Além disso, partículas extremamente secas podem diminuir a dispersão devido a forças eletrostáticas.

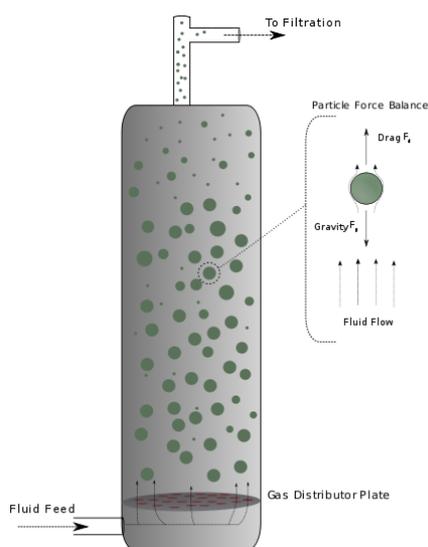


Figura 3.7 - Leito fluidizado

Em alimentadores ciclônicos (figura 3.8), as partículas sólidas estão presentes no fundo do alimentador enquanto ar sob alta pressão é injetado em ângulo, rente à parede, para gerar um efeito de ciclone e induzir o fluxo de partículas pelo centro do ciclone. Uma vantagem do alimentador ciclônico em comparação com o alimentador de leito fluidizado é a redução da aglomeração das partículas, gerando então um fluxo de partículas com diâmetro mais constantes.

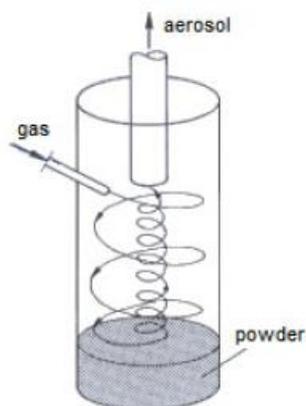


Figura 3.8 - Alimentador ciclônico

Outros modos de alimentação de partículas sólidas como o *spark discharge generator* e o dispersor ultrassônico existem, porém com funcionamento mais complexo e restritos tipos de aplicações.

3.2.4 Comparação entre partículas líquidas e sólidas

Fisicamente, partículas sólidas são difíceis de dispersar devido a forças eletrostáticas e tendem a se aglomerar, enquanto partículas líquidas tendem a evaporar rapidamente. Partículas líquidas possuem a vantagem de uma razão de produção mais constante do que se é possível com partículas sólidas; no entanto, podem se depositar em janelas em escoamentos internos e formar uma camada de filme que pode causar distorção por refração e comprometer ou até inviabilizar a captura de imagens, enquanto que com partículas sólidas esse efeito é pouco impactante. Em escoamentos com chamas e sob altas temperaturas, partículas sólidas não-voláteis são essenciais (Melling, 1997).

Microbalões de acrilonitrila Expancel 551 DE 40 com diâmetro de $40 \mu m$ apresentam precisão no acompanhamento do escoamento de mais de 95% para ar a pressão e temperatura padrão. Além disso, geram aproximadamente 100 vezes a eficiência de luz refletida de partículas de óleo de 2 a $3 \mu m$ (Towers et al, 2004).

As tabelas 3.1 e 3.2 mostram comparativos entre diversos materiais para partículas traçadoras (Melling, 1997):

Tabela 3.1 - Comportamento de partículas em escoamento turbulento

Particle	ρ_p (kg m ⁻³)	Gas (10 ⁵ Pa)	Density ratio s	Viscosity ν (m ² s ⁻¹)	f_c (kHz)	Sk_c	d_p (μ m)
TiO ₂	3500	Air (300 K)	2950	1.50×10^{-5}	1 10	0.0295	1.44 0.45
Al ₂ O ₃	3970	Flame (1800 K)	20250	3.00×10^{-4}	1 10	0.0113	2.46 0.78
Glass	2600	Air (300 K)	2190	1.50×10^{-5}	1 10	0.0342	1.67 0.53
Olive oil	970	Air (220 K)	617	1.45×10^{-5}	1 10	0.0645	3.09 0.98
Microballoon	100	Air (300 K)	84.5	1.50×10^{-5}	1 10	0.1742	8.50 2.69

Tabela 3.2 - Partículas traçadoras em escoamento gasoso

Material	d_p (μ m)	Laser	Pulse energy, pulse time	Light sheet		Reference
				w (mm)	t (mm)	
TiO ₂ ($m = 2.6$, $\rho = 3500$ kg m ⁻³)	<1	Nd:YAG	10 mJ, 20 ns	15	0.3	Reuss <i>et al</i> (1989)
TiO ₂ , ZrO ₂	0.7–1	Nd:YAG	110 mJ, 12 ns			Paone <i>et al</i> (1996)
Al ₂ O ₃ ($m = 1.76$, $\rho = 3970$ kg m ⁻³)	0.3	Nd:YAG	400 mJ		0.2	Muniz <i>et al</i> (1996)
	3	Nd:YAG	9 mJ, 6 ns			Anderson <i>et al</i> (1996)
	0.8	Ruby	20 ns	150	≈ 1	Krothapalli <i>et al</i> (1996)
Polycrystalline	30	Nd:YAG	135 mJ, 6 ns			Grant <i>et al</i> (1994)
Glass	30	Ruby	30 mJ, 30 ns			Schmidt and Löffler (1993)
Oil smoke	1	Ruby	5 J			Stewart <i>et al</i> (1996)
Corn oil	1–2	Nd:YAG	100 mJ			Jakobsen <i>et al</i> (1994)
Oil	1–2	Nd:YAG	120 mJ		0.4	Westerweel <i>et al</i> (1993)
Olive oil ($m = 1.47$, $\rho = 970$ kg m ⁻³)	1.06	Nd:YAG	70 mJ, 16 ns	200	0.5	Höcker and Kompenhans (1991) Fischer (1994) Raffel <i>et al</i> (1996)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Modelo construtivo

Como exposto anteriormente, as principais opções para alimentação de partículas sólidas são por leito fluidizado e alimentador ciclônico. Dadas suas vantagens como simplicidade e reduzida aglomeração de partículas, o alimentador do tipo ciclônico é escolhido para o estudo.

4.1.1 Parâmetros iniciais

Após o conceito ter sido definido, um modelo geométrico deve ser feito para dar início a simulação do escoamento em seu interior. O mesmo será baseado em um bocal Laskin existente em uma bancada de estudos da Eindhoven University of Technology, nos Países Baixos (Meyden, 2009), deste modo necessitando de poucas mudanças na bancada.

Esta bancada consiste em um cilindro de um motor de veículo pesado baseado em um motor Ricardo Proteus e um cabeçote de caminhão DAF MX. Visa analisar o escoamento de ar no interior do cilindro pelo método PIV para implementação do ciclo de combustão *Premixed Charge Compression Ignition* (PCCI), um misto de sistema de ignição por faísca (Otto) e ignição por compressão (Diesel) que tem por objetivo diminuir a emissão de NO_x e particulado. O esquema da bancada pode ser visto na figura 4.1.

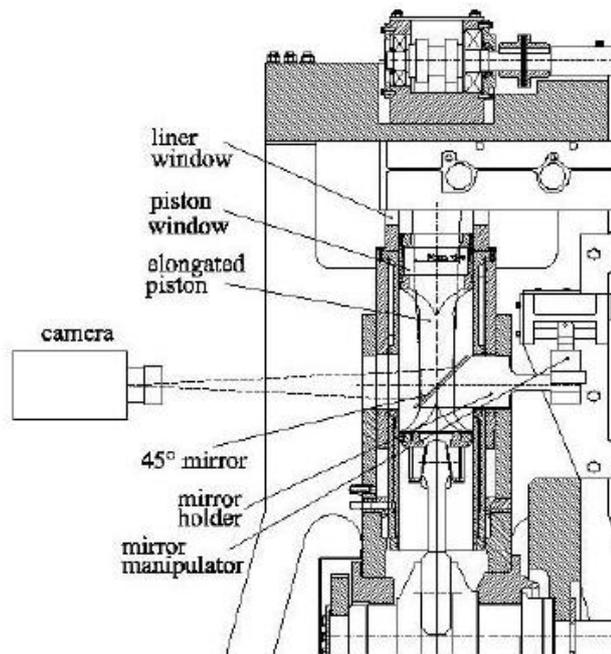


Figura 4.1 - Seção transversal do cilindro

O modelo genérico é similar ao da figura 4.2, com a relação altura-diâmetro entre 1,5 e 2 e diâmetro interno de cerca de 100mm, como sugerido em contato com o Prof. David Towers, da School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, de Edimburgo, Escócia (Towers et al, 2004).

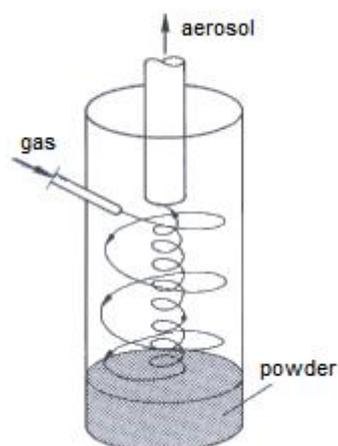


Figura 4.2 - Alimentador do tipo ciclônico

4.1.2 Desenho em CAD

O modelo é gerado em SolidWorks para análise de viabilidade de construção e ilustração do conceito, portanto os desenhos procuram ser de forma mais realista possível. Como o modelo é baseado em um bocal Laskin já existente, as áreas de fixação do dispositivo na bancada, o material (aço carbono SAE 1020) e a espessura do núcleo são os mesmos do bocal, já que são parâmetros secundários e a princípio não interferem no resultado. Os diâmetros dos tubos de entrada e saída são compatíveis com as mangueiras da bancada de testes, e não são variados para não introduzir no escoamento vórtices adicionais e perdas de carga.

As dimensões principais (altura, diâmetro e ângulo do tubo de entrada) são escolhidas de modo a obter um modelo genérico e intermediário; estudos podem ser feitos variando esses parâmetros para avaliar suas contribuições.

A tabela 4.1 detalha as dimensões principais do modelo, e seus desenhos em CAD podem ser vistos nas figuras 4.3 e 4.4. Mais detalhes podem ser vistos nos desenhos de conjunto do dispositivo, presentes no anexo A.

Tabela 4.1 - Dimensões principais do modelo

Dimensão	Valor
Altura do núcleo	160 mm
Diâmetro interno	100 mm
Ângulo do tubo de entrada	25° (em relação à horizontal)
Diâmetro interno do tubo de entrada	2 mm
Diâmetro interno do tubo de saída	7,5 mm

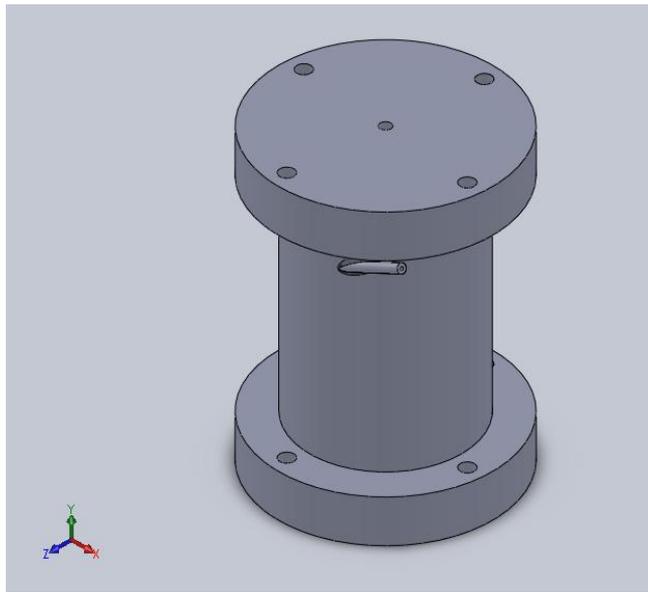


Figura 4.3 - Desenho do protótipo

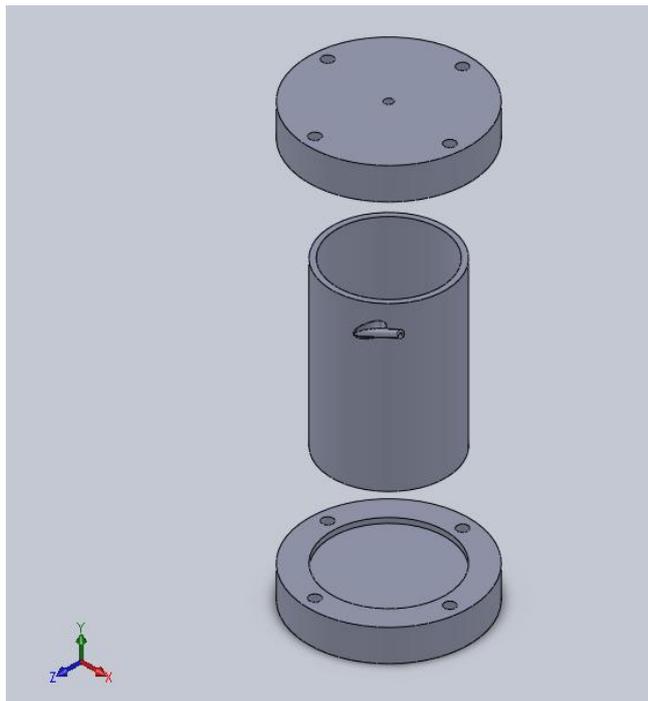


Figura 4.4 - Desenho do protótipo (vista explodida)

As mangueiras são rosqueadas nos tubos de entrada e saída, que conectam um compressor de ar comprimido e a entrada da bancada de testes respectivamente. O dispositivo é fixado pelas tampas na bancada usando parafusos e porcas.

4.1.3 Simulação ilustrativa

Após a geometria ter sido concebida no software SolidWorks, a ferramenta FloXpress é utilizada para dar uma idéia ilustrativa de como se comportaria o escoamento. A ferramenta FloXpress é simples, *user-friendly* e requer pouco tempo computacional, mas seus resultados não são confiáveis como os de uma simulação CFD.

As únicas condições de contorno requeridas são temperatura e pressão na entrada e a pressão na saída; parâmetros que sozinhos deixam a simulação muito pobre. O resto da geometria é considerado como parede, e transferência de calor é suposta desprezível.

Com uma pressão de 2 bar e temperatura de 293 K na entrada, e pressão de 1 bar na saída, o resultado pode ser visto na figura 4.5. A simulação de fato não apresenta fatos conclusivos e confiáveis, mas já mostra evidências de um comportamento ciclônico do escoamento.

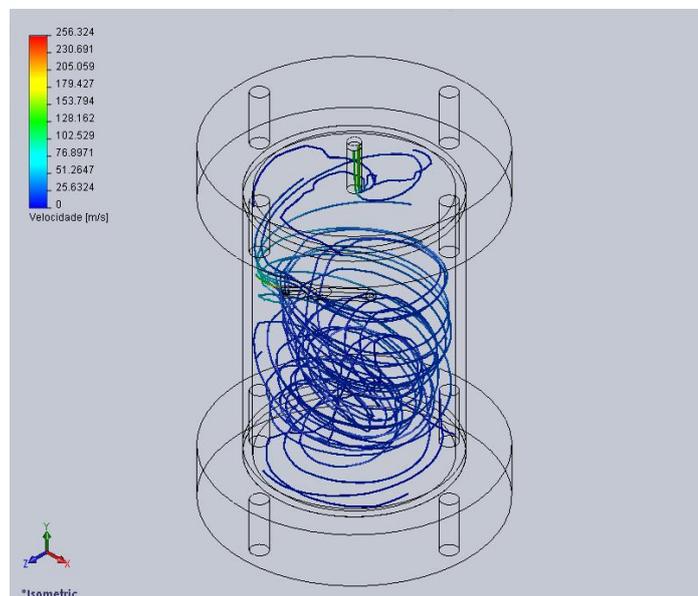


Figura 4.5 - Simulação ilustrativa em FloXpress

4.2 Simulações em CFD

Uma vez que o projeto do alimentador está definido, será feita sua simulação em *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Isto é realizado para analisar em detalhes o escoamento no interior do alimentador e avaliar suas propriedades antes da construção de um protótipo, deste modo otimizando o projeto.

As etapas da simulação serão: criação da malha, realização da simulação e análise dos resultados. Estas etapas se repetirão até ser obtida precisão suficiente dos resultados.

4.2.1 Software

O software Fluent, da Ansys, é capaz de modelar escoamentos, turbulências e transferência de calor em aplicações como escoamento de ar sobre perfis de asa, combustão em fornalhas, fluxo sanguíneo, entre outros (ANSYS FLUENT Brochure, 2010).

Fluent utiliza o método dos volumes finitos para as simulações. O método dos volumes finitos é um método discreto, o que é adequado para simulações numéricas com vários tipos de leis de conservação como massa, momento e energia. Baseado na formulação do volume de controle, o primeiro passo do método é dividir o domínio em diversos elementos (volumes de controle) onde a variável de interesse está localizada no centróide do elemento. O próximo passo é integrar a forma diferencial das equações governantes em cada volume de controle. A equação resultante representa o princípio da conservação da variável dentro do volume de controle (Rübenkönig, 2006).

Características importantes do método dos volumes finitos são que este pode ser usado em geometrias arbitrárias utilizando malhas estruturas ou não-estruturadas, e que o fluxo numérico é conservado de uma célula da discretização para a vizinha. Apesar de ser pouco *user-friendly*, os menus organizados auxiliam na navegação de sua interface, como visto na figura 4.6.

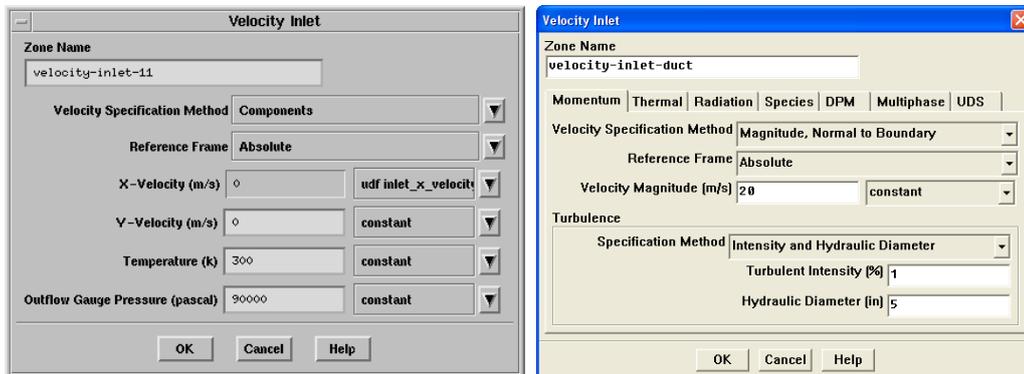


Figura 4.6 - Janelas de interface do Fluent

4.2.2 Malha

Um modelo é criado no software Gambit. O Gambit possui simples interface e gera malhas exportáveis para softwares CFD, como Fluent, como pode ser visto na figura 4.7. Apesar de simples e rápido na geração das malhas, a criação de geometrias muito complexas pode ser um desafio. Além disso, geometrias importadas de softwares CAD podem precisar ser corrigidas no Gambit, já que frequentemente a continuidade dos contornos não se mantém.

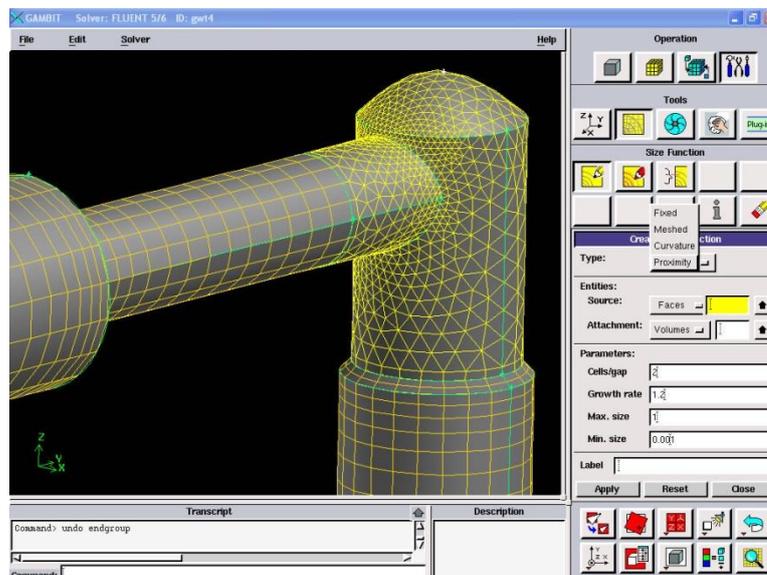


Figura 4.7 - Interface do Gambit

Assumindo que as partículas possuem densidade aproximadamente igual a do ar, é feita a simplificação de apenas escoamento de ar no interior do domínio.

Inicialmente, uma malha grosseira é desenvolvida para avaliação dos resultados iniciais; apesar destes resultados ainda não serem precisos, necessitam de menos tempo computacional. Posteriormente, são desenvolvidas malhas mais refinadas até poder ser concluído dos resultados que o refinamento da malha não interfere mais nos resultados, ou ao menos não interfere dentro de certa margem de tolerância. Quanto mais refinada a malha, melhores os resultados; no entanto mais tempo computacional é necessário.

4.2.3 Simulações no Fluent

Devido à geometria e assimetria do modelo, são utilizadas malhas triangulares nas faces e malhas tetraédricas nos volumes. O tubo de entrada é separado do resto da geometria e as malhas são geradas separadamente; no entanto, a face em comum entre ambos mantém a malha globalmente homogênea. As faces foram geradas utilizando o método Tri/Pave e os volumes utilizando o método TGrid.

Foram geradas três malhas com essas propriedades, onde as malhas *mesh-1* e *mesh-2* possuem funções associadas, com o objetivo de se obter malhas mais refinadas nos tubos de entrada e saída (regiões críticas). Ou seja, como é desejada uma malha mais refinada nestas regiões, no restante da geometria a malha pode ser menos refinada para exigir menos tempo computacional.

No Fluent, um solucionador baseado na pressão é usado baseado em um esquema *Green-Gauss node-based*, já que este é mais adequado do que o padrão esquema baseado em células para malhas triangulares e tetraédricas (FLUENT User's Guide, 2003); também é utilizado o modelo de turbulência *realizable k-epsilon*, que apresenta resultados satisfatórios para modelos onde o gradiente de pressões não é muito alto. É um modelo de duas equações, o que significa que inclui duas equações de transporte extras para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Isso permite que um modelo de duas equações leve em conta efeitos

históricos como convecção e difusão de energia turbulenta. As condições de regime permanente e esquema de discretização de *upwind* de segunda ordem (escoamento contra o fluxo) são também utilizados.

As condições de contorno na entrada são de pressão de 2 bar e temperatura de 300 K, e na saída pressão de 1 bar e temperatura de 300 K; o cálculo é iniciado a partir de todas as células. Energia cinética turbulenta é estabelecida em $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e sua taxa de dissipação é definida como $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$, como definições padrão. Todas as outras faces são consideradas como paredes, e não há troca de calor. A convergência é atingida quando os resíduos ficam abaixo de 10^{-3} .

5. RESULTADOS

5.1 Modelo proposto

As malhas 1, 2 e 3 foram chamadas, respectivamente, de *mesh-0*, *mesh-1* e *mesh-2*. A tabela 5.1 explicita mais detalhes sobre as três malhas.

Tabela 5.1 - Características das malhas

Propriedade	Mesh-0	Mesh-1	Mesh-2
Faces do tubo de entrada – tamanho do intervalo	0.5	0.5	0.3
Volume do tubo de entrada – tamanho do intervalo	1	1	0.3
Face de saída – tamanho do intervalo	1	0.5	0.5
Volume do cilindro – tamanho do intervalo	3	3	2.5
Número de elementos	365.000	525.000	1.000.000
Número de elementos no tubo de entrada	11.000	11.000	63.000
Iterações	2.300	4.700	7.300
Horas computacionais	3	10	35

As figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 mostram as vistas da malha *mesh-2*, onde o tubo de entrada possui 2 mm de diâmetro, a saída possui diâmetro de 7,5 mm, e o cilindro possui diâmetro de 100 mm e altura de 160 mm.

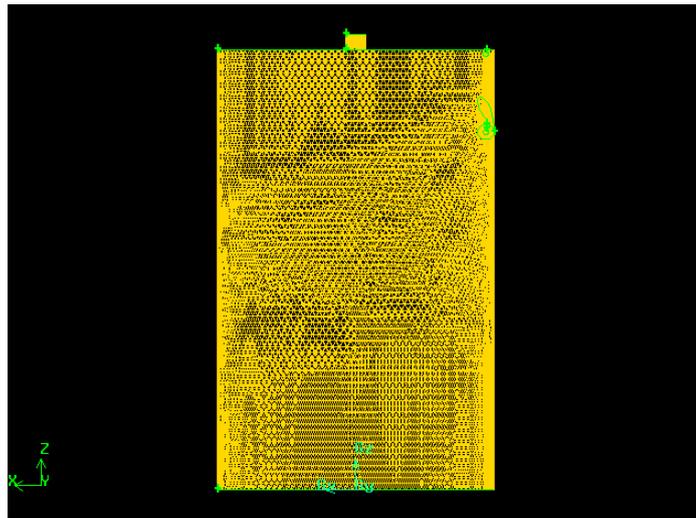


Figura 5.1 - Vista frontal de mesh-2

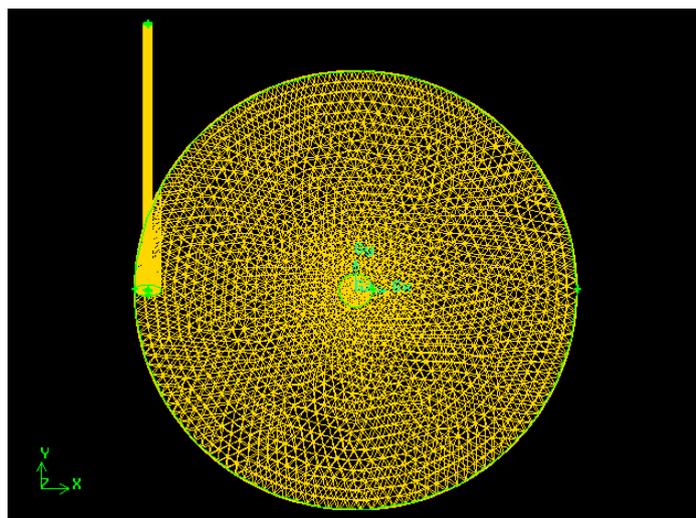


Figura 5.2 - Vista de topo de mesh-2

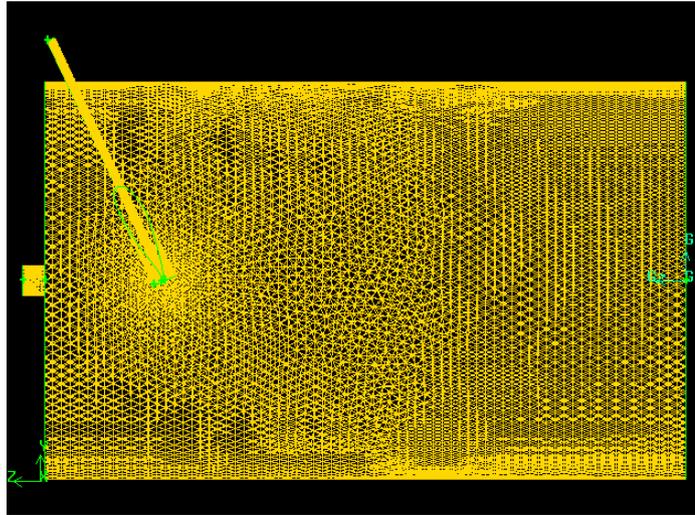


Figura 5.3 - Vista lateral de mesh-2

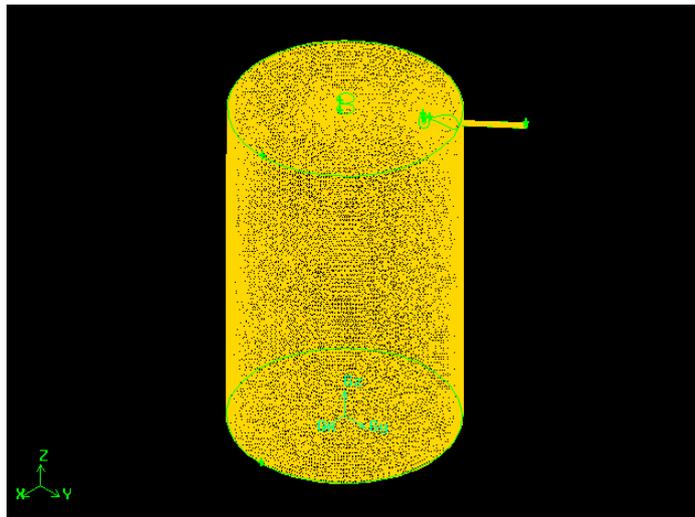


Figura 5.4 - Vista isométrica de mesh-2

A figura 5.5 apresenta o perfil de velocidades no eixo Z através de um corte transversal na saída, enquanto a figura 5.6 mostra o perfil de velocidades no eixo Z em uma seção transversal 70 mm acima do fundo do cilindro. Pela figura 5.5 observam-se velocidades de até 27 m/s, e sua distribuição não-uniforme é devido ao ângulo de saída do escoamento causado pela vorticidade logo abaixo, como pode ser visto na figura 5.7.

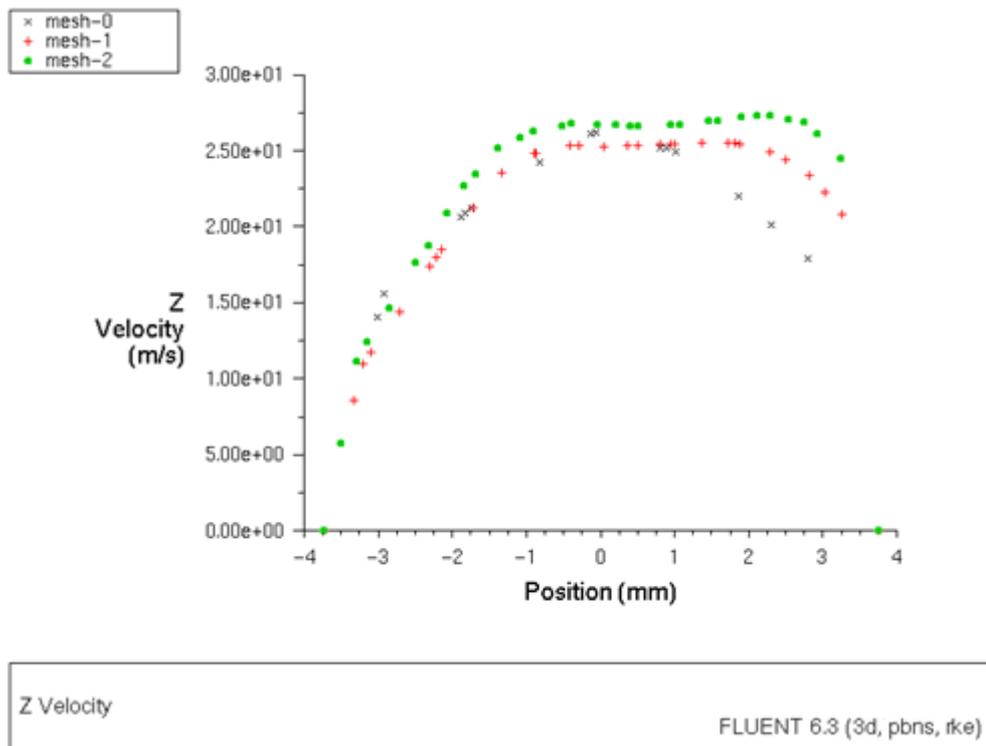


Figura 5.5 - Perfil de velocidades na saída

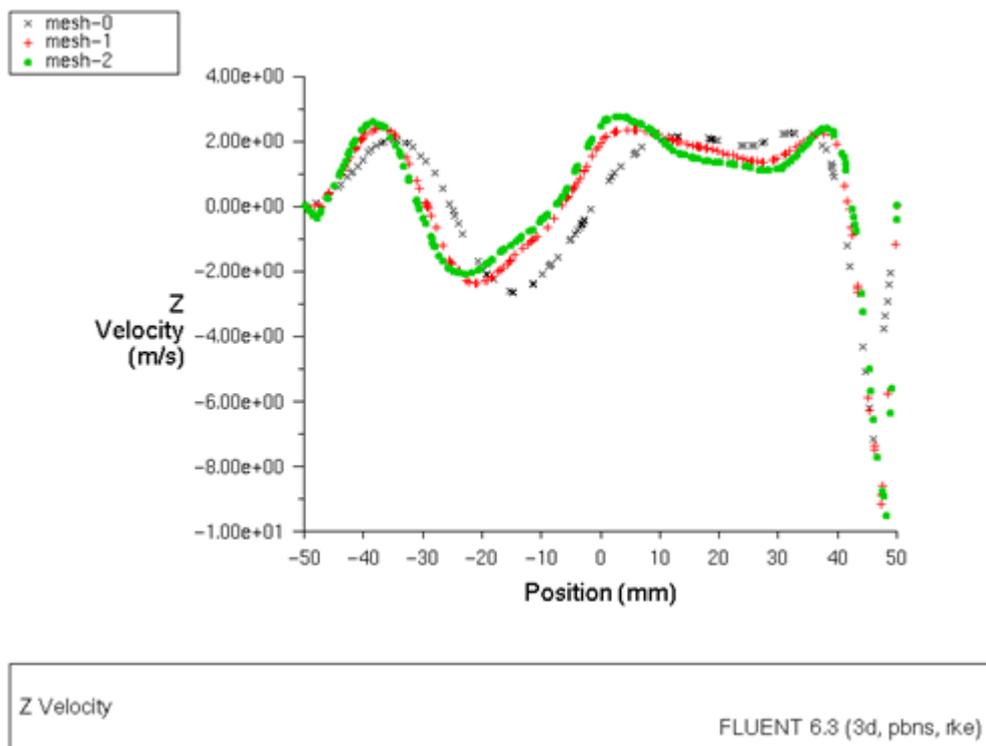


Figura 5.6 - Perfil de velocidades a 70 mm acima do fundo

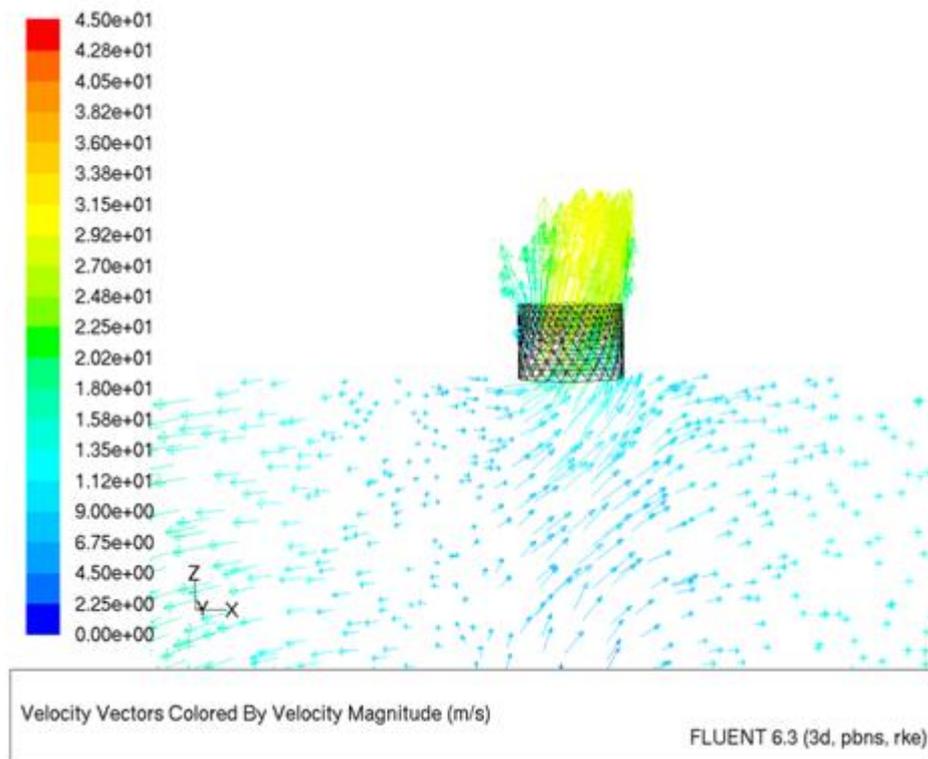


Figura 5.7 - Campo de velocidades na saída

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam comparações entre as três malhas. Pode ser concluído que a malha *mesh-2* já é suficiente para resultados satisfatórios, já que as malhas *mesh-1* e *mesh-2* seguem um mesmo padrão com desvio inferior a 10%.

A figura 5.6 também mostra variações de velocidades positivas e negativas, causado pelos vórtices na região central. Por volta do centro há picos de 3 m/s, enquanto no lado direito há picos de -10 m/s, principalmente por causa da circulação com comportamento ciclônico.

Na figura 5.8 pode ser observado que o comportamento ciclônico esperado é obtido com sucesso. Este campo de velocidades em uma seção transversal ao cilindro mostra o comportamento do escoamento.

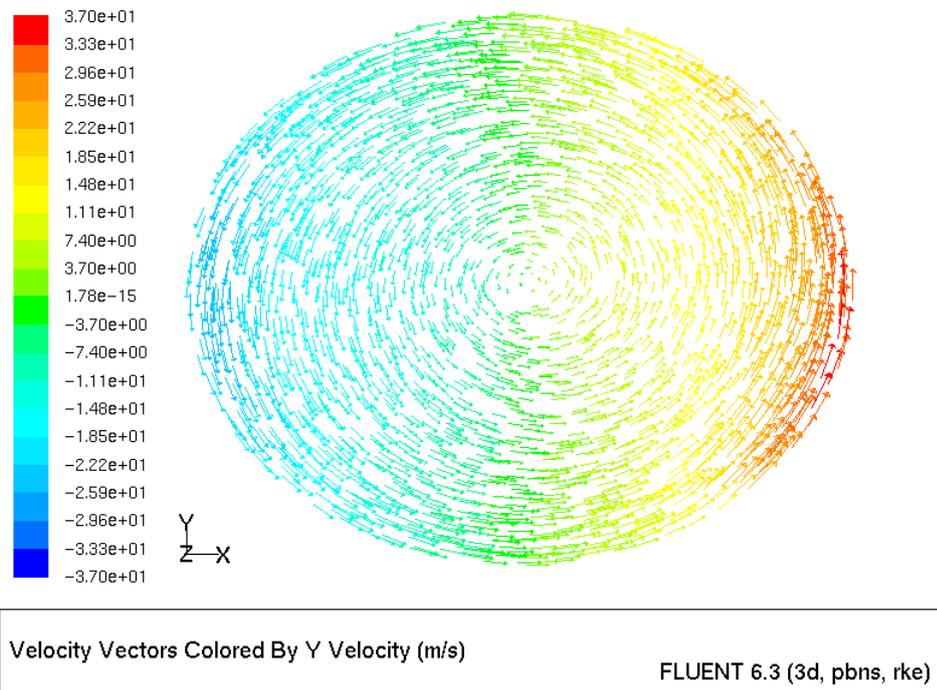


Figura 5.8 - Campo de velocidades em uma seção transversal do cilindro

A figura 5.9 representa o campo de velocidades em um corte paralelo ao eixo Z. Podem ser observados diversos vórtices na região central, o que pode explicar as variações no perfil de velocidades de seções transversais paralelas ao fundo do cilindro (como na figura 5.6). A figura 5.10 apresenta uma vista global do escoamento no interior do alimentador.

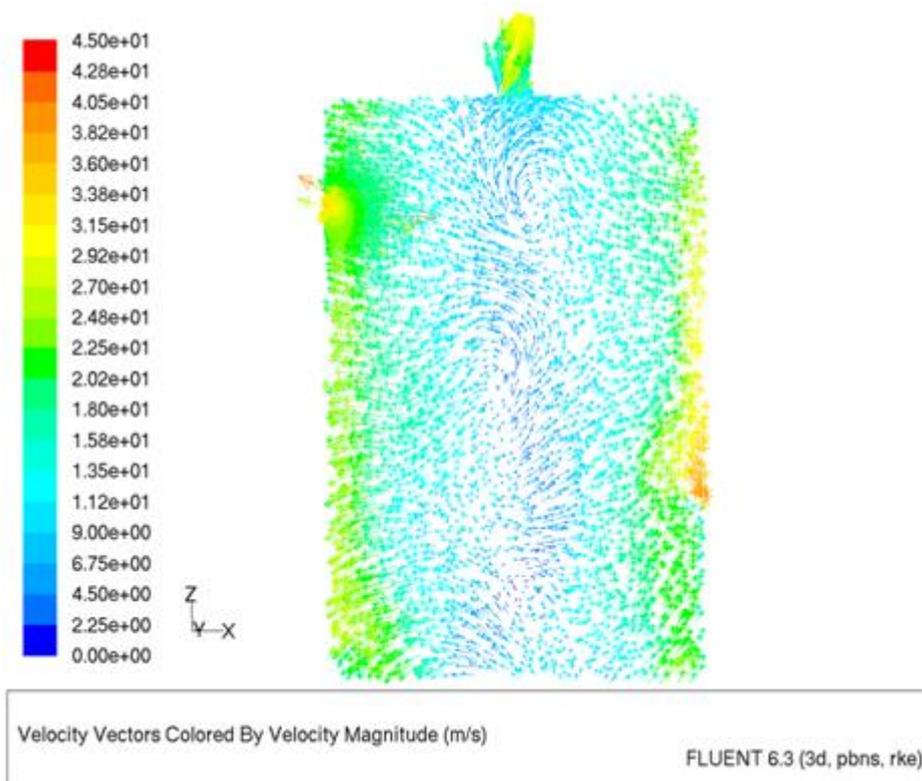


Figura 5.9 - Campo de velocidades em seção paralela ao eixo Z

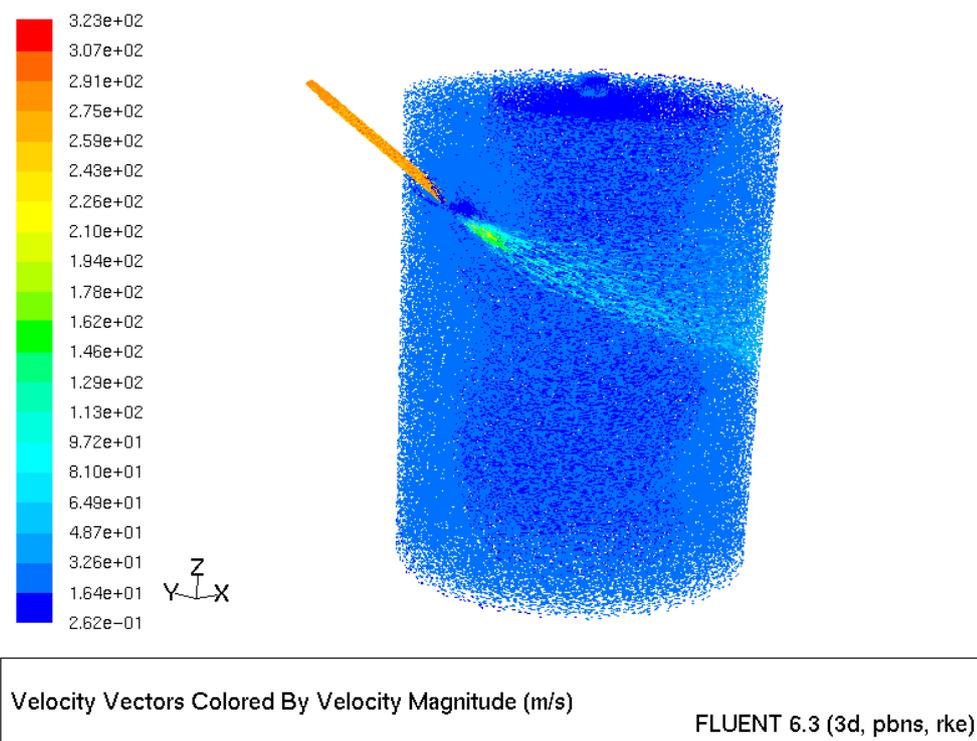


Figura 5.10 - Vista global do escoamento

5.2 Proposta de melhoria

Um importante ponto a ser levado em consideração é se as partículas traçadoras serão, de fato, transportadas pelo escoamento no interior do alimentador. Para tanto, o ar no seu interior deve possuir velocidade suficiente para que tal transporte ocorra. Além disso, o fundo do alimentador é uma região crítica, pois possui cantos onde o material traçador pode aglutinar-se, diminuindo a eficiência do dispositivo.

Portanto uma alternativa, chamada *mesh-alternative*, foi desenvolvida com o intuito de reduzir estes efeitos. A estrutura externa é a mesma da solução proposta anteriormente (*mesh-2*), porém o fundo possui um formato abaulado com 25 mm de raio. A figura 5.11 mostra a malha de *mesh-alternative*, e a tabela 5.2 apresenta características de sua simulação.

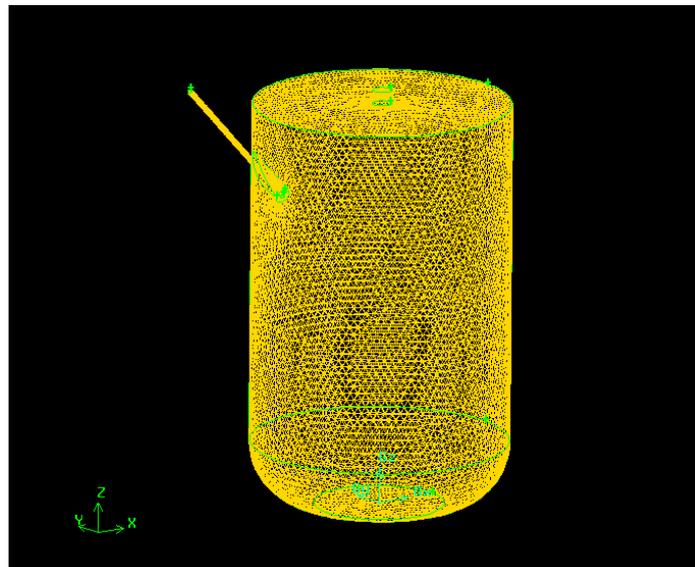


Figura 5.11 - Malha da melhoria proposta

Tabela 5.2 - Características da simulação de mesh-alternative

Raio da superfície abaulada	Iterações	Horas computacionais
25 mm	5.500	12

A figura 5.12 mostra a comparação das velocidades de *mesh-2* e *mesh-alternative* em um plano paralelo ao fundo do alimentador, a uma distância de 5 mm do mesmo.

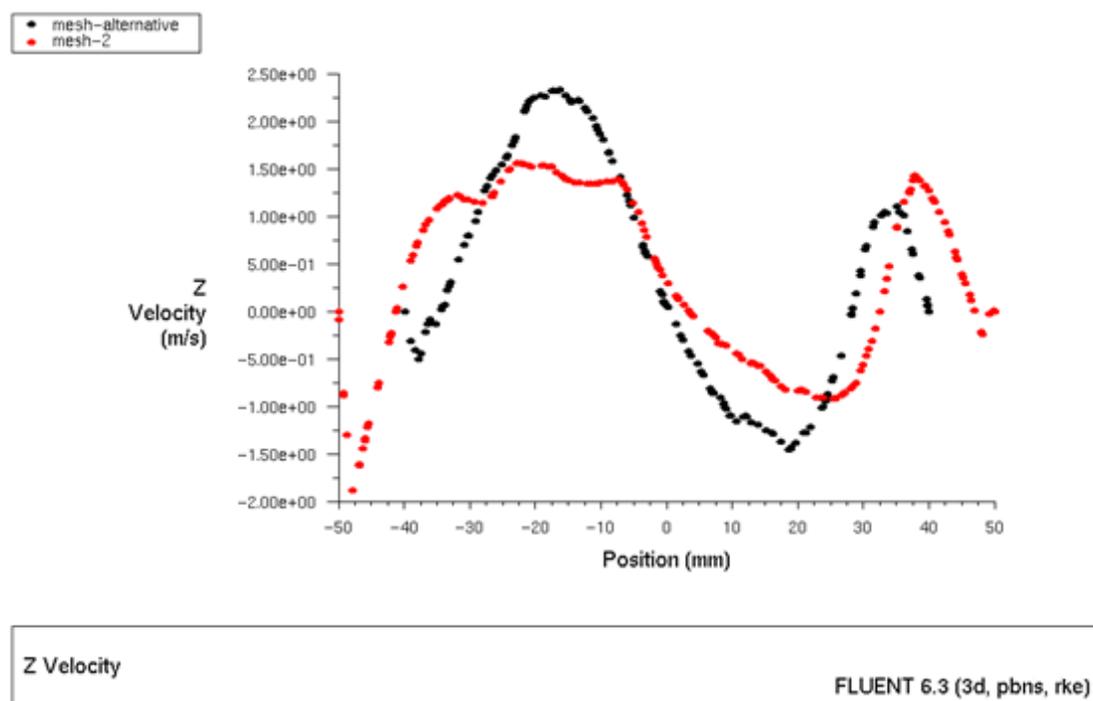


Figura 5.12 - Comparação das velocidades no eixo Z a 5 mm do fundo

Em um primeiro momento nota-se que o diâmetro nesta posição será de 80 mm e não 100 mm como anteriormente. O comportamento do escoamento é similar, no entanto observa-se que os picos de velocidade são maiores, passando de 1,5 m/s para 2,3 m/s em $Z = -15$ mm e de -1,0 m/s para -1,5 m/s em $Z = 20$ mm.

Portanto, com esta melhoria as partículas teriam maior chance de serem transportadas com o escoamento.

6. CONCLUSÃO

Observa-se pelos resultados que o escoamento no interior do alimentador segue um comportamento ciclônico, como esperado. A simulação utiliza da simplificação de apenas escoamento de ar, derivado da hipótese de que as partículas possuem densidade muito próxima à do ar. No entanto, é possível que as partículas causem certa interferência no escoamento; por isso a escolha correta do material das partículas traçadoras é importante.

Em seções transversais paralelas ao eixo Z, observa-se que há vorticidades na região central do cilindro, e seu impacto pode ser visto como variações nos perfis de velocidades no eixo Z em seções transversais paralelas ao fundo do cilindro. Como esperado, os perfis apresentam valores negativos em um extremo do cilindro e positivos do outro, devido ao comportamento ciclônico. Já a assimetria do perfil e dos picos de velocidades pode ser atribuída a tais vorticidades.

Melhorias no projeto podem ser propostas usando como base os resultados acima. Uma alternativa visando aumentar os picos de velocidades no fundo no alimentador, e deste modo aumentando a propriedade do escoamento de transportar as partículas, foi simulada, e pode-se concluir que cumpriu seu objetivo satisfatoriamente. Outros formatos para o fundo do alimentador, e até uma variação no diâmetro do mesmo podem ser explorados para avaliar os efeitos no escoamento e nas vorticidades observadas na região central do alimentador.

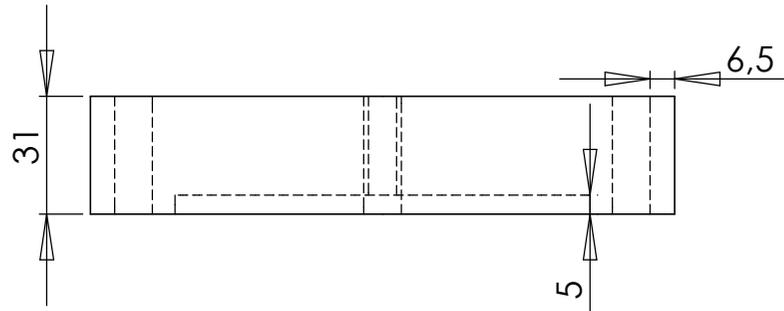
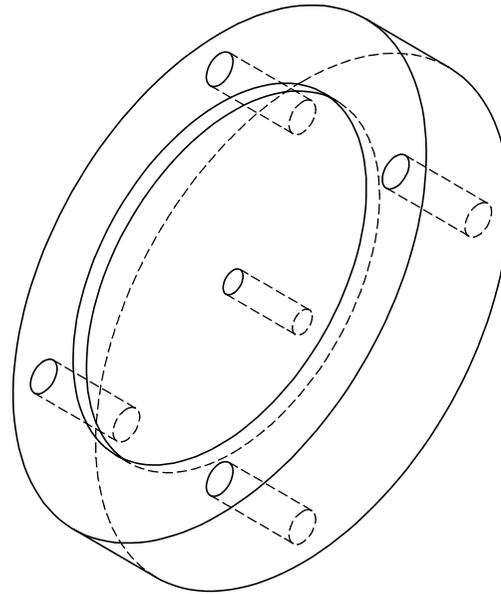
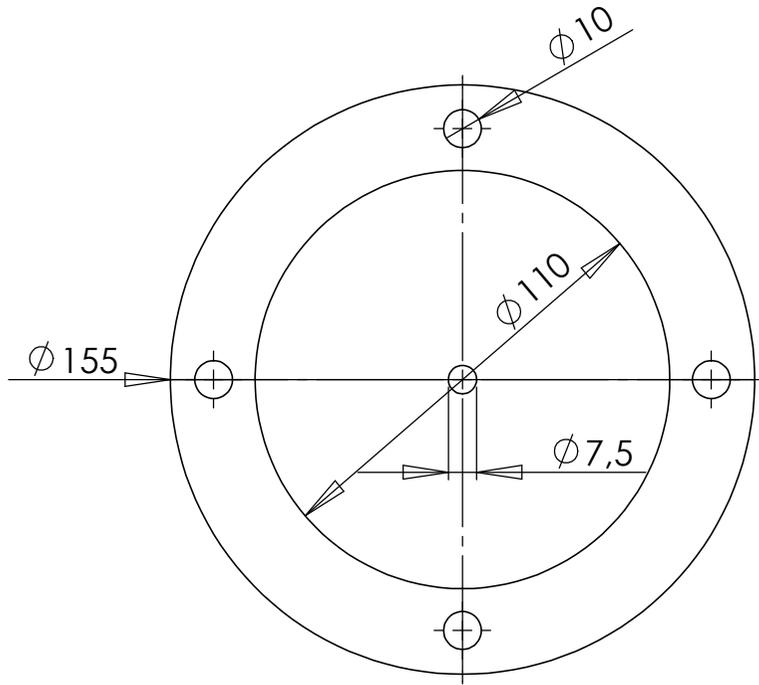
7. BIBLIOGRAFIA

- [1] RAFFEL, M., WILLERT, C., **Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, second edition**, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007
- [2] MEYDEN, T. J. V. D., **Crank angle resolved flow field characterization of a heavy-duty one-cylinder optical engine**, MSc thesis, Eindhoven University of Technology, 2009
- [3] MELLING, A., **Tracer particles and seeding for particle image velocimetry**, Measurement Science and Technology, 1997
- [4] TOWERS, D. P., TOWERS, C.E., **Cyclic variability measurements of in-cylinder engine flows using high-speed particle image velocimetry**, Measurement Science and Technology, 2004
- [5] KÄHLER, C., SAMMLER, B., **Generation and control of tracer particles for optical flow**, Experiments in Fluids 33, 2002
- [6] YAMAKAWA, M., ISSHIKI, S., **Measurement of Ambient Air Motion of D. I. Gasoline Spray by LIF-PIV**, JSME International Journal Series B, Vol. 46, No. 1 (2003), pp.25-30
- [7] JENSEN, K., **Flow Measurements**, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., Vol. 27, No. 4 (2004), pp.400-419
- [8] GRANT, J., ZAPATA, L., MIDDLETON, K., **CFD and Particle Image Velocimetry in Design Optimization**, International Mech. Eng. Congress & Exposition, 2010
- [9] ADRIAN, R., **Twenty years of Particle Image Velocimetry**, International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2004
- [10] SILVA, M., **Development of a Cyclone Seeder**, Internship Report, Technische Universiteit Eindhoven, 2009
- [11] HATSCHBACH, P., EMRICH, M., BAUMRUK, P., **In-Cylinder Velocity PIV Measurements in a Model of a Motored Engine**, MECCA Journal of Middle European Construction and Design of Cars, vol. 4, 2006
- [12] EXPANCEL DE microspheres catalogue, AkzoNobel, 2009
- [13] FERRARA, E., MURAMATSU, M., **Particle-Image Velocimetry Study of a Pediatric Ventricular Assist Device**, J. Biomech. Eng. 132, 071004 (2010)

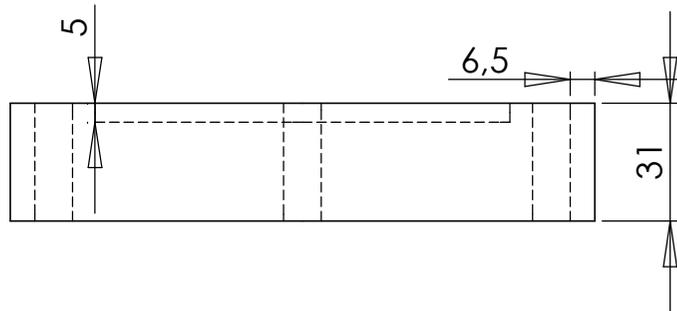
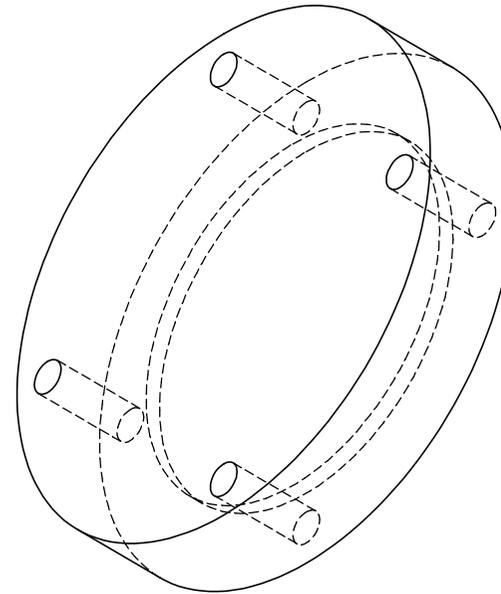
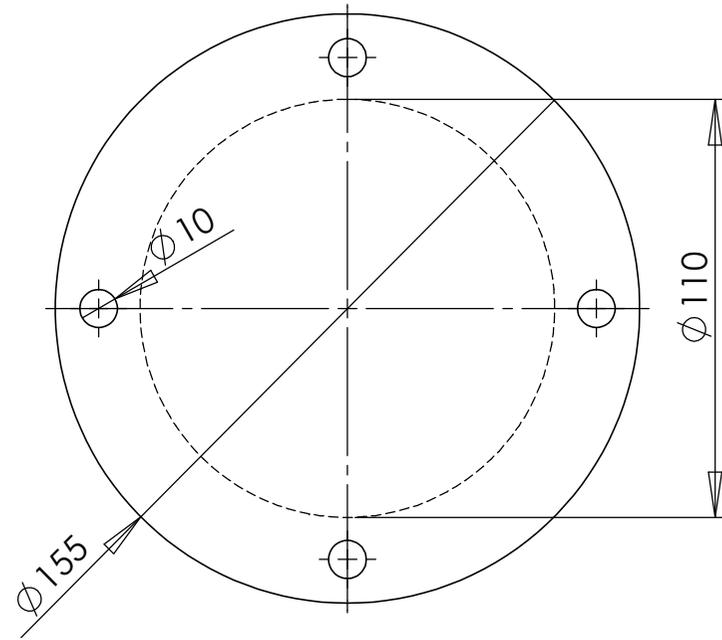
- [14] HAIN, R., KÄHLER, C., **Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras**, Experiments in Fluids 3, pg 403-411, 2007
- [15] ANSYS FLUENT Brochure, ANSYS Inc., 2010
- [16] RÜBENKÖNIG, O., **The Finite Volume Method (FVM) – An introduction**, Albert Ludwigs University of Freiburg, 2006
- [17] FLUENT User's Guide versão 6.1, Fluent Inc., 2003

ANEXO A

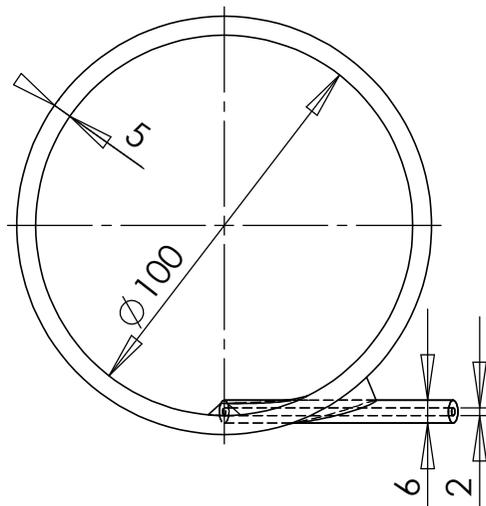
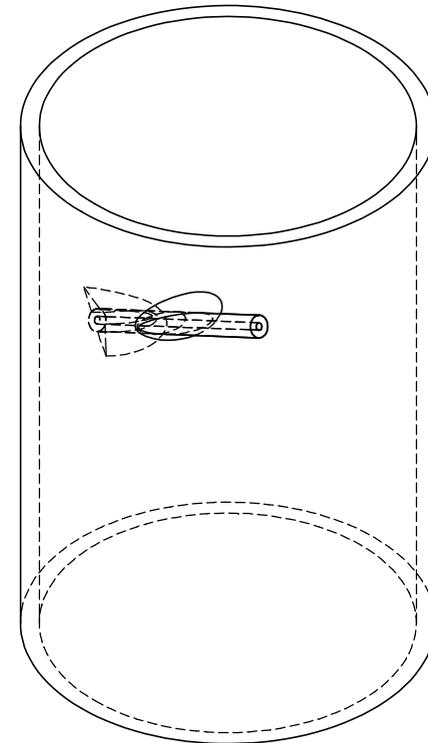
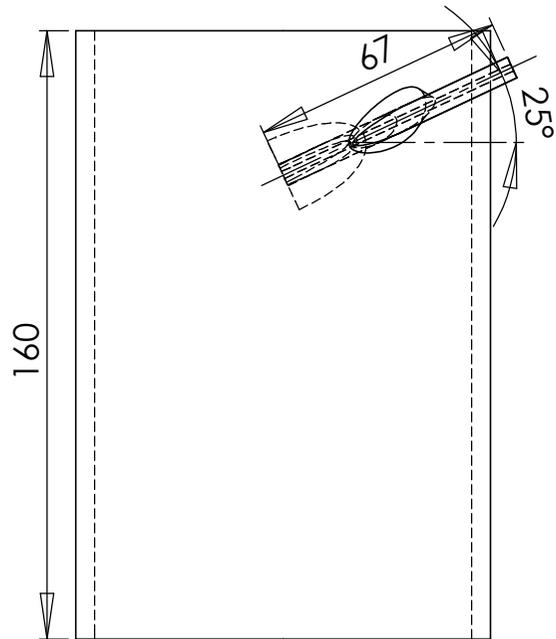
Neste anexo, podem ser vistos os desenhos feitos no software SolidWorks. O modelo foi separado em três partes: tampa superior, tampa inferior e núcleo.



Sheet 1/3	Title Upper cover	
Scale 1:2	Date 19/06/2009	Material Steel
Name Marcel Amaro Andrade Morais S Silva		



Sheet 2/3	Title Bottom cover	
Scale 1:2	Date 19/06/2009	Material Steel
Name Marcel Amaro Andrade Morais S Silva		



Sheet 3/3	Title Body	
Scale 1:5	Date 19/06/2009	Material Steel
Name Marcel Amaro Andrade Morais S Silva		