CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DE UM HIDROCICLONE SEM NÚCLEO GASOSO

Luiz Philipe Martinez Marins

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Aprovada por:

_____

Prof. Atila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

_____

Prof. Albino José Kalab Leiroz, Ph.D.

_____

Prof. Ricardo Medronho, Ph.D.

_____

Prof. Luiz Fernando Alzuguir Azevedo, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Junho de 2007

MARINS, LUIZ PHILIPE MARTINEZ

Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidro-ciclone sem núcleo gasoso [Rio de Janeiro] 2007

XIX, XXX p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Mecânica, 2007)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Hidrociclone
2. Separação

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais Affonso e Gilda,

minha mulher Daniela

e minha filha Beatriz que está completando 1ano de vida.

Agradecimentos

Gostaria de manifestar meu reconhecimento, ao meu orientador, não somente pela orientação no trabalho, mas também pela revisão do texto e a PETROBRAS, pela oportunidade proporcionada para o desenvolvimento deste trabalho.

Alguns nomes merecem destaque, pois, foram pessoas fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Patrícia Rodrigues que atuou de forma intensa no início do trabalho. Juliana Loureiro pelo enorme conhecimento na operação da técnica LDV. Luis Fernando pela assistência inicial na operação com a técnica PIV. Carlos Alberto Capela Moraes, pessoa responsável pela idealização deste trabalho e um profundo conhecedor de hidrociclones.

Em destaque, tenho que ressaltar a ajuda do Daniel Greco que em muitos momentos abdicou de finais de semana e enfrentou mais de 13 horas de ensaios no laboratório do Cenpes.

Não posso deixar de expressar também o meu reconhecimento especial à minha mulher Daniela, pela compreensão, incentivo e apoio proporcionados para a execução deste trabalho, mesmo em finais de semana.

L. P. M. M.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DE UM HIDROCICLONE SEM NÚCLEO GASOSO

Luiz Philipe Martinez Marins

Junho/2007

Orientadores: Atila Pantaleão Silva Freire

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho faz uma análise experimental do escoamento em um hidrociclone, projetado para separação líquido-líquido, operando em fluxo monofásico, sem núcleo gasoso. Foram utilizadas duas técnicas de medição de velocidade, ambas não intrusivas, com princípios óticos de medição a laser, a saber: Velocimetria por efeito Doppler (LDV) e Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Os problemas relativos às medições com essas técnicas em um hidrociclone são apresentados e as soluções empregadas são discutidas. Com a primeira dessas técnicas foi possível obter os perfis de velocidade média de dois dos componentes da velocidade do fluido, em pontos escolhidos no domínio de escoamento, bem como algumas grandezas turbulentas nesses pontos, que puderam ser captadas devido às altas taxas de aquisição proporcionada pelo LDV. Com a segunda técnica, maiores regiões do domínio de escoamento puderam ser investigadas, embora com menores taxas de aquisição de informações. Foram comparados os resultados obtidos com ambas as técnicas, que mostraram excelente concordância para o perfil do componente azimutal da velocidade média e boa concordância, para o componente axial. Algumas características peculiares do escoamento, não conhecidas ou reportadas por pesquisadores anteriores, foram obtidas nos experimentos e confirmadas por ambas as técnicas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL FLOW CHARACTERIZATION IN A HYDROCYCLONE OPERATING WITHOUT AN AIR-CORE

Luiz Philipe Martinez Marins

June/2007

Advisor: Atila P. Silva Freire

Department: Mechanical Engineering

This work makes an experimental analysis of the monophase flow field in a hydrocyclone designed to perform liquid-liquid separation, operating without gas core. Two velocity measurement devices were used, both of them non-intrusive, based on laser technology. These devices are: Laser Doppler Velocimetry (LDV) and Particle Image Velocimetry (PIV). The problems arising from using these devices for hydrocyclone flow field investigation are presented and the adopted solutions are discussed. With the former device it was possible to get average velocity of two of the components of fluid velocity in chosen points of the flow field and also to obtain some information on turbulence in these points due to the high data acquisition frequency of the LDV. With the later device greater regions of the flow field could be investigated, although the data acquisition frequency of PIV is considerably lower than LDV´s. Obtained results from both devices were compared and excellent agreement was observed for the azimuthal velocity profiles, and good agreement was also observed for the axial component. Some peculiar characteristics of this particular hydrocyclone flow field, not previously reported, were obtained and confirmed by measurements with both devices.

Índice

Ficha Catalográfica ii
Dedicatória iii
Agradecimentos iv
Resumo v
Abstract vi
1. Introdução 1
1.1.1 Características gerais dos ciclones e hidrociclones 1
1.1.2 Complexidade do escoamento em um hidrociclone 3
1.2 Motivação para o presente trabalho 5
1.2.1 Importância dos hidrociclones para a indústria do petróleo 5
1.2.2 Objetivos do presente trabalho 8
1.2.3 Contribuição do presente trabalho 9
1.3 Métodos de investigação utilizados 9
1.3.1 Velocimetria por Laser Doppler – LDV 9
1.3.2 Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV 10
1.4 Discussão sumária dos resultados obtidos 11
2. Uma Breve Revisão Bibliográfica 13
3. Técnicas de Medição do Escoamento 22
3.1 Velocimetria por Imagem de Partícula - PIV 22
3.1.1 Visão geral 22
3.1.2 Principais componentes do sistema PIV 26
3.1.2.1 Partículas traçadoras 26
3.1.2.2 Fonte de luz e sistema óptico 27
3.1.2.3 Sincronizador 28
3.1.2.4 Câmeras CCD 28
3.1.3 Imagem das partículas 29
3.1.3.1 Profundidade de campo 30
3.1.4 Correlação das imagens 31
3.1.4.1 Autocorrelação 31
3.1.4.2 Correlação cruzada 35
3.1.5 Sistema estéreo – 3D 38

3.2 Velocimetria por Laser Doppler - LDV **38**
3.2.1 Visão geral **38**
3.2.2 Característica do sinal do LDV **42**
3.2.3 Considerações da técnica LDV **44**
4. Análise de Incertezas **46**
4.1 Incerteza dos resultados **46**
4.1.2 Propagação do erro sistemático e aleatório **47**
4.2 Cálculo dos erros associados a uma medida **47**
4.2.1 Erro sistemático **47**
4.2.2 Erro aleatório **48**
4.2.3 Erro total **49**
4.3 Gráfico da incerteza das medições **50**
5. Hidrociclones **53**
5.1 Necessidade de levantamento experimental do escoamento no hidrociclone **56**
6. Aparato Experimental **60**
6.1 Definição do protótipo **60**
6.2 Configuração do sistema PIV **63**
6.2.1 Ajuste dos parâmetros do sistema PIV **64**
6.2.2 Auto calibração **65**
6.2.3 Configuração pré-aquisição **66**
6.2.4 Configuração pós-aquisição **69**
6.2.4.1 Processamento das imagens **69**
6.2.4.2 Pós- processamento das imagens **72**
6.3 Configuração do sistema LDV **73**
6.4 O Experimento **78**
7. Resultados **84**
7.1 Aspectos gerais **84**
7.2 Tempo de residência **86**
7.3 Resultados com emprego da técnica de Velocimetria por Laser Doppler – LDV **86**
7.4 Resultados com emprego da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV **95**

7.5 Comparativo entre as técnicas PIV e LDV **100**

8. Conclusões e Recomendações **105**

9. Referências Bibliográficas **108**

Capítulo 1

Introdução

1.1.1 Características gerais dos ciclones e hidrociclones

O presente trabalho descreve o estudo realizado visando o levantamento dos perfis dos componentes azimutal e axial da velocidade, em diversas seções ao longo de um hidrociclone utilizando a água como fluido de trabalho.

Dispositivos ciclônicos têm sido amplamente empregado nos processos onde se busca a separação de fases de elementos com densidades distintas. A fase dispersa é normalmente constituída de um sólido ou líquido, enquanto a fase contínua é um fluido (vapor ou líquido). Quando a fase contínua é um gás, o dispositivo é denominado ciclone, caso a fase contínua for líquida então chamamos de hidrociclone.

Os equipamentos que utilizam os efeitos centrífugos para promoverem a separação de fases mais conhecidos são as centrífugas e os ciclones (ou hidrociclones). As centrífugas necessitam de um motor para gerar o campo centrífugo, já os dispositivos ciclônicos não têm quaisquer partes móveis, aproveitando a energia do próprio escoamento para gerar o campo centrífugo. Comparativamente os ciclones demandam um menor custo de investimento, operação e manutenção.

Separadores ciclônicos são equipamentos relativamente simples de serem construídos com partes cilíndricas e cônicas justapostas, nos quais a alimentação é feita tangencialmente ao eixo normal. O separador tem duas saídas posicionadas axialmente ao equipamento: uma situada próximo ao bocal de alimentação, por onde escoa a fase menos densa, e outra situada ao final do vértice do corpo cônico. A figura 1.1 mostra um esquema de um ciclone.

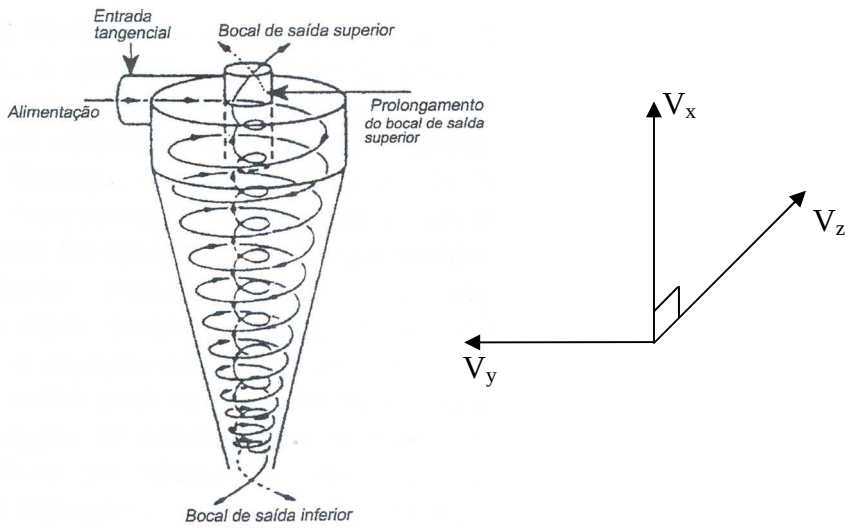


Figura 1.1 – Esquema de um Ciclone e os componentes da velocidade

Nos ciclones ou hidrociclones que operam com fluido/sólido não existe qualquer preocupação com relação à ruptura das partículas, pois mesmos as elevadas tensões de cisalhamento não são suficientes para provocar este efeito. No entanto, quando a separação envolve líquido/líquido, a fase dispersa sob a forma de gota pode se romper formando diâmetros menores e dificultando o processo de separação.

Devido a esse fato, hidrociclones para água oleosa apresentam um cabeçote que permite uma alimentação da dispersão de forma mais suave. Esse cabeçote é composto de uma seção cilíndrica seguido por uma seção cônica para aceleração do vórtice gerado na seção anterior. O impacto da corrente de fluido na entrada gera uma enorme perda de carga que aumenta a turbulência, as tensões cisalhantes e a ruptura das gotas. O objetivo deste cabeçote é minimizar este impacto, impondo uma aceleração gradual à corrente de fluido. Hidrociclones para sólidos não possuem a seção de aceleração, estando a seção cônica de separação logo a jusante do cabeçote cilíndrico de alimentação.

Quando pensamos em hidrociclones para a separação de óleo/água devemos ter em mente que a diferença de densidade entre as fases (água/óleo) é muito menor quando comparamos com hidrociclones para sólido/líquido. Desse modo torna-se necessário aumentarmos o tempo de residência da dispersão no interior do equipamento, por esse motivo estes apresentam uma razão de aspecto mais longa relativamente aos hidrociclones sólido/líquido.

Outra diferença notável entre os hidrociclones líquido/líquido e os líquido/sólidos é que estes últimos têm o tubo de abertura, de saída de fluido próxima

a alimentação, prolongado para o interior do corpo do equipamento, enquanto isso não ocorre com os primeiros. A principal função deste prolongamento é minimizar a perda de dispersão que flui diretamente da alimentação para a saída de fluido próxima a alimentação (curto circuito) sem percorrer a trajetória espiral descendente (externa) e ascendente (interna). Nos hidrociclones para águas oleosas seus idealizadores concluíram, com base em experimentos, que a existência do prolongamento mencionado era prejudicial à eficiência do equipamento.

Resumidamente podemos colocar como principais características dos hidrociclones líquido/líquido relativamente aos do tipo sólido/líquido:

- Cabeçote mais suave – minimiza o problema de rupturas das gotas;
- Corpo mais longo – aumenta o tempo de residência;
- Não existe prolongamento da saída superior – prejudica a eficiência.

1.1.2 Complexidade do escoamento em um hidrociclone

O escoamento no interior dos ciclones e hidrociclones é bastante complexo, apesar das características construtivas bastante simples desses separadores. Para uma descrição qualitativa dos fenômenos que ocorrem no interior do ciclone vamos supor que a fase dispersa tem uma concentração tal que não afete significativamente o escoamento da fase contínua. Isso não é bem verdade, pois existem regiões no interior do hidrociclone onde haverá concentração elevada da fase dispersa e as propriedades reológicas podem ser muito diferentes daquelas verificadas na fase contínua.

Podemos supor, com uma boa aproximação, um comportamento axissimétrico no interior do equipamento. Deve-se ressaltar que muitos dos hidrociclones comerciais possuem dupla alimentação, com os bocais situados em posições diametralmente opostas. Esse arranjo tem por objetivo de conduzir mais rapidamente para a situação de axissimetria.

Assim que deixa a alimentação, o escoamento entrando no ciclone encontra uma parede côncava que impõe um forte movimento de rotação ao redor do eixo do equipamento. O fluido descreve uma trajetória espiral em direção a saída próxima ao vértice cônico. Porém quando uma partícula atinge uma região próxima ao eixo axial passa a desenvolver um movimento reverso, sendo drenada pela abertura de saída próxima à alimentação. Esse fenômeno pode ser entendido, de maneira qualitativa, ao

se observar o diagrama esquemático mostrado na figura 1.2.

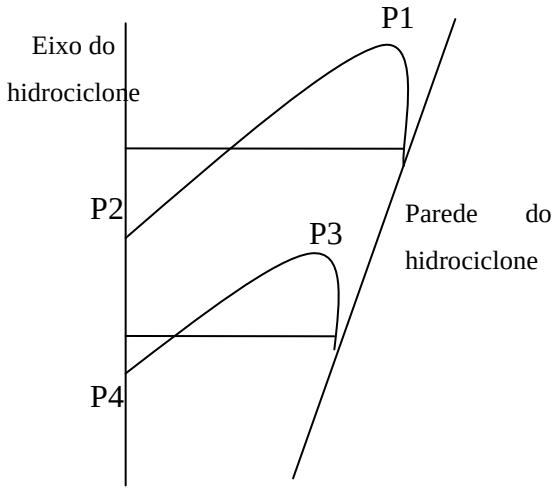


Figura 1.2 – Distribuição radial de pressão no interior de um hidrociclone

Na seção transversal próxima à alimentação do hidrociclone, a pressão P1 é maior que P2 devido à aceleração centrífuga (o fluido é empurrado contra a parede pelo efeito do campo centrífugo). O mesmo acontece em relação às pressões P3 e P4 na seção mais afastada da entrada. A baixa pressão produzida na região próxima ao eixo na primeira seção pode ser forte o suficiente para tornar P2 menor que P4, o que resulta num escoamento reverso junto ao eixo. As vazões pelas aberturas de saída são funções das diferenças de pressões envolvidas que por sua vez são funções dos diâmetros dessas duas aberturas e da vazão de alimentação do hidrociclone, sendo esta última responsável pela geração do efeito centrífugo.

Visando facilitar a nomenclatura a partir deste momento vamos utilizar o jargão da indústria do petróleo para referenciar algumas partes do hidrociclone. Desse modo à saída do hidrociclone próxima ao bocal de alimentação será chamada de rejeito e a saída próxima ao vértice cônico será chamada de saída de água.

Com relação aos campos de velocidade, algumas observações qualitativas também podem ser feitas. O componente axial da velocidade está direcionada da saída de água para o rejeito, para o fluido que se concentra próximo ao eixo axial, e está direcionada do rejeito para a saída de água, para o fluido que se concentra próximo a parede lateral do hidrociclone. Por sua vez o componente radial da velocidade tem direção da parede para o centro do equipamento. A magnitude da componente radial também deve ser uma ordem de grandeza menor que as outras componentes uma vez que a área através da qual se realiza o escoamento radial é muito maior que a seção

transversal do equipamento e muito maior que a área transversal do orifício de alimentação.

Cabe ressaltar algumas considerações sobre o componente azimutal (ou tangencial) da velocidade. Uma partícula de fluido entrando no equipamento tem que descrever uma trajetória espiral descendente. Durante esse movimento a partícula tem uma tendência de conservar o momento angular e como o raio é decrescente à medida que caminhamos em direção a saída de água, a velocidade azimutal deve aumentar. Entretanto esse aumento não deve conduzir a valores extremamente elevados correspondentes ao vórtice livre teórico do escoamento não viscoso. A viscosidade reduzirá a velocidade azimutal à medida que o raio diminui, a partir de algum ponto ao longo do raio. Desse modo, o perfil de velocidade azimutal deverá se comportar como um vórtice livre na região afastada do eixo e um perfil linear de rotação de corpo rígido próximo ao eixo.

Em vista do exposto, constata-se que apesar da simplicidade construtiva o escoamento no interior de hidrociclones apresenta características bastante complexas tais como: linhas de corrente com curvatura acentuada, forças de campo intensas, turbulência anisotrópica e ainda a presença de duas ou mais fases. Melhores modelos fluidodinâmicos têm sido buscados constantemente, mas ainda assim a caracterização do escoamento não é um problema fácil de resolver. Por isso a medição experimental de laboratório constitui uma importante ferramenta na caracterização do escoamento no interior de hidrociclones e nesse campo destacam-se as técnicas LDV (Velocimetria por Laser Doppler) e o PIV (Velocimetria por Imagem de Partícula), técnicas não intrusivas e que utilizam o laser como principal fonte de medição.

1.2. Motivação para o presente trabalho

1.2.1 Importância dos hidrociclones para a indústria do petróleo.

A aplicação industrial de dispositivos ciclônicos como purificadores, em correntes onde temos uma fase contínua e uma fase dispersa, tem sido uma prática por muitas décadas. A indústria alimentícia é a maior beneficiária desta técnica principalmente quando falamos de separação sólido/gás. Em qualquer situação industrial, onde haja uma corrente com pressão relativamente elevada carreando gotículas ou partículas dispersas o uso de ciclones tem se mostrado vantajoso quando

comparamos com a eficiência de decantadores gravitacionais. Dentre as vantagens podemos citar: simplicidade construtiva, baixo custo de investimento e operacional, menor tempo de residência e processo de separação mais eficiente.

Na indústria do petróleo, principalmente na produção em alto mar (*offshore)*, onde o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado, a busca por separadores compactos e eficientes tem sido uma constante e os hidrociclones se enquadram nessa classe de equipamentos. Simkin and Olney (1956) já pesquisavam o uso desses depuradores, mas somente em meados da década de 1980 é que as aplicações práticas começaram.

O petróleo, quando produzido, carrega também gás, sólidos e água. Essas "impurezas" precisam ser separadas. Um esquema típico de uma planta de processamento primário de petróleo contém separadores gravitacionais, separador eletrostático e o sistema de tratamento de água. Nesta última etapa do processo destacam-se os hidrociclones e flotadores.

Nos campos de petróleo, à medida que vão sendo explorados, a produção de água aumenta consideravelmente e para manter a produção de óleo em níveis satisfatórios, decantadores gravitacionais maiores se fazem necessários. Isso certamente é um empecilho para a produção. Desse modo existe um anseio muito grande, por parte dos pesquisadores, de trazer os hidrociclones o mais a montante do processo já que esses equipamentos apresentam grande vantagem frente aos separadores gravitacionais tais como menor área de convés aplicada, menor carga, maior eficiência e também não sofre influência do movimento oscilatório presente nas plataformas semi-submersíveis e navios. Nunes (2005) cita em seu trabalho uma unidade trifásica de separação compacta envolvendo equipamentos ciclônicos, coalescedores em linha e uma malha de controle adequada.

Seguindo esta tendência mundial a PETROBRAS avaliou o desempenho de hidrociclones fabricados pela KVAERNER. Estes equipamentos foram desenvolvidos visando desafogar os campos de produção da STATOIL – companhia de petróleo estatal da Noruega – no Mar do Norte, que tinha uma previsão de aumento da produção de água que ultrapassaria a capacidade instalada para trabalhar com altos teores de óleo.

Em linhas gerais, o sistema concebido pela KVAERNER é constituído de diversos conjuntos de separadores ciclônicos (hidrociclones dispostos em paralelo, acondicionados em vasos cilíndricos verticais). Esses conjuntos são montados em

série, de forma a promover diferentes níveis de remoção e condicionamento de água. O primeiro deles visa somente à remoção de gás das correntes líquidas (denominado de *Compact Cyclonic Degasser*), o conjunto imediatamente à jusante visa remover prioritariamente o óleo com pouca água de uma corrente com 15% a 50% de óleo (é denominado *BOW – Bulk Oil-Water Cyclone*). O conjunto seguinte (denominado de *PDC – Pre-deoiler Cyclone*) visa remover da corrente de água efluente do conjunto anterior (com no máximo 15% de óleo), todo o excesso desse óleo, de forma que essa água, com um teor máximo de óleo de aproximadamente 1500 ppm, possa ser conduzida ao conjunto seguinte, constituído do tradicional hidrociclone *de-oiler* de forma que este último proceda ao condicionamento final dessa água (40 ppm de óleo no máximo, para descarte ou reinjeção).

O fluxograma do sistema concebido pela KVAERNER vem mostrado na figura 1.3, sendo que os números correspondem ao desempenho esperado na plataforma de *Stafjord B* com óleo 38º API (densidade relativa = 0,8348; $API = \frac{141{,}5}{densidade\ relativa} - 131{,}5$)

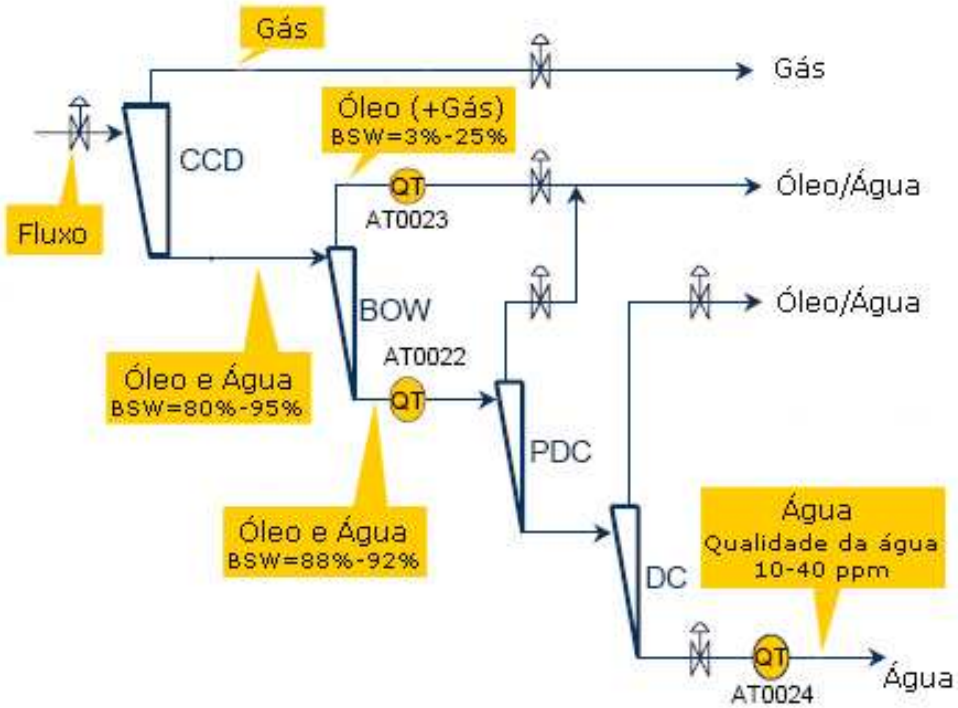


Figura 1.3 – Fluxograma simplificado do sistema concebido pela KVAERNER

A PETROBRAS embora vislumbrando amplo interesse nessa tecnologia,

visando principalmente às plataformas do campo de Marlim, que estão produzindo muita água e visando também o desenvolvimento de campos de óleos pesados em águas profundas, não se dispôs a adquirir uma unidade industrial, enquanto não fosse comprovado um desempenho adequado dessa tecnologia com óleos pesados.

Desse modo foi conseguido junto a KVAERNER o empréstimo de protótipos dos hidrociclones *BOW* e *PDC* . Esses equipamentos foram montados em uma estrutura amplamente instrumentada e conduzidos à plataforma de Pampo, onde se pôde testar a eficiência com óleos variando o grau API de 21 a 13.

Os resultados mostraram que é tecnicamente viável o emprego de um sistema de separação primária com base na tecnologia de hidrociclones, mesmo com óleos pesados (API 15-16). Contudo, geometrias mais eficientes devem ser desenvolvidas para o caso de tratamento com óleos pesados.

1.2.2 – Objetivos do presente trabalho

Como foi visto acima, existem diversas aplicações atuais, e em perspectiva, para os hidrociclones na indústria do petróleo.

Em função da complexidade do escoamento no interior desses equipamentos, a avaliação de performance é conduzida de maneira empírica, ou seja, protótipos são construídos e testados. Não há dúvida de que os testes mais conclusivos são os de campo, porém quando se pensa na indústria do petróleo os testes em campos são extremamente custosos e nem sempre são bem recebidos pelo pessoal que trabalha na operação, uma vez que em alguns casos, pode haver interferência com as atividades normais da produção do campo. Portanto, é muito importante que a matriz de teste seja reduzida ao mínimo possível.

Os modelos em CFD que visam à caracterização do escoamento no interior de hidrociclones evoluíram bastante nos últimos anos, mas ainda assim não são totalmente confiáveis. Por outro lado, o uso de técnicas não intrusivas para a caracterização do escoamento tais como o *LDV – Velocimetria por Laser Doppler* e o *PIV – Velocimetria por Imagem de Partícula* vêm crescendo bastante.

O presente trabalho teve o objetivo de mostrar a viabilidade técnica do uso do LDV e do PIV em hidrociclones. Para isso, foi construído um modelo especial de hidrociclone, objeto de estudo no processamento primário para separar uma corrente oleosa com elevado teor de óleo (mais de 30%), de características geométricas idênticas ao que foi testado na plataforma de Pampo. O escoamento estudado foi

monofásico, sendo a água o fluido de trabalho.

As atividades deste projeto de pesquisa de tese de mestrado abrangem as seguintes etapas:

- Fabricação de um modelo de hidrociclone do tipo BOW em acrílico.
- Caracterização das partículas adicionadas ao fluido de processo para trabalhar com a técnica PIV e investigação experimental dos perfis de velocidade axiais e azimutais.
- Caracterização das partículas adicionadas ao do fluido de processo para trabalhar com a técnica LDV e investigação experimental dos perfis de velocidade axiais e azimutais.
- Algumas discussões sobre a turbulência no interior do hidrociclone.
- Análise comparativa dos perfis axiais e azimutais levantados pela técnica PIV e LDV.

1.2.3 – Contribuição do presente trabalho

1. Levantamento, disponibilização e análise dos dados experimentais obtidos com as técnicas não intrusivas de medição de velocidade.

2. Comparação dos resultados experimentais obtidos com as duas técnicas de medição (LDV e PIV).

3. Discussão e análise dos resultados obtidos e recomendações para aprimoramento das medidas experimentais.

1.3 Métodos de investigação utilizados

1.3.1 Velocimetria por Laser Doppler – LDV

A técnica de medição LDV utiliza o laser para gerar dois feixes de luz coerente (freqüência fixa) e iluminar as partículas que acompanham o escoamento. Os dois raios se cruzam e formam franjas de interferência – a configuração de franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. A distância entre as franjas é função do ângulo de cruzamento dos raios e do comprimento de onda do laser: $\delta_f = \lambda / 2sen(\theta / 2)$. As partículas, ao passarem pelas franjas criam um efeito Doppler na freqüência do feixe e que é diretamente proporcional a sua velocidade: $f_D = U / \delta_f$. É uma medição indireta da velocidade uma vez que medimos o

deslocamento das partículas. Portanto as partículas devem ser suficientemente pequenas para acompanhar o fluido e grande o bastante para refletir a luz incidente. A figura 1.4 mostra um esquema do sistema LDV.

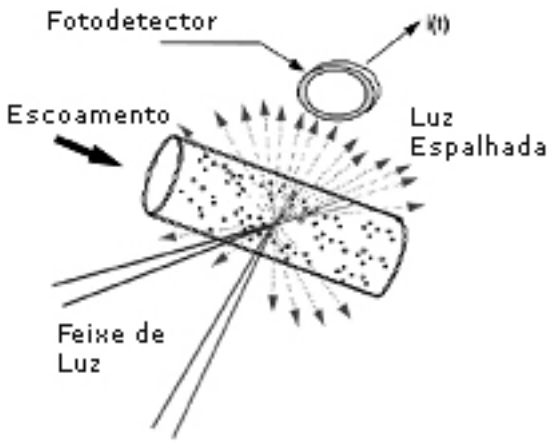


Figura 1.4– Sistema LDV

Os principais componentes de um sistema LDV são:

- laser, fonte de luz monocromática;
- transmissores ópticos;
- fotodetector;
- processador e analisador de sinais.

A velocimetria por laser Doppler tem como principais características:

(i) Fornecer medição não intrusiva.

(ii) Não requer calibração

(iii) Resolução do sentido da velocidade.

(iv) Possui alta resolução temporal

1.3.2 Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV

Similar ao LDV, o sistema PIV também necessita de partículas reflexivas acompanhando o fluido. Estas partículas são iluminadas por um plano de luz por duas vezes em um curto intervalo de tempo. A luz espalhada pelas partículas é gravada em quadros seqüenciais. O plano da imagem é dividido em pequenos quadros

denominados de janelas de interrogação, um software especial correlaciona as imagens referentes às duas exposições. Usando o método de correlação cruzada (*cross-correlation*) e com um tratamento estatístico adequado determinamos o deslocamento médio das partículas em cada janela de interrogação. A velocidade é determinada dividindo esse deslocamento pelo tempo entre os dois pulsos de laser. O sistema PIV também permite medir o componente normal ao plano de laser, mas para isso é necessário usar duas câmeras colocadas com ângulos entre 45º e 90º entre elas.

A velocimetria por imagem de partícula – PIV, possui como principais características:

(i) Medição não intrusiva ao escoamento;

(ii) Também chamada de técnica do campo completo – alta resolução espacial;

(ii) Medição indireta da velocidade: necessita de partículas reflexivas;

(iv) Permite medir os 3 componentes da velocidade – sistema PIV estéreo.

A figura 1.5 mostra o esquema de um sistema PIV.

Figura 1.5 – Sistema PIV

1.4 Discussão sumária dos resultados obtidos.

Um protótipo em escala real de um hidrociclone comercial do fabricante KVAERNER foi construído em acrílico transparente, visando as medições experimentais com as ferramentas PIV e LDV. As principais características geométricas estão mostradas na figura 1.6.

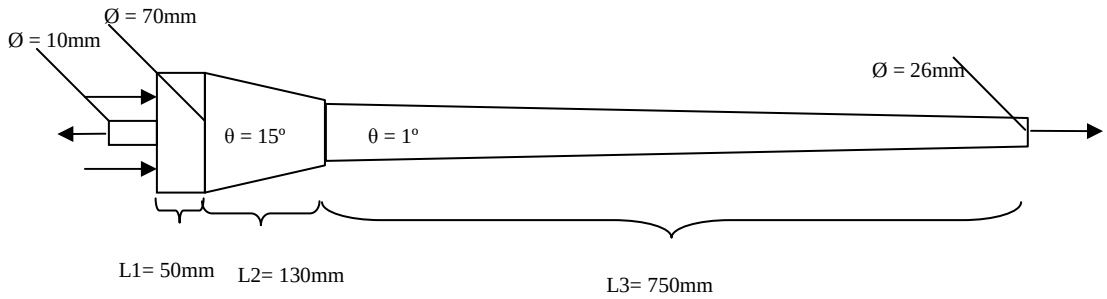


Figura 1.6 – Características geométricas do hidrociclone utilizado nos testes experimentais

O trecho L2 foi investigado, somente com o LDV, em 3 seções transversais (perpendicular ao eixo axial), e o trecho L3 , utilizando o PIV e o LDV, em 3 seções transversais. Dificuldades de arranjo geométrico impossibilitaram medições com o PIV no trecho L2.

As duas técnicas de medição experimental, PIV e LDV mostraram boa concordância quantitativa e qualitativa.

Capítulo 2

Uma Breve Revisão Bibliográfica

O presente capítulo mostrará uma breve revisão do estado da arte na medição das propriedades dos escoamentos que ocorrem de um modo geral no interior de hidrociclones, com núcleo gasoso ou não. O propósito é oferecer uma visão parcial e ao mesmo tempo abrangente o suficiente para permitir uma consolidação dos conceitos fundamentais que regem a operação de separadores ciclônicos.

Os avanços, distinções, dificuldades e características peculiares de separadores ciclônicos com ou sem núcleo gasoso serão abordados. A ênfase, pois, será na descrição da física do problema sob interesse. Neste sentido, a presente compilação não pretende ser direcionada à abordagem das duas técnicas de medição a serem utilizadas nos capítulos subseqüentes. Os detalhes relevantes, para as técnicas de velocimetria por imagem de partículas e de velocimetria laser Doppler serão apresentados em capítulos apropriados.

Os complexos campos de escoamento que se formam no interior de hidrociclones tem sido experimentalmente estudados por diversos autores.

A maioria dos estudos apresenta resultados semelhantes para o componente de velocidade média na direção tangencial. Como vastamente registrado pela literatura, em sua parte interna o escoamento se assemelha a uma rotação de corpo rígido, enquanto na parte externa ele possui o comportamento de um vórtice livre. Para o componente axial da velocidade, a maioria dos estudos mostra uma velocidade descendente junto à parede e uma velocidade ascendente na região central. Alguns estudos apontam uma larga variação da velocidade radial sobre pequenas distâncias próximas à linha de centro. O componente radial de velocidade é certamente o mais difícil de ser quantificado. Com relação a esta quantidade, as dissimilaridades são freqüentemente maiores que as similaridades. Estudos relativamente recentes indicam que existe um aumento na velocidade radial no sentido do centro do hidrociclone. Entretanto, existe obviamente uma impossibilidade física para que uma partícula de fluido sobre o eixo esteja com um componente radial de velocidade não nulo. A explicação dessa ocorrência reside, muito provavelmente, como veremos no capítulo 5, no fato de qualquer deslocamento no plano de medição, situando-o ligeiramente

fora do eixo, terá como resultado a medição do componente do vetor velocidade sobre esse plano, que tem uma contribuição significativa do componente azimutal da velocidade no hidrociclone.

A caracterização qualitativa do escoamento no interior de um hidrociclone foi revista com bastante autoridade por Bradley (1965) e Svarovsky (1984). Nos primeiros estudos, um esforço particular foi dedicado à visualização do escoamento por técnicas simples. O próximo avanço, natural, foi buscar medir as velocidades locais por sensores intrusivos. Exemplos típicos são os trabalhos de Yoshioka e Hotta (1955) e Lilge (1962).

A introdução de técnicas ópticas se deu nos trabalhos pioneiros de Kelsall (1952) e, principalmente, Dabir e Petty (1986). O primeiro trabalho, um clássico, será mencionado muitas vezes a seguir. O último trabalho foi provavelmente o primeiro exemplo da aplicação de velocimetria laser Doppler (LDV) para a geometria de um hidrociclone.

O escoamento no interior de um hidrociclone foi descrito no capítulo anterior como a combinação de um escoamento helicoidal descendente – na região externa – com um escoamento helicoidal ascendente – na região interna.

Um fenômeno de grande interesse para os experimentalistas tem sido também aquele provocado pelos efeitos de parede no escoamento. O atrito no cabeçote de alimentação do hidrociclone provoca uma diminuição no componente azimutal da velocidade que, combinada com as altas pressões presentes, pode causar trajetórias parasitas. Esses caminhos provocam uma ligação direta entre o escoamento de entrada e o de saída, alterando a eficiência do equipamento. Este é o motivo pelo qual separadores fluido/sólidos possuem um prolongamento na saída superior, uma vez que nesse caso, esse “curto-circuito” provoca a piora da eficiência. Para os separadores líquido/líquido o “curto-circuito” é até benéfico no processo de separação.

Um estudo interessante foi conduzido por Monredon et al. (1992) com o auxílio de velocimetria por laser Doppler. Várias geometrias de hidrociclones foram analisadas com o propósito de comparar suas eficiências com referência ao processo de separação. Esses autores notaram que as condições de entrada resultantes do tipo de voluta utilizada podiam inibir as trajetórias parasitas, provocando um aumento da eficiência. Os resultados experimentais foram comparados e confirmados por simulações numéricas.

Já em seu estudo inicial, Bradley (1965) havia observado que a formação de

padrões de escoamentos secundários recirculantes era fortemente induzida pela estrutura vorticial dominante. Introduzindo traçadores em um hidrociclone com superfície transparente, Bradley observou a formação de múltiplas estruturas recirculantes próximas ao prolongamento da saída superior. Alguns autores chegaram a relatar a ocorrência de escoamentos recirculantes mesmo dentro do prolongamento da saída, como pode ser visto no trabalho de Dabir e Petty (1986).

Poucos estudos exploraram os efeitos que uma mudança de geometria poderia impor às propriedades do escoamento interno. Yamamoto e Jiao (1997) analisaram um hidrociclone com a superfície interna do cone perfurada. A especulação então era a de que as perfurações afetariam não apenas a estrutura vorticial interna, mas também a região de entrada do fluido. De fato, essa região deveria assumir uma forma mais prolongada, menos concentrada próxima à área de prolongamento da saída superior.

A maioria dos estudos acima mencionados analisa o escoamento no interior de hidrociclones a partir da medição temporal de perfis de velocidade. Isso pode ser um problema, alguns autores (veja, por exemplo, Solero e Coghe (2001), Hoekstra (2000) e Gupta et al. (1984)) registram ser o escoamento quase-periódico em certas posições. Este fenômeno tem sido conhecido como Precessão do Núcleo Vorticial (PNV) (“*Precessing Vorticy Core – PVC”*). Monredon et al. (1992) sugerem serem as altas flutuações no núcleo gasoso as responsáveis pelas dificuldades na medição na componente de velocidade radial com LDV. Entretanto, é provável que o fenômeno de PNV seja o responsável pelas altas flutuações, o que é corroborado por este trabalho.

Hou et al. (2002) utilizaram microfones com o objetivo de correlacionar o espectro acústico de um hidrociclone com suas condições de operação. Em todas as condições analisadas um pico de baixa freqüência foi sempre observado. Esse resultado implica que a PNV está sempre presente. De fato, Hoekstra (2000) descobriu que em um ciclone a gás a PNV pode ser reconhecida como oscilações periódicas dos componentes tangenciais e axiais em algumas posições radiais do ciclone.

Chu et al. (2000) mediu as flutuações turbulentas em um hidrociclone com um sensor de pressão. As maiores flutuações foram confirmadas existirem próximas ao eixo do hidrociclone; sua periodicidade, entretanto, não foi analisada.

O impacto da PNV no processo de separação de ciclones a gás foi discutido por Solero e Coghe (2001) e Chu et al. (2002). Esses autores concluíram que PNV é prejudicial para a eficiência da separação. Solero e Coghe sugeriram a adição de uma barra cilíndrica colocada no eixo ciclone; isso deveria melhorar a separação. Chu et al. (2002) introduziram uma geometria definida por uma prolongação central com seção reta em forma de cruz. Essa estrutura diminuiu as flutuações de pressão aumentando a separação.

A presença de flutuações causadas por turbulência foi investigada por Chiné e Concha (2000) com LDV; eles concluíram que a variância do componente axial de velocidade é maior que a variância do componente tangencial, o que também foi observado no presente trabalho, exceto nas regiões muito próximas do eixo do hidrociclone. De fato, a influência dos níveis de turbulência na separação de partículas se constitui num intenso tópico de pesquisa. A maioria dos trabalhos, entretanto, é numérica (Cullivan et al. (2004), Nowarovski et al. (2004), Kraipech et al. (2005)). Poucos dados experimentais existem.

Em ciclones que apresentem um núcleo gasoso, a geometria e a estabilidade da região central do escoamento possuem um particular interesse. A prática corrente tem sido então caracterizar a forma dos escoamentos encontrados nas saídas dos ciclones através de meios acústicos ou ópticos (Barrientos et al. (1993), Neese et al. (2004)).

A dinâmica do escoamento no núcleo gasoso incluindo sua estabilidade foi diretamente quantificada por Williams et al. (2004) com o auxílio de tomografia eletro-resistiva. Essa técnica também foi utilizada para analisar a separação de óleo em um hidrociclone (Bennet e Williams, 2004).

Hidrociclones com núcleos gasosos foram ainda investigados com técnicas alternativas de medição como, por exemplo, tomografia ultra-sônica (Schlaberg et al. (2000), Podd et al. (2000)) e raios-x (Cullivan et al. (2001)).

Passemos agora a uma análise mais detalhada dos resultados passados obtidos com referência à medição dos componentes de velocidade do escoamento.

O mais evidente componente, o componente azimutal, foi investigado por Kelsall (1952) com uma técnica que recorria a pequenas partículas de alumínio como traçadores. Kelsall descobriu que a velocidade tangencial das partículas de fluido aumenta em direção ao centro, atingindo um máximo e decaindo rapidamente a seguir. Ele dividiu os perfis de velocidade em uma parte interna e outra externa. A parte interna possui um comportamento semelhante à rotação de um corpo rígido. A

parte externa se comporta como um vórtice livre definido por $v_z r^n$ = constante, onde v_z é a velocidade tangencial, r o raio e n uma constante. Quando a relação entre os escoamentos que deixam o hidrociclone por cima e por baixo varia de infinito a zero, n varia de 0,84 a 0,75.

A transição entre as duas regiões – interna e externa – foi descrita por Kelsall como bastante abrupta. Uma análise mais acurada dos dados deste autor, entretanto, pode levar a conclusões diferentes. O comportamento de corpo rígido da região interna não é bem caracterizado.

Knowles et al. (1973) utilizou pequenas gotas com massa específica próxima a da água, 993 kg/m^3, como traçadores. Então, com o uso de técnicas de visualização, a velocidade tangencial pode ser estimada. O seu hidrociclone foi projetado de acordo com as recomendações de Rietema (1961). Sua operação, em particular, foi efetuada sem a ocorrência de um núcleo gasoso, um fato que influenciou bastante a natureza do escoamento. Os perfis de Knowles e de Kelsall apresentam uma semelhança qualitativa. Entretanto, o valor de n foi reduzido substancialmente para 0,2 a 0,4, quando comparado com os valores típicos para operação com um núcleo gasoso (0,7 a 0,8). Knowles concluiu que o núcleo vorticial não era extenso ou bem definido.

Experimentos em hidrociclones sem núcleo gasoso foram realizados tendo a LDV como técnica de medição principal. Dabir e Petty (1986) analisaram um hidrociclone também construído de acordo com as sugestões de Rietema de escalas ótimas. O hidrociclone operava com uma razão de tal que 80% do escoamento total saía do aparato pela saída superior (correspondente à saída denominada de rejeito, no presente trabalho). O componente azimutal da velocidade manteve-se quase na mesma da posição vertical. Dabir e Petty identificaram uma estrutura vorticial próxima ao eixo do hidrociclone. O valor máximo da velocidade tangencial foi atingido em um raio consideravelmente menor que aquele definido pelo prolongamento da saída superior. O valor de n foi determinado como sendo 0,62 – um valor bastante diferente daquele de Knowles apesar das condições semelhante de operação de ambos hidrociclones.

Um comportamento semelhante foi observado por Hwang et al. (1993) em outro hidrociclone operado sem núcleo gasoso. O comportamento da velocidade tangencial foi ainda investigado em hidrociclones com um cabeçote plano, sem prolongamentos. Luo et al (1989), Morendon et al. (1992), Chiné e Concha (2000) e Collantes et al. (2000) encontraram um comportamento ainda semelhante a este

justamente descrito.

Todos os experimentos descritos acima foram realizados com água pura ou sujeita a uma pequena contaminação por traçadores. Experimentos realizados com uma carga elevada de contaminação são difíceis de serem quantificados. Utilizando um tubo de Pitot com um sistema de autolimpeza, Bergstrom e Vomhoff (2005) mostraram que um hidrociclone carregado com fibras vegetais a baixas concentrações tinha seus máximos de velocidade tangencial diminuídos. A transição entre as duas estruturas de rotação de corpo livre e de vórtice livre é também suavizada.

Perfis radiais da velocidade axial foram levantados por Kelsall em diferentes posições verticais. A velocidade axial foi observada ser descendente junto às paredes do hidrociclone e ascendente na região central. Junto ao núcleo gasoso,velocidades ascendentes muito altas foram notadas. Kelsall também percebeu a presença de um envelope de velocidade axial zero. Esses envelopes, dois normalmente, se situam ao redor do prolongamento da saída superior.

Knowles et al. (1973) mediram as velocidades verticais e descobriram um comportamento oscilatório da velocidade axial no interior do prolongamento da saída. Embora essa oscilação fosse grande, a velocidade não chegada a mudar de sentido.

Dabir e Petty (1986) mediram vários escoamentos axiais contra-corrente, incluindo um escoamento descendente abaixo do prolongamento. Esse comportamento foi explicado como resultante da contração de 2:1 no prolongamento da saída.

Hwuang et al. (1993) observaram a existência de velocidades axiais ondulantes para diferentes razões de vazão volumétrica entre as saídas superior e inferior. Regiões de velocidade ascendente foram mesmo verificadas existir muito próximas à região de saída inferior.

Ohtake et al. (1987) observaram através de traçadores, uma região de escoamento descendente muito rápido exatamente fora da região do núcleo gasoso.

Chu e Cheng (1993) investigaram as trajetórias de pequenas partículas de poliestireno (1050 kg/m^3) através de um analisador de dinâmica de partículas. Eles não perceberam qualquer mudança no sentido do escoamento junto à região central do ciclone. Entretanto, eles conseguiram medir variações de velocidade abaixo do prolongamento, mais à sua região externa. As mudanças notáveis registradas na direção axial do escoamento registradas por Hwang et al. e Dabir e Petty não foram observadas neste estudo.

Morendon et al. (1992) utilizando LDV acharam simetrias da velocidade axial particularmente na parte superior do hidrociclone. Esse é um dos poucos exemplos de trabalho onde a tri-dimensionalidade do escoamento é analisada.

A velocidade radial no interior de ciclones tem sido muito pouco estudada, muito menos que as duas outras componentes descritas nos parágrafos anteriores. Isso pode parecer surpreendente pois, provavelmente, essa componente é a mais importante para um entendimento do fenômeno de separação. Como já vimos, o processo de separação requer necessariamente um deslocamento radial do fluido. Nas poucas vezes que os perfis de velocidade radial foram medidos, o grau de incerteza associado sempre foi alto. Os baixos valores de velocidade radial sempre são difícies de serem quantificados. Isso muito dificulta a interpretação dos dados.

Kelsall (1952) apresentou perfis de velocidade radial em diferentes posições pela redução de seus dados de velocidade tangencial e axial. Considerando ser a equação da continuidade verdadeira e ainda que o escoamento era axissimétrico, Kelsall deduziu que as velocidades de entrada eram maiores junto à parede do ciclone e decresciam no sentido do centro. O mesmo autor, entretanto, afirmou que uma inspeção visual do escoamento em uma região bem abaixo do prolongamento da saída superior (que chamamos de rejeito) revelava a presença de altas velocidades radiais de entrada. Seus argumentos são, pois, contraditórios.

Knowles et al. (1973) apresentaram perfis de velocidade radial obtidos de cálculos geométricos de medidas baseadas em técnicas de imagem. Como um teste de consistência, o componente radial foi também calculado pelos métodos de Kelsall. Para $r < (0,4)R$ a velocidade possuía sentido para dentro.

Os resultados de Kelsall e de Knowles et al. não podiam possuir discordância maior. Junto ao centro do ciclone Knowles et al. acharam que o escoamento possuía o sentido para fora. Em termos absolutos, os resultados de Knowles et al. apresentavam valores muito menores que os de Kelsall.

Dabir e Petty também não mediram diretamente as velocidades radiais. Ela foi obtida por um balanço de massa e argumentos de simetria. O aspecto qualitativo dos dados de Dabir e Petty concordam com os dados de Knowles et al.

Os trabalhos de Luo et al. (1989), Chu e Cheng (1996) e Fisher e Flack (2002) são raros exemplos onde à velocidade radial foi medida diretamente. Luo et al. (1989) utilizou LDV para estudar todos as três componentes de velocidade para duas geometrias diferentes de hidrociclones. Ambos hidrociclones operaram sem núcleo

gasoso. Um deles foi também colocado a operar com um núcleo gasoso. Em contraste aos trabalhos anteriores, Luo et al. encontraram velocidades elevadas com o sentido interno do escoamento. Luo et al. ainda propuseram que a velocidade radial na seção cônica podia ser aproximada pela relação $v_r r^m = - C$, onde v_r é a velocidade radial e m e C são constantes.

Chu e Cheng (1996) mediram a velocidade radial utilizando partículas de estireno e um Analisador Dinâmico de Partículas (ADP). A velocidade assumiu um valor máximo junto à linha de centro do ciclone. O ADP utilizado por Chu e Cheng também foi capaz de medir concentrações locais de partículas. Os picos de concentração foram identificados estarem localizados mais para o lado externo do hidrociclone.

Fisher e Flack (2002) mediram a velocidade radial através de LDV; eles concluíram que o valor médio absoluto da velocidade radial se situa na faixa de 2% da velocidade tangencial. Na seção superior cilíndrica, a velocidade radial é quase nula.

A quebra de partículas ou bolhas no interior de ciclones é uma área extremamente carente de trabalhos específicos. Renner e Cohen (1978) utilizaram um sensor com alta taxa de amostragem para investigar a distribuição do tamanho de partículas minerais em várias posições de um hidrociclone. O sensor foi projetado de modo a perturbar o escoamento o mínimo possível. Quatro zonas características com particulares tamanhos de partículas foram identificadas. A região onde a separação ocorre verificou-se ser surpreendentemente pequena, localizada nas vizinhanças do prolongamento da saída superior. Essa região foi observada ser dependente do número de Reynolds do escoamento e da geometria do hidrociclone.

Chu et al. (1996) dividiram o hidrociclone em três regiões distintas. A região principal de separação ocupa o volume logo abaixo do prolongamento, indicando que a maior parte da separação ocorre na parte cônica do hidrociclone.

Os estudos acima mencionados nos fornecem uma visão parcial dos últimos desenvolvimentos em hidrociclones. A maioria absoluta dos trabalhos tem estudado geometrias com apenas uma entrada. Apesar da tri-dimensionalidade do escoamento, implicada diretamente pelas condições de entrada, apenas um trabalho estuda os hidrociclones sob este ponto de vista.

Os padrões qualitativos das velocidades tangenciais concordam em quase todos estudos. Duas regiões distintas podem ser modeladas. Para a velocidade axial alguma confusão pode ser percebida. Entretanto, algumas tendências são claras. O

escoamento junto à parede escoa para baixo em direção ao vértice. Em alguma posição do raio a direção do escoamento muda, resultando em um escoamento ascendente.

A velocidade radial, de acordo com estudos recentes, possui apenas o sentido para dentro do ciclone, em direção à linha de centro, aumentando conforme se aproxima do eixo, sendo esta última conclusão refutada pelo presente trabalho.

Capítulo 3

Técnicas de Medição do Escoamento

O conhecimento do campo de velocidade de fluidos em movimento é fundamental para o entendimento dos mecanismos básicos que governam a dinâmica do escoamento. Nas últimas décadas, a evolução da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores viabilizou a solução numérica de escoamentos complexos.

Em áreas onde os métodos computacionais são aplicados em modelos físicos bem estabelecidos com modelos matemáticos bem comportados, o papel de experimentos de laboratório tem se enfraquecido consideravelmente, não sendo mais necessária a comprovação experimental das previsões computacionais. No entanto, existem classes de problemas mais complexos para os quais os estudos experimentais são fundamentais para o entendimento dos fenômenos básicos envolvidos e validação de previsões numéricas.

Para o presente trabalho foi estudado um escoamento no interior de um hidrociclone, tratando-se, pois de um escoamento com características bastante complexas tais como: linhas de corrente com curvatura acentuada, forças de campo intensas e turbulência anisotrópica. Melhores modelos fluidodinâmicos têm sido buscados constantemente, mas ainda assim a caracterização do escoamento não é um problema fácil de resolver. Por isso a medição experimental, em laboratório, constitui uma importante ferramenta na caracterização desse escoamento. A seguir serão descritas as duas técnicas de medição de velocidade utilizadas nesse experimento.

3.1 Velocimetria por Imagem de Partícula – PIV

3.1.1 Visão Geral

De uma maneira bem geral podemos descrever o PIV como uma medida simultânea dos vetores velocidade de vários pontos que caracterizam o fluido, usando técnicas ópticas. O fluido de processo está impregnado de partículas reflexivas que acompanham o escoamento. Dois pulsos de luz são disparados iluminando a mesma região do escoamento, que é assim fotografada em dois instantes distintos e muito

próximos, resultando em imagens que correspondem a uma densa distribuição espacial de partículas. Estas imagens são comparadas entre si permitindo a determinação do deslocamento das partículas de uma para outra imagem. Esse deslocamento será, por hipótese, o mesmo do fluido uma vez que é assumido que as partículas acompanham o escoamento do fluido. Como o tempo entre cada pulso de luz é conhecido, a velocidade é diretamente determinada pela razão entre o deslocamento e esse tempo.

O sistema PIV é composto de diversos subsistemas: fonte de luz, partículas reflexivas, câmera para capturar as imagens, sistema de lentes, sincronizador, e software para processamento das imagens. Vale ressaltar que o fluido de processo deve ser transparente ao comprimento de onda da luz utilizada.

A figura 3.1 mostra um esquema típico de um sistema PIV em um túnel de vento. Pequenas partículas traçadoras são adicionadas ao escoamento. O escoamento é iluminado duas vezes por um plano de luz (o tempo entre os pulsos de luz depende da velocidade do escoamento). A luz espalhada pelas partículas traçadoras é gravada através de sensores eletrônicos de imagem conhecidos como CCD (*charge coupled device*).

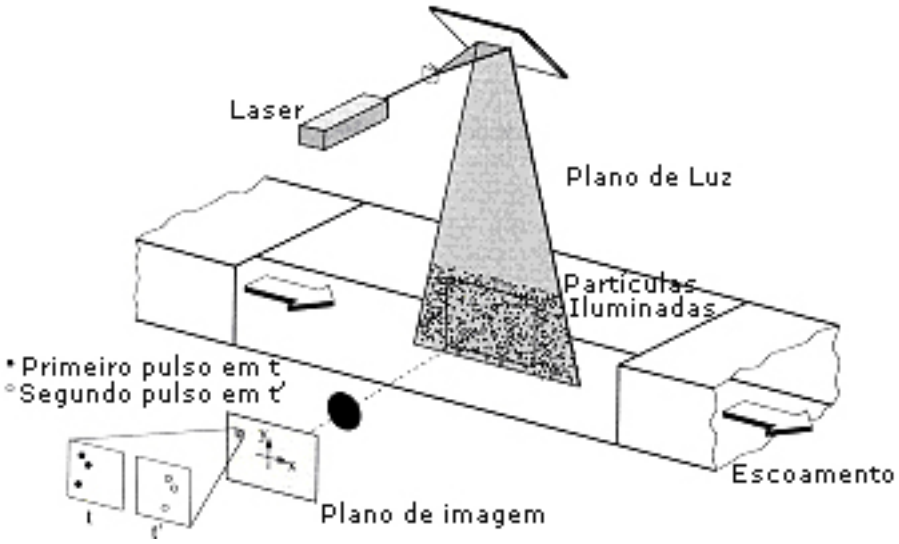


Figura 3.1 – Técnica de medição PIV

Para o cálculo a imagem digitalizada é dividida em pequenas áreas chamadas de "janelas de interrogação". O vetor deslocamento, das imagens das partículas traçadoras formadas pela primeira e segunda iluminação, é determinado para cada janela de interrogação através de métodos estatísticos (correlação cruzada). É

assumido que todas as partículas da mesma janela de interrogação estão se movendo com a mesma velocidade. A projeção do vetor velocidade local do escoamento no plano de luz (velocidade em duas componentes) é calculada de acordo com o tempo entre os dois pulsos de iluminação.

Antes de abordarmos mais detalhadamente a técnica PIV, é conveniente ressaltar alguns aspectos gerais da técnica:

- **Medição não intrusiva de velocidade**: Diferentemente das técnicas mais usuais para medição de velocidade tais como tubo de Pitot e fio quente, o sistema PIV é uma técnica óptica portanto não intrusiva ao escoamento. Isto possibilita a sua utilização para investigação do escoamento em equipamentos de pequenas dimensões onde a presença física de uma sonda poderia modificar significativamente o campo de escoamento.
- **Medição indireta da velocidade**: A técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula–PIV mede a velocidade do fluido através de partículas traçadoras. Por isso a massa específica das partículas deve ser a mesma do fluido para que elas acompanhem fielmente o escoamento.
- **Técnica do campo completo**: O PIV é uma técnica que permite, em uma tomada, a visualização de uma grande área do escoamento. Outras técnicas permitem a medição de velocidade somente em um ponto, contudo com uma alta resolução temporal. O PIV tem alta resolução espacial, todavia a resolução temporal é limitada devido a restrições técnicas. Sistemas tradicionais trabalham com taxa de aquisição de cerca de 5Hz. Atualmente sistemas PIV de alta velocidade estão disponíveis proporcionando alta resolução temporal de até 10 kHz.
- **Escorregamento**: O emprego de partículas traçadoras para a medição da velocidade do escoamento, requer um estudo cuidadoso sobre qual partícula aplicar para minimizar o escorregamento em relação ao fluido. Se a massa específica da partícula não for exatamente a mesma do fluido, suas dimensões devem ser as mais reduzidas possíveis, uma vez que o escorregamento é também minimizado para partículas pequenas ($<20\mu m$).
- **Iluminação**: Devemos utilizar partículas grandes para termos um melhor espalhamento da luz. Isto está em contradição com a necessidade de termos partículas cada vez menores para evitar o escorregamento. Portanto deve-se

sempre procurar um tamanho de partícula que proporcione uma solução de compromisso entre as necessidades de iluminação e do escoamento.

- **Duração do pulso**: A duração do pulso de iluminação deve ser a menor possível de modo que as partículas fiquem “congeladas” durante o tempo de exposição.
- **Intervalo de tempo entre os dois pulsos**: O intervalo entre os pulsos de luz deve ser grande o suficiente para que seja possível determinar o deslocamento entre duas imagens e pequeno o suficiente para evitar que partículas sejam “perdidas” (saiam da janela de interrogação) entre um pulso e outro.
- **Distribuição de partículas traçadoras**: Uma distribuição homogênea de partículas é desejada para uma boa resolução do sistema PIV. É importante notar que uma boa resolução significa que não há formação de aglomerados de partículas, ou seja, elas estão distribuídas de forma homogênea no fluido.
- **Concentração das partículas traçadoras**: A figura 3.2 mostra, de forma qualitativa, três tipos de imagens formadas com concentrações diferentes de partículas. Na figura 3.2a vemos pouca concentração de partículas o que acarretará em erro no cálculo dos vetores velocidade, pois quando a área a ser investigada for dividida nas janelas de interrogação, haverá regiões sem partículas. No caso da figura 3.2b temos a situação ideal para determinação da velocidade do escoamento. Na prática, para obtermos bons resultados, devemos ter pelo menos 10 partículas em cada janela de interrogação. Quando temos alta concentração de partículas, como mostra a figura 3.2c, não é possível identificar cada partícula em separado, pois elas se sobrepõem.

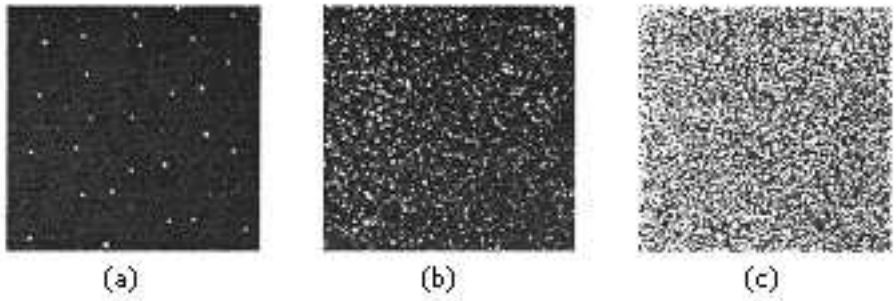


Figura 3.2 – Exemplo de concentração de partículas: (a) baixa, (b) média e (c) alta concentração

- **Número de iluminação por gravação:** Existem dois modos de gravarmos as imagens: os dois pulsos de luz são gravados no mesmo quadro, nesse usamos a técnica de autocorrelação para o cálculo dos vetores velocidade; ou gravamos cada pulso de luz em cada quadro, que é o método de correlação cruzada.
- **Número de componentes do vetor velocidade:** Devido à iluminação ser em um plano do escoamento duas componentes de velocidade são determinadas no sistema PIV padrão. Porém métodos modernos como o sistema estéreo permitem que se meça a terceira componente da velocidade: perpendicular ao plano iluminado.
- **Janela de interrogação:** O tamanho da janela de interrogação deve ser pequeno o suficiente para que gradientes de velocidade não tenham influência significativa no resultado.
- **Repetibilidade do cálculo:** No sistema PIV todas as informações do escoamento são registradas na sua forma bruta. Essa é uma característica interessante do sistema, pois permite que o cálculo e o pós-processamento da imagem possam ser feitos utilizando diferentes técnicas, sem necessidade de repetir o experimento.

3.1.2 – Principais componentes do sistema PIV

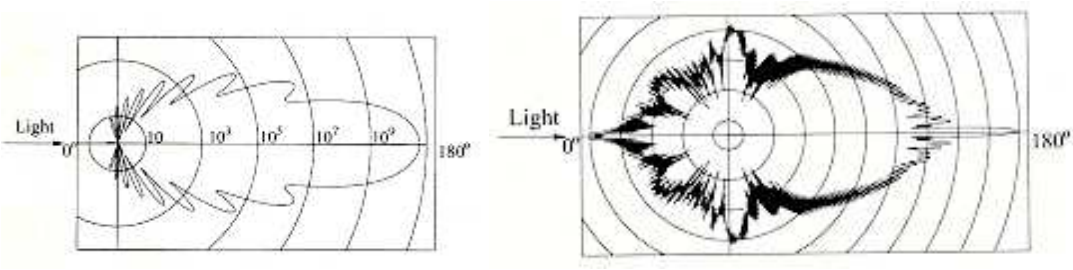
O desenvolvimento da velocimetria por imagem de partícula durante os últimos 20 anos tem se caracterizado pelo fato dos sistemas analógicos de gravação e cálculo terem sido substituídos por técnicas digitais. A descrição dos principais componentes do PIV se concentrará nos aspectos mais modernos da técnica.

3.1.2.1 Partículas traçadoras

A técnica PIV é baseada na medição indireta do escoamento uma vez que o que é medido é a velocidade da partícula que está no fluido, e não diretamente a velocidade do fluido. Por isso é necessário levar em consideração as propriedades das partículas para minimizar os problemas de escorregamento partícula / fluido.

Um item muito importante é a escolha do diâmetro da partícula. A luz espalhada por uma superfície esférica é proporcional ao seu diâmetro. De acordo com

a teoria de MIE (Raffel et al. – 1998) o espalhamento de luz depende da orientação que a luz incide na partícula. A figura 3.3 mostra a intensidade de luz espalhada para partículas com diâmetro de 1μm e 10μm.



(a) (b)

Figura 3.3–Espalhamento de luz para partículas de vidro na água com diâmetros de 1μm (a) e 10μm (b)

As partículas devem ser pequenas o suficiente para acompanhar o fluido e grande o bastante para promover um espalhamento de luz adequado. Na tabela 3.1 mostra os principais tipos de partículas para aplicação em líquidos.

Tabela 3.1 – Partículas reflexivas utilizadas em líquidos

TIPO	MATERIAL	DIÂMETRO MÉDIO (μm)
Sólido	Poliestireno	10 – 100
	Alumínio	2 – 7
	Esperas de vidro	10 – 100
	Grãos com cobertura sintética	10 – 500
Líquido	Gotas de óleo	50 – 500
Gasoso	Bolhas de oxigênio	50 – 1000

3.1.2.2 Fonte de luz e sistema óptico

O laser é amplamente utilizado nos sistema PIV devido a sua capacidade de emitir uma luz monocromática com alta concentração de energia, que pode ser colocada como um fino plano de luz capaz de iluminar as partículas sem gerar aberrações cromáticas.

O mais importante laser para o sistema PIV é o Nd:YAG, com comprimento de onda λ = 532nm. O feixe é gerado por íons Nd^{3+} (neodímio) que são incorporados ao material YAG (ítrio – alumínio – granada).

Para que se tenha bastante flexibilidade nas medições de velocidade (altas ou baixas) o sistema PIV trabalha com dois lasers simultâneos de modo que o intervalo de tempo entre os pulsos possa variar de *ms* a μs.

O sistema óptico incluí lentes esféricas e cilíndricas. A lente cilíndrica faz com o feixe fique divergente, gerando um plano de luz. A lente esférica controla a espessura desse plano. Para a maioria das aplicações um plano de luz com 1mm de espessura é desejado.

3.1.2.3 Sincronizador

Para obter a imagem no sistema PIV, o pulso de laser e a câmera devem ser disparados em seqüência e sincronizadamente, num tempo adequado às condições do escoamento que está sendo analisado. O dispositivo chamado de sincronizador é responsável por controlar os tempos de ação de todos os componentes envolvidos na aquisição da imagem.

3.1.2.4 Câmeras CCD

O CCD é um sensor eletrônico que converte luz, isto é, fótons, em carga elétrica. Normalmente quando nos referimos a um sensor CCD, temos em mente uma matriz desses sensores. Cada elemento individual da matriz é chamado de pixel (*picture element*) e suas dimensões típicas são da ordem de 10x10μm.

O funcionamento desse dispositivo pode ser mais bem entendido olhando a figura 3.4. O CCD é construído sobre um material semicondutor, tipicamente sílica, com metal condutor em sua superfície, uma camada isolante, uma camada-n (anôdo) e uma camada-p (catôdo) abaixo. Uma pequena voltagem aplicada entre o metal condutor e a camada-p gera um campo elétrico no semicondutor. O mínimo campo elétrico que é formado abaixo do centro do pixel está associado com a necessidade de elétrons e isto é conhecido como “poço potencial”. Na verdade, poço potencial é equivalente a um capacitor permitindo que se armazene carga, isto é, elétrons. Quando um fóton de um comprimento de onda adequado entra na junção p-n do semicondutor um par do elétron é gerado. Isto é conhecido como efeito fotoelétrico. Enquanto este par, considerado como carga positiva, é absorvido na camada-p, o elétron gerado migra em direção ao poço potencial onde é armazenado. Os elétrons continuam a se acumular durante a exposição do pixel a luz. Contudo, a capacidade de armazenamento do pixel é limitada e valores típicos variam de 10.000 a 100.000

elétrons por pixel. Quando a exposição for excessiva e este número for excedido, os elétrons adicionais migram para os pixels vizinhos deixando a imagem com certa florescência. Este efeito é reduzido nos modernos CCD através de dispositivos antiflorescente.

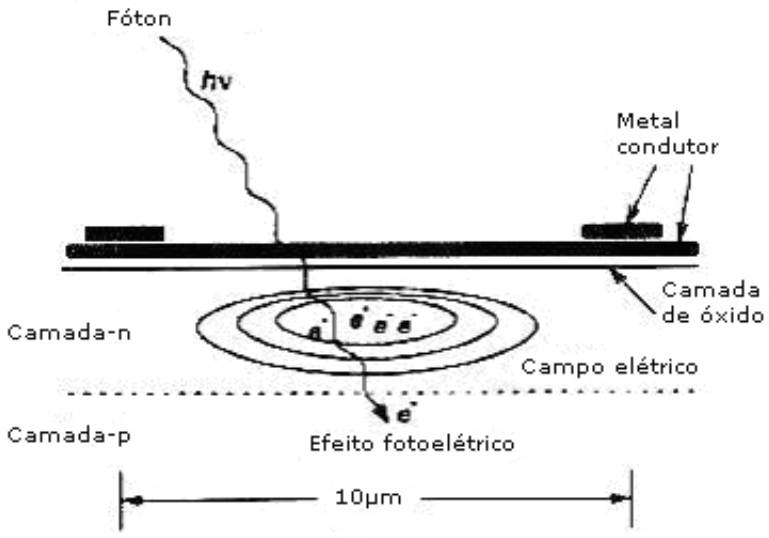


Figura 3.4 - Modelo simplificado de um pixel

Muito cuidado é requerido com a quantidade de luz incidente nas câmeras. O CCD é extremamente sensível à luz e intensidades luminosas muito altas podem "queimar" alguns pixels do CCD. Os softwares comerciais do sistema PIV utilizam um recurso que identifica o excesso de iluminação: formação de áreas vermelhas na imagem. Por isso, no início de cada experimento deve-se começar com uma baixa potência da fonte luminosa (Raffel et al. – 1998).

3.1.3 Imagem das partículas

Deve-se ter em mente a importância de uma imagem de boa qualidade. A análise do sistema PIV mostra que o erro na medição de velocidade é fortemente dependente do diâmetro da partícula. Em muitas situações práticas o erro pode ser minimizado diminuindo o diâmetro da imagem.

O tamanho da imagem da partícula (d_τ) formada no CCD é a combinação do tamanho da imagem (d_p) com o fator de magnificação (M).

Para uma lente limitada por difração, temos:

$$d_{diff} = 2{,}44 f_{\#}(1+M)\lambda \quad (1)$$

onde $f_{\#}$ é o número f da lente definido como a razão entre a distância focal e o diâmetro de abertura, λ é o comprimento de onda do laser (532 nm) e M é o fator de magnificação. Revisando alguns conceitos da óptica:

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

onde z_0 é definido como a distância da imagem a lente, Z_0 à distância do objeto a lente e f é a distância focal. O fator de magnificação é definido como:

$$M = \frac{z_0}{Z_0} \quad (3)$$

O diâmetro da imagem da partícula será dado pela fórmula:

$$d_\tau = \sqrt{\left(M^2 d_p^2 + d_{diff}^2\right)} \quad (4)$$

Como já mencionado, a escolha das partículas envolve a conciliação de dois fatores: o diâmetro das partículas deve ser o menor possível para que ela acompanhe o escoamento por outro lado, deve ser grande o suficiente para que espalhe a luz necessária para sensibilizar o sensor da câmera.

3.1.3.1 Profundidade de campo

A profundidade de campo, para uma dada lente, é a distância em que dois objetos de interesse podem estar afastados e, ainda assim, formarem imagens adequadamente focadas (imagens aceitáveis). No sistema PIV, uma vez que é preciso capturar imagens de partículas muito pequenas, elas precisam estar bem focadas para produzir um bom resultado. Altos fatores de magnificação e grandes aberturas de lente reduzem a profundidade de campo, mas são requeridos, na maioria dos casos, para se assegurar luz suficiente para a formação da imagem.

Quanto maior a abertura da lente menor é a profundidade de campo, contudo, as imagens do PIV devem ser capturadas com a máxima abertura de lente possível para que a câmera fique mais sensível à luz espalhada pela partícula, por outro lado deve-se ter uma profundidade de campo adequada para que as partículas mantenham-se focadas. Por exemplo, para uma lente de distância focal de 105 mm e com um fator de magnificação de 1, a profundidade de campo é menor que 1mm. Se a espessura do plano de laser for de 1mm (valor típico) não se dispõe de margem para um possível pequeno desalinhamento da câmera. Nesse caso deve-se aumentar a profundidade de

campo, reduzindo a abertura da lente.

Como mencionado, profundidade de campo é a distância entre o objeto mais próximo e o mais afastado, dentro da qual a imagem resultante é “bem focada”. A expressão “bem focada” é algo subjetivo e que requer a opinião do experimentalista. Para computar a profundidade de campo é definido um valor limite para o desvio da imagem. Para as câmeras CCD esse valor limite é função do tamanho do pixel. A fórmula para a profundidade de campo é:

$$PDC = \frac{2D^2\beta}{A} \tag{5}$$

onde

PDC = profundidade de campo;

D = distância do objeto

A = abertura da lente (mm)

β = desvio da imagem angular (B/ImgD)

B = tamanho do desvio da imagem aceitável

ImgD = distância da imagem

Esta fórmula mostra que a profundidade de campo é inversamente proporcional à abertura da lente e proporcional ao número-f da lente. A figura 3.5 mostra um esquema da profundidade de campo.

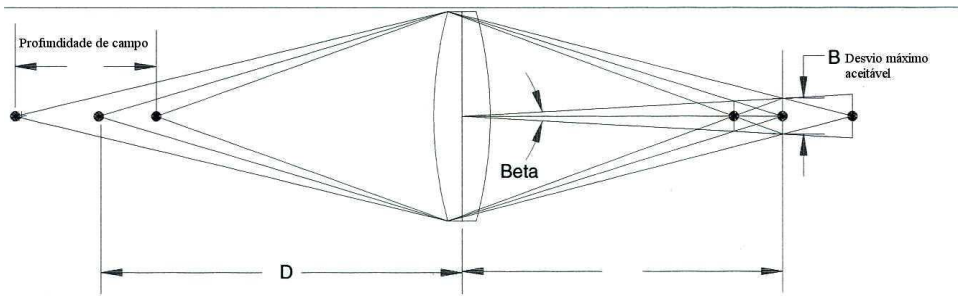


Figura 3.5 – Profundidade de campo

3.1.4 Correlação das imagens

3.1.4.1 Autocorrelação

A velocidade das partículas pode ser calculada utilizando duas técnicas diferentes: autocorrelação e a correlação cruzada. Na autocorrelação a mesma janela de imagem é usada para o primeiro e o segundo quadro. Na correlação cruzada a primeira imagem é gravada no quadro 1 e segunda imagem no quadro 2. A técnica de autocorrelação é o sistema clássico de PIV. A correlação cruzada fornece resultados

melhores, porém exige maior recurso computacional e câmeras CCD com elevada taxa de transferência de dados, atualmente é o método mais usado para o cálculo da velocidade.

A correlação de dados é um dos tópicos mais importantes para o cálculo da velocidade por essa razão faz-se necessário um bom entendimento deste parâmetro. Embora os softwares comerciais usem a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para a correlação de dados, vamos inicialmente entender o método de correlação utilizando o histograma de partículas. O exemplo citado pode ser encontrado em TSI, *Particle Image Velocimetry, software* (2000)

Consideremos uma imagem aquisitada pelo sistema PIV, analisaremos uma pequena área dessa imagem. As partículas dessa janela de interrogação são identificadas e o centro de cada uma delas é determinado. A tabela 3.2 mostra um exemplo da lista de partículas e a figura 3.6 exemplifica a correspondente janela de interrogação.

Tabela 3.2 – Lista de partículas com seus respectivos centros

Número da Partícula	Centro em X	Centro em Y
1	0,4	0,7
2	0,1	0,6
3	0,8	0,6
4	0,5	0,5
5	0,6	0,3
6	0,3	0,2

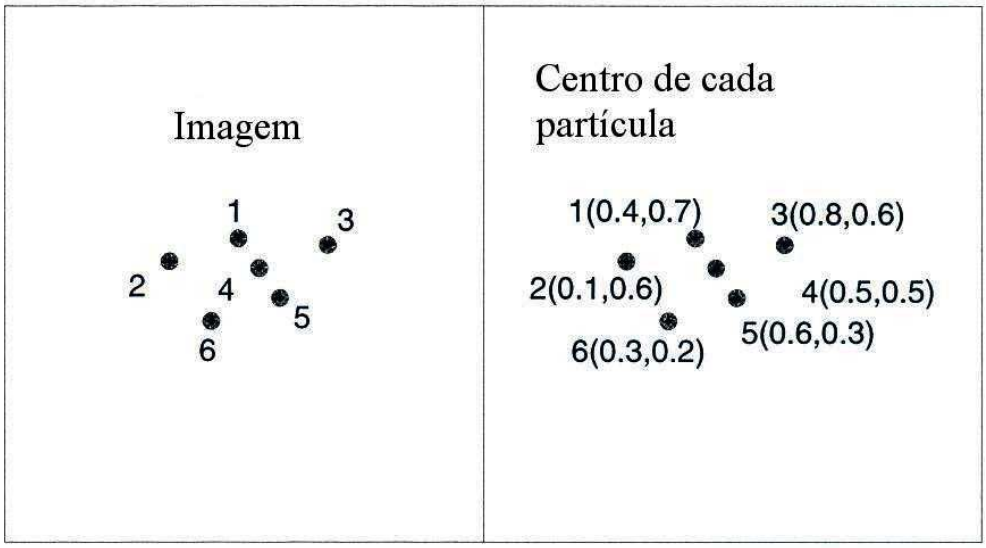


Figura 3.6 – Partículas identificadas

A tabela 3.3 mostra uma matriz comparando o deslocamento entre todas as partículas. A tabela 3.4, a seguir, mostra a freqüência que cada deslocamento (Δx e Δy) ocorre.

Tabela 3.3 – Pares de partículas

	Primeira Imagem:Partícula Numerada (posição)					
	#1 (0.4,0.7)	#2 (0.1,0.6)	#3 (0.8,0.6)	#4 (0.5,0.5)	#5 (0.6,0.3)	#6 (0.3,0.2)
Segunda Imagem: Partícula Numerada (posição)						
#1 (0.4,0.7)	(0,0)	(0.3,0.1)	(-0.4,0.1)	(-0.1,0.2)	(-0.2,0.4)	(0.1,0.5)
#2 (0.1,0.6)	(-0.3,-0.1)	(0,0)	(-0.7,0)	(-0.4,0.1)	(-0.5,0.3)	(-0.2,0.4)
#3 (0.8,0.6)	(0.4,-0.1)	(0.7,0)	(0,0)	(0.3,0.1)	(0.2,0.4)	(0.5,0.4)
#4 (0.5,0.5)	(0.1,-0.2)	(0.4,-0.1)	(-0.3,-0.1)	(0,0)	(-0.1,0.2)	(0.2,0.3)
#5 (0.6,0.3)	(0.2,-0.4)	(0.5,-0.3)	(-0.2,-0.4)	(0.1,-0.2)	(0,0)	(0.3,0.1)
#6 (0.3,0.2)	(-0.1,-0.5)	(0.2,-0.4)	(-0.5,-0.4)	(-0.2,-0.3)	(-0.3,-0.1)	(0,0)

Tabela 3.4 – Distribuição de freqüência do deslocamento entre as partículas

ΔX	ΔY	Frequência
–.7	0.0	1
–.5	–.4	1
–.5	.3	1
–.4	.1	2
–.3	–.1	3
–.2	–.3	1
–.2	–.4	1
–.2	.4	2
–.1	–.5	1
–.1	0.2	2
0.0	0.0	6
.1	–.2	2
.1	.5	1
.2	–.4	2
.2	.4	1
.2	.3	1
.3	.1	3
.4	–.1	2
.5	–.3	1
.5	.4	1
.7	0.0	1
	Total	36

Os dados são então plotados em um gráfico onde a intensidade na escala de cinza identifica o pico de sinal, isto está exemplificado na figura 3.7.

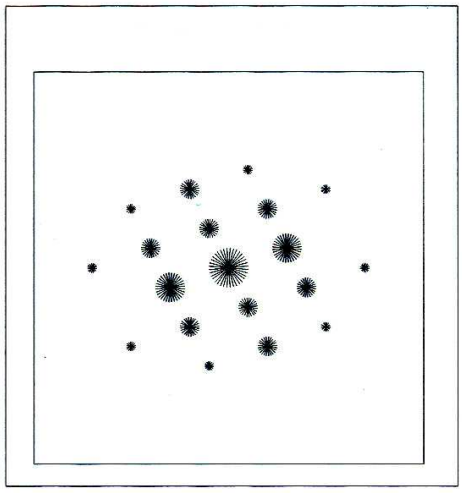


Figura 3.7 – Mapa de autocorrelação

O deslocamento que predomina com maior freqüência é o (0,0). Isto significa a partícula se correlacionando com ela mesma. Uma vez que isso não traz nenhuma informação significativa, a maioria dos softwares ignora esse pico.

Uma vez que o pico (0,0) é eliminado, a autocorrelação irá procurar o outro pico. No exemplo mostrado o sinal mais forte aparece três vezes com os deslocamentos (-0.3 , -0.1) e (0.3 , 0.1). Cada pico da autocorrelação está associado a um pico de mesma intensidade na direção reversa. Isso significa que um pico é a medida da primeira para a segunda imagem e o outro da segunda para primeira imagem. Contudo como não existe nenhuma informação sobre qual imagem veio primeiro o processamento não é capaz de detectar o pico correto. É necessário colocar a direção do escoamento e procurar os picos somente em meio plano.

Neste exemplo todas as partículas têm um par associado e não há par perdido. A freqüência que o maior deslocamento aparece é metade do deslocamento (0,0) (partículas correlacionando entre si). Caso haja par perdido esta freqüência pode ser menor que 50% do deslocamento (0,0). Todos os outros picos são considerados ruídos.

3.1.4.2 Correlação cruzada

A correlação cruzada é o método mais utilizado atualmente para a análise das imagens. Duas imagens são capturadas em quadros diferentes: a primeira é referente ao primeiro pulso do laser e a segunda imagem, referente ao segundo pulso de laser. Cada quadro é dividido em pequenas regiões chamadas de “janelas de interrogação”.

A correlação cruzada entre essas áreas determina o vetor deslocamento. A direção do vetor deslocamento é dada do primeiro para o segundo quadro.

As vantagens desse método são:

- Não é necessária nenhuma informação adicional sobre a direção do escoamento.
- Melhor relação sinal – ruído quando comparado com o método de autocorrelação.

O objetivo da correlação cruzada é encontrar a distância que a partícula percorre no intervalo entre duas imagens e então calcular a velocidade. A relação entre a velocidade ***U*** e o deslocamento ***d*** é simples:

$$U = \frac{d}{M\Delta t}, \tag{6}$$

onde *M* é o fator de magnificação e Δt é o tempo entre as imagens.

Como já mencionado o método de correlação cruzada utiliza pequenas áreas denominadas janelas de interrogação. Um vetor velocidade é calculado para cada janela de interrogação. A figura 3.8 exemplifica a técnica de correlação cruzada.

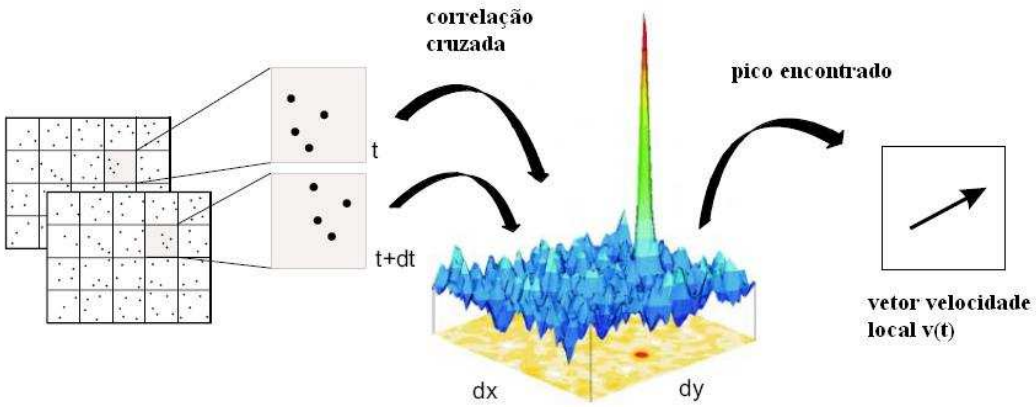


Figura 3.8 – Ilustração de como a velocidade é extraída através de um par de imagens

Uma das maneiras de efetuar a correlação é através do histograma de partículas, contudo os softwares comerciais utilizam a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT). O processo FFT dá o mesmo resultado que a análise feita pelo histograma, contudo é um processo computacional muito mais eficiente.

A transformada de Fourier é uma transformação linear do espaço ou do tempo ao domínio da freqüência. Em vez de indicar os dados na maneira que foi medida,

após a aplicação da transformada de Fourier, eles são vistos como intensidades do sinal de determinadas freqüências. Uma vez que as funções base da transformada de Fourier são ortogonais e completas, nenhuma informação é perdida na transformação. Aplicar a transformação inversa de Fourier recuperará os dados originais outra vez. A transformada de Fourier (FT) é definida usando integrais em tipos contínuos de dados. Por outro lado, computadores armazenam valores digitalizados em intervalos regulares no espaço. Aqui, a transformada discreta de Fourier (DFT), definido como a soma de valores discretos, deve ser usada. Finalmente, a transformada rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo rápido para computar a DFT, que reduz bastante o tempo de cálculo. Devido ao FFT-algoritmo ser bastante rápido, o FFT tornou-se um uma ferramenta extensamente utilizada para tratamento de dados em diversas aplicações.

Para um conjunto de N dados, por exemplo, são necessários N*N cálculos numéricos usando a DFT. Usando a FFT isto é reduzido a $N\log_2(N)$. A aplicação principal de FFTs é na execução de técnicas de filtragem, uma vez que no espaço da freqüência muitos filtros podem ser feitos por uma simples multiplicação. Na maioria das vezes um filtro passa-baixo é usado para eliminar o ruído de alta freqüência, ou um filtro passa-alto pode suprimir mudanças lentas não desejadas. A FFT também é usada como um método rápido para computar a correlação entre 2 conjuntos de dados (LaVision Manuals – 20024).

O uso da técnica FFT trata os dados como se fossem periódicos. A periodicidade pode levar a um erro conhecido como *"aliasing"* que é causado pela perturbação de dados periódicos adjacentes. Isto ocorre quando as partículas se movimentam uma distância maior que a metade da janela de interrogação. A solução para evitar este problema é aumentar a janela de interrogação ou diminuir o intervalo de tempo entre as imagens. Outro erro que pode ocorrer com o uso da FFT é chamado erro de tendência (*bias error*). Um dos erros mais significativos desse grupo é o *"peak locking"* que é a tendência dos valores de deslocamento das partículas serem estimados em valores inteiros de pixels.

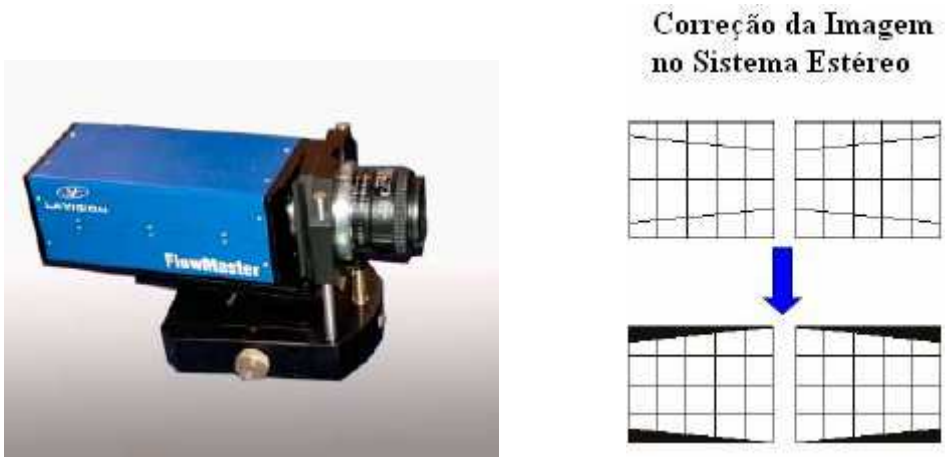
O resultado estatístico que é insensível ao de fenômeno de "peak locking" é a velocidade média, que é o objeto de estudo do presente trabalho (Raffel et al. – 1998).

3.1.5 Sistema estéreo – 3D

Uma das facilidades do sistema PIV, que está sendo cada vez mais usada, é a possibilidade de se medir os três componentes de velocidade. Para isso é necessário o emprego de duas câmeras de captura de imagem. Elas devem ficar posicionadas de tal forma que o ângulo entre elas fique entre 30° e 90°. Uma vez que o terceiro componente de velocidade é normal ao plano de laser, o tempo entre os pulos deve ser pequeno o suficiente para que a partícula permaneça no "plano" de laser (com espessura da ordem de 1mm).

A relação entre os pontos no escoamento e a imagem correspondente nas duas câmeras é estabelecida através de um processo de calibração. O modo mais usual de se realizar esta calibração é através de um alvo de tridimensional.

Outro ponto a ser considerado é o fato da câmera não estar posicionada ortogonalmente ao objeto e isso resulta em uma imagem deformada no CCD. Para minimizar este desvio deve-se colocar a lente um pouco angulada em relação ao CCD, este ângulo é conhecido como "*Scheimpflüg angle*". A figura 3.9 (a) e (b) mostra uma câmera montada com este dispositivo de ajuste e a imagem corrigida.



(a) (b)

Figura 3.9 – Correção essencial para o sistema estéreo. Em (a) temos a câmera montada com um dispositivo para o ajuste do "*Scheimpflüg angle*". Em (b) a imagem corrigida.

3.2 Velocimetria por Laser Doppler – LDV

3.2.1 Visão geral

O primeiro instrumento a utilizar o efeito Doppler para medir o campo de velocidade de um escoamento foi desenvolvido por Yeh e Cummins em 1964. Desde então, o progressivo aperfeiçoamento de tecnologias ópticas e de processamento

eletrônico, bem como o aumento da capacidade computacional tornou a medição de velocidade por efeito Doppler (LDV) uma técnica robusta, apropriada à medição da turbulência. Como princípio básico, esta técnica utiliza o efeito Doppler para avaliar a velocidade do fluido em um dado ponto do escoamento. Tomando uma visão mais geral, a técnica LDV consiste no uso de uma fonte de luz coerente (todos os fótons tem a mesma freqüência e viajam na mesma velocidade) para gerar dois raios que se cruzam, dando origem a franjas de interferência. A configuração de franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. A região de interseção dos dois raios, ponto onde o escoamento é de fato avaliado, é denominada volume de controle.

A medição da velocidade pela técnica LDV, ocorre de maneira indireta: o fluido deve receber partículas reflexivas que podem ser bolhas ou qualquer coisa que tenha um índice de refração diferente do fluido. As partículas devem ser pequenas o suficiente (geralmente na faixa de mícron) para seguir o escoamento e grandes o bastante para prover um sinal adequado.

Os principais componentes do sistema são:

- Laser argônio – fonte de luz monocromática e coerente
- Sistema óptico para separar as luz em freqüências distintas,
- Célula de Brag;
- Fibra óptica
- Sonda para transmissão da luz
- Fotodetector e processador de sinais.

A figura 3.10 ilustra um sistema LDV.

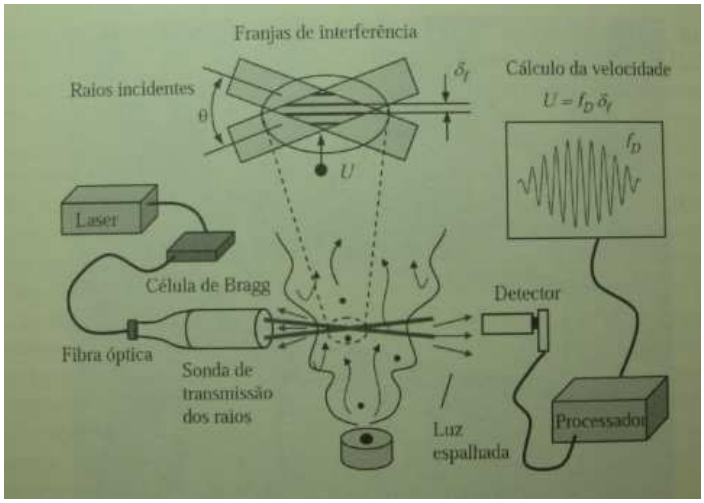
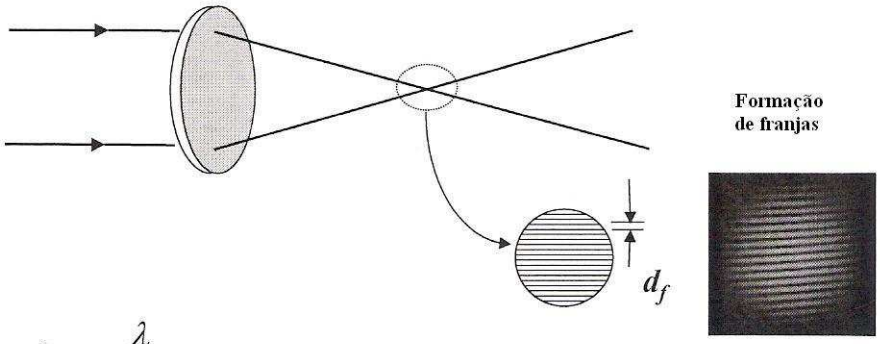


Figura 3.10 – Sistema LDV

O espaçamento entre as franjas (d_f) depende somente do comprimento de onda da luz (λ) e da metade do ângulo que se forma entre os raios (θ). Com o uso do laser o comprimento de onda é bem determinado (0,01% ou melhor). O ângulo entre as faixas determina o valor exato do espaçamento entre as franjas, que é fundamental para o cálculo da velocidade. A figura 3.11 mostra as franjas se formando pelo cruzamento entre dois raios.



$$d_f = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen} \theta}$$

$$u_x = f_D \, d_f$$

λ = Comprimento de onda da luz incidentes

f_D = Freqüência detectada pelo fotodetector

Figura 3.11 - Formação das franjas

O ângulo θ, que define o espaçamento entre as franjas, varia de acordo com a lente usada na sonda. Um valor típico de espaçamento é de 5μm e valores considerados largos são da ordem de 25μm. Na prática velocidades de 1μm/s a até 1.000 m/s tem sido medidas que corresponde a uma faixa de 10^9.

A configuração mostrada na figura 3.11 resolve o componente do vetor velocidade normal às franjas de interferência, mas nenhuma informação sobre o sentido desta componente está contida no sinal adquirido. Isso acontece porque a freqüência não é dependente do sentido da velocidade, ou seja, uma medida de velocidade de mesma magnitude, positiva ou negativa, irá resultar na mesma freqüência Doppler.

Movimento das franjas

Um grande problema que temos, na medição de fluxo reverso, é que, a priori, a direção do escoamento não é conhecida. O sistema usual de LDV não pode distinguir entre a velocidade "positiva" e a "negativa". Este problema, chamado "ambigüidade direcional", é resolvido deslocando (aumentando ou diminuindo) a freqüência de um

dos dois feixes com respeito ao outro. Isto resultará em ter franjas em movimento no volume de medição. O sentido do movimento da franja é do feixe da freqüência mais elevada para a mais baixa. Três casos podem ocorrer:

i) a partícula se movendo paralelamente às franjas em movimento, resultando no deslocamento imposto da freqüência (f_{shift}),

ii) a partícula movendo-se na direção oposta ao movimento das franjas, resultando em $f > f_{shift}$,

iii) a partícula movendo-se no mesmo sentido do movimento das franjas, resultando em $f < f_{shift}$.

Para impor esse deslocamento na freqüência, os sistemas laser-Doppler são normalmente equipados com moduladores óptico-acústicos, chamados de células de Bragg. Esta célula é na verdade um bloco de vidro, que possui um transdutor eletro-mecânico em um dos lados, movido por um oscilador. Esse mecanismo é responsável por produzir ondas acústicas que se propagam através do bloco, gerando uma configuração periódica de altas e baixas intensidades. O lado oposto do bloco é composto de material isolante, construído de forma a minimizar a reflexão das ondas acústicas.

A luz incidente à célula de Bragg encontra uma série de ondas acústicas, que agem como um disco de difração: a interferência da luz refletida pelas frentes de onda provoca a subdivisão do raio incidente em vários outros feixes, em diferentes direções. Através da variação da intensidade do sinal acústico e do ângulo de inclinação do bloco, pode-se balancear a intensidade do raio gerado pela difração. A velocidade com que as franjas estão se movendo é determinada pela seguinte equação:

$$V_f = \frac{f\lambda}{2\sin\frac{\theta}{2}} = \frac{40Mhz \times 633 \times 10^{-9} m}{2\sin 2.5^0} = 290 m/s \qquad (7)$$

As franjas em movimento podem ser muito úteis no caso de partículas que cruzam o volume de medição sem cruzar um número significativo das franjas. Como um exemplo, uma partícula na borda do volume de medição atravessará poucas franjas do que um cruzamento da partícula no centro do volume, conseqüentemente seu sinal não passará nos critérios impostos de validação, ao passo que quando as franjas se movem, a partícula poderá atravessar um número maior de franjas. A figura 3.12 ilustra esse exemplo.

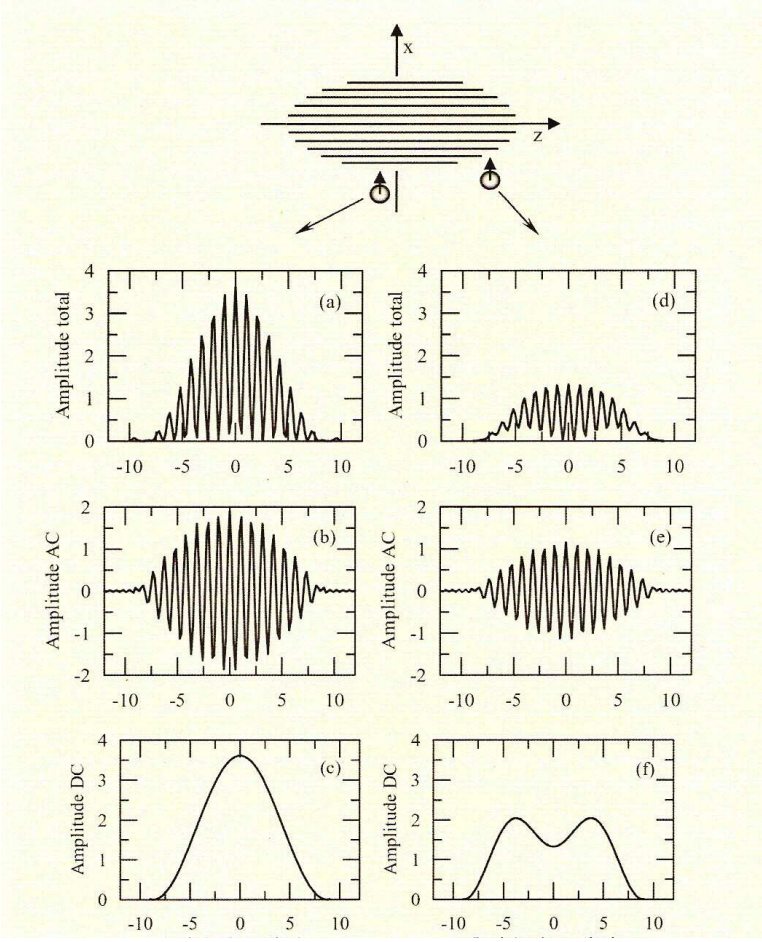


Figura 3.12 – Partículas cruzando as franjas de interferência

3.2.2 Características do sinal do LDV

O sinal proveniente do fotomultiplicador tem a forma indicada na figura 3.13(a). A variação de baixa freqüência deste sinal, normalmente chamada de envelope ou pedestal, é conseqüência da distribuição Gaussiana dos raios lasers. A amplitude do envelope varia com o tamanho da partícula e com a sua posição ao longo do volume de controle. O sinal de alta freqüência contido no interior do envelope está relacionado com a velocidade da partícula, e o número de períodos representa o número de franjas de interferência que a partícula atravessou.

A freqüência no interior de um sinal envelope é normalmente constante devido ao pequeno intervalo de tempo que o traçador percorre para atravessar o volume de controle, ou seja, a velocidade da partícula é constante durante o tempo de geração do sinal. Contudo, essa freqüência pode variar de um envelope para outro, e por isso recomenda-se que cada sinal válido seja convertido em somente um valor de

velocidade ("single measurement per burst", modo SMB, como chamado na literatura inglesa). Em um escoamento laminar, os envelopes apresentarão exatamente a mesma freqüência, e por isso um número pequeno de amostras (sinais válidos) é suficiente para gerar bons resultados. Ao contrário, para um escoamento turbulento, a variação de freqüência entre os envelopes será considerável, e quanto mais elevado for o nível de intensidade turbulenta, maior será essa variação. Nesse caso, caracterizar corretamente o escoamento demanda um alto número de amostras.

Geralmente um filtro passa-alta é utilizado para remover a componente de baixa freqüência do sinal, o que resulta em um sinal similar àquele mostrado na figura 3.13(b). Normalmente, esta filtragem é feita sem perda de informação, pois a freqüência do pedestal é em geral muito mais baixa que o sinal Doppler. A medida que a velocidade do escoamento tende para zero, ou quando a intensidade turbulenta aumenta, a faixa do sinal Doppler pode diminuir, aproximando-se da freqüência do pedestal. Sob esta condição, há possibilidade de filtragem do sinal de interesse, com perda de informação relevante sobre o escoamento.

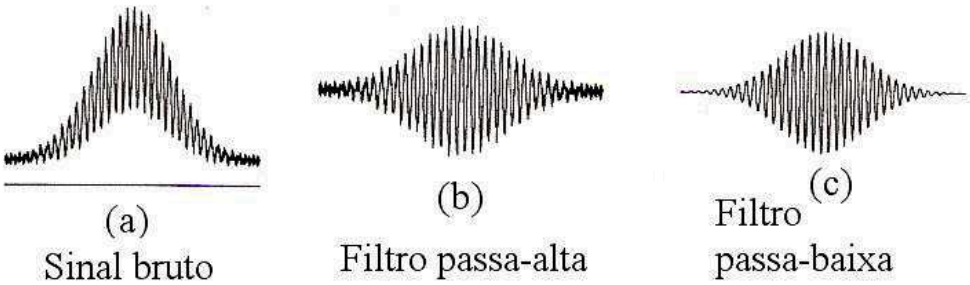


Figura 3.13 – Sinal gerado no LDV

A alternativa mais adequada é utilizar o desvio ("shift") de freqüência para sanar este problema. Quando adicionamos um desvio de freqüência em um dos raios incidentes, alteramos a faixa do sinal Doppler, sem alterar a posição do pedestal. Assim, podemos sempre, para qualquer condição de escoamento, especificar um desvio que faça o sinal Doppler se distanciar do pedestal, garantindo que o processo de filtragem não retira componentes relevantes do sinal.

É válido lembrar que na técnica LDV o sinal não se faz sempre presente, porque depende da concentração de partículas e do tamanho do volume de controle. Quando o volume de medição e a concentração de partículas são grandes, duas ou

mais partículas podem contribuir para um mesmo sinal, que pode ter melhor ou pior qualidade dependendo da posição relativa entre os traçadores.

A visibilidade do sinal na técnica LDV é definida como a razão entre a amplitude do sinal Doppler e a amplitude do pedestal, ou seja, a razão entre as componentes de alta e baixa freqüência. A visibilidade do sinal é proporcional à taxa sinal-ruído instantânea, e depende dos seguintes parâmetros: potência do laser, razão entre tamanho da partícula e espaçamento entre as franjas, intensidade relativa entre os dois raios, alinhamento dos componentes ópticos. A literatura recomenda que a intensidade dos raios incidentes seja equivalente, e que o diâmetro do traçador seja da ordem de um quarto da distância entre as franjas. Idealmente, altas taxas de sinal-ruído devem ser atingidas (~ 40dB). No passado, entretanto, quando os processadores de sinal eram menos sofisticados, conseguir boa visibilidade do sinal era determinante para a obtenção de resultados. Os processadores atuais, por outro lado, utilizam técnicas refinadas de validação do sinal e conseguem gerar resultados mesmo a partir de sinais com baixa taxa sinal-ruído.

Invariavelmente, o sinal carrega consigo ruídos provenientes de diferentes fontes, como ruído eletrônico e ruído inerente ao processo de fotodetecção.

A luz espalhada pela partícula que passa pelo cruzamento de dois raios é coletada e transmitida para o tubo fotomultiplicador (PMT). O PMT converte esta luz em uma voltagem elétrica. Variações nesta voltagem geram configurações de formas bem definidas conhecido como “burst”. O sinal medido passa primeiro por um filtro do tipo passa-alto para remover um tipo de ruído no sinal conhecido Pedestal. Como já mencionado, para que seja conhecida a direção e sentido do vetor velocidade, um dos raios sofre um deslocamento de 40MHz. O filtro passa-baixo remove ruídos e essa freqüência adicional. Os filtros que irão refinar o sinal são colocados de acordo com a característica do escoamento.

3.2.3 Considerações da técnica LDV

A primeira requisição do ajuste óptico é que o volume de controle (cruzamento dos raios) se forme no local desejado da medição. O segundo item é tentar aperfeiçoar a qualidade deste sinal. A qualidade da medida depende da qualidade do sinal que o fotodetector recebe.

A característica do laser – luz monocromática e fonte de luz coerente, permite a geração de franjas de interferência.

Partículas precisam ser adicionadas ao escoamento, esta técnica baseia-se na medição indireta da velocidade do escoamento: o que se mede é a velocidade das partículas.

A luz é espalhada em todas as direções, mas não de maneira uniforme, como explica a teoria de MIE.

Lentes com distância focal diferente resultam em espaçamentos de franjas diferentes.

A velocidade é diretamente proporcional a freqüência Doppler e ao espaçamento entre as franjas.

Há algumas desvantagens com o uso desta técnica. A principal é que o sistema mede a velocidade das partículas e não do fluido (isto acontece também com a técnica PIV). A medição dos componentes da velocidade está sempre alinhada com a hipótese de que as partículas seguem o escoamento. É um desafio freqüente encontrar as partículas apropriadas. Este tipo de problema não existe com a anemometria de fio quente e o tubo de Pitot. O acesso ótico também é outra necessidade da técnica LDV: o fluido de trabalho tem que ser um meio transparente. Dependendo do que for ensaido, o aparato experimental deve ser constituído de janelas de visualização (como o acrílico por exemplo) para que a luz do laser consiga transpassar o meio. Finalmente, por causa da complexidade é fácil cometer erros na aquisição de dados. Por isso o experimentalista deve ter bom conhecimento da física do problema, para que os dados coletados sejam satisfatórios. Outro inconveniente é que o custo de um sistema LDV é elevado devido ao rigor óptico que existe no sistema envolvido.

Capítulo 4

Análise de Incertezas

Considerando que todo processo de medição possui erros associados, é de extrema importância para qualquer trabalho experimental a investigação do grau de confiabilidade dos resultados obtidos. O texto a seguir apresenta algumas considerações básicas sobre o assunto, revisando as definições clássicas e mostrando o procedimento de estimativa de incerteza utilizado no presente trabalho. Kline (1985) e Moffat (1985) foram utilizados como referências básicas para a confecção deste texto.

Os erros associados à medição são definidos como a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, normalmente desconhecido. O erro total associado a uma grandeza medida possui duas componentes:

(i) um erro viciado fixo (erro sistemático), e

(ii) um erro aleatório, também chamado precisão.

Logo, conclui-se que uma boa medição é aquela que possui ambos os erros, aleatório e viciado, baixos.

4.1 Incerteza dos resultados

Os resultados desejados dificilmente são grandezas medidas diretamente. Normalmente grandezas básicas são obtidas e a partir delas são calculadas as grandezas de interesse. Portanto, para estimar a incerteza desse valor calculado é preciso propagar os erros das grandezas primárias através da fórmula funcional que relaciona o resultado e os parâmetros medidos.

Para o caso geral de uma grandeza medida y, que depende de outras medidas primárias, x_i, temos:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n), \tag{8}$$

e devemos propagar o erro de cada grandeza x_i para a grandeza y. Essas propagações de erro devem ser feitas separadamente para erros sistemáticos e erros aleatórios, e

posteriormente combinadas para fornecer a incerteza total da medida realizada.

4.1.2 Propagação do erro sistemático e aleatório

Segundo Albrecht et al. (2003), o erro sistemático resultante para y pode ser obtido através de uma expansão em série de Taylor:

$$\delta_y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\delta x_n \,, \tag{9}$$

Onde δx_i é o erro sistemático de cada grandeza primária e δy é o erro sistemático associado a y. Lembre-se que cada δx_i possui um sinal intrínseco. Consequentemente, por natureza, os erros sistemáticos compensam uns aos outros.

O erro aleatório é propagado de acordo com a seguinte relação:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\sigma x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\sigma x_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\sigma x_n\right)^2} \,, \tag{10}$$

Onde a variância de cada grandeza primária, $\sigma^2 x_i$, deve ser avaliada usando técnicas estatísticas apropriadas. Esta fórmula assume que todos os erros aleatórios individuais têm uma distribuição normal, e que todos os devios-padrão foram calculados utilizando-se o mesmo intervalo de confiança.

4.2 Cálculo dos erros associados a uma medida

4.2.1 Erro sistemático

Em medições repetidas, usando-se as mesmas condições ambientes e técnicas experimentais, pode-se esperar que cada medida apresente o mesmo erro viciado. Ele é, em geral, um acúmulo de vários erros sistemáticos individuais.

A esse tipo de erro incluem-se aqueles que podem ser calibrados ou que são desprezíveis. Na maioria dos casos δ é um valor a mais ou a menos que o valor medido, mas normalmente não se sabe se o erro sistemático é positivo ou negativo.

O erro sistemático é um parâmetro difícil de se estimar, e os procedimentos normalmente recomendados são comparar as medidas com resultados de instrumentos-padrão ou comparar medidas independentes realizadas com instrumentos que utilizam princípios diferentes para avaliar a grandeza medida. Quando existe alguma causa de erro sistemático conhecida, os seus efeitos podem ser contabilizados através de um processo de calibração.

De acordo com Albrecht et al. (2003), o erro sistemático não é influenciado diretamente pelo tamanho das amostras utilizadas para o cálculo da grandeza de interesse. Este erro pode ter origem em diferentes fontes, normalmente localizada fora do sistema de processamento de dados. Por exemplo, no caso da velocimetria por laser Doppler quando o ângulo de intersecção entre os raios não é medido corretamente, um erro viciado aparece em todos os resultados derivados desta medição. Em geral, procedimentos de calibração são os mais recomendados para avaliar este tipo de incerteza.

4.2.2 Erro aleatório

Os erros aleatórios são observados em medições repetidas, as quais não são, e não se espera que sejam, exatamente iguais, devido às numerosas fontes que influenciam no valor medido. O erro aleatório é muitas vezes denotado também por erro de precisão. A medida da distribuição dos erros de precisão é dado pelo desvio-padrão σ. Para uma distribuição normal de erros, o intervalo de $\mu \pm 1.96\sigma$ irá incluir aproximadamente 95% do total dos pontos medidos, onde μ representa o valor médio. Dessa forma, um desvio-padrão grande significa uma grande dispersão das medidas obtidas. A estatística normalmente utilizada para quantificar o erro aleatório é chamada de erro randômico normalizado:

$$\varepsilon\left(\hat{\bar{x}}\right) = \frac{\sigma\left(\hat{\bar{x}}\right)}{\bar{x}}, \tag{11}$$

onde $\left(\hat{\bar{x}}\right)$ é a estimativa para a média, e $\left(\bar{x}\right)$ é a média de “ensemble” verdadeira.

O erro aleatório pode ser expresso em termos de ε da seguinte forma:

$$1 - z_{\alpha/2}\varepsilon\left(\hat{\bar{x}}\right) < \frac{\left(\hat{\bar{x}}\right)}{\bar{x}} < 1 + z_{\alpha/2}\varepsilon\left(\hat{\bar{x}}\right), \tag{12}$$

onde $z_{\alpha/2}$ é tabelado. Para uma probabilidade de 95%, esta variável assume o valor de 1.96, enquanto para P = 99% este valor é de 2.57 (Bruun (1995), pág. 410.

Este procedimento remete diretamente ao conceito de intervalos de confiança, ou seja, o intervalo dentro do qual o valor verdadeiro será encontrado com uma dada probabilidade, determinada pela variável $z_{\alpha/2}$.

4.2.3 Erro total

Segundo a norma ANSI/ASME (1985), é conveniente expressar um único valor de incerteza (*U)* para expressar um único limite aceitável de erro associado ao valor medido. Esse número, que é uma combinação do erro aleatório e do erro sistemático, deve ter uma interpretação simples, como o máximo erro esperado, e ser útil e informativo sem a necessidade de maiores esclarecimentos. Normalmente o valor medido é expresso na forma de intervalo, como $\pm U$ que representa uma faixa na qual espera-se que esteja o valor verdadeiro da grandeza medida.

A literatura (e.g. ASME(1985) e Kline(1985)) recomenda a utilização de dois intervalos de incerteza, segundo a distribuição t-Student, que possuem uma cobertura análoga aos intervalos de 95% e 99% de confiança, descritos pela teoria estatística. Estes intervalos de incerteza indicam a freqüência na qual o valor verdadeiro estará contido na faixa estimada. Estes intervalos são dados por:

$$U\,(99\%) = \delta y + t\,\sigma y,$$

$$U\,(95\%) = [\,\delta y^2 + (t\,\sigma y)^2]^{(1/2)}, \tag{13}$$

onde δy é o limite do erro sistemático, σy é o erro aleatório e t é o valor correspondente à distribuição de t-Student. O valor de t para uma probabilidade de 99% é de 2.22.

Em termos do cálculo da incerteza aleatória para a velocidade média, ele é quantificado através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_U = \frac{t u_{rms}}{U\sqrt{N}} \tag{14}$$

onde N é o tamanho da amostra, e $u_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}}$ é obtido durante a medição; t é o parâmetro de Student que no caso é sempre igual a 2 (na verdade 1.96, mas em geral arredonda-se para 2).

A incerteza aleatória de u_{rms} em termos relativos é dada pela equação:

$$\varepsilon'_u = \frac{t}{\sqrt{2N}} \tag{15}$$

Devemos notar que esta grandeza é independente do próprio valor de u_{rms} e só depende do tamanho da amostra. Assim, para uma amostra de 5000 pontos teremos uma incerteza aleatória de 2% no cálculo de u_{rms} logo à partida. Com 10000 pontos por amostra este valor diminui para 1.4%.

4.3 Gráfico da incerteza das medições.

Uma vez que o escoamento no hidrociclone não é estacionário e existe uma grande variação de velocidade no seu interior, a análise de incerteza da medida faz mais sentido se avaliarmos cada ponto medido.

Para a análise da incerteza foi escolhida a seção D distando 440mm do orifício de rejeito. Devido a problemas ópticos de refração, verificados na técnica LDV, foram considerados somente os dados que compunham a metade do perfil do componente da velocidade. O gráfico da figura 4.1 mostra o erro associado à medida do componente axial com o uso da técnica PIV e da técnica LDV.

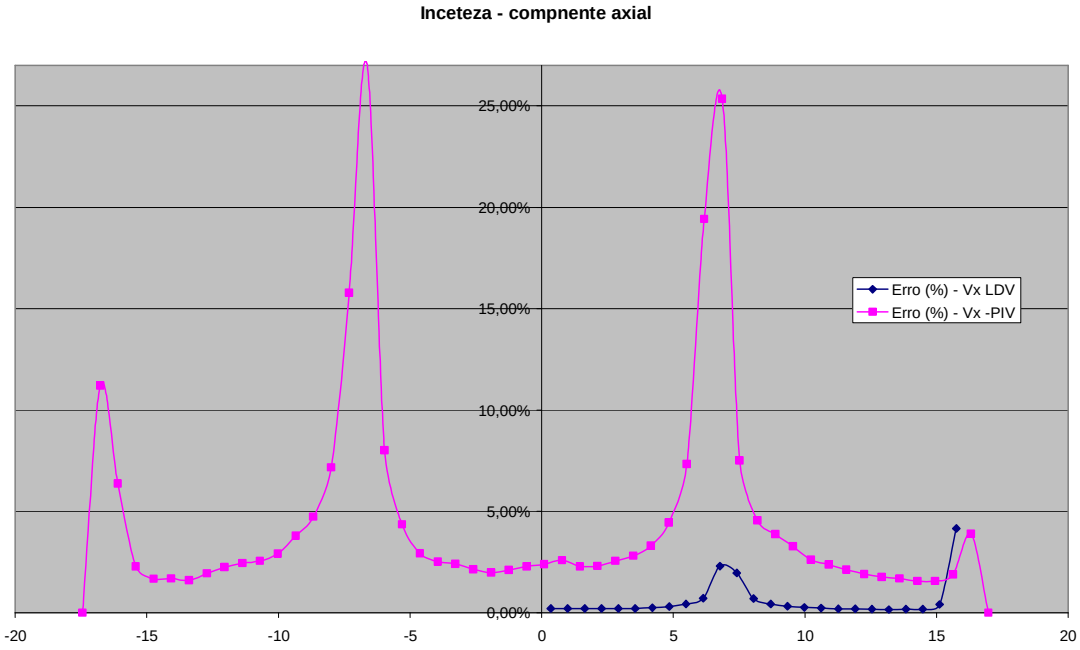


Figura 4.1 - Incerteza do componente axial.

Do gráfico 4.1 podemos verificar que a incerteza com a técnica PIV é maior do que a técnica LDV, isso se deve ao número de amostras. Enquanto que na técnica PIV foram analisadas 200 amostras para todos os pontos, o número de amostras, com a técnica LDV além de variar ponto a ponto, também foi bem maior: para o componente axial da velocidade no ponto x=0,35 (menor quantidade amostrada), foram aquisitadas 30.000 amostras, enquanto que para o componente axial da velocidade no ponto x=3,56 (maior quantidade de amostras registrada), forma aquisitadas 97.000 amostras. Tanto a técnica LDV quanto a PIV registraram a maior incerteza quando o valor do componente axial chegou 0 m/s. De certa forma isto era esperado uma vez que o escoamento não é estacionário e o valor da velocidade neste ponto ora é positivo e ora é negativo. Excetuando-se os pontos de velocidade zero, a incerteza na medição com a técnica PIV ficou em torno de 3,0%, enquanto que com a técnica LDV a incerteza calculada foi de 0,30%.

O gráfico da figura 4.2 mostra o erro associado à medida do componente azimutal, tanto da técnica PIV quanto da técnica LDV.

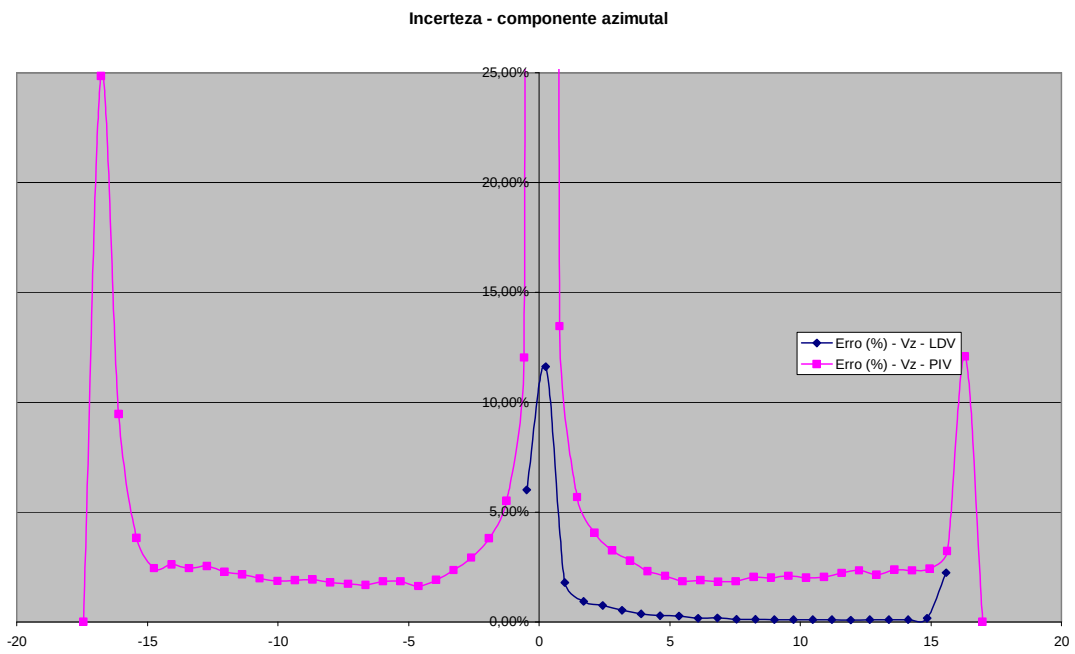


FIgura 4.2 - Incerteza do componente azimutal.

Do gráfico 4.2 podemos verificar que a incerteza com a técnica PIV é maior que a técnica LDV, isso se deve ao número de amostras. Enquanto que na técnica PIV foram analisadas 200 amostras para todos os pontos, o número de amostras, com a técnica LDV além de variar ponto a ponto, também foi bem maior: para o componente axial da velocidade no ponto x=0,25 (menor quantidade amostrada), foram aquisitadas 2.300 amostras, enquanto que para o componente axial da velocidade no ponto x=14,12 (maior quantidade de amostras registrada), forma aquisitadas 41.500 amostras. Tanto a técnica LDV quanto a PIV registraram a maior incerteza quando o valor do componente axial chegou 0 m/s. De certa forma isto era esperado uma vez que o escoamento não é estacionário e o valor da velocidade neste ponto ora é positivo e ora é negativo. Excetuando-se os pontos de velocidade zero, a incerteza na medição com a técnica PIV ficou em torno de 2,60% enquanto que com a técnica LDV a incerteza calculada foi de 0,30%.

Capítulo 5

Hidrociclones

Os hidrociclones são equipamentos destinados à separação sólido-líquido ou líquido-líquido e para a indústria do petróleo foram desenvolvidos visando à separação óleo-água. Usualmente são instalados após os separadores de produção trifásicos ou, em alguns casos, após os tratadores eletrostáticos. O hidrociclone avaliado no presente trabalho difere dos modelos convencionais tanto na geometria quanto na aplicação. Esta nova proposta de aplicação procura trazer este equipamento para uma fase mais a montante do processo, trabalhando com altos teores de óleo.

Visando uniformizar a nomenclatura vamos chamar a saída de fluido próxima alimentação de rejeito e a saída de fluido próxima ao vértice do trecho cônico de saída de água.

Um único hidrociclone é chamado de "*liner*". O uso deste equipamento no processamento geralmente é feito acomodando vários "*liners*" dispostos em um vaso de pressão operando em paralelo.

O fluido de processo entra no hidrociclone através de entradas tangenciais onde a energia potencial é transformada em energia cinética de rotação (efeito centrífugo). Esta força centrífuga direciona o fluido mais denso (água) para as paredes do hidrociclone e o menos denso (óleo) para o centro. A manutenção da pressão da corrente de rejeito, por onde sai o óleo recuperado, sempre abaixo da pressão de saída de água garante o direcionamento do cone de óleo no sentido oposto ao da saída da água.

Quando comparamos os hidrociclones com os tradicionais separadores gravitacionais podemos explicitar algumas vantagens:

- Dimensões e peso reduzidos, em função do menor tempo de residência dos fluidos no interior do equipamento.
- Ideal para aplicações em FPSO (navios) e plataformas semi-submersíveis, pois seu desempenho não é afetado pelos movimentos induzidos pelo mar.
- Facilidade de arranjo: pode ser montado na posição horizontal, vertical o qualquer outra.

Atenção especial deve ser dada quando a operação envolve alguns aspectos:

- Pode haver deposição de sais inscrustantes nas paredes do hidrociclone. Nos hidrociclones utilizados para tratamento da água de descarte (*"de-oilers"*) esse problema é mais acentuado, uma vez que, o orifício de rejeito tem o diâmetro bastante pequeno (Ø=1mm), podendo ocasionar entupimento dos mesmos. Nesse novo hidrociclone este problema deve ser reduzido já que o diâmetro de rejeito é Ø=10mm.
- Os hidrociclones são feitos com materiais para resistir à erosão, mas em sistemas com grande potencial de produção de areia, esses equipamentos podem sofrer um sério desgaste.

Existe uma série de fatores que influenciam no desempenho do hidrociclone. A influência dos principais fatores é mais facilmente compreendida através da Lei de Stokes. A lei aplicada à segregação de uma gota esférica em um separador centrífugo é traduzida como FSL (força de separação de líquido) que é a diferença entre a força centrífuga, gerada entre o movimento do fluido, e a força de arrasto (Stokes)

$$FSL = \frac{\pi}{6}\phi_o^3(\rho_a - \rho_o)a - 3\pi\mu_a v_{y(o)}\phi_o \qquad (16)$$

onde:

FSL – força de separação de líquido,

$Ø_o$ – diâmetro da gota de óleo;

ρ_a – massa específica da água;

ρ_o – massa específica do óleo;

μ_a – viscosidade dinâmica da água;

a – aceleração centrífuga;

$v_{y(o)}$ – velocidade radial da gota de óleo.

As gotas de óleo atingem a velocidade terminal quando a força centrífuga se iguala à força de arrasto.

É recomendada a instalação de uma malha de controle para sistemas que trabalham com altas pressões e/ou grandes volumes de fluido processado. O decréscimo na vazão de alimentação resulta em um aumento no diferencial de pressão entre a entrada e o rejeito, conseqüentemente, levando a um aumento da vazão de rejeito. Em sistemas com grandes volumes de fluido a ser processado, se a vazão de rejeito não for controlada, a flutuação na vazão de entrada pode causar grandes variações nesta vazão.

A filosofia de controle da vazão de rejeito mais utilizada, é a que correlaciona o diferencial de pressão entre a corrente de entrada e a de rejeito, com o diferencial de pressão entre a corrente de entrada e a de saída de água, sendo que esta relação deve ser mantida constante, para uma determinada relação óleo / água.

$$DPR = \frac{P_{in} - P_{ov}}{P_{in} - P_{und}} \tag{17}$$

onde,

DPR – relação de pressão;

P_{in} – pressão de alimentação;

P_{ov} – pressão de rejeito;

P_{und} – pressão na saída de água.

Mantendo-se a relação de pressão acima constante a vazão de rejeito será sempre uma percentagem constante da vazão que entra no hidrociclone. Esta percentagem pode ser determinada sem ser medida, utilizando-se para isso o valor de DPR e um gráfico do fabricante que correlacione o DPR com a percentagem de rejeito, para um determinado diâmetro de orifício de rejeito. Uma vez que o hidrociclone utilizado neste experimento é um protótipo, esse gráfico não foi disponibilizado pelo fabricante.

Segundo o fabricante este equipamento, relativamente aos hidrociclones tradicionais, é capaz de operar com correntes com um teor de óleo muito mais elevado, de até 50% (a fase contínua ainda é a água), com uma vazão total de líquido de 7,5 m^3/h e um DPR de 1,2. Testes de campo mostraram um desempenho bem inferior: para uma vazão de operação de cerca de $6m^3/h$ e com um óleo de grau API 21, a eficiência só foi alcançada para corrente de entrada com até 35% de óleo e ainda operando com um DPR de 1,4.

Na situação experimental de laboratório e bem como na simulação numérica os resultados foram mais discrepantes: utilizando somente a água como fluido de processo e trabalhando com um DPR em torno de 1,8, a vazão de rejeito ficou em 40% da entrada. Para um valor bastante “agressivo” de DPR esperava-se uma vazão de rejeito bem mais elevada, porém tanto a simulação numérica como os às medições experimentais mostraram que é necessário operar com valores de DPR elevados para promover uma separação de fases.

Um módulo de teste foi construído para acomodar três hidrociclones: um do

tipo MTO – Médio Teor de Óleo (até 15%) e os outros dois, montados em paralelo, do tipo ATO – Altos Teores de Óleo (modelo investigado no presente trabalho). Este módulo de teste foi levado para a plataforma de PAMPO, na Bacia de Campos, onde foi realizada, por mais de um ano, uma intensa campanha de avaliação de campo. A figura 5.1 mostra a seção de teste com destaque para os hidrociclones ATOs montados em paralelo.

Figura 5.1 – Seção de teste ciclônica

5.1 Necessidade de levantamento experimental do escoamento no hidrociclone

Como já mencionado, o hidrociclone tem por objetivo a separação de fases, que é obtida pela ação de forças de campo intensas, geradas pelo movimento de rotação do fluido que entra no equipamento. O movimento de rotação do fluido gera um campo centrífugo intenso que é equilibrado por um gradiente de pressão que se estabelece na direção radial do equipamento. Assim, num referencial inercial, as partículas de fluido são mantidas numa trajetória curva (espiral) pelo diferencial de pressão entre as faces externa e interna da partícula (relativamente ao eixo do equipamento). Esse equilíbrio pode ser traduzido pela equação abaixo.

$$\rho \frac{v_t^2}{r} = \frac{d\,p}{d\,r} \tag{18}$$

O campo de forças de corpo que se estabelece na direção radial é proporcional ao quadrado do componente azimutal da velocidade, dividido pela distância ao eixo (aceleração centrífuga). Esse campo proporciona, no caso de mais de uma fase de diferentes densidades presentes no interior do hidrociclone, a segregação radial das fases leve (que se acumula na região central, junto ao eixo do hidrociclone) e as fases pesadas (que se acumulam na região externa, junto às paredes do equipamento).

Talvez a característica mais marcante do escoamento num hidrociclone, que é uma conseqüência direta do campo centrífugo que se estabelece na direção radial, é a reversão do fluxo na direção axial que atinge o fluido situado junto ao eixo. A corrente de entrada no hidrociclone é alimentada junto a uma das extremidades do equipamento e assim, o fluxo se dirija à outra extremidade, circulando ao redor do eixo do equipamento, devido à alimentação tangencial à parede. Parte dessa corrente, ao atingir uma região mais próxima do eixo, no domínio de escoamento, sofre uma inversão na direção axial do fluxo, ou seja, volta para a extremidade de alimentação.

Essa característica de divisão de fluxo é decorrência direta do campo centrífugo que se estabelece na direção radial do hidrociclone. Esse campo proporciona a inversão, em algum ponto ao longo do raio, no gradiente axial de pressão, o que provoca a citada reversão na direção axial do escoamento. Essa característica é decorrente, portanto, apenas das forças de inércia, e da conversão da energia de pressão em energia cinética de rotação e pode ser verificada numa análise ideal do escoamento no hidrociclone. Veja, por exemplo, Moraes (2003).

Muito embora tanto o gradiente de pressão radial, como a reversão de fluxo possam ser bem capturados por uma abordagem ideal, a presença das paredes e a viscosidade do fluido têm efeito importante sobre todo o escoamento, modificando os perfis que poderiam ser obtidos de uma análise teórica do escoamento com a hipótese de escoamento ideal, além de serem responsáveis por escoamentos secundários, que na análise ideal, não seriam obtidos. Assim, por exemplo, a presença da parede superior do trecho cilíndrico atua de forma a frear o fluido em rotação próximo dessa parede, permitindo que o gradiente radial de pressão, gere um escoamento secundário de parte do fluxo de alimentação diretamente para a saída de líquido junto ao eixo, próximo a essa seção de alimentação (rejeito).

Além das dificuldades na análise do escoamento acima citadas, não basta considerar a equação de Navier-Stokes, com o termo viscoso, para que a análise do escoamento se faça completa (ainda que a obtenção da solução numérica fosse

possível, considerando-se as dificuldades em se prescrever condições de contorno realistas para o problema), é preciso considerar ainda que as elevadas velocidades impostas ao fluido indicam que a turbulência deve ser levada em conta na análise, já que a consideração de um escoamento laminar, nos níveis de velocidade alcançados principalmente nas direções azimutal e axial, seria uma hipótese não realista.

A consideração da turbulência por meio dos modelos diferenciais com base no conceito de viscosidade turbulenta, desenvolvidos considerando a hipótese de turbulência isotrópica, mostra-se totalmente inadequada para descrever o escoamento no hidrociclone. Já que a presença de forças de campo intensas e as linhas de corrente com curvatura acentuada, anulam totalmente as hipóteses de comportamento isotrópico da turbulência. Essas características exigem a abordagem com modelos de alta ordem, que permitam um desenvolvimento individual, com equação de transporte própria, de cada um dos componentes do tensor de Reynolds.

A tentativa de solução numérica, considerando que o escoamento atinge um regime estacionário – desde que as condições de contorno sejam mantidas constantes – também se mostra inadequada, uma vez que o regime permanente atingido é periódico, com oscilações do núcleo do vórtice principal ao redor do eixo do equipamento. Assim, tampouco a hipótese de simetria axial é adequada para o escoamento num dado instante, exigindo que a abordagem numérica seja tridimensional.

Do exposto acima, verifica-se que a análise do escoamento em um hidrociclone demanda uma abordagem numérica de altíssimo custo computacional, exigindo a solução transiente de um sistema de dez equações diferenciais, a saber: a equação da continuidade, as equações para os três componentes da velocidade média, as equações de transporte de cada um dos seis componentes do tensor de Reynolds e a equação de transporte para a taxa de dissipação da energia turbulenta. A grande influência das condições de contorno e as dificuldades na sua exata prescrição, também demandam que se amplie o domínio do escoamento a ser numericamente calculado, de forma a minimizar a influência de imprecisões nas prescrições adotadas, o que resulta num domínio de escoamento maior (e num maior número de equações lineares a serem resolvidas).

Para se ter uma idéia da do custo computacional da análise de um único caso (uma determinada geometria de hidrociclone, com uma determinada condição operacional) podemos citar que esse caso tridimensional, com cerca de 1.600.000 nós,

aí incluído o domínio ampliado, em processamento paralelo num cluster com 12 processadores, leva 19 dias de processamento, para simular cerca de 1,5 segundos de escoamento (cerca de duas vezes o tempo de residência médio – vazão de alimentação / volume interno do hidrociclone).

Diante desse custo verifica-se a grande importância de se obter dados experimentais que venham a validar os modelos empregados nas simulações numéricas, bem como permitir uma melhor caracterização das condições de contorno a serem impostas nessas simulações. A carência da disponibilidade desses dados, principalmente para os hidrociclones que operam com dois líquidos (sem a presença de núcleo gasoso) também sinalizam para a necessidade de realizar levantamentos experimentais.

No caso específico dos hidrociclones para separação líquido-líquido, que se destinam a operar com elevados teores de ambas as fases líquidas, por se tratar de equipamentos novos no mercado, com poucas unidades em operação no mundo, ainda cobertos por patentes, a carência de dados na literatura é praticamente absoluta. Nesse contexto, o trabalho experimental objeto desta tese aqui apresentada constitui-se uma contribuição inédita, para o aprimoramento do projeto desse tipo de equipamento.

Capítulo 6

Aparato Experimental

6.1 Definição do protótipo

Para a construção do protótipo experimental duas opções foram consideradas: (a) construção do hidrociclone com paredes finas. O equipamento seria então acomodado em caixa de acrílico preenchida como mesmo fluido de trabalho, ou seja, a água. (b) A segunda opção, que é a que foi adotada, foi à construção de um modelo com paredes planas, ou seja, é o mesmo que pensar em bloco de acrílico usinado.

A opção (b) foi à utilizada porque se esperava conseguir um fluido de trabalho que tivesse as propriedades físico-químicas semelhante à água e propriedades ópticas semelhantes a do acrílico. De fato, este fluido é um sal iodado, porém muito instável diante a presença de luz e oxigênio, perdendo a transparência com poucos minutos de teste. Para se trabalhar com este fluido deveríamos construir um novo aparato experimental o que aumentaria muito o tempo de investigação experimental. Ainda assim a opção da construção do hidrociclone com uma seção externa quadrada foi a melhor escolha para o emprego da técnica PIV.

Uma vez que tanto a técnica PIV como a LDV se baseiam em princípios ópticos e por isso todo esforço se faz necessário para minimizar os efeitos de refração luminosa. Desse modo, o hidrociclone foi construído com a menor espessura de parede possível. Um cálculo aproximado da espessura de parede foi feito utilizando a equação:

$$P_{\max} = \frac{50 \cdot t}{\phi_{\text{int}}} \tag{19}$$

onde P_{max} é a pressão interna máxima, t a espessura e ϕ_{int} o diâmetro interno. A pressão máxima que poderíamos ter no teste seria da ordem de 5bar e a seção com maior diâmetro é 40mm. Utilizando a equação acima a espessura de parede mínima seria de 4mm. Foi feita a opção de se trabalhar com uma espessura mínima de 5mm. O gráfico da figura 6.1 mostra a resistência dos tubos em relação à pressão interna.

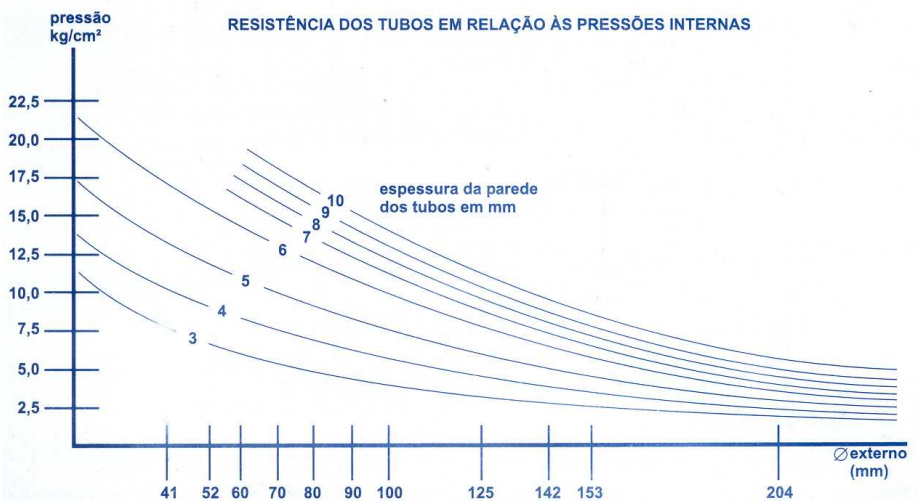


Figura 6.1 – Resistência interna x espessura

O acrílico tem transparência de 92 a 93%, possui excepcional variação de espessura (+/- 10%) assegurando uma qualidade constante e uma baixa distorção óptica.

A figura 6.2 mostra o hidrociclone em acrílico que foi construído para o experimento.

Figura 6.2 (a) – Seção com conicidade maior

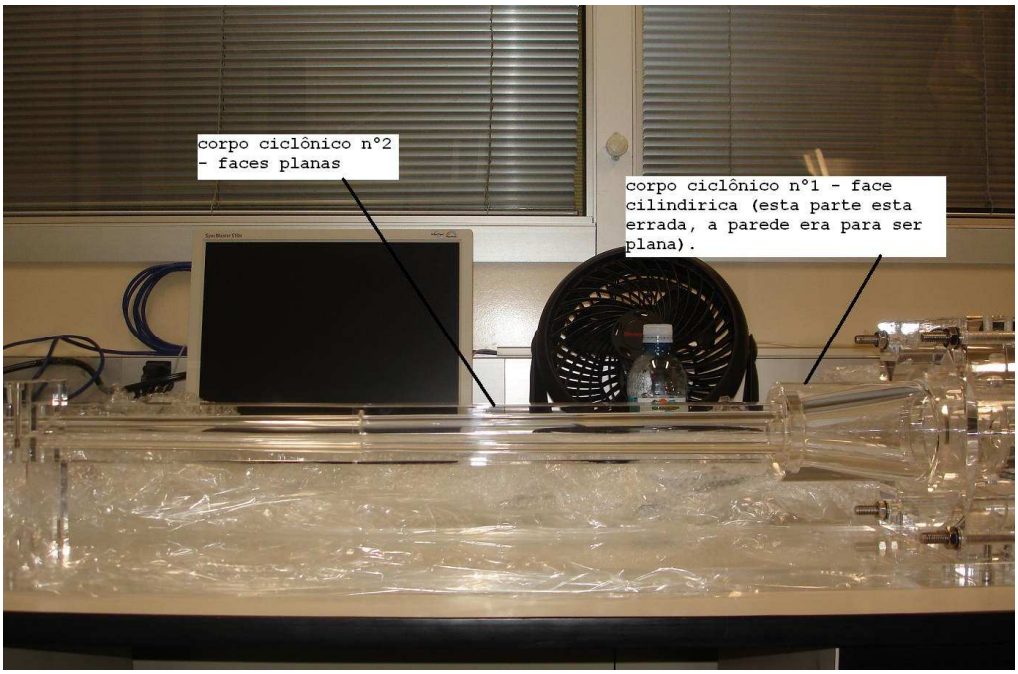


Figura 6.2 (b) – Corpo. A seção interna tem uma conicidade de 1º.

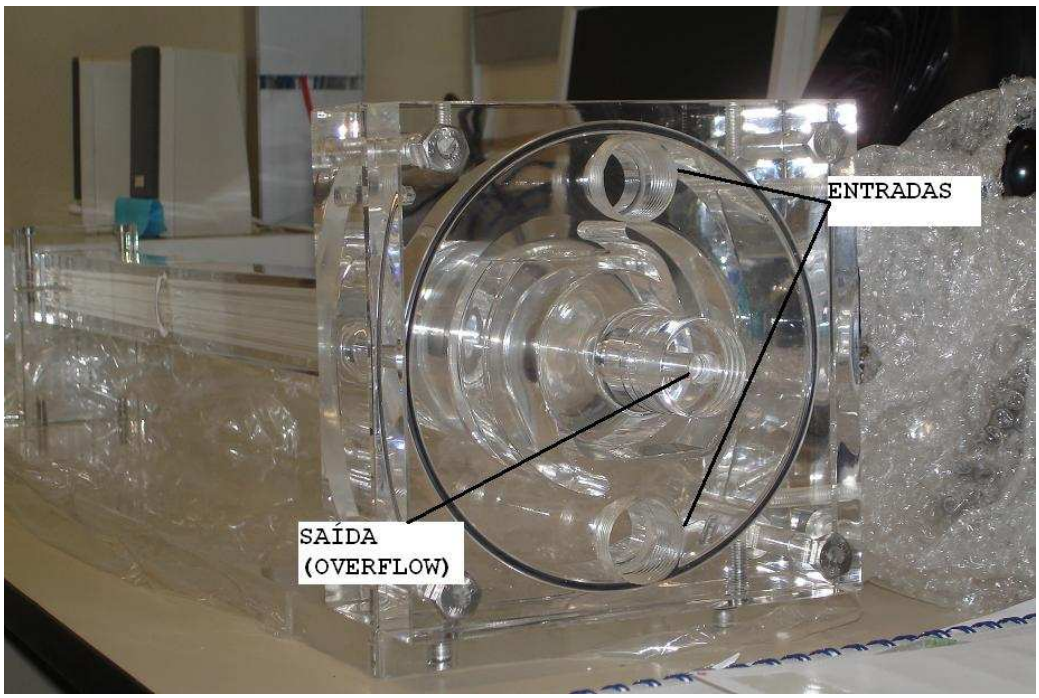


Figura 6.2 (c) - Entrada e rejeito (*"overflow"*)

Figura 6.2 (d) – Voluta de entrada.

6.2 Configuração do sistema PIV

O sistema PIV utilizado para a medição dos perfis de velocidade no interior do hidrociclone foi o 3D FlowMaster Stereoscopic System do fabricante LaVision com as seguintes características:

- Sistema estéreo – capaz de medir as 3 componentes da velocidade: Vx, Vy e Vz;
- Câmeras CCD de 12 Bit, com resolução de 1376x1040 pixel e tamanho de pixel 6,45 μm x 6,45 μm
- Lentes AF Micro-Nikkor 105 mm f/2.8D
- Alvo de calibração para sistema estéreo com dimensões 25 mm x 25 mm;
- Software Davis 7.1 para processamento das imagens
- Laser do tipo Nd:YAG do fabricante BigSky com comprimento de onda λ = 532nm e energia por pulso de 120 mJ.

O sistema foi montado conforme mostra a figura 6.3

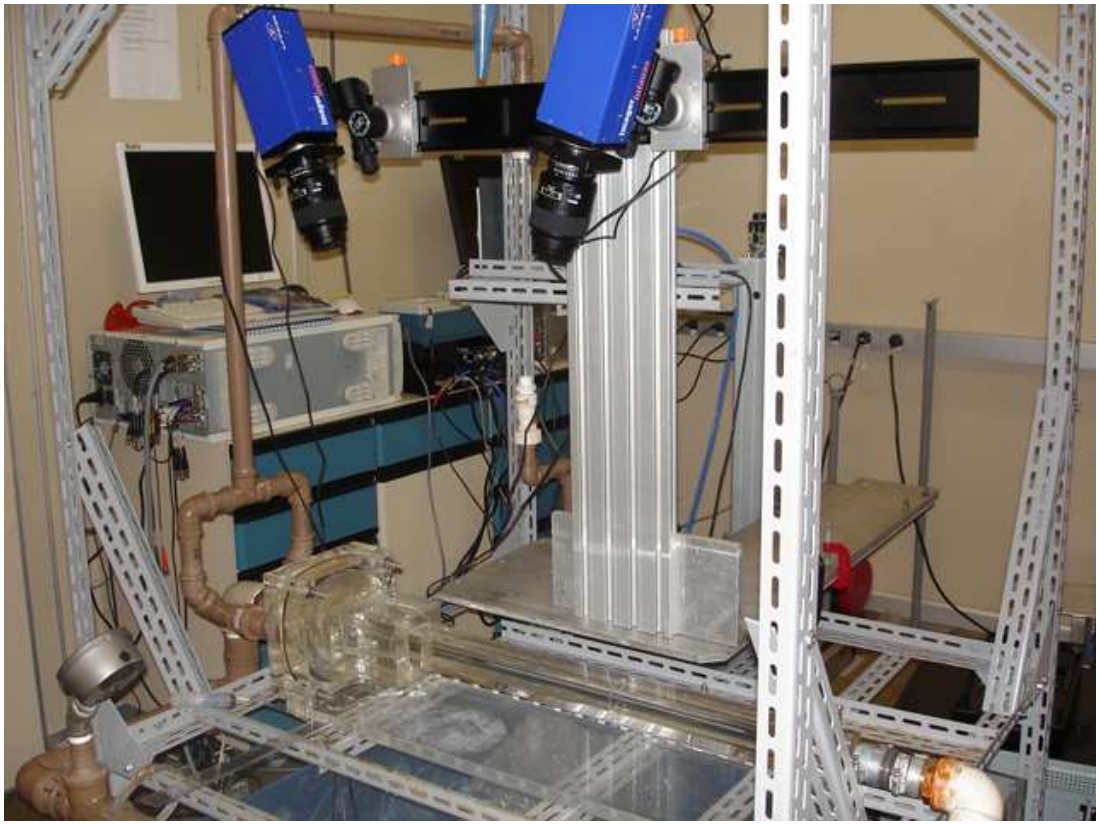


Figura 6.3 – Montagem do sistema PIV em modo estéreo

6.2.1 Ajuste dos parâmetros do sistema PIV

O primeiro passo é fazer a calibração do sistema. A maioria dos sistemas PIV comerciais exige que a calibração do sistema estéreo seja feita exatamente no local em que se deseja avaliar o escoamento. O software LaVision possui uma facilidade denominada *"self-calibration"* (autocalibração) que consiste na possibilidade de se fazer a calibração fora do experimento e depois transportar para o local que se deseja medir (LaVision Manuals – 2004) . Esta característica foi fundamental para a medição dentro do hidrociclone. Esta técnica será descrita com mais detalhes a seguir.

Como já mencionado, a melhor configuração para a medição da componente ortogonal ao plano de medição é quando o ângulo entre as câmeras está entre 30 e 90°. Quanto maior o ângulo melhor é a medição da componente ortogonal, contudo, aumentam-se os problemas de distorção de imagem. Outra questão a ser considerado é manter a mesma disposição geométrica das câmeras para as diversas seções que se deseja medir no hidrociclone. Desse modo, bastaria transladar as câmeras para a seção que se deseja medir. As câmaras foram dispostas de modo que o ângulo entre elas ficou em torno de 75°, para essa configuração foi possível medir ao longo de 460mm

no trecho de conicidade de 1°.

6.2.2 Auto calibração

Para um sistema PIV estéreo, a calibração correta é um pré-requisito essencial para medir exatamente os três componentes da velocidade. O método mais freqüente é o uso de um alvo de calibração plano com uma grade regularmente espaçada na exata posição do plano de laser. Após isso o alvo é movido de uma distância conhecida no sentido para fora do plano marcando duas ou mais posições de z (Soloff et al. 1997). Em cada posição de z (o plano do laser é definido em z = 0), uma função da calibração com graus de liberdade suficientes mapeia o plano x-y para os planos da câmera, enquanto a diferença entre os planos em z fornecem os derivativos de z necessários para reconstrução dos três componentes da velocidade. Esta aproximação empírica tem a vantagem de que todas as distorções da imagem, ocasionadas pelas imperfeições das lentes ou pelas irregularidades do trajeto da luz (por exemplo, interfaces entre ar / água / acrílico), são compensadas. Alternativamente, pode-se usar uma placa da calibração 3D com marcas em dois níveis de z, evitando a necessidade para instalações mecânicas rígidas com estágios exatos de posicionamento. Diferentes mapas de funções têm sido usados, desde um polinômio de segunda ou terceira ordem em x e em y (Soloff et al. 1997) até as funções derivadas das equações de perspectiva (método *pinhole*[1]) (Willert 1997). Um inconveniente principal deste método empírico é a necessidade posicionar o alvo de calibração exatamente na mesma posição que o plano de laser, que é freqüentemente muito difícil de realizar. Um esquema da correção baseado em uma correlação cruzada entre a imagem das câmeras 1 e 2 foi proposto (Willert 1997; Coudert e Schon 2001), que é a base para o método da correção da calibração utilizado pelo software DaVis.

O sistema LaVison utiliza, para calibração em 3D, o método de perspectiva (*pinhole)*. Em vez de requer um alinhamento perfeito entre o alvo e o plano do laser,

---

[1] *Pinhole*[*] - do inglês, buraco de alfinete - é o nome dado à técnica que irá permitir que o fenômeno fotográfico se dê em um ambiente sem a presença de lentes (componente das máquinas fotográficas convencionais). Um furo é o que permite a formação da imagem em um recipiente ou espaço vedados da luz. A projeção de imagens por este método é uma lei física, e já é conhecida pelo homem desde a Antigüidade. Antes do advento da fotografia (séc.XIX), as projeções *pinhole* eram instrumento científico de visualização de eclipses e no estudo das estrelas; nas artes, as imagens *pinhole* serviam de molde para os pintores paisagistas

um esquema da correção foi desenvolvido de modo a fornecer um exato mapeamento das funções, mesmo quando o alvo está inclinado em relação ao plano de laser (Wieneke – 2005).

Uma aplicação importante da auto calibração é o caso onde é difícil de se colocar o alvo de calibração dentro da seção a ser medida. O experimento em questão se enquadra nesta classe de problemas. Ainda que o software DaVis seja capaz de corrigir grandes deformações ópticas, bastando para isso fazer uma enorme quantidade de interações, optamos por construir uma seção de teste recriando as condições ópticas presentes no experimento. A figura 6.4 mostra o alvo de calibração dentro da seção de teste que foi construída. O alvo foi posicionado exatamente no meio da seção, ou seja, a mesma posição que foi analisada no experimento.

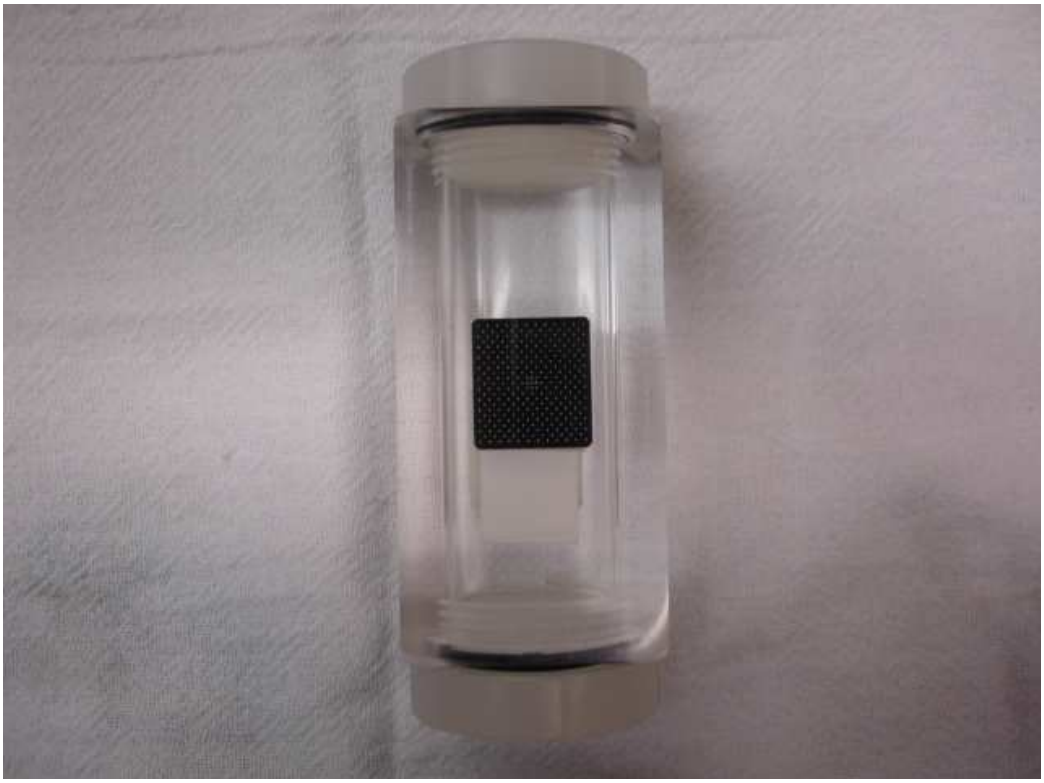


Figura 6.4 – Alvo de calibração na seção de teste

6.2.3 Configuração pré-aquisição

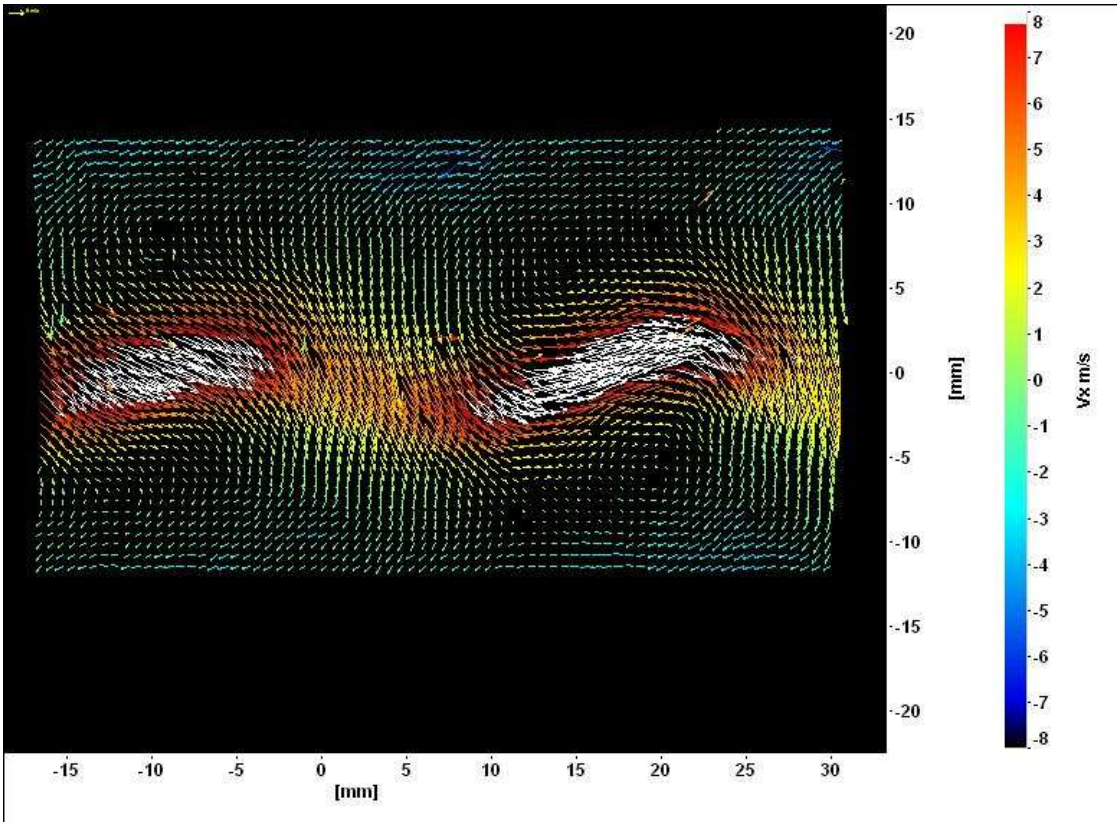
Uma das grandes vantagens da utilização da técnica de velocimetria por imagem de partícula – PIV é a possibilidade de se processar as imagens utilizando programas e configurações diferentes. Contudo alguns parâmetros precisam ser determinados antes do início do teste:

a) dimensionamento das partículas:

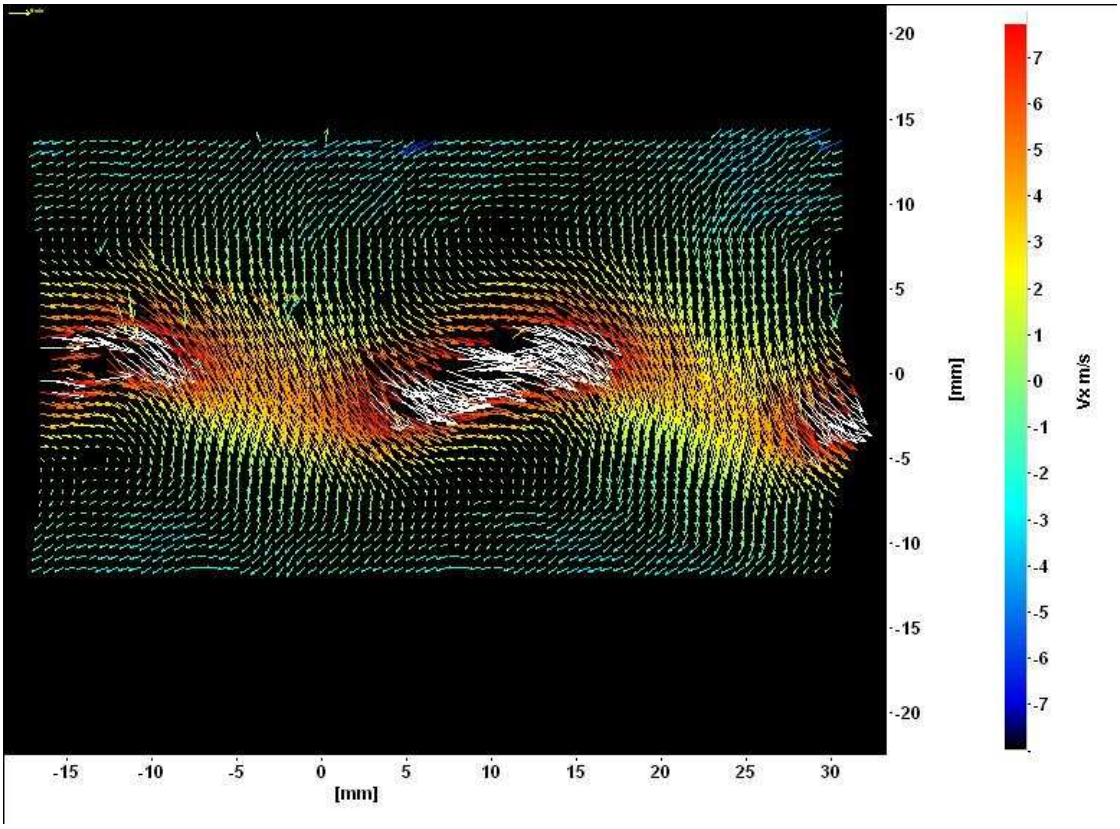
Para o experimento foram usadas partículas reflexivas do tipo esferas de vidro com tinta de prata e diâmetro médio de 14µm. Ainda que a técnica mencione que o número mínimo de partículas deve ser 10 em cada janela de interrogação, a determinação ocorreu de forma experimental: adicionando partículas até a formação de uma imagem satisfatória. As lentes usadas são AF Micro Nikkor e distância focal f=105mm. As câmeras foram posicionadas a 650 mm de distância do plano de laser (objeto).

b) intervalo entre os pulsos de laser

Dentro do hidrociclone temos uma variação muito grande de velocidade: -8 a +10 m/s, aproximadamente. A escolha do intervalo entre os pulsos de laser é de fundamental importância para uma boa medida. O tempo deve ser grande o suficiente para permitir que a partícula percorra pelo menos ¼ da janela de interrogação e pequeno o bastante para que partículas não sejam “perdidas” quando se correlacionam as janelas de interrogação. A figura 6.5 ilustra duas tomadas: uma aquisitada com um intervalo de tempo de 18µs (a) e outra com 24µs(b). Note que em (b) existem alguns “buracos”. Isto acontece devido a falta de informação para o cálculo das imagens. É bem verdade que os softwares comerciais oferecem diversos recursos para preencher todo o campo amostrado com informação, mas isto pode acabar gerando uma informação falsa sobre o escoamento.



(a) 18µs



(b) 24µs

Figura 6.5 – Comparativo das imagens aquisitadas com intervalos de tempo distintos

c) determinação da quantidade de imagens aquisitada.

Foram aqusitadas 100, 200 e 300 imagens de uma seção aleatória no hidrociclone. Os dados foram plotados e os perfis de velocidade média em x, y e z comparados. Para as tomadas de 200 e 300 imagens não houve alteração do perfil médio, portanto 200 imagens representam satisfatoriamente a velocidade do escoamento. Para uma taxa de aquisição de 5Hz (freqüência do laser) temos um tempo total de aquisição de 40s (tempo = 200 x 0,2s).

6.2.4 Configuração pós-aquisição

6.2.4.1 Processamento das imagens

Para tratamento dos dados os principais itens ajustados no programa de tratamento das imagens foram

a) correlação cruzada:

O cálculo determina um vetor deslocamento para cada janela de interrogação (figura 6.6).

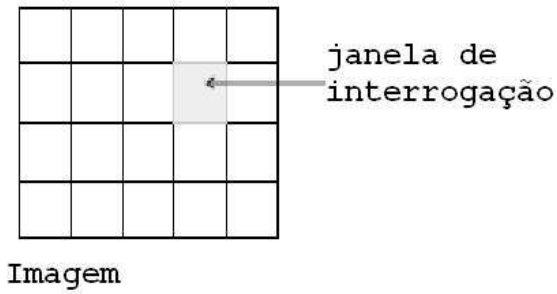


Figura 6.6 – Imagem dividida em janelas de interrogação

A correlação cruzada consiste na análise das imagens de dois quadros distintos. O primeiro quadro é referente ao primeiro pulso do laser e o segundo quadro referente ao segundo pulso. Um algoritmo computa a correlação cruzada de todas as janelas de interrogação entre o quadro 1 e o quadro 2. O maior pico obtido é o que representa o deslocamento das partículas em cada janela, como pode ser visto na figura 6.7. Não há pico para o deslocamento igual 0 (como no caso da auto correlação).

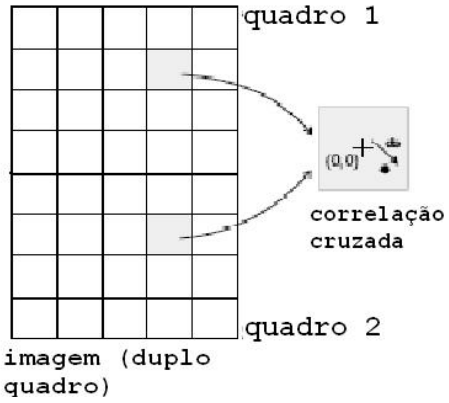


Figura 6.7 – Correlação cruzada

b) Tamanho da janela de interrogação

Para o experimento a janela de interrogação foi definida como 64 x 64 pixels. Uma vez que a câmera possui 1280 x 1024 pixels, a imagem foi dividida em 20 x 16 janelas de interrogação (desde que não haja sobreposição de imagens).

Um recurso muito utilizado para aumentar a precisão dos resultados é quando parte das janelas de interrogação são sobrepostas. Isto aumenta em muito o número de vetores calculado. Por exemplo, para uma janela de 64 x 64 pixels isso resulta em 320 vetores calculados (para a câmera 1280x1024). Se fizermos uma sobreposição parcial das imagens de 50% teremos 39 x 31 janelas o que resulta em 1209 vetores calculados.

O tamanho da janela de interrogação e a percentagem de sobreposição das janelas definem a malha do campo vetorial. Este é o espaçamento entre dois vetores vizinhos no campo vetorial. Para explicitar melhor o conceito de sobreposição parcial de imagens, vamos supor uma janela de interrogação de tamanho 32 x 32 pixel e sem sobreposição de imagem (0%) dá uma malha de tamanho igual a 32 pixel, já uma janela de 32 x 32 pixel e com uma sobreposição de 50% dará uma malha de tamanho de 16 pixel. A posição do primeiro vetor no topo esquerdo da imagem é determinada somente em função do tamanho da malha. A convenção é que a posição de pixel (x/y) é determinada pela metade do tamanho da malha, isto é, se a malha tem 32 pixel o primeiro vetor ficará localizado na posição (16/16) e se o tamanho da malha for de 16pixel então o vetor ficará localizado na posição (8/8). Esta convenção permite que os vetores sejam calculados com diferentes tamanhos de janelas de interrogação, mas com o mesmo tamanho da malha. A figura 6.8 ilustra a sobreposição das janelas de interrogação.

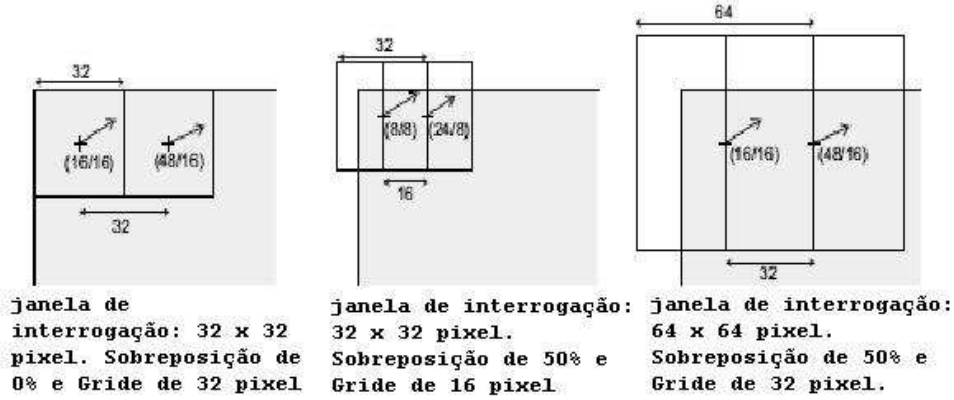


Figura 6.8 – Vetor posição relacionado com o tamanho da janela e com a sobreposição

No presente trabalho foi usado o método de múltiplos passes, começando com uma janela de interrogação de 64 x 64 pixel e sobreposição de 50% até 32 x 32 pixel com sobreposição de 50%. Nesse método, o cálculo do campo de vetores inicia-se na janela de 64 x 64, o vetor calculado será usado como referência para o próximo passo. Desta maneira os vetores computados nos passos seguintes são mais corretos e mais confiáveis. Isso garante que as mesmas partículas são correlacionadas entre si, ainda que se trabalhe com pequenas janelas de interrogação onde menos partículas entram ou desaparecem da janela de interrogação. O método de múltiplos passos com diminuição da janela de interrogação (como é o caso do experimento no hidrociclone) permite que se use uma janela de interrogação pequena no processamento final. Isso aumenta a resolução espacial do campo de vetores e diminui os erros gerados na correlação.

c) função correlação

A correlação utilizada usa a equação de algoritmo FFT que a calcula a correlação cíclica da janela de interrogação:

$$C(dx,dy) = \sum_{x=0,y=0}^{x<n,y,n} I_1(x,y) I_2(x+dx, y+dy), -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2} \qquad (20)$$

Onde I_1 e I_2 são as intensidades das imagens da primeira e da segunda janelas de interrogação, C é o pico de correlação para todos os deslocamentos (*dx,dy*) entre as duas janelas, *n* é o tamanho da janela e *n/2* é o máximo deslocamento computado (Raffel et al. – 1998) .

6.2.4.2 Pós-processamento das imagens

Uma vez calculado os vetores, um algoritmo de validação pode ser empregado para eliminar os vetores espúrios.

a) Filtro mediano

O filtro mediano calcula um vetor médio utilizando 8 vetores vizinhos e compara o vetor do meio com o vetor médio +/- um determinado desvio da vizinhança. O vetor central é rejeitado quando está acima dos limites impostos.

$$U_{mediano} - U_{rms} \leq U \leq U_{mediano} + U_{rms} \tag{21}$$

onde:

$U_{mediano}$ = valor médio de U de todos os componentes "vizinhos"

U_{rms} = desvio de U em relação a todos os componentes "vizinhos"

Só foi explicitado para a componente U, mas o mesmo critério é adotado no cálculo das três componentes: U, V e W. A figura 6.9 exemplifica este critério.

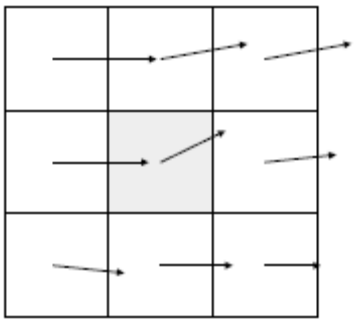


Fig 6.9 – Local do filtro mediano

O critério imposto no experimento foi remoção dos vetores caso o desvio for maior que 2 e substituição por interação caso o desvio seja menor que 3. Esta aplicação é muito importante quando queremos o cálculo da média e dos desvios-padrão. Um falso vetor, que não foi rejeitado, pode alterar a média uma vez que esses vetores espúrios podem diferir em muito do valor real. Por exemplo, se a média de deslocamento para uma dada posição é de U = 5 pixel com um desvio padrão de +/- 2 pixel, então um simples falso vetor deslocamento de U = 10 pixel, em uma amostra de 100 imagens, irá alterar a média para 5,05, ou seja, 5% de erro. Portanto é aconselhável remover os vetores espúrios sempre que possível, mesmo que alguns "bons" vetores sejam também removidos.

6.3 Configuração do sistema LDV

Para as medições de velocidade com o LDV o hidrociclone foi dividido em várias estações. Na seção com conicidade mais pronunciada (θ=15º) foram tomadas 3 estações transversais ao eixo axial distando 20mm de cada. Na seção com conicidade θ=1º as estações distam 40mm entre si.

O hidrociclone em acrílico foi construído com as paredes externas planas com o objetivo de minimizar os efeitos de refração e difração da luz, contudo o laser percorre três meios diferentes: ar, acrílico e água. Ainda assim diversos problemas de difração impossibilitaram uma boa medição ao longo de toda seção do hidrociclone. Imperfeições do acrílico e até mesmo pequenos arranhões eram identificados pelo fotodetector como uma fonte emissora. O conhecimento prévio do comportamento do escoamento foi fundamental para a filtragem desses dados.

Uma vez que o eixo de coordenadas está no ar, foi necessário implementar uma correção de cota para correlacionar a posição fora e dentro do hidrociclone. A figura 6.10 mostra um esquema do desvio dos raios.

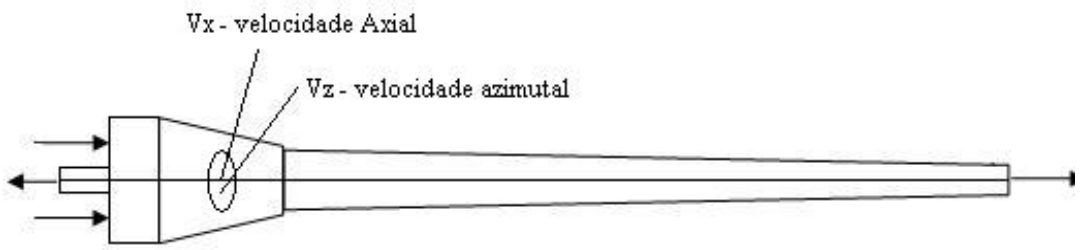


Figura 6.10 – Os raios não se cruzam no mesmo ponto.

A figura 6.11 mostra o esquema que foi usado para a correção da posição dos raios.

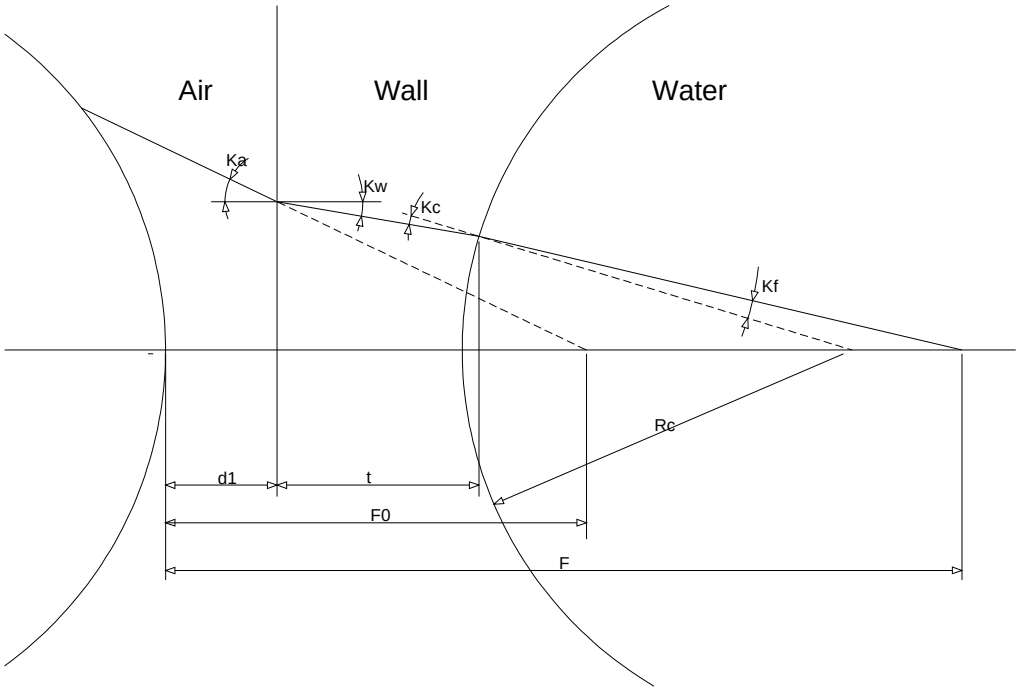


Figura 6.11 – Os raios sofrem refração, pois percorrem meios diferentes.

$$\begin{cases} K_f = \arcsin\left[\dfrac{n_{acr}}{n_{H_2O}} * \sin K_c\right] \\ K_c = \arctan[\pi - K_w] - \arctan\left[-\left(\dfrac{\partial}{\partial_x}\left(\left(R^2 - \left(x - F^2\right)\right)^{1/2}\right)_{x=d+t}\right)^{-1}\right] \\ F = d_1\left[1 - \dfrac{TanK_a}{TanK_f}\right] + t\left[1 - \dfrac{TanK_w}{TanK_f}\right] + F_0\left[\dfrac{TanK_a}{TanK_f}\right] \end{cases} \quad (22)$$

Outro ponto importante é referente ao volume de controle. A distância entre as franjas de interferência, que formam o volume de controle, é função do ângulo de entrada dos raios na superfície. Contudo como o comprimento de onda é função do meio o espaçamento entre as franjas não muda:

$$\begin{cases} n_1 senk_1 = n_2 senk_2 \\ n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 \\ \dfrac{\lambda_1}{senk_1} = \dfrac{\lambda_2}{senk_2} \\ d_f = \dfrac{\lambda}{2senk} \end{cases} , \qquad (23)$$

Para aquisição de dados com o sistema LDV a água (fluido de processo) foi impregnada com partículas de nylon, com diâmetro da ordem de 4µm e densidade de 1,02. O LDV utilizado no experimento foi o modelo da TSI de 2 canais com laser argônio de 5W. A tabela 6.1 mostra as principais características do sistema utilizado nos ensaios:

Tabela 6.1 – Característica do sistema LDV utilizado.

	Canal1	Canal2
Comprimento de onda (nm)	514.5	488
Distância Focal (nm)	261.30	261.30
Espaçamento entre os feixes (µm)	2.70	2.56
Volume de controle (µm)	64.59	61.27

A figura 6.12 mostra o arranjo experimental utilizando a técnica LDV para medição no hidrociclone.

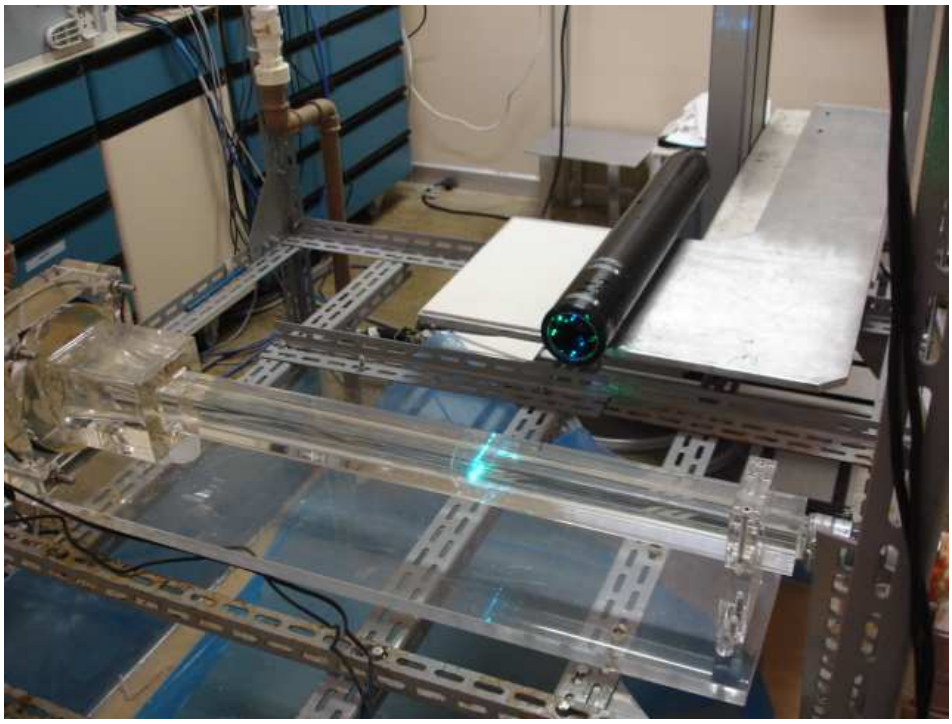


Figura 6.12 – Arranjo experimental para o LDV

A figura 6.13 mostra o resultado da medição em um ponto da seção do hidrociclone.

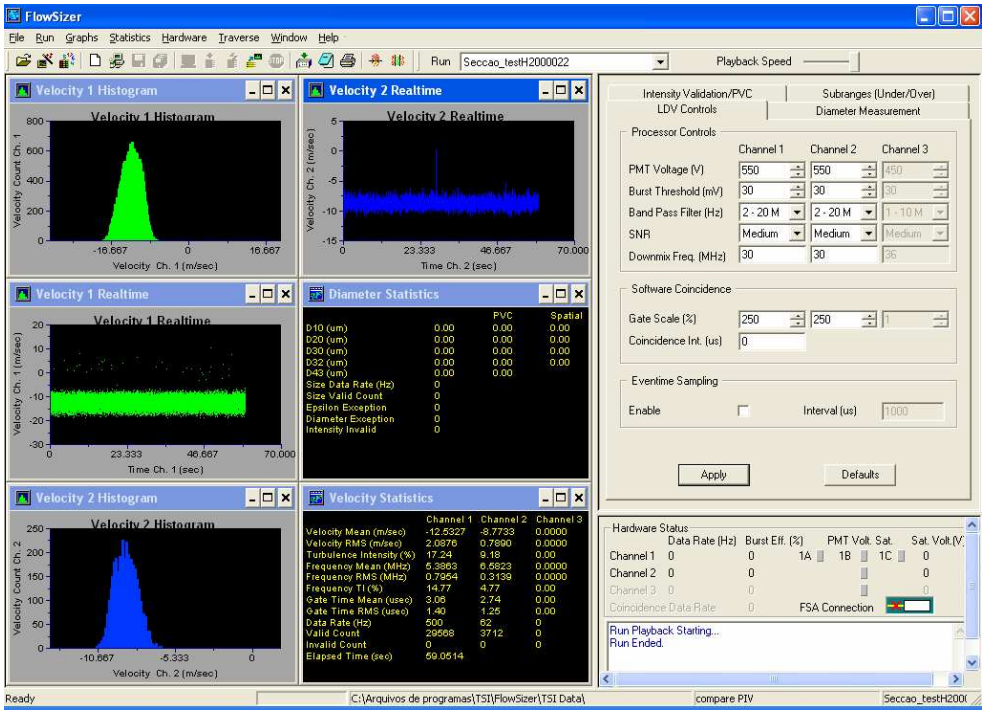


Figura 6.13 – Medição da velocidade em duas componentes.

A medição mostrada foi realizada na seção a 200 mm do orifício de rejeito. A velocidade axial está próxima ao eixo do hidrociclone, e a velocidade azimutal está a 2,5 mm do eixo.

Como pode ser visto na figura 5.3.4 o espectro de freqüência foi bem aberto (2 – 20 MHz) e subtraindo 30 MHz do sinal, temos um intervalo de medição o componente axial de (-21 m/s a 27 m/s) e para o componente azimutal de (-20 m/s a 25 m/s).

O processo de aquisição para cada ponto seguiu o seguinte critério de parada: 60 segundos ou 100.000 amostras.

6.4 O experimento

O Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Cenpes/TPAP possui um circuito de recirculação do fluido de trabalho como mostrado na figura 6.14.

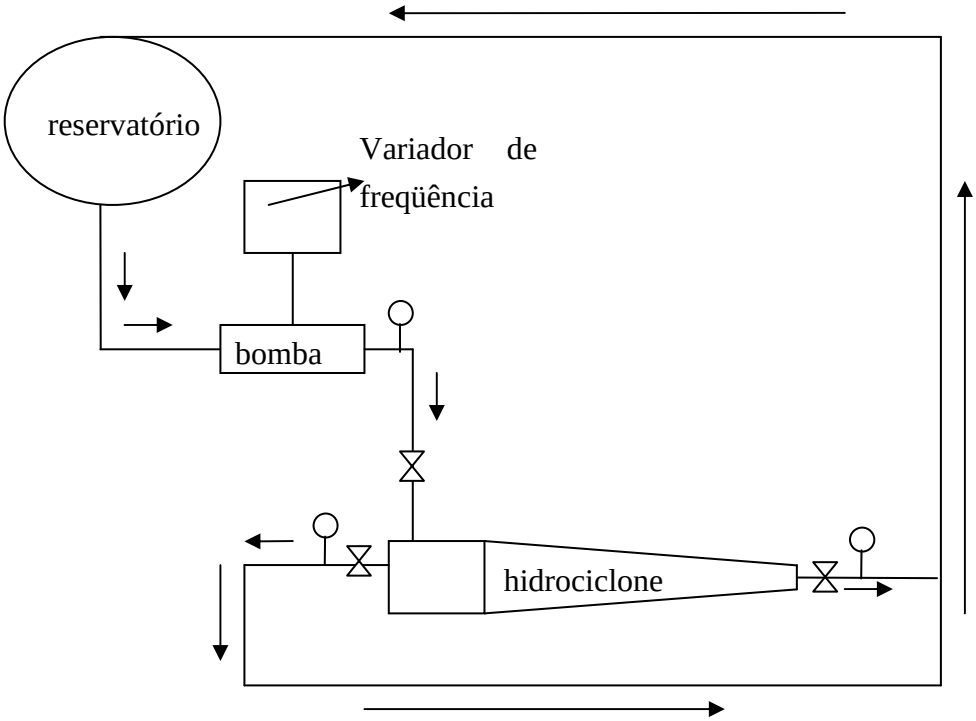


Figura 6.14 – Aparato experimental

O circuito fechado de movimentação de fluidos tem como principais componentes os seguintes itens:

- reservatório de fibra com capacidade para $3m^3$;
- bomba NETZSCH - BCP com rotação nominal de 1160rpm, vazão de $10m^3/h$ e pressão de 10 kgf/cm^2;
- Inversor de freqüência WEG modelo CFW-09
- 3 transdutores de pressão
- Mini-LDV
- Rotâmetro Conaut (faixa de 1 a $10m^3/h$)

Inicialmente a medição da vazão de entrada foi realizada utilizando um mini-LDV. Este equipamento é um laser Doppler de baixa potência unidimensional. Como

a água (fluido de trabalho) estava impregnada com partículas reflexivas foi possível a utilização do mini-LDV. Um tubo de acrílico foi colocado verticalmente na corrente de entrada, o perfil de velocidade foi então medido e integrado. A figura 6.15 mostra o mini-LDV em uso.

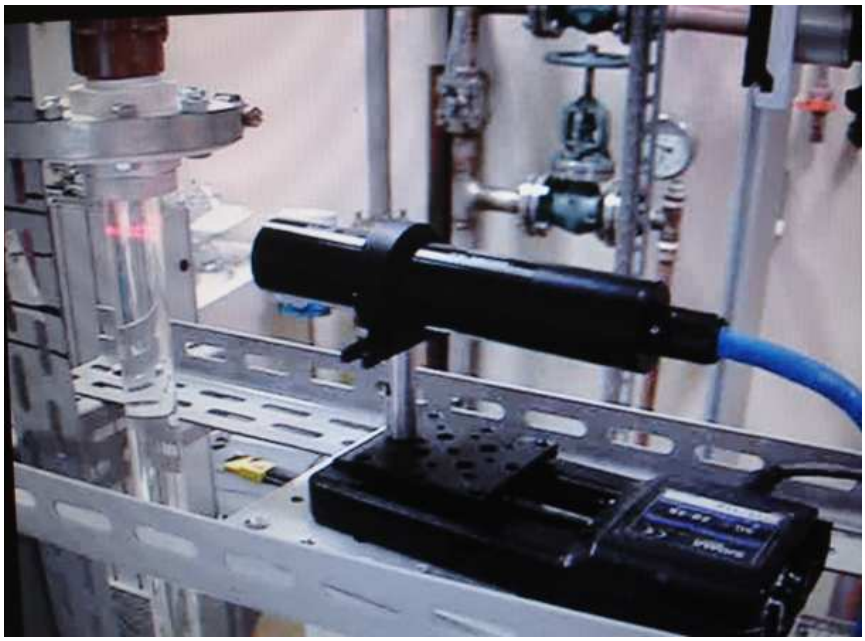


Figura 6.15 (a) Uso do mini-LDV para medição de vazão

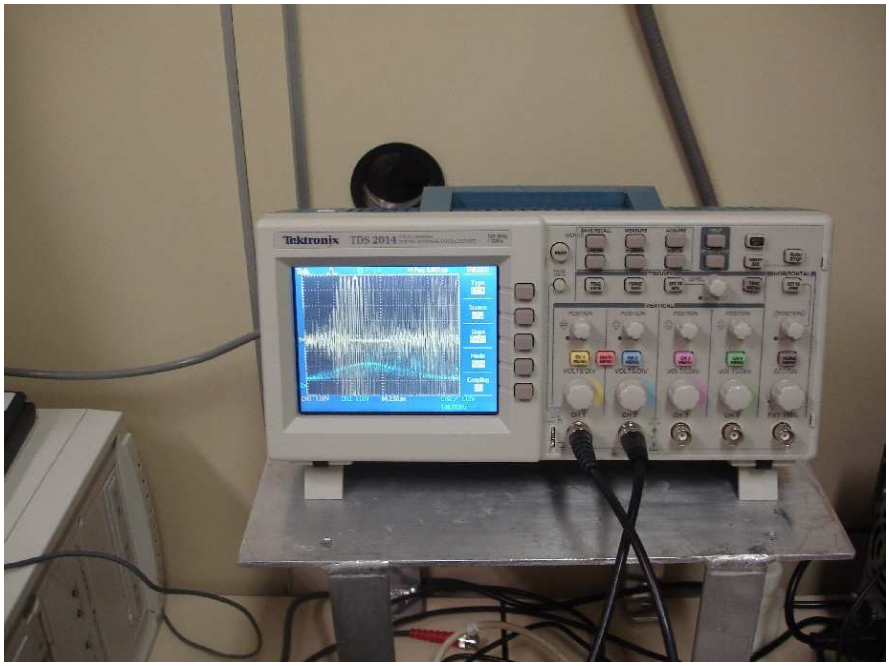


Figura 6.15 (b) – Forma do sinal – "*Burst*"

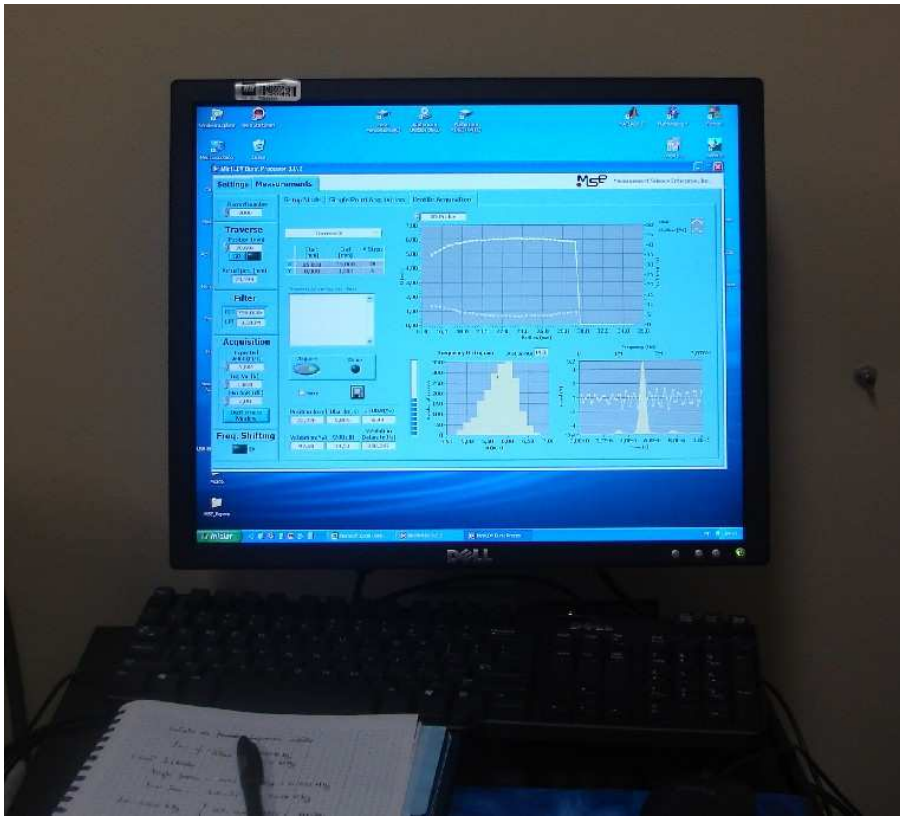
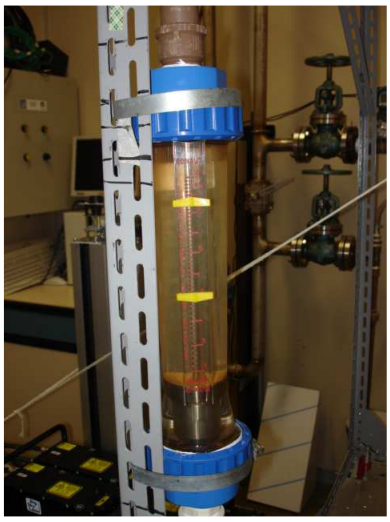


Figura 6.15 (c) – Velocidade medida pelo mini-LDV

O perfil de velocidade foi integrado e o valor médio de vazão obtido para vários experimentos foi de 6,5 m^3/h.

Devido ao fato do tubo de acrílico utilizado ($Ø_{int}$ = 13 mm) não ter sido dimensionado para trabalhar com pressões da ordem de 3 bar a parede trincou e o tubo teve que ser substituído pelo rotâmetro do fabricante Conaut. A figura 6.16 mostra o tubo trincado e rotâmetro que foi utilizado no seu lugar.



(a) (b)

Figura 6.16 – (a) Trinca no tubo de acrílico. (b) Rotâmetro para trabalhar com vazões de 1 a $10m^3/h$

A primeira preocupação foi à verificação da vazão com o rotâmetro. Para isso colocamos o experimento nas mesmas condições operacionais. A substituição do tubo pelo rotâmetro não causou alteração na vazão sendo registrados valores médios de 6,5 m^3/h.

Um parâmetro importante para o controle de desempenho do hidrociclone é razão entre a perda de carga da entrada e o rejeito e a perda de carga entre a entrada e a saída de água. Para isso foram colocados três transdutores de pressão para as medições de pressão da entrada, do rejeito e da saída de água. O ajuste da pressão foi feito através de válvulas do tipo gaveta. Devido ao posicionamento do transdutor pressão de entrada estar muito afastado do real ponto de entrada, foi necessário corrigir a pressão. A figura 6.17 ilustra o posicionamento dos manômetros.

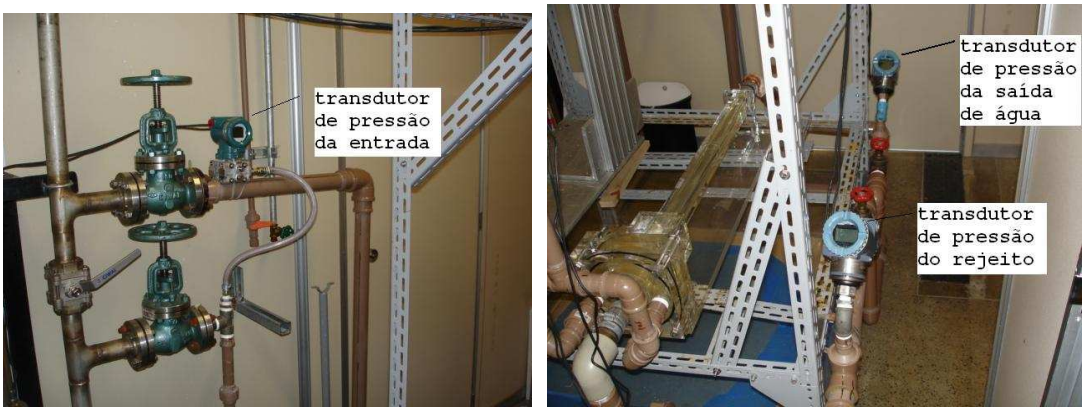


Figura 6.17 – Posicionamento dos transdutores de pressão

Os valores de pressão medidos pelos transdutores foram:

P_{in} (entrada) = 3,55 bar;

P_{ov} (rejeito) = 1,20 bar;

P_{und} (saída de água) = 2,05 bar

Para o cálculo da perda de carga foi considerado em geometria contendo as seguintes características:

- 5 m de tubo liso 1” (PVC);
- 10 curvas de 90º;
- 2 curvas de 45º;
- 1 Tê

Determinação do número de Reynolds na tubulação:

D_{tub} = 1” = 2,54 x 10^{-2}m;

U = 3,23 m/s (para uma vazão de 6,5 m^3/h);

μ (viscosidade dinâmica) = 1,137 x 10^{-3}kg/m.s;

ρ (massa específica) = 1000 kg/m^3;

υ (viscosidade cinemática) = μ/ρ

$$\mathrm{Re} = \frac{UD}{\upsilon}; \qquad \mathrm{Re} = 0{,}76x10^5$$

i) cálculo de h_L na tubulação:

- utilizando a correlação de Blasius para o cálculo do fator de atrito, encontramos:

$$f_{at} = \frac{0{,}316}{\mathrm{Re}^{0{,}25}} = \frac{0{,}316}{(0{,}76x10^5)^{0{,}25}} = 0{,}019$$

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{U^2}{2} = 0{,}0173\frac{5}{0{,}0254}\frac{3{,}23^2}{2} \cong 18m^2/s^2$$

ii) cálculo de $h_{acessórios}$ dos acessórios (curvas e Tê):

- a razão L/D equivalente:

10 curvas de 90º = 300;

2 curvas de 45º = 32;

1 Tê = 20.

L/D = 352

$$h_{acessórios} = f\frac{L}{D}\frac{U^2}{2} = 0{,}019x352x\frac{3{,}23^2}{2} = 35m^2/s^2$$

perda total: $h_L + h_{acessórios}$ = 53m^2/s^2

Δp = ρx53 = 53600 kg/m^2/s^2 = 0,53bar

Os valores de pressão corrigidos são:

P_{in} (entrada) = 3,02 bar;

P_{ov} (rejeito) = 1,20 bar;

P_{und} (saída de água) = 2,05 bar

$$DPR = \frac{3{,}02 - 1{,}20}{3{,}02 - 2{,}05} = 1{,}87$$

O modelo de hidrociclone avaliado possui as mesmas dimensões que o protótipo industrial, sendo assim, foi necessário montar uma configuração robusta para circulação do fluido de trabalho, uma vez que, as pressões e a vazão de processo

são relativamente altas para sistemas de laboratório. O reservatório de fluido, com capacidade de $3m^3$ foi disposto no telhado do laboratório de mecânica dos fluidos do CENPES / TPAP. Para a movimentação do fluido foi montada uma bomba do tipo BCP (bomba de cavidades progressivas) do fabricante NETZSCH, com rotação nominal de 1160rpm, vazão de 10 m3/h e pressão de 10 kgf/cm2. Para melhor controle de vazão foi acoplada a bomba o inversor de freqüência WEG modelo CFW-09. A figura 6.18 ilustra esse arranjo.

Figura 6.18 – Reservatório, bomba BCP e motor de acionamento

Capítulo 7

Resultados

7.1 Aspectos gerais

A figura 7.1 mostra o desenho do hidrociclone utilizado no experimento. Devido à dificuldade de arranjo experimental, a seção L2 (θ=15°) foi medida somente com o LDV.

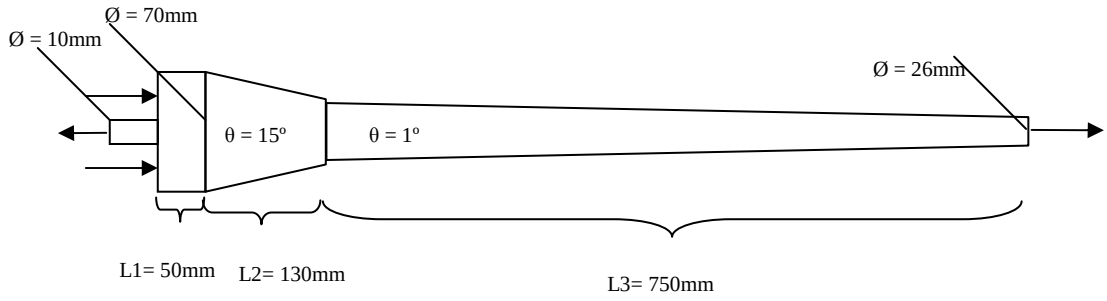


Figura 7.1 – Dimensões do hidrociclone

O trecho cônico L2 foi investigado em 3 seções transversais (perpendiculares ao eixo axial), distando 20mm cada uma. O trecho cônico L3 (θ=1°) foi investigado em 9 seções transversais distando 40mm de cada. As cotas axiais dessas seções, em ambos os trechos, estão expressas em milímetros e são medidas a partir do orifício de rejeito, conforme figura 7.2. Foram comparados os perfis azimutais e axiais, muito embora o PIV meça os 3 componentes. A velocidade radial não foi investigada, mesmo considerando importância desse componente no processo de separação, pois esse componente influencia a velocidade com que as partículas da fase dispersa caminham para o eixo central do cone. A razão da não investigação do componente radial deve-se aos possíveis problemas de escorregamento entre as partículas (que espalham o "laser") e o fluido, já que nessa direção há uma força de campo muito intensa. As partículas que foram adicionadas ao fluido tinham dimensões reduzidas (15 µm para o PIV), contudo, a força de campo que atua na direção radial é na ordem de 2.000g e, portanto uma forte aceleração é imposta a partícula. Já nas direções axial e azimutal não há forças de campo e, portanto não teremos escorregamento, ou seja, as velocidades medidas nessa direção podem ser consideradas velocidades do fluido.

As seções transversais onde foram realizadas as estão representadas na figura 7.2

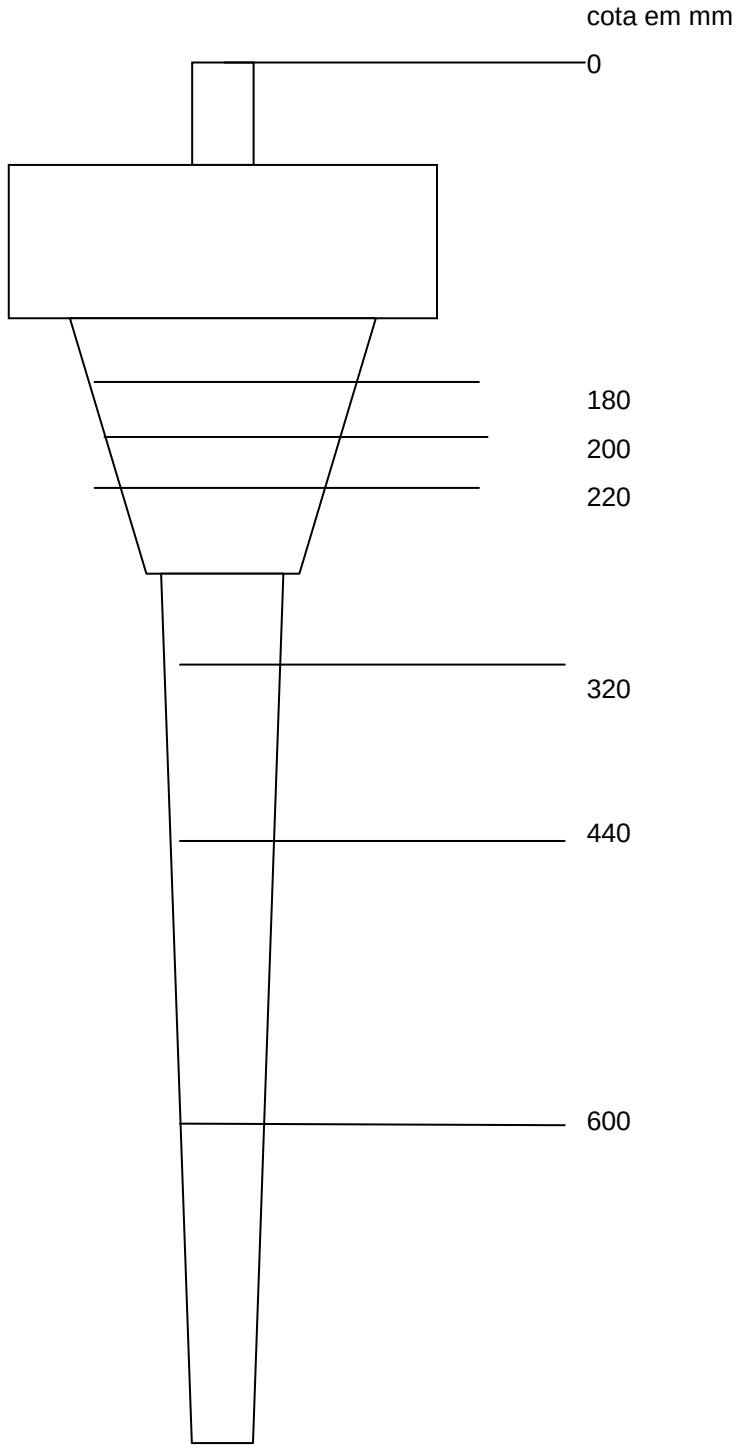


Fig 7.2 – Seções transversais do hidrociclone em que as velocidades foram investigadas

7.2 Tempo de residência

Como todo separador empregado na indústria do petróleo é fundamental conhecermos o tempo de residência, ou seja, o tempo que será necessário para efetuarmos uma separação de fases.

Através das dimensões do hidrociclone podemos calcular o tempo de residência médio. O termo médio é usado uma vez que cada partícula percorre uma trajetória diferente.

$$t = \frac{volume\ \ do\ \ hidrociclone}{vazão\ \ de\ \ alimentação} \tag{24}$$

Para o modelo em questão com volume de 0,00267 m^3 e para uma vazão de operação de 6,5 m^3/h, o tempo de residência médio é de 1,5s.

7.3 Resultados com emprego da técnica de Velocimetria por Laser Doppler (LDV)

No trecho de maior conicidade ($\theta=15^o$) foram investigadas as seções transverais de cotas 180, 200 e 220mm.

O gráfico das figuras 7.3 (a) e (b) mostram os perfis, ao longo do raio do hidrociclone, para os componentes axial e azimutal da velocidade, respectivamente. Problemas de refração luminosa impossibilitaram uma medida completa ao longo de todo o diâmetro da seção transversal.

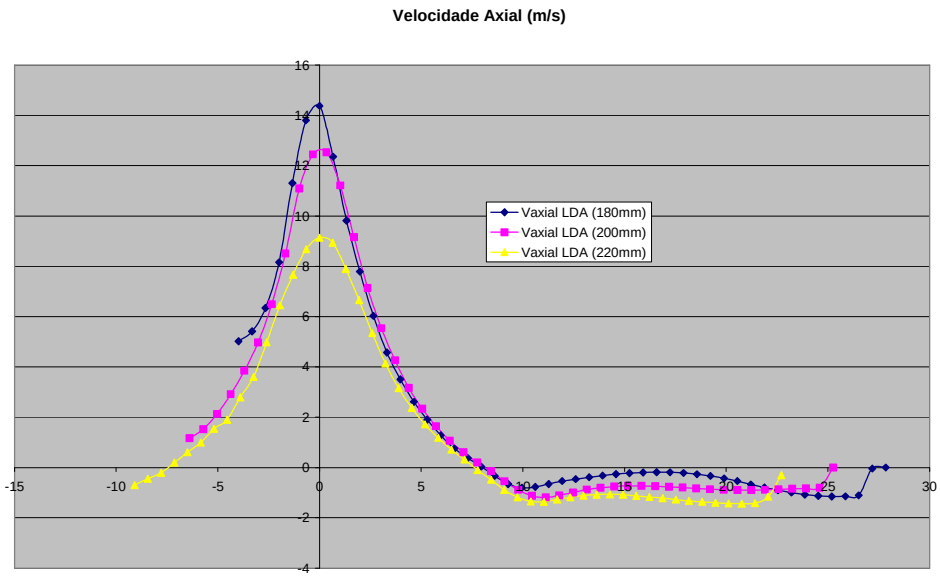


Figura 7.3 (a)– Componente axial da velocidade - LDV

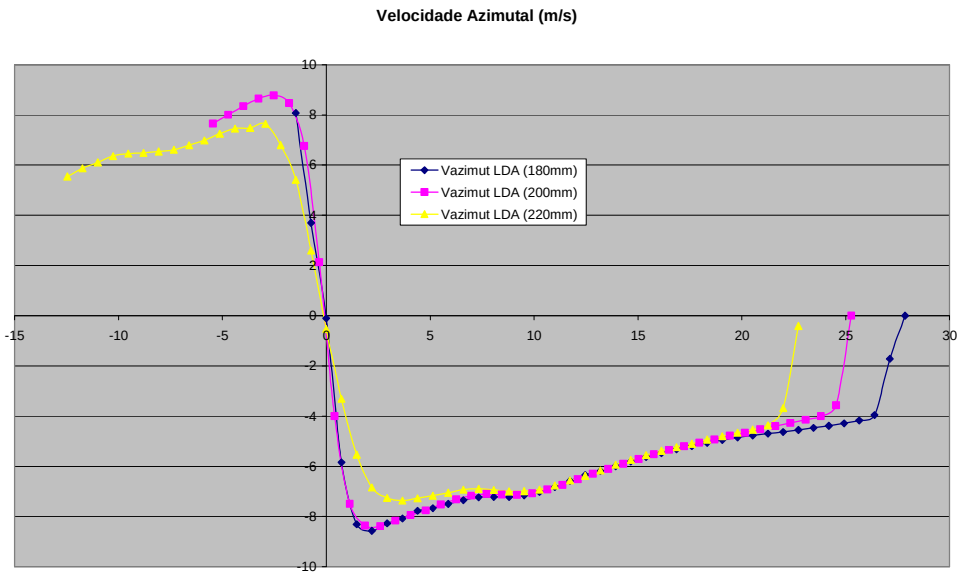
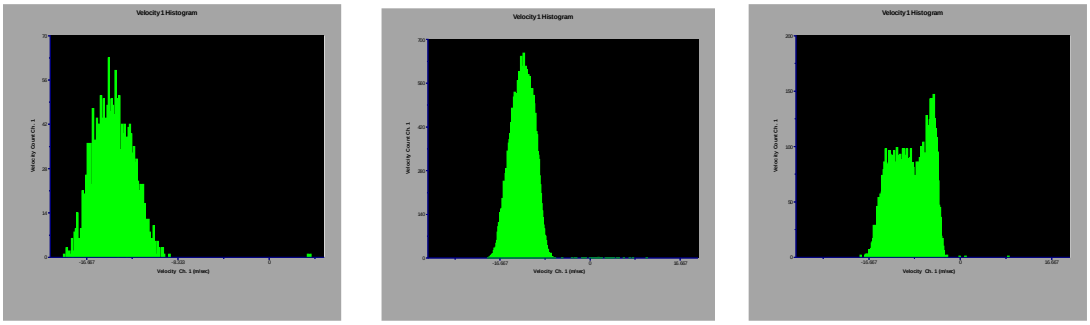


Figura 7.3 (b)– Componente azimutal da velocidade – LDV

Os perfis do componente azimutal mostraram uma boa concordância. O objetivo da angulação das paredes é manter um valor elevado do componente azimutal da velocidade, pela conservação do momento angular, de modo que a eficiência de separação não sofra redução significativa ao longo do hidrociclone.

O componente axial no eixo central do hidrociclone na seção transversal 220mm, foi subestimado. De fato não foi possível realizar uma boa medida neste ponto e diversas distribuições de medidas mostravam sistematicamente dois picos de velocidade. Imperfeições geométricas e problemas de refração luminosa podem ter gerado essas distorções. A figura 7.4 mostra as curvas geradas pelo LDV nas

medições que definem o componente axial (Vx) sobre o eixo central, respectivamente nas seções 180, 200 e 220mm.



(a) (b) (c)

Figura 7.4 - (a) Vx na seção 180mm, (b) Vx na seção 200mm e (c) Vx na seção 220mm

Foi calculado o balanço de massa em cada uma das seções transversais do trecho L2, para tal foi considerado apenas a metade do perfil do componente axial da velocidade, devido ao problema já mencionado, de que o perfil não pode ser obtido em todo o diâmetro da correspondente seção transversal (vide figura 7.3). A tabela 7.1 apresenta os resultados do cálculo do balanço de massa.

Tabela 7.1 – Cálculo da vazão através dos perfis axiais obtidos com o LDV no trecho L2.

	Seção 180mm	Seção 200mm	Seção 220mm
Vazão (m^3/h)	3,05	3,31	4,68

A figura 7.4 (c), supra, mostra um resultado de medição indefinido. O esperado é uma forma gaussiana da curva. Essa figura mostra apenas o problema no ponto sobre o eixo central da seção 220 mm, mas esse mesmo problema se repetiu por boa parte do perfil ao longo do raio, nessa seção. Isto pode explicar a discrepância acentuada no valor da vazão, obtido nessa seção.

No trecho L3 (com conicidade de 1º) foram efetuadas medidas em três seções transversais nas cotas axiais: 320 mm, 440 mm e 600 mm (referenciadas ao orifício de saída de rejeito – vide figura 7.2). Os gráficos das figuras 7.5 (a) e (b) mostram os perfis dos componentes axial e azimutal, respectivamente, para essas três seções transversais..

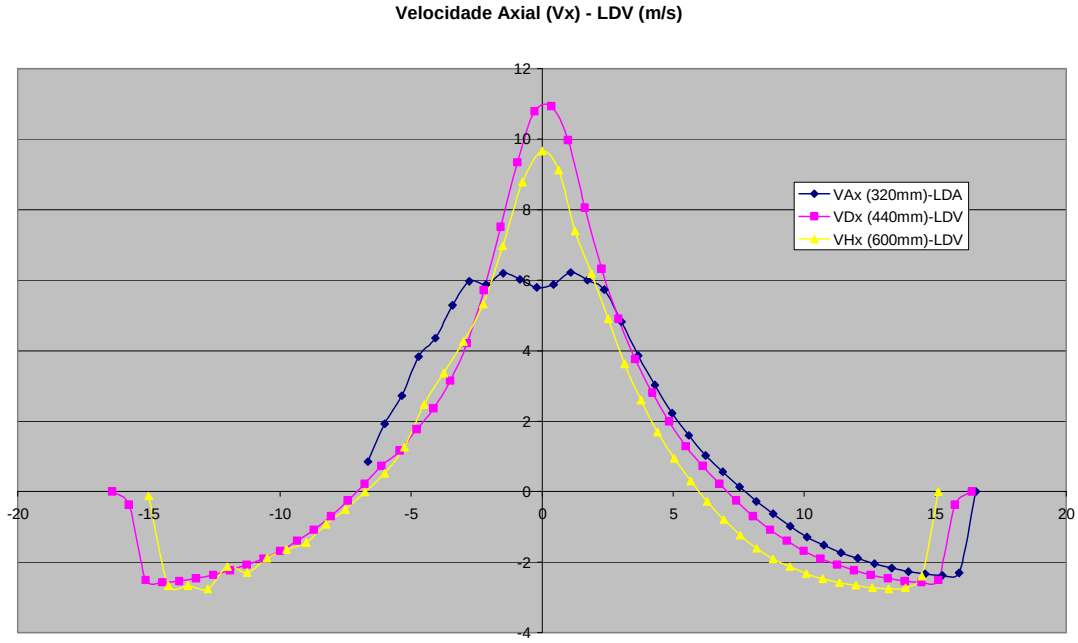


Figura 7.5 (a)– Componente axial da velocidade - LDV

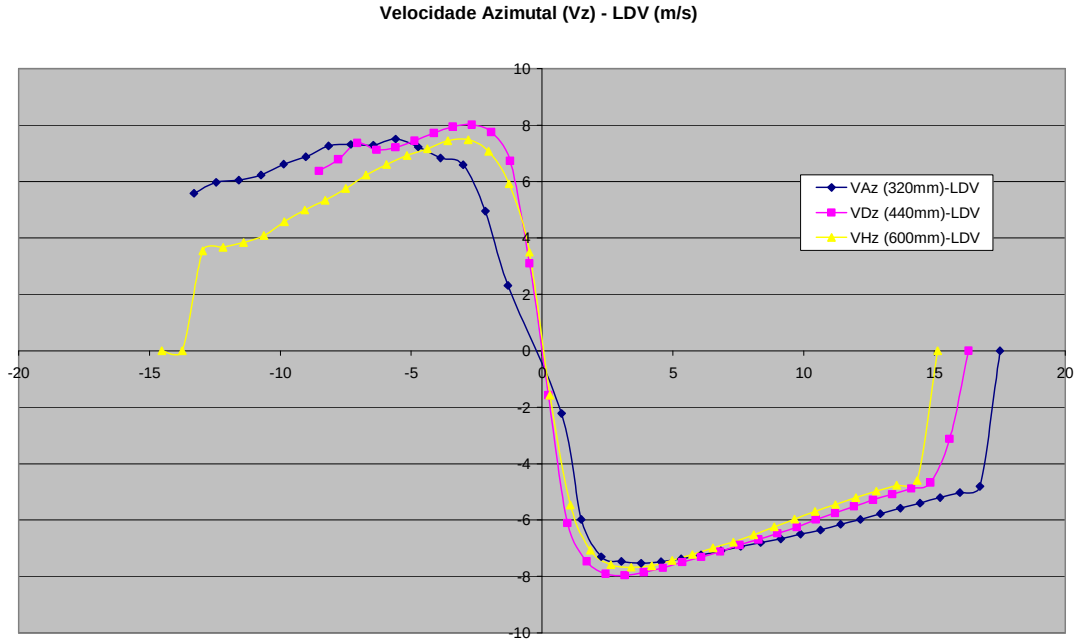


Figura 7.5 (b)– Componente azimutal da velocidade - LDV

Também neste trecho L3 foram calculados os balanços de massa em cada seção transversal analisada. Na seção transversal de cota 320mm foi considerado, para o balanço, meio perfil de velocidade, devido às razões já mencionadas. A tabela 7.2 apresenta os resultados do cálculo do balanço de massa.

Tabela 7.2 – Cálculo da vazão através dos perfis axiais obtidos com o LDV no trecho L3.

	Seção 320mm	Seção 440mm	Seção 600mm
Vazão (m^3/h)	3,26	3,35	3,5

Além das medições nas seis seções transversais (três no trecho L2 e três no trecho L3), cujos resultados foram acima mostrados, também foram investigados, com o LDV, os perfis de velocidade em outras seções transversais do trecho L3 e a tabela 7.3 mostra o tratamento estatístico dos dados obtidos em todas as medições válidas realizadas dos perfis axiais, integrados para a obtenção da vazão. Verifica-se, da análise da tabela, que os valores das vazões, obtidos com os perfis do componente axial da velocidade, nas onze seções transversais investigadas, apresentaram pouca dispersão.

Tabela 7.3 – Estatística de todas as vazões calculadas através dos perfis axiais obtidos com o LDV.

TABELA ESTATÍSTICA	
Média	3,57
Erro padrão	0,16
Mediana	3,35
Desvio padrão	0,52
Variância da amostra	0,27
Curtose	-0,02
Assimetria	0,91
Intervalo	1,65
Mínimo	2,97
Máximo	4,68
Soma	39,27
Contagem	11,00
Nível de confiança(95,0%)	0,35

A dispersão observada pode ser atribuída às dificuldades ópticas encontradas ao se trabalhar com o LDV e o modelo em acrílico. Primeiramente, houve muita dificuldade de garantir o correto alinhamento com o eixo do hidrociclone. Além disso, imperfeições no protótipo e pequenos arranhões na parede do mesmo atuaram como uma “excelente” fonte emissora, fazendo com que o fotodetector acusasse, algumas vezes, um sinal espúrio de alta intensidade. Apesar desse problema, em determinadas

regiões do hidrociclone as medições registraram uma ótima qualidade de sinal chegando até mesmo a aquisição de 100.000 amostras em menos de 7 segundos. Esta elevada taxa de aquisição é fundamental para o estudo de grandezas turbulentas.

O gráfico da figura 7.6 mostra a flutuação da velocidade em uma seção da cota 440mm.

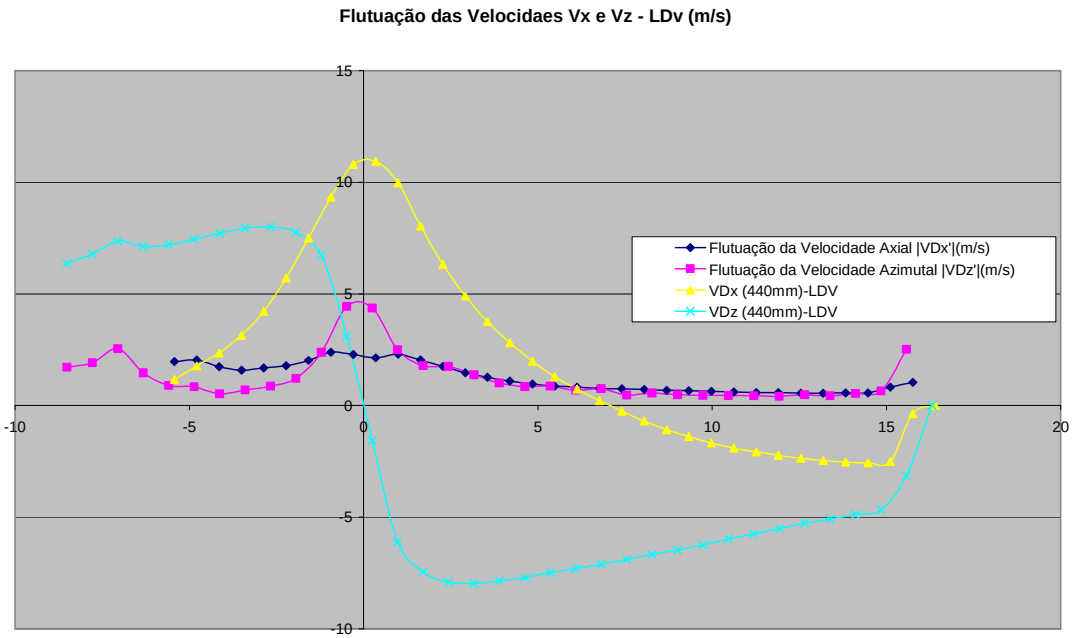


Figura 7.6 – Flutuação das velocidades axial e azimutal.

O escoamento no interior do hidrociclone não é estacionário ($d\overline{U}/dt \neq 0$). As figuras 7.7 (a) e (b), obtidas com a técnica PIV, mostram os mapas dos vetores velocidade do escoamento para uma aquisição instantânea e a média de 200 imagens em 40s.

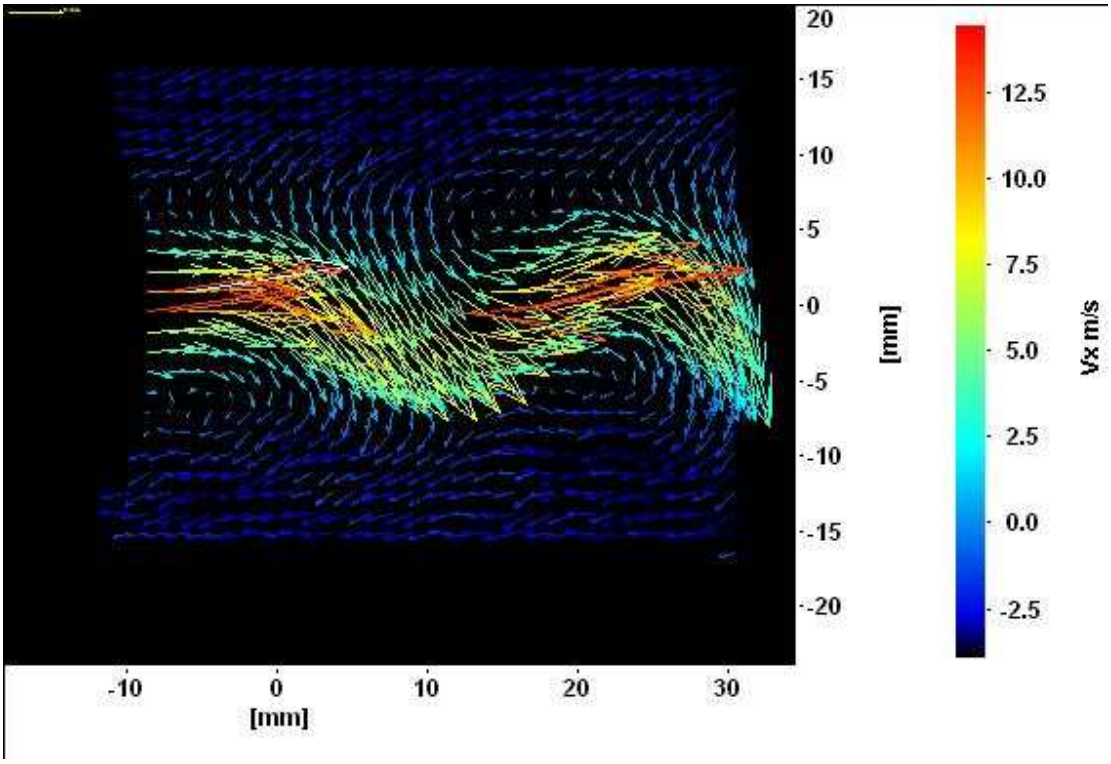


Figura 7.7 (a) – Aquisição instantânea (18 µms)

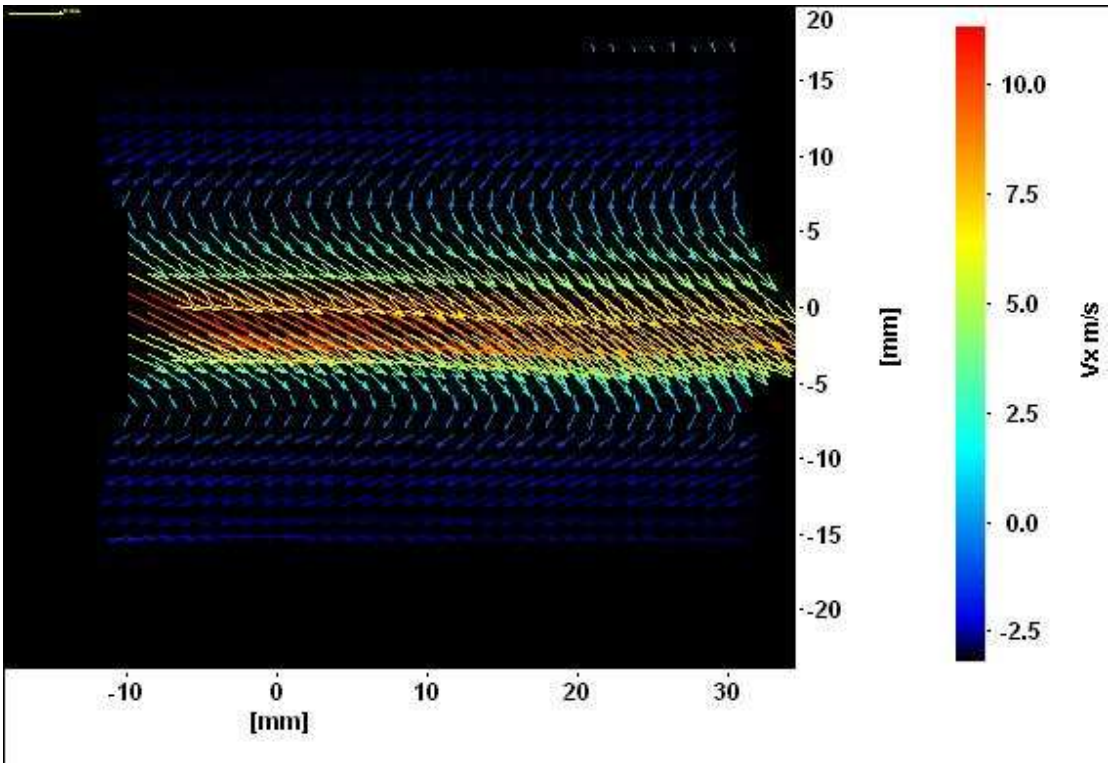


Figura 7.7 (b) – Média de 200 imagens

Portanto, para captar apenas variações turbulentas, o tempo de aquisição deve ser muito reduzido. O critério utilizado para amostragem foi um tempo de aquisição

de 60s ou 100.000 pontos válidos, prevalecendo o que ocorresse primeiro. Foram analisadas as flutuações dos componentes axial e azimutal em dois pontos situados em diferentes posições ao longo do diâmetro da seção de cota 440 mm. O primeiro ponto foi a 11,9mm do centro do hidrociclone (ponto 1) e o segundo a 0,3mm do centro (ponto2). No ponto 1 foram aquisitados 73.500 dados para o componente axial e 28.250 dados para o componente azimutal, em um tempo de 6,6s. Isso resulta em uma taxa de aquisição de 11 kHz e 4,3 kHz respectivamente. O gráfico da figura 7.8 mostra as flutuações das velocidades axial e azimutal para o ponto 1 em um intervalo de 3s.

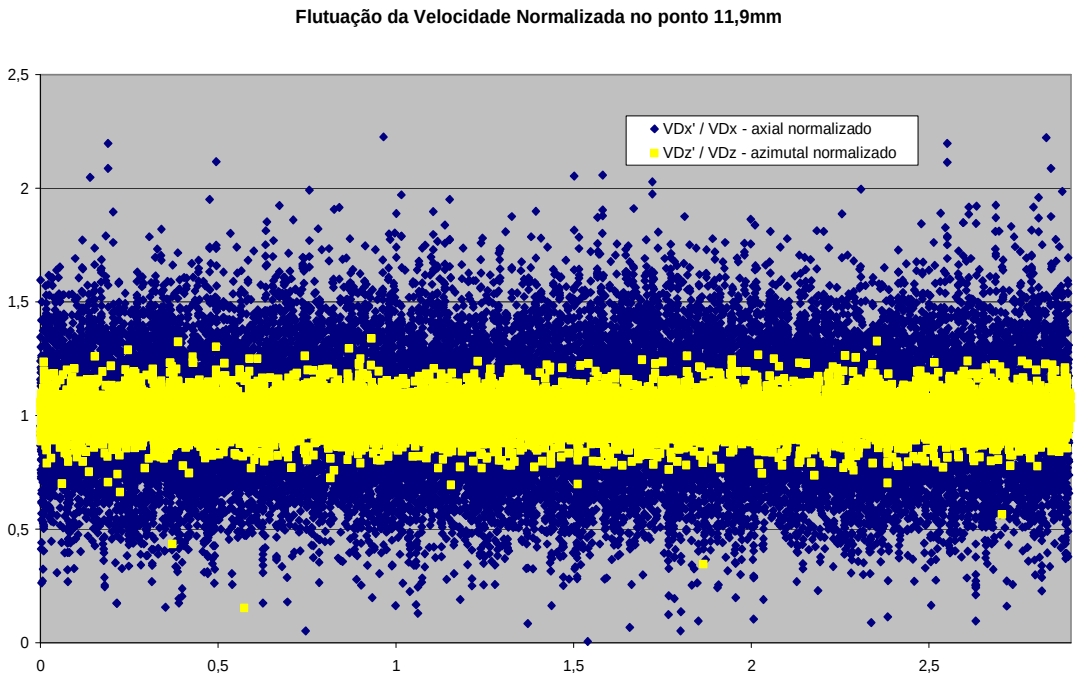


Figura 7.8 – Flutuação da velocidade no ponto 1

As flutuações do componente axial oscilaram em 30% (para um intervalo de confiança de 95%) em torno da média, já as flutuações do componente azimutal registraram uma oscilação de 10% em torno da média.

No ponto 2, distando 0,3mm do centro do hidrociclone, foram aquisitados 32.761 pontos para a componente axial e 2.276 pontos para a componente azimutal em um intervalo de tempo igual a 14s. Isso resulta em uma taxa de aquisição de 2,3 kHz e 0,16 kHz respectivamente. As taxas de medição são bem inferiores ao ponto 1 devido a problemas ópticos provocados pela geometria do hidrociclone e pela maior

distância entre o ponto investigado e a sonda do LDV. O gráfico da figura 7.9 mostra a flutuação das componentes axial e azimutal para o ponto 2.

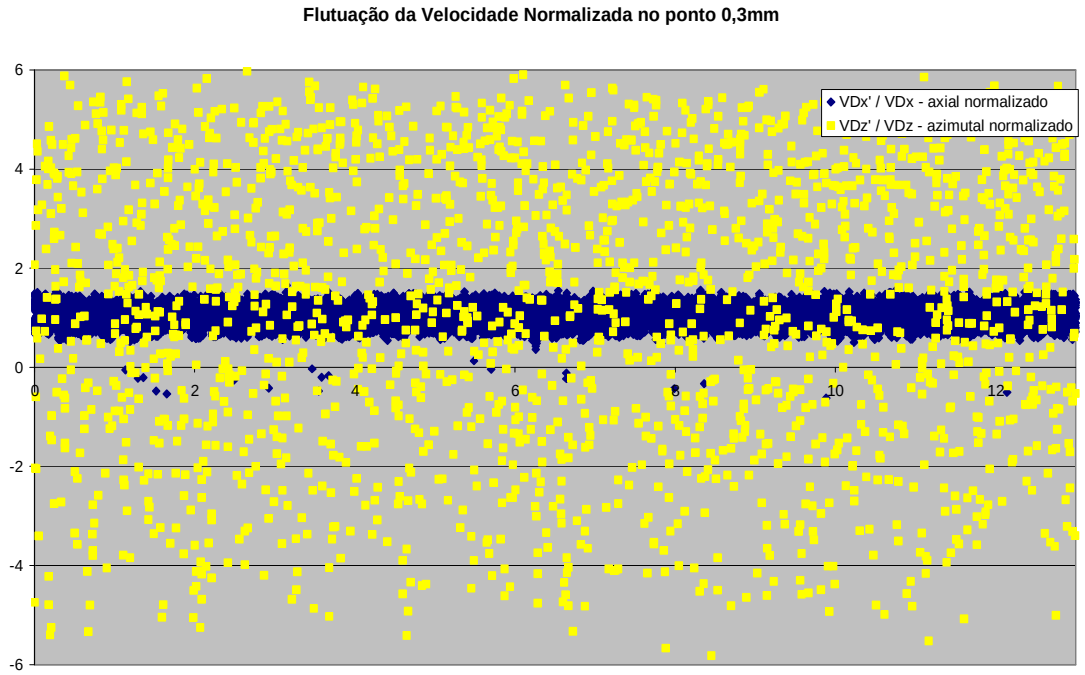


Figura 7.9 – Flutuação da velocidade no ponto 2

A flutuação da componente axial oscilou em 20% (para um intervalo de confiança de 95%) em torno da média, já a flutuação da componente azimutal registrou uma oscilação de 230% em torno da média.

A análise visual do experimento pareceu indicar que as flutuações do escoamento médio (devidas ao movimento espiralado do vórtice central chamado de precessão do núcleo vorticial PNV - "*precessing of the vortex core*" – *PVC*) tinham um período muito superior a esse tempo, entretanto, fazendo-se uma análise das medidas efetuadas num intervalo de tempo muito menor (0,1s) verifica-se que, mesmo os valores médios apresentam considerável flutuação, mesmo nesse intervalo. Assim, as flutuações de velocidade mostradas incluem as flutuações da velocidade média. Por essa razão os valores obtidos das flutuações são da mesma ordem de grandeza da velocidade média. Essa característica fica bem evidente se considerarmos os valores medidos no ponto 2 (junto ao eixo) componente azimutal da velocidade (em amarelo na figura 7.9) que sofre variações muito bruscas, mesmo em tempos muito pequenos, devido ao *PVC*.

7.4 Resultados com emprego da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV)

Como já mencionado, devido à dificuldade de arranjo do experimento não foi possível a aquisição de dados no trecho L2 (de conicidade de 15º). O trecho L3 (de conicidade de 1º) possui 750mm de comprimento (medido ao longo do eixo do hidrociclone). Foram realizadas medições ao longo de 380mm, do plano longitudinal que contém o eixo, sendo que cada área investigada era de 40mmx40mm, que denominamos de área de investigação. Para cada posição axial da área de investigação, foram também investigados diversos planos paralelos (acima e abaixo do eixo) distando 2mm entre si, com a idéia de gerar uma grande massa de dados que, por meio de um aplicativo apropriado, por exemplo o TecPlot, possibilitasse a determinação do campo vetorial de velocidade no volume do hidrociclone, o que não será abordado neste trabalho, no qual, nos restringiremos aos dados os PIV, que permitam a comparação com as medições com o LDV, enfocando os perfis radiais dos componentes axial e azimutal da velocidade, nas seções já citadas. A figura 7.10 mostra três planos investigados, paralelos ao eixo do hidrociclone.

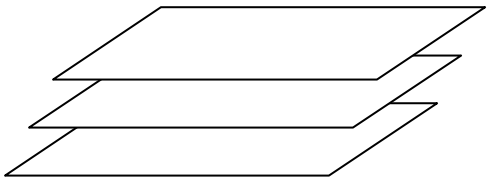


Figura 7.10 – Planos investigados distando 2mm entre si.

Somente a seção que contém o eixo do hidrociclone é que foi mostrada no presente trabalho e os resultados encontrados foram plotados nos gráficos das figuras 7.11 (a) e (b).

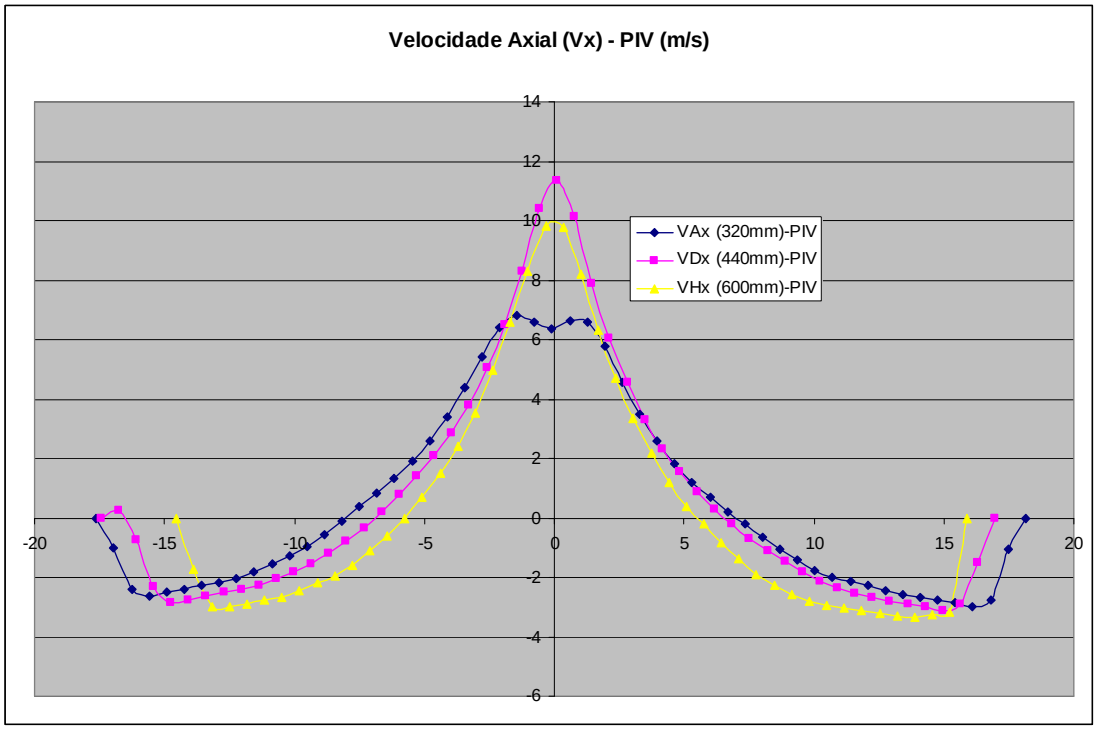


Figura 7.11 (a)– Componente axial da velocidade - PIV

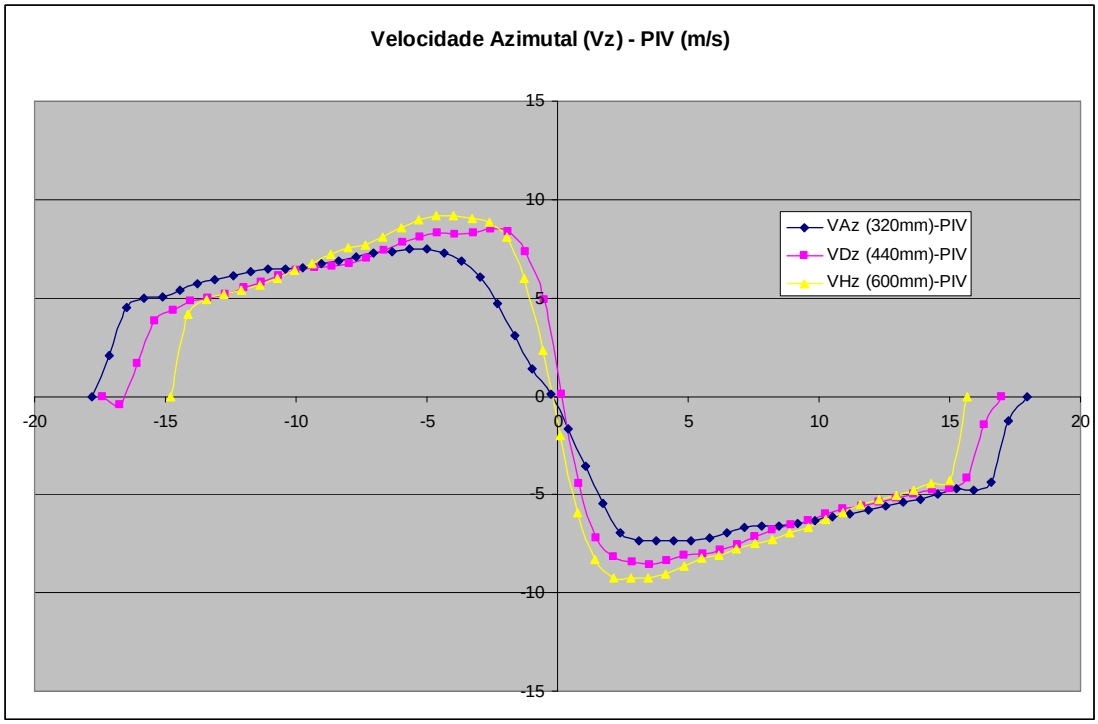


Figura 7.11 (b)– Componente azimutal da velocidade - PIV

O componente radial de velocidade mostrou ser o componente mais influenciado pela posição do plano de medida. Qualquer afastamento, na direção ortogonal ao eixo do hidrociclone, foi suficiente para alterar significativamente o valor medido, já que esse valor contém, além do componente radial, uma contribuição muito grande do componente azimutal. Na análise de um plano paralelo ao plano que

contém o eixo do hidrociclone, com uma distância de 2 mm entre eles, o componente radial máximo variou de 0,4 m/s (no plano que contém o eixo) para 7,5 m/s. Isso indica uma que o componente radial da velocidade sofre uma forte influência do componente azimutal. Conforme mencionado no capítulo 2, alguns estudos experimentais apontam para um aumento da velocidade radial à medida que se caminha para o centro, esta observação talvez se deva a dificuldade de se obter um correto alinhamento com eixo do hidrociclone. O gráfico da figura 7.12 mostra a variação do componente radial da velocidade medido no plano que contem o eixo central do hidrociclone e no plano 2 mm acima.

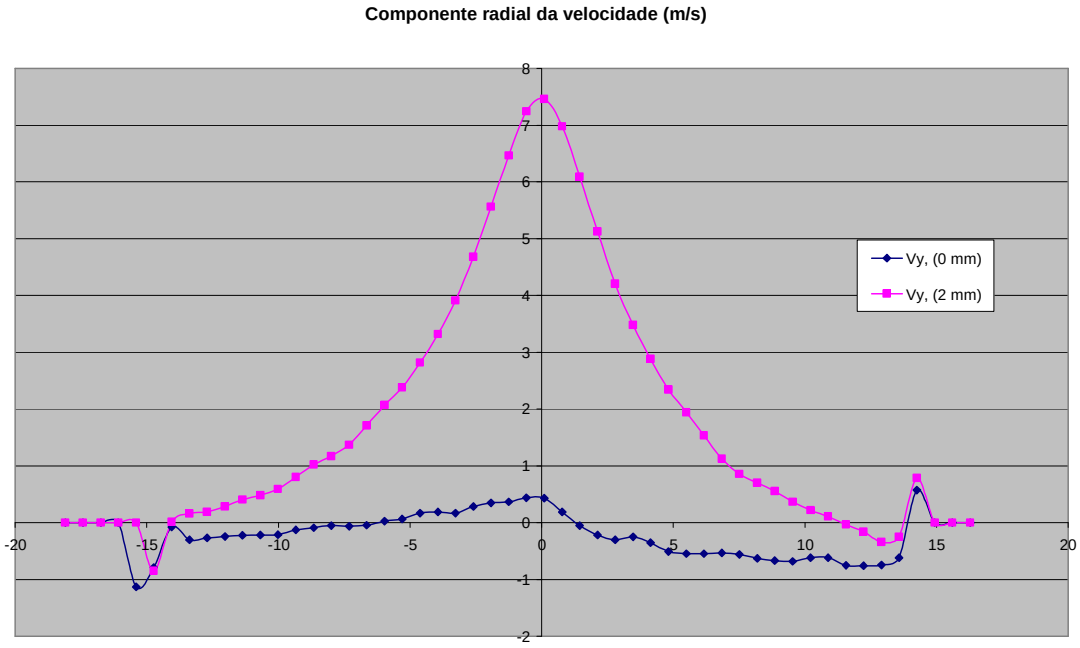
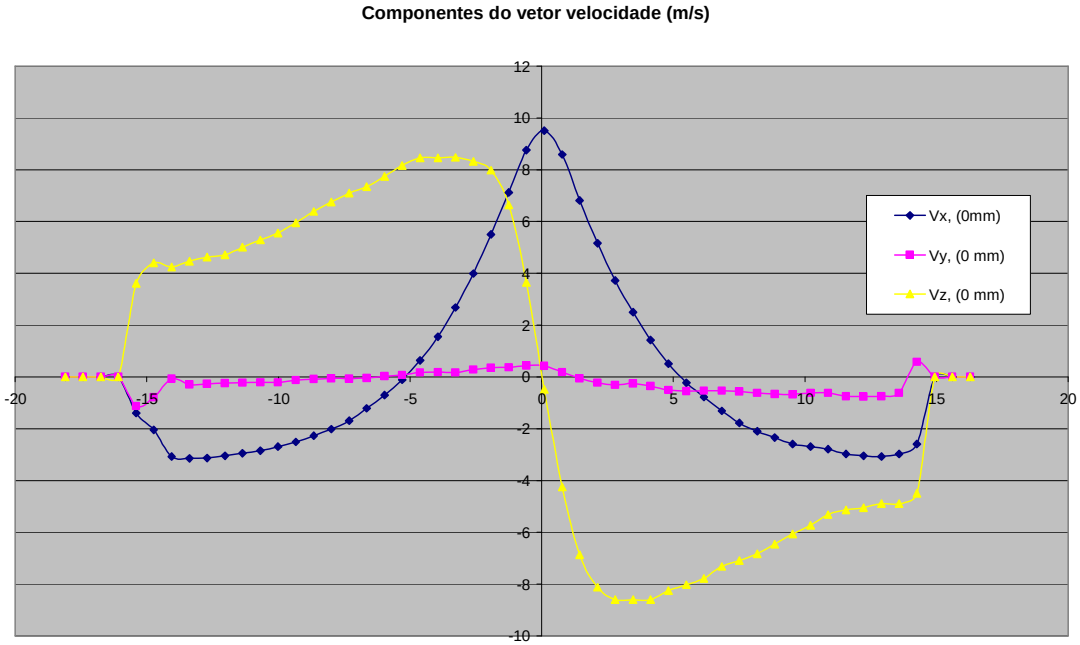


Figura 7.12 – Componente radial da velocidade

O gráfico da figura 7.13 mostra todos os componentes do vetor velocidade no plano que contém o eixo central.



Figuras 7.13 – Componentes do vetor velocidade

De fato, o componente radial foi pouco explorado no presente trabalho, uma vez que somente a técnica PIV foi capaz de medi-lo e, portanto não haveria como compará-lo com os resultados obtidos com a técnica LDV.

Em cada área medida (de 40 mm x 40 mm) seria possível fazer o levantamento dos perfis de velocidade em diversas seções transversais do hidrociclone, já que, para cada área de medida, foram obtidas informações ao longo de 40 mm na direção do eixo. Arbitrou-se então, um intervalo de 5 mm, ao longo do eixo, para levantamento dos perfis, em cada área de investigação, ou seja, cada área de investigação gerou perfis dos componentes azimutal e axial de velocidade em 8 seções transversais. Neste trabalho foram mostrados os dados nas mesmas seções nas quais se tinha medições com o LDV. A figura 7.14 mostra uma seção que contém a cota 320mm.

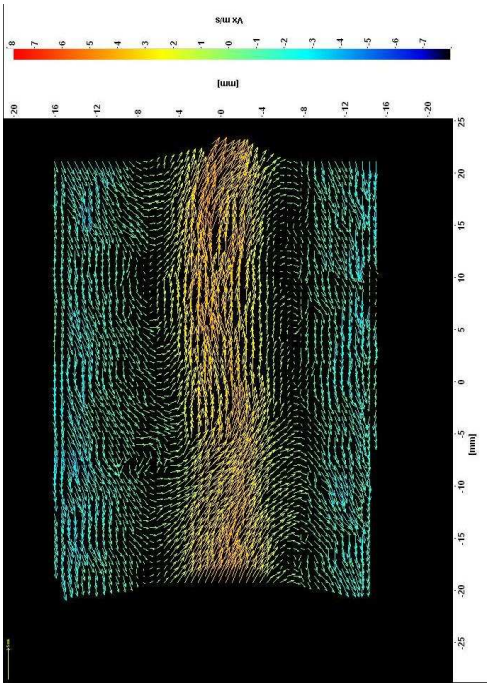


Figura 7.14 – Exemplo de seção amostrada pelo PIV

O balanço de massa foi calculado utilizando as várias seções mencionadas, em cada área de medida e o resultado é mostrado na tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Estatística de todas as vazões calculadas através dos perfis axiais obtidos com o PIV.

TABELA ESTATÍSTICA	
Média	4,28
Erro padrão	0,03
Mediana	4,31
Desvio padrão	0,19
Variância da amostra	0,04
Curtose	-0,89
Assimetria	-0,23
Intervalo	0,76
Mínimo	3,89
Máximo	4,65
Soma	239,62
Contagem	56,00
Nível de confiança(95,0%)	0,05

Para a média de 4,28 m^3/h teremos uma vazão média de 2,22 pelo orifício de rejeito, isso gera uma razão entre as vazões de rejeito sobre a vazão de alimentação de 34%.

7.5 Comparativo entre as técnicas PIV e LDV

A figura 7.15 mostra os gráficos dos perfis radiais, no plano horizontal que contém o eixo do hidrociclone, dos componentes axial e azimutal da velocidade, obtidos com o PIV e o LDV, em três seções no trecho L3 (de conicidade de 1°), nas cotas axiais 320mm, 440mm e 600mm (vide figura 7.2).

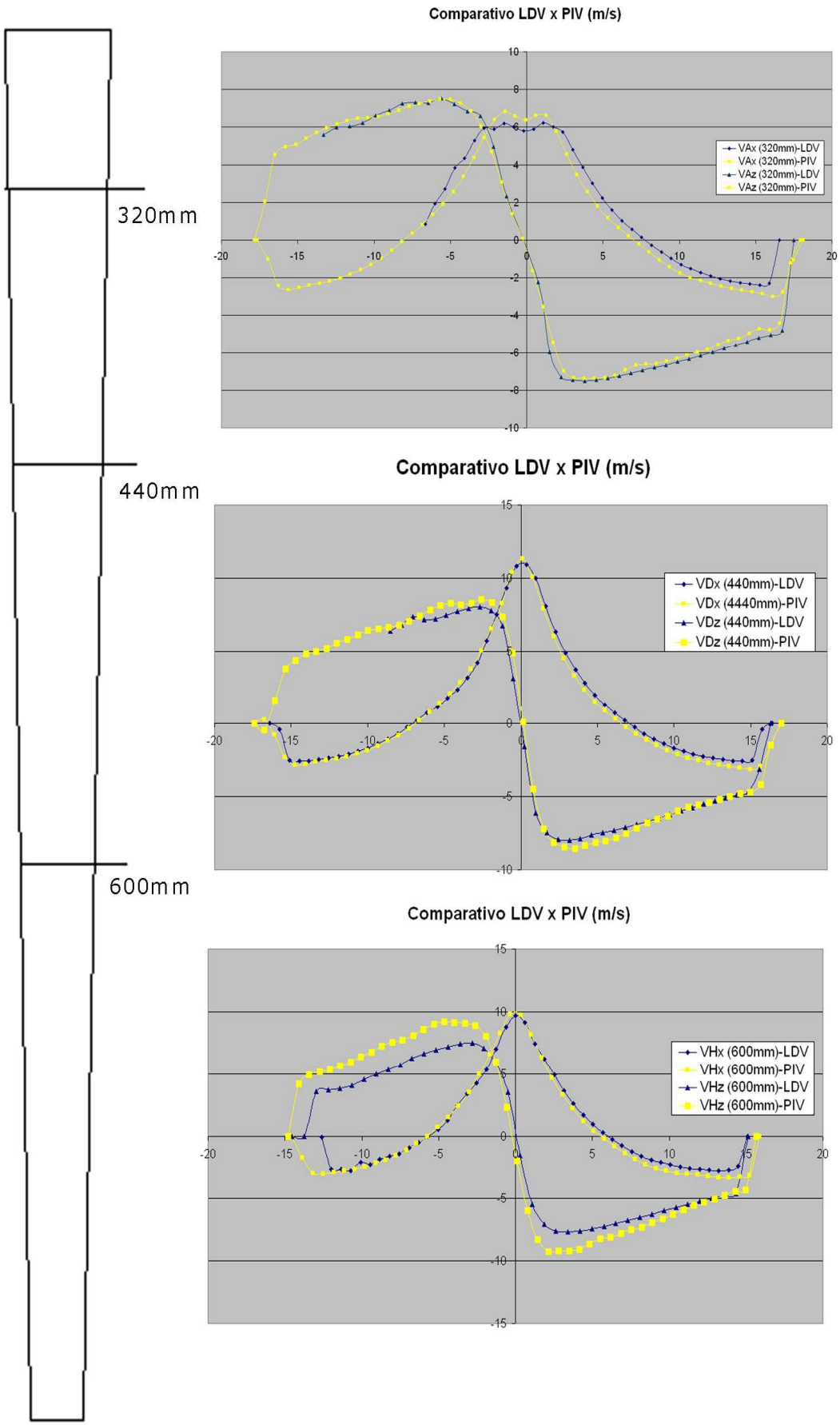


Figura 7.15 – Comparativo LDV x PIV

Inicialmente, comparando-se as vazões, calculadas com base nos perfis axiaisobtidos pelas técnicas LDV e PIV, obteve-se que os valores encontrados com base no LDV foram em média 16,5% menores que os encontrados com base nos perfis obtidos pelo PIV. Algumas razões podem ser enumeradas para explicar tal diferença:

(i) O cálculo da vazão foi feito através da integração do perfil da velocidade axial, contudo em muitas seções medidas com o LDV não foi possível obter todos os valores de velocidade ao longo do eixo do hidrociclone e, para esses casos, a integração foi feita utilizando meio perfil, o que acarretou a hipótese de axissimetria.

(ii) O medidor de vazão utilizado foi o rotâmetro modelo 400 do fabricante Conaut com um erro de +/- 2% do fundo de escala. Para o medidor em questão com fundo de escala em $10m^3/h$, o erro máximo pode ser de até $0,4m^3/h$. Então para uma vazão de trabalho de 6,5 m^3/h poderíamos ter na verdade valores variando de 6,1 a $6,9m^3/h$ gerando um erro de até 6,5%. Essa diferença tem efeito direto na determinação da velocidade desenvolvida no interior do hidrociclone.

(iii) A marcação da vazão no rotâmetro é feita com base no olho do experimentalista. Erros de paralaxe podem ocorrer, sendo ainda agravados pelo fato de que os experimentos foram feitos por técnicos diferentes.

(iv) Os ensaios ocorreram em dias diferentes.

Os componentes axiais da velocidade foram comparados, no ponto de máximo, e os resultados podem ser visto na tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Comparativo da velocidade axial máxima obtido com a técnica PIV e a técnica LDV

seção	**PIV**	**LDV**	**Diferença**
320 mm	6,21	6,6	5,91%
440 mm	10,93	11,33	3,53%
600 mm	9,66	9,76	1,02%

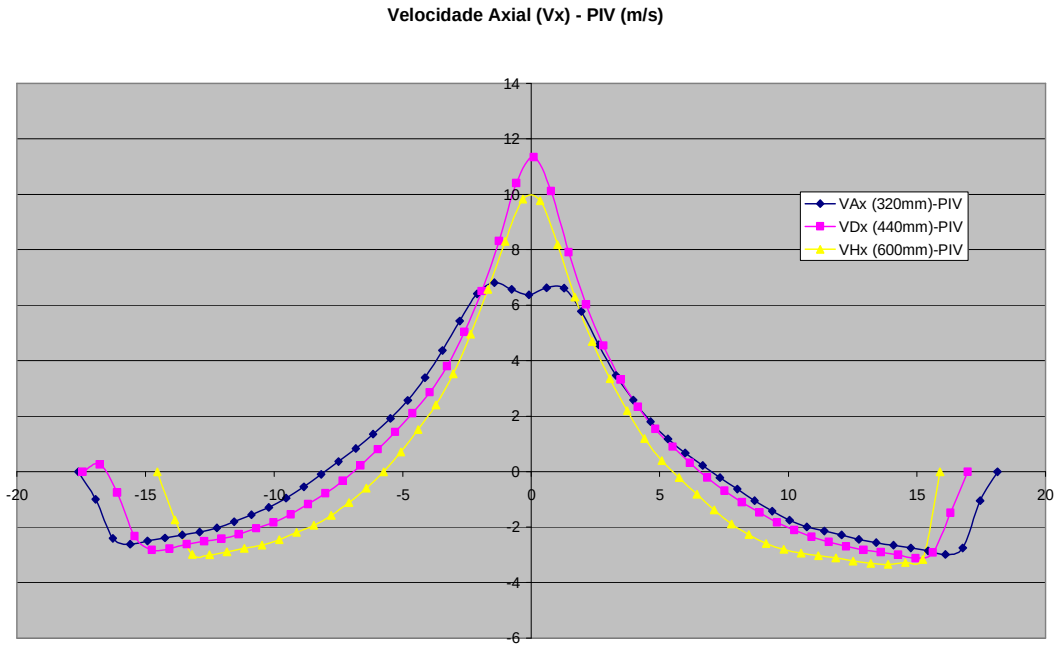
O componente azimutal da velocidade é um parâmetro importante para avaliação de performance de separação. Normalmente, quando várias geometrias são simuladas, a escolha do hidrociclone se dá por aquele que apresenta o maior componente azimutal de velocidade. É necessário também estabelecer um compromisso entre o gradiente da velocidade azimutal e o seu valor máximo. Um gradiente muito elevado pode levar a um cisalhamento das gotas da fase dispersa

dificultando o processo de separação ao invés de ajudá-lo. Os gráficos 7.3.1 (b) e 7.3.2 (b), medições feitas com a técnica LDV, mostram o desenvolvimento do componente azimutal da velocidade, nos trechos L2 e L3, respectivamente, indicando um comportamento de vórtice livre. No trecho L2, de maior conicidade (15°), o fluido é acelerado em até 3.000g e no trecho L3, com baixa conicidade, o valor médio é de 2.200g. A tabela 7.6 mostra uma comparação das velocidades azimutais máximas entre PIV e LDV.

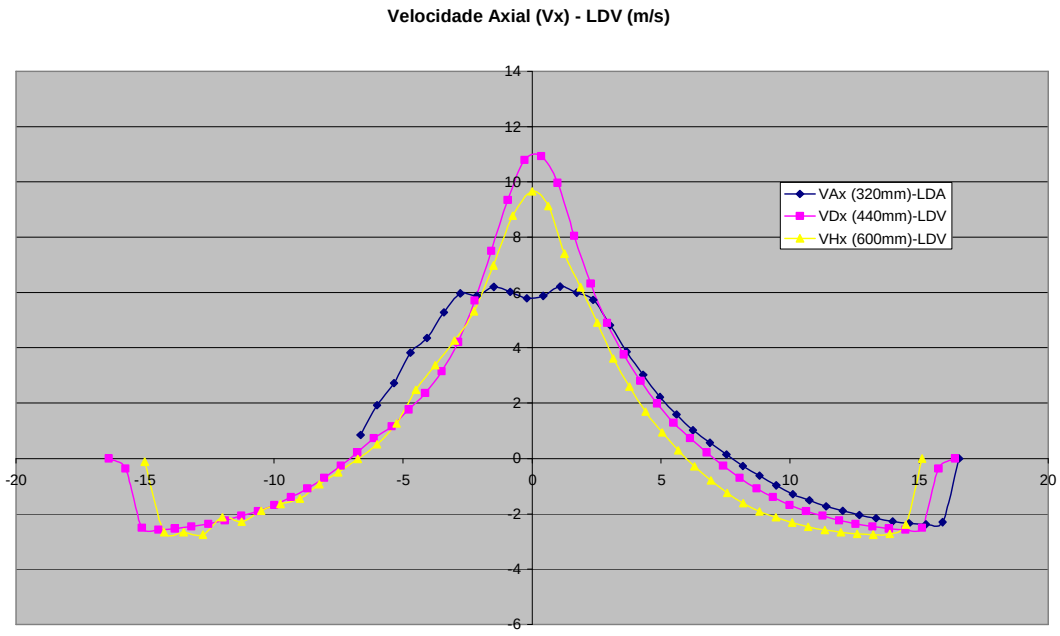
Tabela 7.6 – Comparativo da velocidade azimutal máxima obtido com a técnica PIV e a técnica LDV

seção	**PIV**	**LDV**	**Diferença**
320 mm	7,35	7,46	1,47%
440 mm	8,46	7,91	6,95%
600 mm	9,22	7,58	21,64%

As duas técnicas de medição mostraram um comportamento que não era esperado na medição da componente axial da velocidade. Era esperado que o valor máximo do componente axial sofresse aumento à medida que caminhássemos para o orifício de rejeito, já que a vazão de rejeito aumenta progressivamente nas seções transversais à medida que nos aproximamos do orifício de rejeito. Contudo, as duas técnicas de medição, perceberam um ganho e depois uma perda na velocidade, ao caminhar-se na direção do orifício de rejeito, (do perfil em amarelo para o em rosa e deste para o em azul, na figura 7.15). Na seção superior o perfil foi “achatado” no seu valor máximo, porém houve um “alargamento” na base, de forma a compensar a maior vazão de rejeito, que ocorre nessa seção. Essa redução no pico do componente azimutal da velocidade pode ser explicada, considerando a proximidade da transição dos trechos L3 para L2 (de conicidade 1° para o de conicidade 15º), o que provoca, pelo rápido aumento da área disponível para o escoamento, uma desaceleração do fluido que se dirige ao orifício de rejeito. Os gráficos da figura 7.16 (a) e (b) mostram as medições com PIV e com LDV respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7.16 – Medição do componente axial com PIV (a) e LDV (b)

Capítulo 8

Conclusões e Recomendações

O emprego das técnicas de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) e Velocimetria por Laser Doppler (LDV) mostraram ser excelentes ferramentas para a análise de escoamentos complexos. O grande diferencial dessas técnicas, em relação à anemometria de fio quente, está no fato de não serem intrusivas, ou seja, não perturbarem o escoamento.

Foram investigados parâmetros importantes do escoamento no interior do hidrociclone, tais como os componentes axial e azimutal da velocidade média. Para os valores máximos do componente axial da velocidade média a diferença encontrada, entre a medição utilizando a técnica PIV e a realizada com a técnica LDV, ficou em 3,5%. Na análise do valor máximo do componente azimutal da velocidade média a diferença registrada foi de 8%.

Através do levantamento do perfil do componente axial da velocidade média, em diversas seções do hidrociclone, foi possível calcular a vazão através de cada seção. Os valores obtidos com a técnica PIV registraram uma variação de 4,5% em torno do valor médio, entre as diversas seções transversais investigadas. Com a utilização da técnica LDV a dispersão dos resultados foi um pouco maior, registrando uma variação de 14,5% em torno do valor médio, entre as diversas seções transversais investigadas. A maior dispersão dos resultados apresentados com a técnica LDV foi, em grande parte, devido a problemas de refração luminosa. Em algumas seções transversais investigadas, os pontos entre o eixo central do hidrociclone e a parede, na região mais afastada da sonda do LDV, registraram taxas de amostragem muito baixas, sendo que em muitos casos não foi registrado nenhum sinal. Desse modo, para o cálculo da vazão só foi considerado meio perfil de velocidade, ou seja, foi investigada somente a região onde havia alta qualidade do sinal percebido pelo fotodetector. O valor da vazão média obtido com a técnica LDV foi 15% menor do que o obtido com a técnica PIV.

O escoamento no interior de um hidrociclone não é estacionário e tanto a técnica PIV como a LDV perceberam esse comportamento. Foi possível verificar, com a técnica PIV, as linhas de corrente do escoamento realizando um movimento

oscilatório (“*precessing of vortex core”*). Já com a técnica LDV, a investigação de um ponto próximo ao eixo do hidrociclone, registrou uma flutuação da componente azimutal de 230% em torno da média, efeito que mostra um forte indicativo da oscilação do escoamento. Aliás, a técnica LDV mostrou-se uma boa ferramenta para investigação de grandezas turbulentas no hidrociclone. Em alguns pontos, a taxa de aquisição chegou a 11 kHz.

A técnica PIV mostrou-se uma ferramenta de investigação com respostas rápidas e, portanto, adequada para investigar sistemas com variadas condições operacionais, como é o caso do hidrociclone, pois uma vez finalizado o arranjo experimental, a utilização dessa técnica permite que sejam rapidamente investigadas outras condições, tais como: variação da vazão de alimentação e ajuste das pressões, visando à avaliação da eficiência de separação. O tempo entre a aquisição de 200 imagens, por exemplo, e o tratamento das mesmas não ultrapassa 3 horas. Se compararmos com a simulação numérica do mesmo experimento, vemos que os tempos requeridos para a investigação são incomparavelmente maiores pois, como mencionado em 4.1.2, para uma única condição operacional, e para simular cerca de 1,5 s de tempo de escoamento, foram demandados 19 dias de processamento em 12 processadores de alto desempenho.

Alguns autores concluíram, através de experimentos, que o componente radial da velocidade aumentava à medida que o escoamento caminhava em direção ao centro do hidrociclone. Na verdade o que pode se espera, pela própria física do problema, é justamente o contrário: o valor do componente radial da velocidade deve diminuir à medida que o escoamento caminha em direção ao eixo do hidrociclone. Esse fato pôde ser comprovado nesse trabalho em seções onde as linhas de corrente estavam totalmente alinhadas com o orifício de rejeito. Talvez a observação do aumento da componente radial, mencionado por alguns autores, deva-se a dificuldade em se fazer um correto alinhamento com o plano que contém o eixo. De fato, a grande maioria dos experimentos menciona a dificuldade de se medir o componente radial. Ainda que o estudo do componente radial tenha sido pouco explorado no presente trabalho, a técnica PIV mostrou-se uma excelente ferramenta na investigação deste componente.

Diversos planos paralelos ao eixo do hidrociclone foram avaliados com a técnica PIV e um banco de dados com os valores das velocidades foi criado. No futuro pode-se fazer uso de um aplicativo adequado, para compor o perfil de velocidade ao longo do volume do hidrociclone.

Fator determinante para a realização de um bom conjunto de medidas, utilizando a técnica PIV, é o alinhamento. O protótipo, o laser e as câmeras necessitam de um arranjo sólido e sem vibrações.

O grande diferencial do PIV com relação à técnica LDV é que o primeiro é capaz de analisar toda uma área no mesmo intervalo de tempo (técnica do campo completo), contudo a baixa de taxa de aquisição de dados (5 Hz) é um limitante para esta técnica para o estudo de grandezas turbulentas. Já a técnica LDV é capaz de operar com taxas de aquisição de cerca de 20 kHz. Atualmente existem sistemas PIV comerciais de alta velocidade, com taxas de aquisição de até 10 kHz.

A geometria dos hidrociclones exige um cuidado óptico elevado para a medição com a técnica LDV. Este hidrociclone possui, em alguns trechos, uma espessura de parede de acrílico de cerca de 10mm. Esta espessura foi super-dimensionada pelo fato de que no início dos trabalhos desejava-se flexibilidade nos valores de vazão e pressão de trabalho. Talvez um arranjo mais adequado, para operar com a técnica LDV, seja a construção de um protótipo com paredes bem mais finas e colocá-lo dentro de uma caixa de acrílico cheia com o mesmo fluido que circulará no interior do hidrociclone.

É adequado ressaltar algumas recomendações com relação aos equipamentos utilizados. Os transdutores de pressão devem ser posicionados mais próximos da entrada e das saídas, para minimizar as perdas externas ao equipamento investigado. A utilização de técnicas tão apuradas para medição da velocidade do escoamento merece equipamentos mais sofisticados para a caracterização da vazão de entrada, um medidor de vazão do tipo Coriolis seria bem mais indicado que rotâmetro utilizado.

Deveria ter sido utilizado um medidor de vazão na linha de saída de água do hidrociclone, desse modo, seria possível comparar a vazão medida com a calculada pelos perfis axiais levantados com as técnicas PIV e LDV.

Capítulo 9

Referências Bibliográficas

Abrantes, J. K., Estudo do escoamento e transferência de calor em um jato espiralado incidente, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

Albrecht, H. E., Borys, M., Damasche, N. e Tropea, C.; "Laser-Doppler and Phase-Doppler Measurement Techniques", 738 pp., Springer-Verlag, 2003.

ASME; "Measurement Uncertainty, Instruments and Apparatus", ANSI/ASME PTC 19.1, 1985.

Barrientos, A., Sampaio, R. e Concha, F., Effects of air-core on the performance of hydrocyclone, in: XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia, 267-270, 1993.

Bennett, M. A., Williams, R. A., Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography, Miner. Eng., 17, 605-614, 2004.

Bergstrom, J. e Vomhoff, H., Application of a pitometer to measure the tangential velocity in a cylindrical through-flow hydrocyclone operated with fiber suspension, Nordic Pulp Paper Res. J., 20, 30-35, 2005

Bradley, D., The Hydrocyclone, Pergamon, Oxford, 1965.

Bruun, H. H.; "Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis", Oxford University Press, 1995.

Chu, L.-Y., Qin, J.-J., Chen, W.-M. e Lee, X.-Z., Energy consuption and its reduction in the hydrocyclone separation process. Part II: Time-averaged and fluctuating characteristics of the turbulent pressure in a hydrocyclone, Sep. Sci. Technol., 35, 2543-2560, 2000.

Chu, L.-Y. e Chen, W.-M., Research on the motion of solid particles in a hydrocyclone, Sep. Sci. Tech., 10, 1875-1886, 1993.

Chu, L.-Y., Chen, W.-M. e Lee, X.-Z., Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure, Chem. Eng. Sci., 57, 207-212, 2002.

Chu, L.-Y., Lee, X.-Z. e Chen, W.-M., Energy consumption in hydrocyclone separation and its reduction. Part I. Theoretical investigations of pressure distribution and energy consumption mechanism in hydrocyclones, Seventh World Filtration Congress, Hungarian Chemical Society, Budapest, 152-156, 1996.

Chiné, B. e Concha, F., Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones, Chem. Eng. J., 80, 267-273, 2000.

Collantes, J., Concha, F. e Chiné, B., Axial symmetric flow model for a flat bottom hydrocyclone, Chem. Eng. J., 80, 257-265, 2000.

Coudert, S., Schon, J. P., Back-projection algorithm with misalignment corrections for 2D3C stereoscopic PIV, Meas SCI Technol 12; 1371-1381, 2001

Cullivan, J. C., Williams, R. A., Dyakowski, T. e Cross, C. R., New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism form computational fluid dynamics, Miner. Eng., 17, 652-660, 2004.

Cullivan, J. C., Williams, R. A. e Cross, C. R., Verification of theoretical 3D-flow in a hydrocyclone using tomography, in: 4th world Congress for Particle Technology, Sidney, Australia, 1-9, 2004.

Dabir, B. e Petty, C. A., Measurement of mean velocity profiles in a hydrocyclone using laser Doppler anemometry, Chem. Eng. Commun., 48, 377-388, 1986.

Durst F., “Laser Doppler measurements in two-phase flows”, LDA-Symposium 1975 Accuracy of Flow Measurements by Laser Doppler Methods, Technical Unversity Denmark, pp. 14-16, Lyngby, Denmark, 1975.

Fisher, M. J. e Flack, R. D., Velocity distribution in a hydrocyclone separator, Exp. Fluids, 32, 302-312, 2002.

Fox, R.W., McDonald, A. T., Introdução à Mecânica dos Fluidos, LTC 2001

G. Degrez, M.L. Riethmuller, “Measurement Techniques in Fluid Dynamics”, Von Karman Institute For Fluid Dynamics, 1994.

Gupta, A. K., Lilley, D., Syred, N., Swirl Flows, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, 1984.

Hoekstra, A. J., Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators, PhD Thesis, Technishe Universiteit Delft, Delft, 2000.

Hou, R., Hunt. A. e Williams, R. A., Acoustic monitoring of hydrocyclones, Powder Technol., 124, 176-187, 2002.

Hwang, C. C., Shen, H. Q., Zhu, G. and Khonsari, M. M., On the main flow pattern in hydrocyclones, J. Fluids Eng., 115, 21-25, 1993.

Jonathan D. Kulick, John R. Fessler e John K. Eaton, “On the interaction between particles and turbulence ina fully developed channel flow”, Thermoscience Division, Department of Mechanical Engineering Stanford University, Stanford, Califórnia, 1993.

Kraipech, W., Nowakowski, A. F., Dyakowski, T. e Suksangpanomrung, A., An investigation of the particle-fluid and particle-particle interactions on the flow within a hydrocyclone, Chem. Eng. J., 111, 189-197, 2005.

Kelsall, D. F., A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone, Trans. Inst. Chem. Eng., 30, 87-108, 1952.

Kline, S. J.; “The Purpose of Uncertainty Analysis”; J. Fluids Eng., vol.107, 153-160, 1985

Knowles, S. R., Woods, D. R. e Feuerstein, I. A., The velocity distribution within a hydrocyclone operating without an air-core, Can. J. Chem. Eng., 51, 263-271, 1973.

LaVision System, Manuals & Softwares, Gmbh, Göttingen, 2004

Lilge, E. O., Hydrocyclone fundamentals, Trans. Ins. Min. Metal., 71, 285-337, 1962.

Luo , Q., Deng, C., Xu, J., Yu, L. e Xiong, G., Comparison of the performance of water-sealed and commercial hydrocyclones, Int. J. Miner. Process, 25, 297-310, 1989.

M.J. Rudd, "A new theoretical Model for the Laser Dopplemeter", Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E) 2, pp 55-58 (1969).

Moffat, R. J.; "Using Uncertainty Analysis in The Planning of an Experiment", ASME J. Fluids Eng., vol. 107, 173-182, 1985.

Moraes, C.A.C, Uma Investigação do Escoamento em um Hidrociclone Operando sem Núcleo Gasoso, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Engenharia Mecânica, 2003.

Morendon, T. C., Hsieh, K. T., Rajamani, R. K., Fluid flow of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions, Int. J. Miner. Process, 35, 68-83, 1992.

Neesse, T., Schneider, M., Dueck, J., Golyk, V., Buntenbach, M. e Tiefel, H., Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge, Miner. Eng., 17, 733-737, 2004.

Neesse, T., Schneider, M., Golyk, V. e Tiefel, H., Measuring the operating state of the hydrocyclone, Miner. Eng., 17, 697-703, 2004.

Nowakowski, A. F., Cullivan, J. C., Williams, R. A. e Dyakowski, T., Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones: Is this a realizable option or a research challenge? Miner. Eng., 17, 661-669, 2004.

Nunes, G. C., Boletim. Técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, 48: 18 – 24, jan./jun. 2005

Ohtake, T., Usuda, M., Kadoya, T., A fundamental study of hydrocyclones, Part 1: Flow pattern in the hydrocyclone, Jpn. Tappi, 41, 60, 1987.

Podd, F., Schlaberg, I. e Hoyle, B., Model-based parametrization of a hydro-cyclone air-core, Ultrasonics, 38, 804-808, 2000.

Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., Particle Image Velocimetry: A Pratical Guide, Springer, 1998

Renner, V. G. e Cohen, H. E., Measurement and interpretation of size distribution of particles in a hydrocyclone, Trans. Inst. Min. Metal., c139-c145, 1978.

Rietema, K., Performance and design of hydrocyclones- 1,2,3,4, Chem. Eng. Sci., 15, 298-303, 310-320, 1961.

Schlaberg, I., Podd, F. e Hoyle, B., Ultrasound process tomography for hydrocyclones, Ultrasonics, 28, 813-816, 2000.

Solero, G. e Coghe, A., Experimental fluid dynamics characterization of a cyclone chamber, Exp. Therm. Fluid Sci., 27, 87-96, 2001.

Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z. C., Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. Meas Sci Technol, 1997

Svarovsky, H., Hydrocyclones, Holt, Rinehart and Winston, 1984.

TSI, Particle Image Velocimetry Software, version 3.3, MN – USA, 2000

Yamamoto, K. e Jiao, X., Hydrocyclone with a perforated inner cylinder, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu B, 63, 3623-3628, 1997.

Yoshioka, N., Hotta, Y., Liquid cyclones as a hydraulic classifier, Chem. Eng. Jpn., 19, 633-641, 1955.

Wieneke, B., Stereo PIV using self-calibration on particle images, Experiments in Fluids 39; 267-280, 2005

Willert, C., Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows. Meas SCI Technol 8; 1465-1479, 1997

Williams, R. A., Ilyas, O. M., Dyakowski, T., Dickin, F. J., Gutierrez, J. A., Wang, M., Beck, M. S., Shah, C. e Rushton, A., Air-core imaging in cyclonic separators – implications for separator design and modeling, J. Biochem. Eng., 56, 135-141, 1995.

Wills, B. A., An Introduction to the Practical Aspects of the Ore Treatment and Mineral Recovery, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.