

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO ELETRO-
ELETRÔNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS ATRAVÉS DE
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

por

Roger Pizzato Nunes

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, outubro de 2005

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO ELETRO-
ELETRÔNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS ATRAVÉS DE
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

por

Roger Pizzato Nunes
Engenheiro Eletricista

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Flávio Tadeu van der Laan

Aprovada por:

Prof. Dr. Adalberto Schuck Júnior

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, outubro de 2005

DEDICATÓRIA

A todos que, mesmo mediante as imensas dificuldades existentes neste país, desenvolvem pesquisa visando transformar ciência em tecnologia.

RESUMO

Historicamente, devido à incompreensibilidade dos fenômenos físicos envolvidos, diversas técnicas de análise experimental de escoamentos foram desenvolvidas. Inicialmente, estas técnicas consistiam em uma simples visualização do escoamento em questão. Visava-se com isto produzir a intuição física a respeito do sistema físico para que futuras teorias pudessem ser formuladas. No entanto, nos anos posteriores, tornou-se necessária a criação de técnicas quantitativas. Neste segmento, a evolução tecnológica da eletrônica propiciou que técnicas intrusivas e não intrusivas fossem criadas. Tal processo culminou com o surgimento da microeletrônica, quando sensores eletrônicos de imagem puderam ser fabricados. Assim, técnicas não intrusivas de velocimetria através de processamento digital de imagens tornaram-se referência, possibilitando a medição de campos de velocidade do escoamento em análise. Tais técnicas são atualmente utilizadas não apenas no meio acadêmico, na investigação da turbulência, como na indústria, em projetos de engenharia que envolvam alta tecnologia.

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para a concepção de um sistema de velocimetria de 2 dimensões por processamento digital de imagens. Para tanto, o sistema de velocimetria foi dividido em duas partes, sendo os equipamentos bem como os conceitos físicos envolvidos em cada uma analisados e descritos. Por fim, projetou-se e implementou-se um sistema de velocimetria de 2 dimensões através de processamento digital de imagens, modo PIV. A sua validação foi efetuada sobre um escoamento altamente turbulento interno a um duto circular, cuja solução é conhecida e exaustivamente estudada no decorrer dos anos. O resultado obtido se apresentou totalmente satisfatório e demonstrou a grande importância atual de tal técnica de medição.

ABSTRACT

“PROJECT AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRO-ELECTRONIC INSTRUMENTATION SYSTEM FOR FLOW CHARACTERIZATION THROUGH DIGITAL IMAGE PROCESSING”

Historically, due to the hard difficulties involved to understand the physical phenomena, many experimental techniques for flow analysis had been developed. Initially, this means just simple flow visualization. With that, the development of the physical intuition regarding the system was aimed to make possible that future theories could be formulated. However, in the subsequent years, quantitative techniques became necessary. In this segment, the technological electronics evolution propitiated that intrusive and non intrusive techniques were created. Such process culminated with the fast introduction of microelectronics, when electronic image sensors had been manufactured. Thus, not intrusive velocimetry techniques through digital image processing had started to be reference, making possible that a whole field velocity measurement was taken from the flow in analysis. Such techniques currently are used not only for academic propose, on turbulence studies, but in the industry engineering projects that involve high technology.

In this work, a digital image processing velocimetry design methodology is presented. In such way, the velocimetry system was divided in two parts, in each one the equipments as well its physical concepts were analyzed and described. Finally, a digital image processing two dimensional velocimetry system, mode PIV, was projected and implemented. It was validated in a highly turbulent circular duct flow, whose solution is well-known and already exhaustingly studied in elapsing years. The final result was satisfactory and demonstrated the great current importance of such measurement technique.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Medição qualitativa e quantitativa	1
1.2. Medição intrusiva e não intrusiva	1
1.3. Velocimetria por Processamento de Imagem.....	2
1.4. Concentração de partículas no escoamento.....	3
1.5. Aplicação de sistemas de velocimetria por processamento de imagens	5
1.6. Objetivo deste trabalho.....	5
1.7. Motivação deste trabalho	5
1.8. Organização deste trabalho	6
2. Sistema de velocimetria por processamento de imagens	7
3. Sub-sistema de formação da imagem.....	14
3.1. Câmera com sensor eletrônico de imagem.....	14
3.1.1. Objetiva	14
3.1.2. Modelo geométrico para captação da imagem.....	16
3.1.3. CCD.....	19
3.1.3.1. A resolução e a taxa de quadros	21
3.1.3.2. O sistema de Reset	22
3.1.3.3. O Fator de preenchimento	23
3.1.3.4. A Arquitetura de Transferência.....	23
3.1.3.4.1. <i>Full frame transfer</i>	23
3.1.3.4.2. <i>Frame transfer</i>	23
3.1.3.4.3. <i>Interline transfer</i>	24
3.1.3.4.3.1. <i>Interlaced-scan interline transfer</i>	25
3.1.3.4.3.2. <i>Progressive scan interline transfer</i>	25
3.1.3.5. Comparação CCD x CMOS	26
3.1.4. Transmissão da imagem.....	26
3.2. Fontes de Luz	27
3.2.1. LASER de Hélio-Neônio (He-Ne, $\lambda=633\text{nm}$, contínuo).....	30
3.2.2. LASER de íons de Argônio (Ar^+ , $\lambda=514\text{nm}$, contínuo).....	30
3.2.3. LASER de Neodímio-YAG (Nd:YAG, $\lambda=532\text{nm}$, pulsado)	31
3.2.4. LASER de semicondutores (Junções de Gálio e Arsênio, $\lambda=840\text{nm}$, contínuo).....	32
3.3. Plano de luz	32
3.4. Partículas traçadoras.....	32

3.4.1. Geração e inserção das partículas no escoamento.....	33
3.4.2. Comportamento frente ao espalhamento da luz.....	34
3.4.3. A imagem de uma partícula.....	34
3.5. Dispositivo sincronizador.....	35
4. Sub-sistema de processamento da imagem.....	36
4.1. Técnicas <i>intraframe</i>	37
4.1.1. Mediante LASER pulsado.....	38
4.1.2. Mediante LASER contínuo.....	38
4.2. Técnicas <i>interframe</i>	41
5. Implementação do Sistema de Velocimetria 2D por processamento digital de imagens.....	44
5.1. Implementação do Sub-sistema de Formação da Imagem.....	44
5.1.1. Câmera com sensor eletrônico de imagem utilizada.....	44
5.1.2. Fonte de luz utilizada.....	47
5.1.3. Plano de luz utilizado.....	48
5.1.4. Partículas traçadoras utilizadas.....	49
5.2. Implementação do Sub-sistema de Processamento da Imagem.....	50
5.2.1. Técnica <i>interframe</i> através de métodos estatísticos.....	51
5.2.1.1. Algoritmos de pré-processamento desenvolvidos.....	52
5.2.1.2. Algoritmos de processamento desenvolvidos.....	54
5.2.1.2.1. Correlação cruzada entre $I_{j-1}(l,c)$ e $I_j(l,c)$	55
5.2.1.2.2. Detecção do pico da correlação cruzada.....	57
5.2.1.2.3. Cálculo do campo de velocidade.....	59
5.2.1.3. Algoritmos de pós-processamento desenvolvidos.....	59
6. Aplicação a um escoamento interno ao duto circular.....	64
6.1. Análise teórica do meio físico.....	64
6.2. Aparato experimental para o meio físico.....	65
6.3. Emprego do SVPI desenvolvido e o procedimento experimental.....	67
7. Incertezas envolvidas na medição.....	75
7.1. Incertezas não-quantificáveis.....	75
7.1.1. Não-paralelismo entre o plano de LASER e o sensor CCD.....	75
7.1.2. Resposta em frequência da partícula.....	76
7.1.3. Velocidade de grupo das partículas.....	76
7.1.4. Distorção ótica por refração.....	76
7.2. Incertezas quantificáveis.....	77

7.2.1. Taxa de quadros T_q	77
7.2.2. Fator de escala FE	78
7.2.3. Quantização do deslocamento	78
7.3. Cálculo da incerteza combinada.....	79
8. Validação dos resultados	80
9. Conclusões	85
10. Trabalhos futuros.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
APÊNDICE I.....	94
APÊNDICE II	95
APÊNDICE III	96
APÊNDICE IV	98
APÊNDICE VI.....	102
APÊNDICE VII.....	103
APÊNDICE VIII	105

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda do fóton	[m]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[Ns/m ²]
ν_f	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
ρ_f	Densidade do fluido	[kg/m ³]
ρ_p	Densidade da partícula	[kg/m ³]
ν	Frequência do fóton	[1/s]
Δt	Intervalo temporal ou tempo relativo de análise do sistema	[s]
$\Delta \vec{r}$	Variação espacial do vetor posição	[m]
$\Delta \vec{r}_{ip}$	Deslocamento do grupo de partículas na imagem	[pixel]
Δz_p	Espessura do plano de LASER	[m]
δz	Profundidade de campo da lente	[m]
$\delta(x)$	Camada limite	[m]
$\sigma_{\Delta t}$	Incerteza sobre a base de tempo Δt	[s]
σ_{d_f}	Incerteza sobre d_f	[m]
$\sigma_{d_{pix}}$	Incerteza sobre d_{pix}	[pixel]
σ_{FE}	Incerteza sobre FE	[pixel/m]
σ_q	Incerteza de quantização	[pixel]
σ_{T_q}	Incerteza sobre T_q	[1/s]
σ_u	Incerteza combinada sobre a componente u de \vec{v}_{ot}	[m/s]
$\sigma_{\vec{v}}$	Incerteza combinada sobre a velocidade \vec{v}_{ot}	[m/s]
α, β	Coordenadas do plano de correlação	[m]
τ	Ordem de grandeza de tempo das grandes escalas da turbulência	[s]
τ_s	Tempo de relaxação da partícula	[s]
AINTE	Variável que determina o tamanho da área de interesse	[pixel]
c	Coordenada que indexa uma coluna de pixel	[pixel]
C	Número médio de partículas por volume	[1/m ³]
c'	Variável temporária para a operação de convolução	[pixel]
c_f	Coefficiente de sustentação	[]
c_e	Coordenada c dos vetores espúrios	[pixel]
d	Distância da lente ao plano de imagem	[m]
D	Diâmetro do duto circular	[m]

d_c	Diâmetro do cilindro de análise no meio físico	[m]
d_{dif}	Diâmetro da partícula devido a difração	[m]
d_f	Dimensão de referência do meio físico	[m]
d_i	Diâmetro do cilindro de análise na imagem	[m]
d_{pi}	Diâmetro da partícula na imagem	[m]
d_p	Diâmetro máximo da partícula e/ou esfera em análise	[m]
d_{pix}	Distância em pixels referente a d_f	[pixel]
d_{ob}	Diâmetro da objetiva	[m]
e	Elétron	[]
\vec{E}	Força de empuxo	[N]
e^-	Carga do Elétron	[C]
E_n	Níveis de energia em um átomo	[J]
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Vetores unitários na direção x, y e z respectivamente	[]
f	Distância focal da lente	[m]
f_s	Frequência máxima de resposta da partícula	[Hz]
$f_{\#}$	Número f da lente	[]
FE	Fator de escala	[pixel/m]
\vec{F}_a	Força de arrasto	[N]
\vec{F}_s	Força de sustentação	[N]
\vec{F}_{stokes}	Força de Stokes	[N]
\vec{g}	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
GRAD	Espaçamento entre áreas de interesse	[pixel]
h	Constante de Planck	[J · s]
I_j	Função imagem	[]
I_l	Intensidade do feixe de LASER	[J]
j	Indexador temporal	[]
k	Constante de proporcionalidade da transformação p-p	[]
k_p	Número de partículas em um volume V de análise	[1/m ³]
l	Coordena que indexa uma linha de pixel	[pixel]
L	Comprimento de uma cavidade ressonante LASER	[m]
l'	Variável temporária para a operação de convolução	[pixel]
L_c	Comprimento característico do escoamento	[m]
l_{CCD}	Largura do elemento CCD	[m]

l_e	Coordenada l dos vetores espúrios	[pixel]
M	Magnificação	[]
m_l	Número inteiro da cavidade ressonante	[]
n_c	Número de colunas de um quadro Q_j	[pixel]
n_l	Número de linhas de um quadro Q_j	[pixel]
n_r	Índice de refração do material LASER	[]
N_s	Densidade de partículas em uma região cilíndrica no meio físico	[]
N_i	Densidade de partículas em uma região cilíndrica na imagem	[]
N_q	Número de quadros capturados	[]
\vec{P}	Força gravitacional ou peso	[N]
P_0, P_1, P_2	Coordenadas arbitrárias de uma trajetória	[m]
P_c	Ponto do centro de projeção	[]
P_i	Ponto na imagem	[]
picom	Coordenada m do pico de correlação-cruzada	[pixel]
picon	Coordenada n do pico de correlação-cruzada	[pixel]
picosm	Coordenada m subpixel do pico de correlação-cruzada	[pixel]
picosn	Coordenada n subpixel do pico de correlação-cruzada	[pixel]
P_o	Ponto do objeto	[]
q	Variável pertinente a DFT	[]
Q_j	Quadro	[]
Q_v	Vazão interna ao duto circular	[m ³ /s]
Q_{vt}	Vazão média temporal interna ao duto circular	[m ³ /s]
R	Raio do duto circular	[m]
\vec{r}	Vetor posição	[m]
\vec{r}_o	Vetor posição do objeto	[m]
\vec{r}_i	Vetor posição da imagem do objeto	[m]
\vec{r}_c	Vetor posição do centro de projeção	[m]
RAQ	Relação de aspecto de quadro	[]
Re	Número de Reynolds	[]
Re_D	Número de Reynolds relativo ao diâmetro do duto	[]
R_{I_{j-1}, I_j}	Função de correlação cruzada entre I_{j-1} e I_j	[]
$\vec{R}_p(l, c)$	Resposta do filtro passa-altas	[]
s	Variável pertinente a DFT	[]

$S_I(t)$	Sinal de imagem	[V]
S_c	Sinal de controle do SPI sobre o SFI	[V]
t	Tempo absoluto qualquer de análise do sistema	[s]
T	Tempo de captura de quadros	[s]
t_0, t_1, t_2	Tempos arbitrários de uma trajetória	[s]
T_q	Taxa de quadros	[1/s]
u, v, w	Componentes do vetor velocidade em $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ respectivamente	[m/s]
U	Velocidade máxima do perfil em \vec{e}_x	[m/s]
U_c	Velocidade característica do escoamento	[m/s]
u_f	Velocidade não perturbada do fluido em \vec{e}_x	[m/s]
u_g	Velocidade média geométrica em \vec{e}_x	[m/s]
u_p	Velocidade da partícula em \vec{e}_x	[m/s]
u_t	Velocidade média temporal em \vec{e}_x	[m/s]
U_∞	Perfil de velocidade não-perturbado em \vec{e}_x	[m/s]
\vec{v}	Velocidade instantânea	[m/s]
V	Volume de análise do escoamento	[m ³]
\vec{v}_t	Velocidade média temporal	[m/s]
\vec{v}_{it}	Velocidade média temporal da imagem do objeto	[m/s]
\vec{v}_{ot}	Velocidade média temporal do objeto	[m/s]
V_p	Volume da partícula	[m ³]
\vec{V}_t	Velocidade terminal da partícula	[m/s]
x, y, z	Componentes do vetor posição em $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ respectivamente	[m]
x_i, y_i, z_i	Componentes do vetor posição da imagem do objeto	[m]
x_0, y_0, z_0	Componentes do vetor posição do objeto	[m]
X_T	Comprimento de entrada hidrodinâmico	[m]
w_0	Largura do feixe de LASER	[m]
w	Máscara que implementa o filtro passa-altas	[]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cilindro de análise na região iluminada do escoamento.....	4
Figura 1.2 – Os 3 modos de densidade: a) Baixa (PTV), b) Média (PIV), e c) Alta (LSV).....	5
Figura 2.1 – Diagrama explicativo do sistema de velocimetria.....	7
Figura 2.2 – Trajetória arbitrária de uma partícula qualquer.....	8
Figura 2.3 – Obtenção da velocidade média da partícula sobre qualquer intervalo de tempo.....	9
Figura 2.4 – Forças atuantes sobre o movimento de uma partícula no escoamento.....	11
Figura 2.5 – Trajetória considerando um grupo de partículas.....	12
Figura 3.1 – Componentes pertencentes ao sub-sistema genérico de formação da imagem.....	14
Figura 3.2 – Principais parâmetros de uma lente.....	15
Figura 3.3 – Reconstrução geométrica da imagem.....	16
Figura 3.4 – Modelo geométrico para transformação de pontos do objeto em de imagem.....	17
Figura 3.5 – Modelo simplificado de um dispositivo CCD.....	19
Figura 3.6 – Matriz que compõe a arquitetura de um sensor CCD de imagem com $RAQ=4/3$	20
Figura 3.7 – Imagem real e seus sinais após quantização espacial e temporal.....	22
Figura 3.8 – Arquitetura <i>Full frame transfer</i>	24
Figura 3.9 – Arquitetura <i>Frame transfer</i>	24
Figura 3.10 – Arquitetura <i>Interlaced Interline transfer</i>	25
Figura 3.11 – Arquitetura <i>Progressive scan interline transfer</i>	26
Figura 3.12 – Imagem e seu respectivo sinal RS-170 transmitido.....	28
Figura 3.13 – Topologia de uma fonte de LASER.....	28
Figura 3.14 – Processo de emissão estimulada.....	29
Figura 3.15 – Modos transversos em uma cavidade confocal: (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01}	30
Figura 3.16 – Padrões dos modos transversos: (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01} , (c) TEM_{11} , (d) uma superposição 2 ou mais modos transversos.....	31
Figura 3.17 – (a) Volume de LASER, (b) plano de LASER.....	32
Figura 3.18 – Plano de luz formado através de um arranjo de lentes.....	33
Figura 3.19 – LASER espalhado por partículas de poliestireno de diâmetro d_p igual a: a) $1\mu m$, b) $10\mu m$ e c) $30\mu m$	34
Figura 4.1 – Diagrama dos itens que compõe o SPI.....	36
Figura 4.2 – Técnicas de captura da imagem: (a) <i>Intraframe</i> , (b) <i>Interframe</i>	37
Figura 4.3 – Sincronização do LASER pulsado em relação ao tempo de obturação para os 4 tipos de arquiteturas de sensores CCD na técnica <i>intraframe</i>	39
Figura 4.4 – Variação do tempo de obturação na técnica <i>intraframe</i> com LASER contínuo.....	40

Figura 4.5 – <i>Intraframe</i> LASER contínuo: (a) Rastro, (b) Campos entrelaçados.....	40
Figura 4.6 – Captura <i>interframe</i> das imagens mediante LASER contínuo.....	41
Figura 4.7 – Captura <i>interframe</i> das imagens: (a) Convencional, (b) <i>Frame straddling</i>	42
Figura 4.8 – Princípio de semelhança de um padrão em quadros na técnica <i>interframe</i>	42
Figura 4.9 – Plano de correlação entre $I_{j-1}(x,y)$ e $I_j(x,y)$	43
Figura 5.1 – A câmera Redlake MotionMeter 500.....	45
Figura 5.2 – Armazenamento dos Q_j em buffers na Redlake MotionMeter 500.....	46
Figura 5.3 – Vista panorâmica do sistema de fixação.....	47
Figura 5.4 – Ampliação no sistema de fixação utilizado para a câmera.....	48
Figura 5.5 – Fonte de LASER utilizada.....	49
Figura 5.6 – Dispositivos utilizados para acoplamento da lente cilíndrica ao LASER.....	50
Figura 5.7 – Topologia do programa desenvolvido com suas entradas e saídas.....	52
Figura 5.8 – Algoritmos presentes na etapa de pré-processamento.....	52
Figura 5.9 – Variação da luminância na escala de cinza de 8bits.....	52
Figura 5.10 – Representação: (a) Imagem, (b) Gráfico de superfície de sua matriz correspondente.....	53
Figura 5.11 – O quadro: (a) Com cabeçalho, (b) Sem cabeçalho, (c) Inversão na tonalidade.....	53
Figura 5.12 – Término do pré-processamento: (a) Quadro original, (b) Quadro recortado.....	54
Figura 5.13 – Algoritmos envolvidos na etapa de processamento.....	54
Figura 5.14 – Segmentação do quadro: (a) Malha dada por AINT, (b) Malha dada por GRAD..	55
Figura 5.15 – Implementação da correlação cruzada envolvendo FFTs.....	56
Figura 5.16 – (a) Área de interesse e busca e o plano de correlação, (b) Gráfico de superfície do plano de correlação.....	57
Figura 5.17 – (a) Campo de velocidade após processamento, (b) Campo de velocidade filtrado.	62
Figura 5.18 – Esquema de interpolação de vetores utilizado para a coordenada (l,c).....	62
Figura 5.19 – (a) Campo de velocidade filtrado, (b) Campo de velocidade interpolado.....	63
Figura 6.1 – Análise teórica do escoamento turbulento interno ao duto circular.....	65
Figura 6.2 – Motobomba Centrífuga Schneider BC-92SJC instalada.....	66
Figura 6.3 – Inversor de frequência Danfoss VLT 5000 utilizado.....	67
Figura 6.4 – Posicionamento dos itens pertencentes ao sistema.....	68
Figura 6.5 – Composição do quadro capturado do escoamento.....	69
Figura 6.6 – Esquemático da seção de teste.....	69
Figura 6.7 – A seção de teste, o seu isolamento e o SVPI em operação.....	70
Figura 6.8 – Seção de teste em detalhe.....	71

Figura 6.9 – Quatro segmentos da tubulação utilizada.	72
Figura 8.1 – Quadros utilizados na medição do campo de velocidade.	80
Figura 8.2 – Campo de velocidade resultante da aplicação do programa desenvolvido.....	81
Figura 8.3 – Campo de velocidade médio resultante da aplicação do programa desenvolvido....	82
Figura 8.4 – Comparação resultado analítico e experimental para a coordenada $c=240$ pixels. ..	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Diferentes características de partículas utilizadas em escoamento de líquidos.....	33
Tabela 5.1 – Eficiência computacional nos métodos de implementação da correlação.	57
Tabela 6.1 – Medições de vazão na tubulação.	74
Tabela 8.1 – Resultados do perfil de velocidade na coordenada $c=240$ pixels.	84

1. INTRODUÇÃO

Em física toda a teoria desenvolvida deve ser validada mediante resultados experimentais. O quão mais próximo os seus resultados estiverem da medida, mais fiel e robusta é a teoria na descrição e previsão do fenômeno que ocorre na natureza.

Desde os primórdios estudos em mecânica dos fluidos, técnicas de **visualização** de escoamentos têm sido largamente utilizadas visando o entendimento de certos aspectos do seu comportamento. Pode-se citar, dentre muitos, o experimento de Reynolds e o túnel de Prandtl, ambos com objetivos diferentes, mas que propiciaram o desenvolvimento da intuição física sobre o problema [Shames, 1992]. Em 1883, Osborne Reynolds construiu um sistema que, mediante a análise da estrutura de um filete de tinta durante o escoamento, se poderia evidenciar a transição de um regime laminar para um regime turbulento. Por outro lado, em 1904, Ludwig Prandtl construiu um túnel onde podiam ser averiguadas as estruturas geradas no escoamento devido à presença de um corpo com geometria qualquer.

1.1. Medição qualitativa e quantitativa

As técnicas acima propiciaram um entendimento visual do fenômeno. Portanto serviram apenas para uma compreensão **qualitativa** de seu comportamento. No entanto, no decorrer dos anos subseqüentes, os experimentos tiveram de ser refinados para que uma descrição **quantitativa** das variáveis físicas envolvidas fosse possível.

Surgiu então uma série de técnicas visando mensurar a magnitude do vetor velocidade do escoamento. Em geral, estas consistem em inserir uma estrutura que altere o escoamento de tal forma que haja o surgimento de uma variação de pressão (tubos de Pitot, tubos de Venturi e placas de orifício), do desprendimento de vórtices (medidores tipo esteira de vórtices de Karman), de uma força de arrasto (medidores de arrasto), de troca de calor (anemometria a fio quente) e de rotações (medidores tipo turbina), dentre outros [Doebelin, 1990]. Mediante a medição destas grandezas e equações matemáticas que modelam as distorções provocadas no escoamento pode-se então obter a velocidade.

1.2. Medição intrusiva e não intrusiva

No entanto, as técnicas de medição anteriores interferem no escoamento. Assim, o experimento não condiz mais com o original e sim em um novo, perturbado. Tais técnicas são então **intrusivas**, pois alteram as características do escoamento onde são aplicadas. Ainda, tratam-se técnicas de medição **indireta**, uma vez que a grandeza de interesse é obtida através da medição de outra relacionada.

O avanço tecnológico na eletrônica determinou o surgimento de transdutores mais sofisticados. Desenvolveram-se então técnicas através de ultra-som. Nesta, um transmissor e um

receptor são estrategicamente posicionados tal que seja possível emitir e receber um sinal, verificando o seu tempo de propagação. Pode-se então determinar a diferença deste tempo em relação ao de propagação do som no fluido estático. Associando com a distância entre os transdutores, a qual é conhecida, obter-se-á a velocidade desenvolvida pelo escoamento nesta seção.

Um marco tecnológico foi estabelecido com o surgimento da velocimetria a LASER Doppler (LDV). Basicamente, um feixe de LASER é incidido sobre um escoamento onde partículas estão disseminadas. A luz espalhada por estas partículas em movimento produzirá uma variação (proporcional à velocidade) na frequência dos raios que atingem o fotodetector, devido ao efeito Doppler. Assim, com LDV, pequenos volumes e grandes taxas de análise do escoamento puderam ser obtidas, aumentando a resolução espacial e temporal da medição, respectivamente. Trata-se então de uma medida **direta e não-intrusiva**, já que as partículas podem ser diminuídas de tal forma que sua presença não interfira substancialmente no meio físico. No entanto, como todas as outras comentadas anteriormente, ainda constitui em uma medida **pontual**, referente a uma parte ou ponto particular do escoamento.

1.3. Velocimetria por Processamento de Imagem

O avanço tecnológico nos últimos 25 anos nas áreas de ótica, teoria eletromagnética, microeletrônica e computação determinaram o surgimento de técnicas **quantitativas e não-intrusivas** de medição capazes de fornecer perfis de velocidade instantâneos em escoamentos complexos. Estas técnicas se baseiam no princípio de **velocimetria por processamento de imagens**, o qual consiste em disseminar partículas no escoamento e capturar suas imagens em tempos definidos, calculando posteriormente a distância percorrida e determinando assim o vetor velocidade [Lai, 1996]. Ainda, ao contrário das técnicas pontuais acima, trata-se de uma medição de **campo**, onde todas as partículas pertinentes a um volume de interesse terão seu vetor velocidade validado. Deste modo, as grandezas diferenciais em relação às coordenadas espaciais como vorticidade, tensões normais e tensões cisalhantes e também as grandezas integrais em relação às coordenadas espaciais, como circulação, fluxo de massa por unidade de profundidade, funções do tipo potencial e corrente, dentre outras, passaram a ser então possíveis de serem mensuradas [Menon et al., 1992].

Inicialmente, as imagens eram capturadas de forma analógica, através da sensibilização de filmes em uma câmera fotográfica. Tal circunstância determinava então que um processamento **analógico** da imagem devia ser empregado. A partir dos anos 90, mediante os avanços na física do estado sólido, houve o surgimento de câmeras com sensores eletrônicos de imagem baseados

em elementos como o Charge Injection Device (CID), o Charge Coupled Device (CCD) [Castleman, 1996] e o Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS).

Estes sensores eletrônicos aliados ao avanço computacional determinaram a utilização de formas de processamento **digital** das imagens. Este tratamento potencializou o desenvolvimento de métodos e algoritmos de processamento cada vez mais eficientes, sendo o precursor a correlação [Keane et al., 1989]. Atualmente, algoritmos envolvendo inteligência artificial têm sido largamente aplicados. Pode-se citar a Lógica *Fuzzy*, visando filtrar vetores espúrios [Wernet, 1993] [Wernet, 1999], as Redes Neurais, que, além do caso anterior [Liang et al., 2003], servem para o reconhecimento de padrões do escoamento [Labonté, 1999] [Chen et al., 1998] e a localização de partículas [Grant et al., 1997] e os algoritmos genéticos, utilizados para o rastreamento de partículas em imagens capturadas em instantes sucessivos [Sheng et al., 1998]. Por fim, também *wavelets* têm sido empregadas para detecção de estruturas coerentes do escoamento [Camussi, 2002].

Agregado a isto, as técnicas que envolvem a formação da imagem também tem sido amplamente diversificadas. Para os casos de fluidos não-transparentes confinados em sistemas físicos opacos, os quais são insensíveis ao comprimento de onda da luz visível, a obtenção da imagem pode ser realizada através da utilização de raios-x [Lee et al., 2003]. No caso onde partículas não possam ser inseridas, a utilização da LASER Induced Fluorescence (LIF) para a fluorescência de certos compostos químicos disseminados no escoamento também surge como uma alternativa para a formação da imagem [Schlicke, 2001]. Por fim, pode-se citar o emprego da técnica velocimetria por processamento de imagens em sistemas físicos caracterizados por fluidos eletricamente carregados ou plasmas [Thomas et al., 1999]. Tais aperfeiçoamentos elevaram os sistemas de velocimetria por processamento de imagens atuais ao estado da arte.

1.4. Concentração de partículas no escoamento

Supondo que as partículas estejam randomicamente distribuídas de tal forma que a probabilidade de encontrar k_p partículas em um volume V do escoamento obedeça a uma distribuição de Poisson, tem-se a seguinte equação:

$$prob(k_p \in V) = \frac{(CV)^{k_p}}{k_p!} e^{-CV} \quad (1)$$

onde C é o número médio de partículas por unidade de volume. Supondo um volume cilíndrico de análise, conforme ilustra a Figura 1.1, pertinente a uma região iluminada do escoamento, a densidade de partículas N_s presente é dada por:

$$N_s = C \cdot \Delta z_p \frac{\pi d_c^2}{4M^2} \quad (2)$$

Onde Δz_p é a espessura do plano de iluminação, M a magnificação da câmera utilizada e d_c é o diâmetro do cilindro de análise. Um $N_s > 1$ significa uma grande probabilidade de encontrar mais de uma partícula enquanto $N_s < 1$ determina que é pouco provável que se encontre mais de uma partícula no volume de interesse.

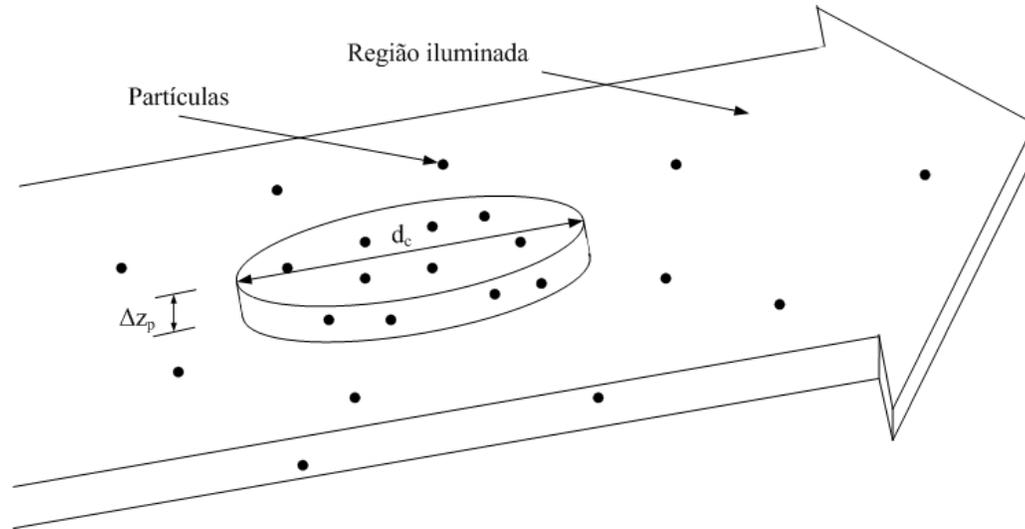


Figura 1.1 – Cilindro de análise na região iluminada do escoamento.

Por outro lado, a densidade de partículas N_i na imagem é dada por:

$$N_i = C \cdot \Delta z_p \frac{\pi d_i^2}{4M^2} \quad (3)$$

Onde d_i é o diâmetro do cilindro analisado na imagem. Igualmente ao caso anterior, um $N_i > 1$ significa uma grande probabilidade de encontrar mais de uma partícula enquanto $N_i < 1$ determina que é pouco provável que se encontre mais de uma partícula no volume de interesse.

Com base nas equações (1), (2) e (3) a técnica de velocimetria por processamento de imagens foi dividida em 3 modos de operação [Adrian, 1991]. Para $N_s \ll 1$ e $N_i \ll 1$, tem-se a presença dominante de partículas individuais que devem ser rastreadas uma a uma em tempos sucessivos para determinação do vetor velocidade. Por isto, denomina-se esse modo de Particle Tracking Velocimetry (PTV). Para $N_s \ll 1$ e $N_i \gg 1$, a densidade de partículas atinge tal ponto que, embora possam ser identificadas individualmente, não mais podem ser individualmente localizadas no instante posterior. Tal modo necessita de um tratamento estatístico e denomina-se Particle Image Velocimetry (PIV). O extremo, quando $N_s \gg 1$, independente de N_i , tem-se a superposição das imagens das partículas individuais, não podendo mais estas serem identificadas individualmente. Este modo corresponde ao LASER Speckle Velocimetry (LSV). Na Figura 1.2, pode-se visualizar a quantidade de partículas que devem estar presentes em uma imagem para aplicação de cada um dos modos descritos acima.

1.5. Aplicação de sistemas de velocimetria por processamento de imagens

Sistemas velocimetria por processamento de imagens têm sido amplamente utilizados para a caracterização de escoamentos. Do ponto de vista acadêmico, em especial, para o estudo da Turbulência, fenômeno ainda não compreendido pela física atual. Do ponto de vista industrial são empregados de forma irrestrita em projetos aerodinâmicos, em turbomáquinas, na combustão e até mesmo na área de Engenharia Biomédica, em projeto de próteses [Vieira et al., 1999].

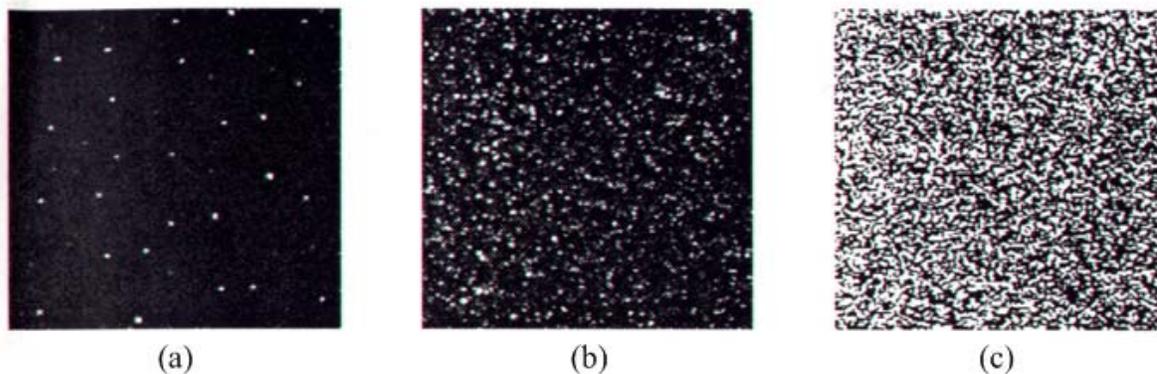


Figura 1.2 – Os 3 modos de densidade: a) Baixa (PTV), b) Média (PIV), e c) Alta (LSV).

1.6. Objetivo deste trabalho

O objetivo deste trabalho é projetar e implementar um sistema de velocimetria por processamento de imagens (SVPI), digital, modo PIV, para obtenção de campos de velocidade instantâneos de 2 dimensões do escoamento. Mais, este sistema deve servir de suporte para que trabalhos futuros possam ser sobre o mesmo elaborados. Para tanto, desenvolveu-se uma nova concepção de análise, dividindo o SVPI em 2 partes denominadas de Sub-sistema de Formação da Imagem (SFI) e Sub-sistema de Processamento da Imagem (SPI), as quais serão descritas nos capítulos a seguir. Também, devido ao surgimento de novas técnicas nos últimos anos dentro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) junto ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos Aplicada e Computacional (LAMAC), uma atualização na nomenclatura utilizada será efetuada.

1.7. Motivação deste trabalho

O fato da quase ausência de pesquisa científica nesta área no país, a possibilidade de desenvolvimento tecnológico nacional e o alto custo de dezenas de milhares de dólares relacionados aos sistemas do gênero, motivou o desenvolvimento deste trabalho. Utilizou-se para isto uma câmera com alta taxa de captura adquirida recentemente em um projeto pelo grupo.

Devido ao fato de os últimos trabalhos desenvolvidos nesta Universidade se basearem no modo PTV, utilizando algoritmos de rastreamento da partícula, escolheu-se o modo PIV através de métodos estatísticos de processamento digital das imagens.

1.8. Organização deste trabalho

A partir do século passado, com o início do estudo científico sobre a estrutura da matéria, a divisão histórica estabelecida entre pesquisa experimental e teórica tornou-se cada vez mais tênue. Não diferente, a complexidade envolvida em um SVPI atual, a enorme quantidade de variáveis atuantes e o desconhecimento real do comportamento do sistema físico a ser analisado determinaram que, para medidas satisfatórias sejam obtidas, um completo entendimento teórico a respeito do assunto seja estabelecido.

Desta forma, dividiu-se o presente trabalho nos capítulos descritos a seguir. Os capítulos 2, 3 e 4 constituem uma revisão bibliográfica dos conceitos necessários ao entendimento de um SVPI, organizados de forma original pelo presente autor. Os demais capítulos constituem a contribuição deste trabalho ao assunto em questão.

No capítulo 2, serão apresentadas as partes que compõe um SVPI e o seu princípio básico de funcionamento para o caso mais geral, envolvendo 3 dimensões. Também, serão analisadas as influências causadas por sua aplicação sobre o sistema físico o qual deseja-se investigar.

No capítulo 3, o estudo passará a ser restrito a um sistema 2D de medição, objeto deste trabalho. Neste, será apresentado o SFI, sendo cada item que o compõe abordado em detalhe e tendo seus conceitos físicos envolvidos elucidados e bibliografias para um estudo mais aprofundado citadas.

No capítulo 4, será descrito o SPI. Para tanto, as técnicas de captura envolvidas bem como os algoritmos usuais de processamento empregados serão abordados. Nesta parte, será realizada uma atualização na nomenclatura, acrescentando as novas técnicas de medição desenvolvidas junto a esta Universidade.

No capítulo 5, será descrita a implementação de um SVPI. Para tanto, os equipamentos utilizados no SFI e os algoritmos de processamento digital implementados para utilização no SPI serão apresentados.

No capítulo 6, o SVPI implementado será aplicado a um escoamento interno ao duto circular, em regime altamente turbulento.

No capítulo 7, as incertezas envolvidas na medição utilizando o SVPI projetado serão averiguadas e quantificadas.

No capítulo 8, os resultados obtidos serão comparados e validados com a solução analítica conhecida para o problema.

No capítulo 9, as conclusões a respeito deste trabalho serão apresentadas.

No capítulo 10, por fim, inúmeras sugestões para trabalhos futuros serão discutidas.

2. SISTEMA DE VELOCIMETRIA POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Genericamente, um sistema de velocimetria consiste em 2 sub-sistemas os quais são aplicados sobre um meio físico qualquer a ser analisado, conforme Figura 2.1. O sub-sistema de formação da imagem (SFI) é responsável em inserir partículas no escoamento e propiciar que suas imagens sejam produzidas e armazenadas em tempos sucessivos e bem determinados. O sinal de imagem $S_I(t)$ juntamente com sua taxa de quadro T_q e o fator de escala FE, os quais serão definidos nos capítulos posteriores, são enviados ao sub-sistema de processamento de imagens (SPI). Estes são então processados para que as grandezas físicas pertinentes ao escoamento tais como velocidade, vorticidade, intensidade de turbulência, dentre outras, sejam extraídas, efetuando a caracterização do escoamento.

O SFI é um sistema rígido que apenas envolve os equipamentos utilizados na instrumentação. Contudo, cada um destes equipamentos deve ser configurado para que a imagem seja formada e capturada adequadamente. Usualmente, a sua configuração é basicamente efetuada pelo operador do sistema, que, por exemplo, determina o aumento da intensidade do feixe de LASER, do tempo de obturação da câmera ou aumento do $f_{\#}$ da objetiva, ao verificar que a imagem enviada ao SPI não possui nitidez. Há, então, um processo de realimentação, onde os equipamentos devem ser continuamente regulados mediante a análise das imagens produzidas. Esta função, em sistemas mais automatizados, cabe a parte inteligente do sistema, o SPI. Esta atuação do SPI sobre o SFI é simbolizada na Figura 2.1 através de um sinal de controle S_c .

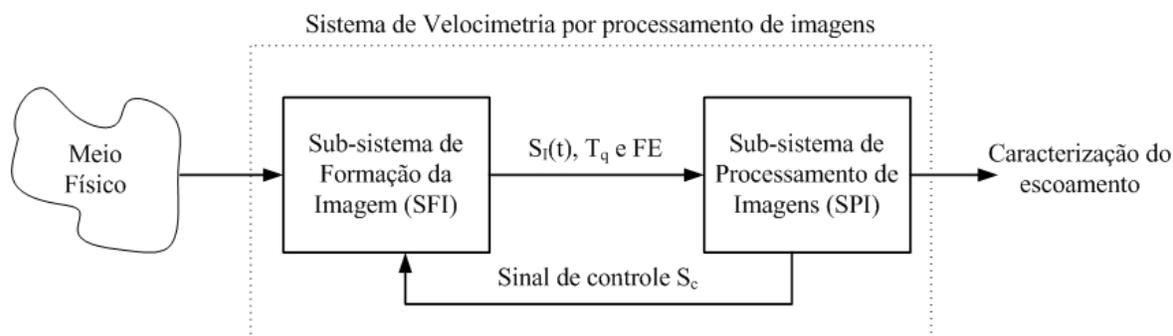


Figura 2.1 – Diagrama explicativo do sistema de velocimetria.

Neste processo, pode-se observar que cada um dos blocos é independente. Ou seja, o projeto do sub-sistema SPI não está atrelado ao meio físico e apenas sim às limitações impostas pelo aparato experimental utilizado no SFI. Esta abstração potencializa o processamento das imagens através de diferentes algoritmos.

O princípio básico de um sistema de velocimetria através de processamento de imagens consiste em determinar a distância percorrida por certo objeto ou partícula sobre um intervalo de

tempo bem definido. Para tanto, usualmente utilizam-se câmeras com sensor eletrônico de imagem com objetivo de captar sucessivos quadros da evolução espacial da partícula com uma base de tempo gerada pelo sistema de aquisição.

A Figura 2.2 ilustra a situação onde uma partícula descreve, em relação a um sistema de coordenadas Euleriano, uma trajetória arbitrária em um escoamento, tendo-se registro de sua passagem pelos pontos P_0 , P_1 e P_2 em tempos também arbitrários dados por t_0 , t_1 e t_2 , respectivamente. Tendo como início da análise do movimento o ponto P_0 , então a velocidade em um determinado intervalo desde o instante t_0 até t é dada por:

$$\vec{v} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_o}{t - t_o} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (4)$$

sendo \vec{r} o vetor posição da partícula em um tempo t qualquer após t_0 , $\Delta\vec{r}$ a variação espacial desta posição e Δt a variação temporal. Em $t=t_2$, o deslocamento espacial calculado difere muito da trajetória real realizada pela partícula e assim a sua velocidade através de (4) constitui apenas uma aproximação. Com a diminuição do tempo de análise para $t=t_1$, o vetor velocidade se torna cada vez mais tangente à trajetória, descrevendo com maior precisão a dinâmica da partícula. Pode-se dizer então que a aplicação de (4) irá determinar a velocidade média temporal da partícula sobre este intervalo.

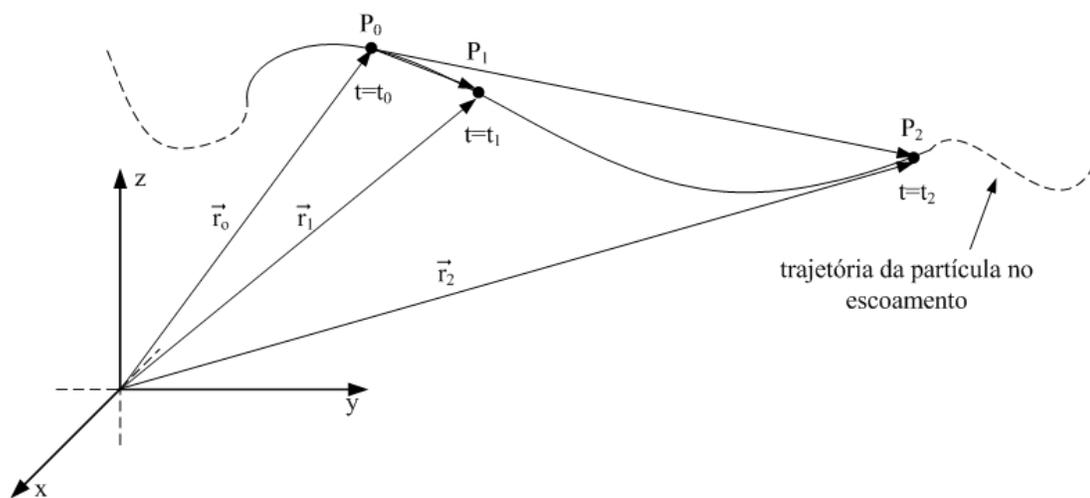


Figura 2.2 – Trajetória arbitrária de uma partícula qualquer.

O caso limite em que $t \rightarrow t_0$ determina a velocidade instantânea da partícula:

$$\vec{v} = \lim_{t \rightarrow t_o} \frac{\vec{r} - \vec{r}_o}{t - t_o} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (5)$$

O critério de instantaneidade depende diretamente do sistema físico e das escalas ou ordens de grandeza de tempo em que suas grandezas variam. Portanto, constitui uma excelente

aproximação, a análise onde o intervalo de tempo Δt seja menor que as escalas de tempo envolvidas no escoamento. Em regimes turbulentos, objeto de estudo neste trabalho, segundo [Freire et al., 2002], a ordem de grandeza de tempo envolvida nas grandes escalas do fenômeno é dada por:

$$\tau = \frac{L_c}{U_c} \quad (6)$$

onde L_c é o comprimento característico e U_c é a velocidade característica do escoamento em questão. No entanto, para que ainda o critério de Nyquist [Oppenheim et al., 1998] seja cumprido e assim o histórico temporal da velocidade possa ser completamente estabelecido, tem-se que:

$$\Delta t \leq \frac{\tau}{2} \quad (7)$$

Deste modo, a velocidade média sobre um intervalo de tempo maior que Δt qualquer pode ser obtida. Para tanto, basta-se apenas computar o vetor velocidade em cada intervalo de tempo conforme exemplifica a Figura 2.3. Neste caso, a velocidade média \bar{v}_t é determinada, desde o ponto P_0 até um ponto arbitrário P_j , para um intervalo de tempo $\Delta t \approx \text{constante}$, pela seguinte equação:

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{j=1}^J \Delta \vec{r}_j}{\sum_{j=1}^J \Delta t} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \vec{v}_j \quad (8)$$

onde j é o indexador temporal.

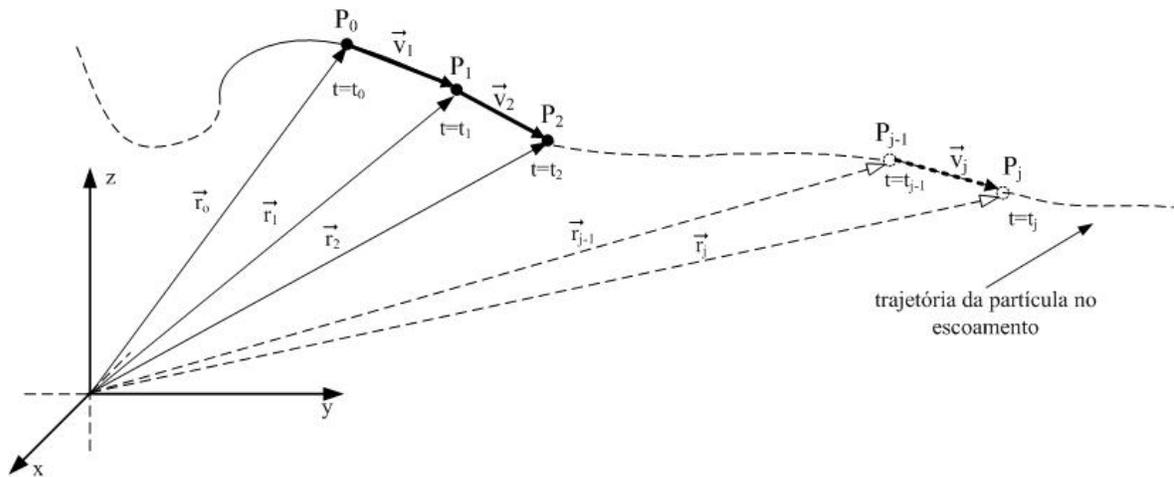


Figura 2.3 – Obtenção da velocidade média da partícula sobre qualquer intervalo de tempo.

É importante salientar que a velocidade determinada constitui a velocidade da partícula, a qual difere da velocidade do escoamento dos elementos de fluido no local de análise. O fato de a partícula possuir um tamanho finito determina que esta sofra um arrasto no escoamento, devido ao caráter viscoso do fluido. Ainda, caso a partícula não seja da mesma densidade do fluido, há um desequilíbrio entre a força gravitacional e a de empuxo. Por fim, a ação conjunta da força de arrasto, empuxo e gravitacional implica que a velocidade da partícula seja diferente da velocidade do fluido ao seu redor, surgindo efeitos de uma força de sustentação que irá desviar a partícula em relação à trajetória do elemento de volume. Estes fatores pertinentes à inserção da partícula no escoamento devem ser minimizados para que a medida seja a mais fiel possível.

Torna-se necessário então determinar qual a dependência destas forças em relação às características da partícula. Para uma partícula com geometria arbitrária em um escoamento em regime turbulento, o problema torna-se não-linear com solução analítica impossibilitada. Desta forma, deve-se estabelecer simplificações na análise para que, ao menos, algumas induções a respeito de tal comportamento possam ser obtidas.

A Figura 2.4 ilustra a situação de uma partícula em um escoamento cuja direção, por simplificação, está alinhada com o campo gravitacional. Considerando o caso particular de uma partícula com geometria esférica em um escoamento estacionário com Re suficientemente pequeno tal que os efeitos inerciais sejam desprezíveis frente aos viscosos, tem-se que a força de arrasto \vec{F}_a pode ser aproximada pela força de Stokes \vec{F}_{stokes} [Landau et al., 1959]. Em módulo:

$$F_a \approx F_{stokes} = 3\pi d_p \mu \cdot u_f \quad (9)$$

onde d_p é o diâmetro da esfera, μ a viscosidade dinâmica do fluido e u_f a componente em \vec{e}_x da velocidade do escoamento não perturbado pela partícula. Pode-se observar que, quanto menor d_p , menor é a ação da força de Stokes.

A diferença de densidade entre a partícula e o fluido em escoamento determina que o empuxo \vec{E} e a força gravitacional \vec{P} não sejam iguais [Shames, 1992]. Esta diferença, também em módulo, é dada pela equação:

$$P - E = (\rho_f - \rho_p) \cdot V_p \cdot g \quad (10)$$

onde ρ_p é a densidade da partícula, ρ_f é a densidade do fluido, V_p é o volume da partícula e g o módulo da aceleração da gravidade. Quanto mais $\rho_p \rightarrow \rho_f$, menos influenciada por (10) a partícula é.

Contabilizando a ação da força de Stokes dada por (9) somada ao desequilíbrio entre a ação gravitacional e o empuxo dado por (10) e resolvendo a equação do movimento dada pela 2ª.

Lei de Newton obtém-se a velocidade terminal da partícula na direção do escoamento [Almeida, 1997]:

$$V_t = \frac{1}{18} g \frac{(\rho_f - \rho_p)}{\mu} d_p^2 \quad (11)$$

Ou seja, quanto menor for o diâmetro d_p , menor será a limitação em termos de velocidade terminal V_t da partícula presente no escoamento. Em outras palavras, menor será a ação da viscosidade do fluido sobre a dinâmica da partícula.

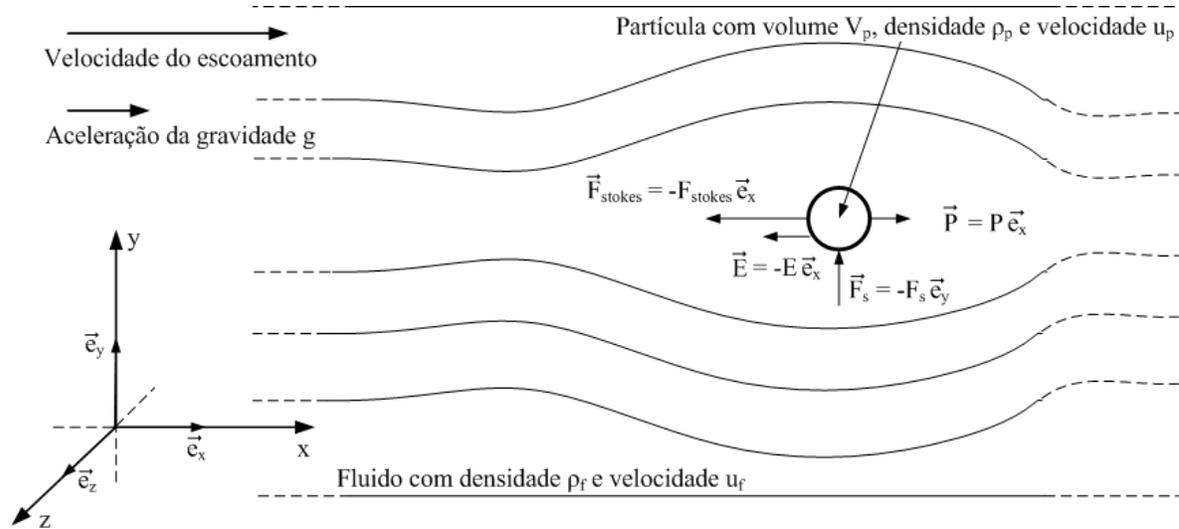


Figura 2.4 – Forças atuantes sobre o movimento de uma partícula no escoamento.

Ainda, a partícula possui tamanho e assim massa finita, determinando que haja efeitos inerciais que impedem que esta responda, instantaneamente, a uma perturbação quando em um fluido viscoso. Segundo [Raffel et al., 1998], a resposta da partícula sobre uma perturbação tipo pulso, no escoamento particular comentado acima, pode ser aproximada por uma lei exponencial do tipo:

$$u_p(t) = u_f \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right] \quad (12)$$

sendo u_p a componente em \vec{e}_x da velocidade da partícula e τ_s o tempo de relaxação dado por:

$$\tau_s = \frac{\rho_p}{18\mu} d_p^2 \quad (13)$$

Desta forma, quanto menor o diâmetro d_p , menor τ_s e assim mais rápido $u_p \rightarrow u_f$.

Conforme comentado anteriormente, a diferença de velocidade entre a partícula e o fluido ao seu redor determina o surgimento de uma força de sustentação transversal ao movimento dada em módulo por [Bernabeu et al., 1982]:

$$F_s = c_f \frac{d_p^2}{4} \rho_f (u_f - u_p) \sqrt{v_f \frac{\partial u_f}{\partial y}} \quad (14)$$

onde c_f é coeficiente de sustentação e v_f é a viscosidade cinemática do fluido.

Assim, com base nas equações (9), (10) e (14), pode-se concluir que quanto menor for o diâmetro d_p da partícula e quão mais semelhante for sua densidade em relação à do fluido, mais a velocidade da partícula corresponderá à velocidade do escoamento, tornando a medida a mais fiel possível.

Até o momento, foi considerada apenas a análise sobre uma partícula individual no escoamento. Contudo, mediante as mesmas aproximações anteriores, supondo que haja certa quantidade de partículas com velocidades relativas pequenas entre si, em uma região de interesse cuja dimensão é suficientemente pequena frente às escalas espaciais do fenômeno, pode-se estender a abordagem de uma para um grupo de partículas em deslocamento no fluido.

Geralmente isto ocorre para densidades muito altas de partículas no escoamento, quando se torna extremamente complicado rastrear uma partícula individual em instantes sucessivos. Assim, deve-se determinar não mais a velocidade individual de cada partícula, mas sim a velocidade de grupo de um conjunto de partículas.

A velocidade de grupo corresponde à velocidade média de todas as partículas presentes na área selecionada. Ou seja, é a razão entre o somatório de todas as velocidades referentes às partículas individuais e o seu número total presente em uma determinada área analisada. A Figura 2.5 ilustra esta situação. Nesta, pode-se observar que o arranjo das partículas do grupo forma um padrão, o qual se desloca ao longo do tempo.

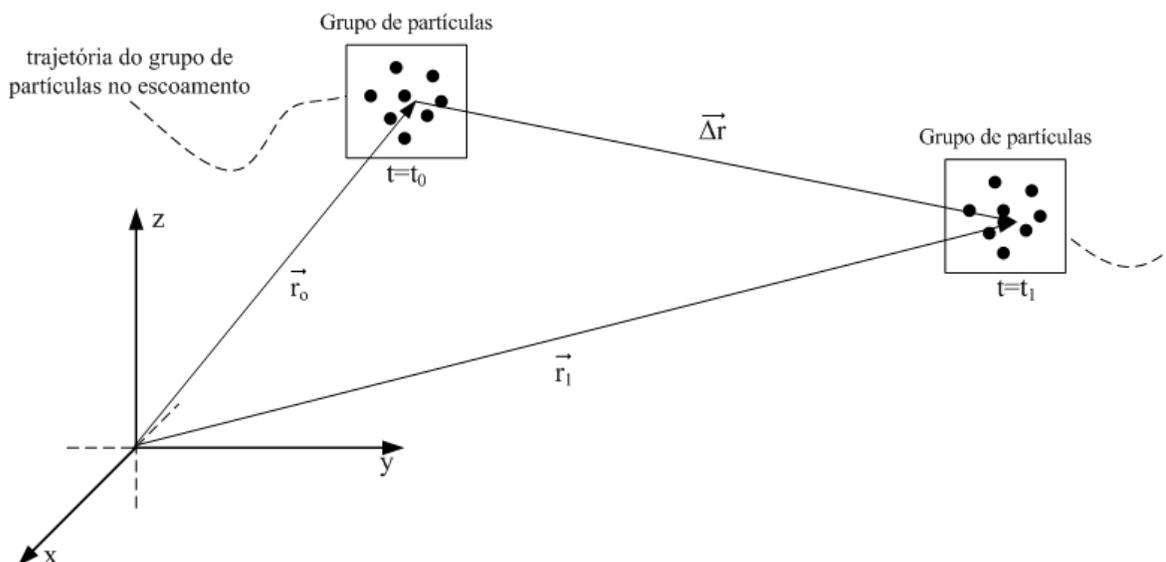


Figura 2.5 – Trajetória considerando um grupo de partículas.

A característica de grupo de partículas aliada ao fato de estas partículas estarem presentes sobre um sistema físico com um grande número de variáveis atuantes determina que uma abordagem sistêmica [Thornton et al., 2004], através de métodos estatísticos, seja adotada. Mesmo que ainda haja uma pequena deformação do padrão ao longo da trajetória, esta medição continuará sendo uma boa aproximação uma vez que corresponderá a uma velocidade média sobre as partículas analisadas.

Por fim, sendo a partícula o elemento utilizado para mensurar a velocidade do escoamento e sendo as conseqüências de seu uso descritas anteriormente, pode-se dizer que, em geral, o seu grau de interferência aumenta conforme a sua densidade no escoamento. Assim, o modo PTV perturba com menor intensidade enquanto o modo LSV perturba com maior intensidade o meio físico. Caso a densidade aumente ainda mais, pode-se chegar ao caso de um escoamento bifásico de água e de partículas.

A grande densidade de partículas também determina a redução da transparência ótica do fluido analisado. Portanto, em muitos casos, o aumento excessivo da densidade não resultará em um aumento direto da densidade de partículas N_i nos quadros capturados. É esperado até que esta diminua drasticamente, uma vez que o espalhamento do LASER incidente por estas partículas não possuirá direções preferenciais, atingindo em menor intensidade o sensor eletrônico de imagem.

3. SUB-SISTEMA DE FORMAÇÃO DA IMAGEM

A Figura 3.1 demonstra todas as partes que compõe um sub-sistema genérico de formação da imagem (SFI). As partículas traçadoras são responsáveis em espalhar a luz incidente proveniente da fonte a fim de que esta seja captada através de uma câmera com sensor eletrônico de imagem. O disparo da fonte luz pode ser sincronizado com a captura da imagem pela câmera através de um dispositivo sincronizador. Ao final, as imagens são transmitidas para que sejam então processadas pelo sub-sistema seguinte. A seguir, cada um destes componentes será analisado em detalhe.

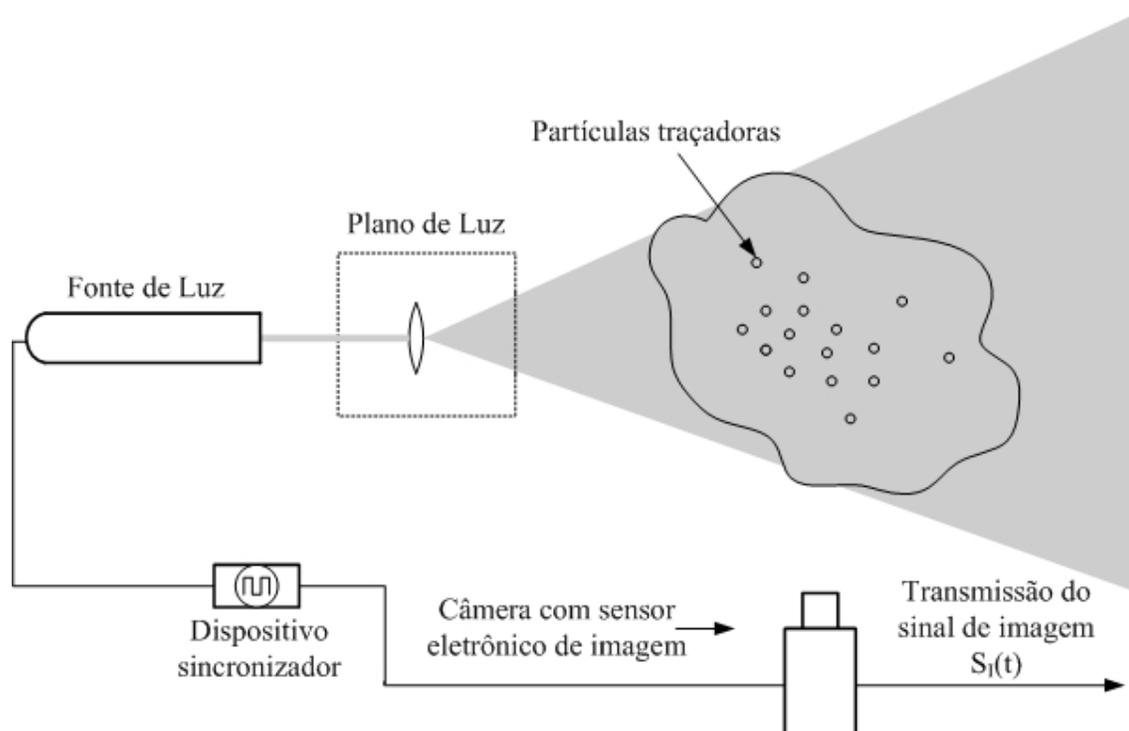


Figura 3.1 – Componentes pertencentes ao sub-sistema genérico de formação da imagem.

3.1. Câmera com sensor eletrônico de imagem

O processo de captação da imagem envolve a transformação de uma perspectiva em uma projeção mediante a utilização de dispositivos óticos e eletrônicos. O conceito envolvendo um modelo geométrico para a formação da imagem (plano da imagem), a objetiva para sua projeção, o sensor eletrônico responsável por sua captação bem como os protocolos envolvidos em sua transmissão serão abordados nos sub-itens a seguir. Devido a sua extensa utilização, o sensor eletrônico de imagem descrito será o CCD, posteriormente efetuando sua comparação com os CMOS, os quais constituem uma tendência futura de utilização.

3.1.1. Objetiva

Usualmente, visando basicamente a diminuição da distorção e aberração cromática, são utilizadas, ao invés de uma única, diversas lentes conjugadas, formando o elemento ótico

denominado objetiva. No entanto, devido ao princípio da equivalência, este conjunto de lentes também pode ser modelado e analisado como uma única lente equivalente.

As principais características das lentes são sua distância focal f e o seu diâmetro d_{ob} . A distância focal é a medida entre o centro da lente e o ponto no qual os raios paralelos provenientes do objeto distante convergem para um ponto comum, denominado foco F , conforme a Figura 3.2. Os dois parâmetros estão relacionados com a quantidade de luz ou luminosidade proveniente do objeto que pode ser pela lente captada. Quanto maior o diâmetro da lente, mais luz por ela é captada e assim mais luminosa esta é. Por outro lado, quanto maior a distância focal, menos convergente é a lente e, assim, menor é a quantidade de luz captada, tornando-a menos luminosa. Devido à relação inversamente proporcional destes dois parâmetros em relação à luminosidade, usualmente, define-se o número f ou $f_{\#}$ [Grob, 1989]:

$$f_{\#} = \frac{f}{d_{ob}} \quad (15)$$

sendo f a distância focal e d_{ob} o diâmetro da lente. Quanto menor o $f_{\#}$, mais sensível à luz é a lente.

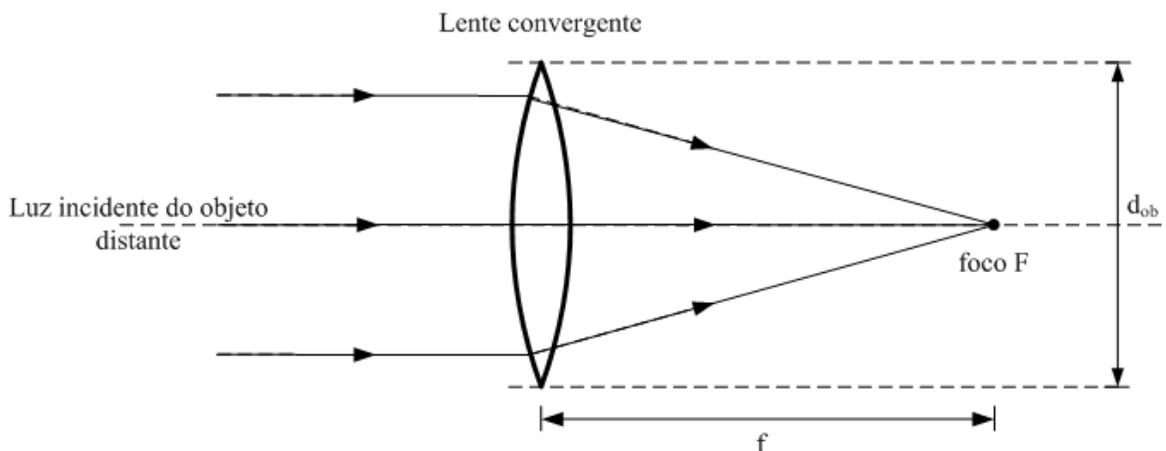


Figura 3.2 – Principais parâmetros de uma lente.

O diâmetro d_{ob} da lente pode ser variado por um dispositivo denominado diafragma ou íris. Igualmente, a distância focal também pode ser controlada, determinando o “ângulo de tomada” e, conseqüentemente, a aproximação ou *zoom*. Lentes com pequeno f são utilizadas para ângulos de tomada grande (*zoom out*), enquanto as com grande f , para ângulos de tomada pequeno (*zoom in*).

Os raios provenientes do objeto que formarão a imagem devem cumprir o princípio de reconstrução geométrica estabelecido pela lente utilizada. Este processo é mostrado na Figura 3.3 para o caso específico de uma lente convergente. Utilizando os raios especiais que passam

pelo foco e pelo centro da lente pode-se então estabelecer através de geometria a relação que estes devem cumprir [Jenkins et al., 1950]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_o - d} + \frac{1}{d} \quad (16)$$

Sendo z_o a distância do objeto e d a distância da lente ao plano da imagem. A capacidade de uma lente ser insensível a pequenas variações de z_o , mantendo ainda a imagem focalizada e nítida, determina o quão mais ou menos é profundo o seu campo de visão. A máxima variação em z_o suportada pela lente determina a sua profundidade de campo.

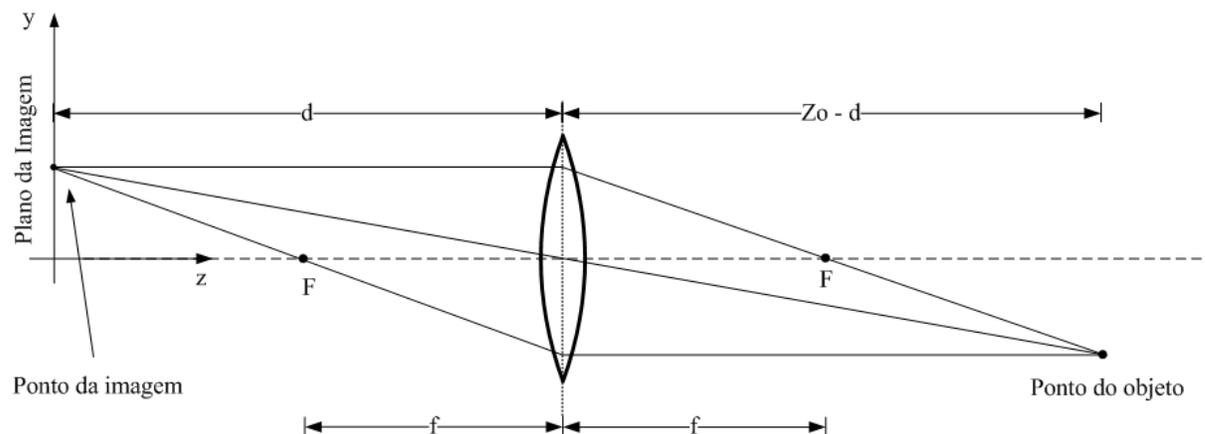


Figura 3.3 – Reconstrução geométrica da imagem.

3.1.2. Modelo geométrico para captação da imagem

O meio físico do objeto ou cena possui dependência espacial tridimensional (3D), enquanto os sensores utilizados para a captação da sua informação ou imagem são estritamente 2D. Assim, este processo consiste na transformação de uma perspectiva em uma projeção, também sendo denominado de transformada p-p. Para tanto, define-se um sistema de coordenadas global referente ao objeto e um sistema de coordenadas local referente à imagem. O sistema de coordenadas local possuirá sempre dois eixos e sua origem centrada sobre o sensor, formando o plano da imagem. Por outro lado, a escolha do sistema de coordenadas global é arbitrária, podendo livremente ser definida pelo usuário. Contudo, devido à simplicidade, usualmente considera-se um sistema de coordenadas global coincidente com o sistema de coordenadas local [Schalkoff, 1989].

O ponto onde os raios luminosos provenientes do objeto convertem para a posterior formação da imagem é denominado centro de projeção. Para o caso em que o plano da imagem esteja posicionado antes do centro de projeção, então a imagem se formará invertida em relação ao objeto, sendo denominada de *back-projection*. Na situação contrária, caso o plano da imagem esteja posicionado a frente do centro de projeção, então a inversão da imagem em relação ao

objeto é eliminada, determinando o modo *front-projection*. Devido ao fato de o centro de projeção ser fisicamente uma lente convergente do tipo mostrada na Figura 3.3, o eixo perpendicular ao plano da imagem que passa pelo seu centro também é denominado de eixo ótico [Gonzalez et al., 2000].

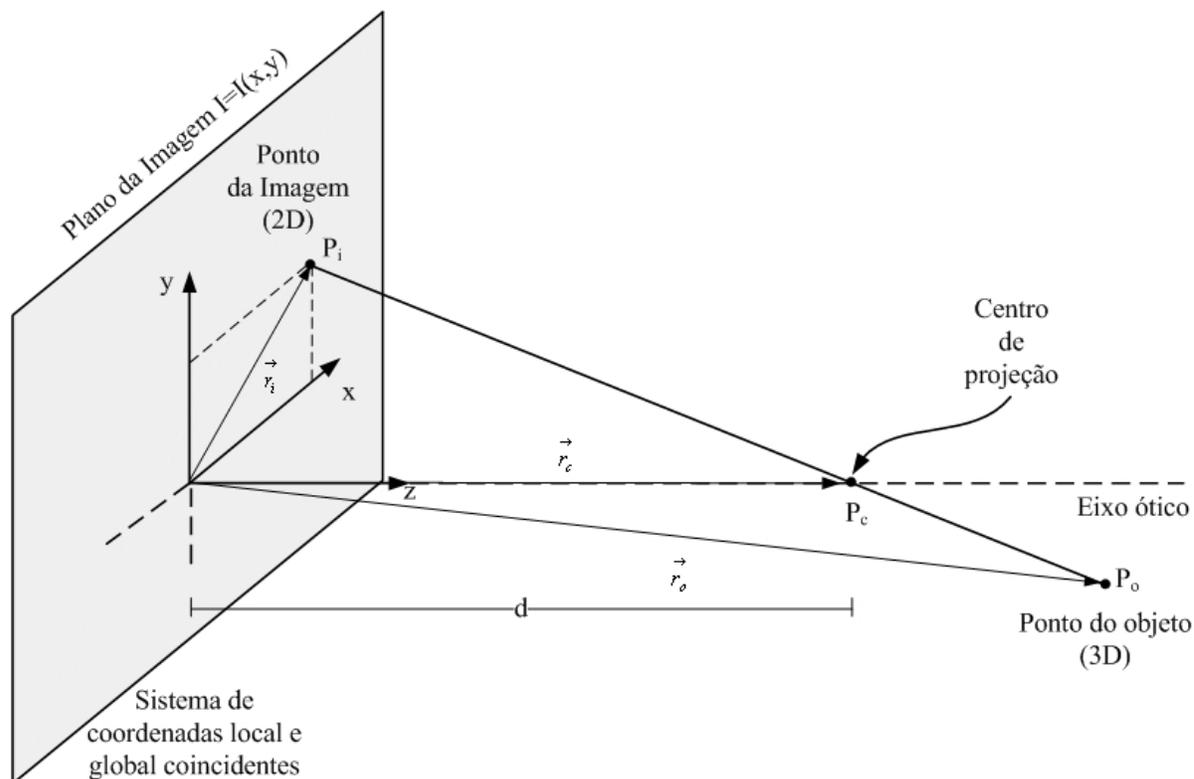


Figura 3.4 – Modelo geométrico para transformação de pontos do objeto em de imagem.

O modelo geométrico mais usual (*back-projection* e sistemas de coordenadas coincidentes) para a composição da imagem é demonstrado na Figura 3.4. Nesta, os raios luminosos provenientes de um ponto P_o infinitesimal do objeto passam pelo centro de projeção no ponto P_c e se direcionam ao plano da imagem no ponto P_i . O somatório dos raios luminosos dos demais pontos pertencentes a um objeto de dimensão finita irá resultar na composição da imagem por um todo:

$$I_j = I_j(x, y, j \cdot \Delta t) \quad (17)$$

sendo I uma função que determina a intensidade luminosa dos raios provenientes do objeto, x e y são as coordenadas espaciais do sistema local utilizado, j é o indexador temporal e Δt o intervalo de tempo em que a imagem persiste imutável. Observa-se que então a imagem na realidade possui dependência de três dimensões, 2 espaciais e 1 temporal. Devido à simplicidade na notação, o argumento $j \cdot \Delta t$ será omitido a partir de então. O conjunto total de imagens provenientes de objetos que são capturadas pelo elemento sensor forma o que se denomina de quadro Q_j , o qual também é indexado por j .

Os 3 pontos P_o , P_i e P_c são colineares e relacionados pela seguinte equação:

$$k \cdot (\vec{r}_i - \vec{r}_c) = -(\vec{r}_o - \vec{r}_c) \quad (18)$$

sendo k uma constante de proporcionalidade geométrica, \vec{r}_i o vetor que descreve os pontos da imagem, \vec{r}_c o vetor que localiza o centro de projeção e \vec{r}_o o vetor que descreve pontos do objeto. Tratando-se de uma equação vetorial, há então 3 equações escalares que descrevem a transformação. Para a componente \vec{e}_x :

$$x_i = \frac{d \cdot x_o}{d - z_o} = -\frac{x_o}{k} \quad (19)$$

Para a componente \vec{e}_y :

$$y_i = \frac{d \cdot y_o}{d - z_o} = -\frac{y_o}{k} \quad (20)$$

Para a componente \vec{e}_z :

$$k = -\frac{d - z_o}{d} \quad (21)$$

O modelo elementar acima implica que as equações (19), (20) e (21) sejam não-lineares tanto nas coordenadas do objeto como no parâmetro d , o qual está relacionado à distância focal f da objetiva. Contudo, comumente a condição de $z_o \gg d$ é verificada e então a equação (21) torna-se:

$$k \approx \frac{z_o}{d} = M \quad (22)$$

onde M é então definido como a razão de magnificação. Assim, a equação vetorial (18) pode ser reescrita com o simples formato:

$$\vec{r}_i = -\frac{\vec{r}_o}{M} \quad (23)$$

A não-linearidade da equação (22) determina que, para cada posição z_o , haja um fator M de magnificação. Supondo os raios luminosos provenientes de uma variação espacial do ponto infinitesimal do objeto, a variação na imagem formada resultante:

$$\Delta \vec{r}_i = -\frac{\Delta \vec{r}_o}{M} - \vec{r}_o \cdot \Delta \left(\frac{1}{M} \right) = -\frac{\Delta \vec{r}_o}{M} + \frac{\Delta z_o}{M^2 \cdot d} \cdot \vec{r}_o = -\left(\frac{\Delta \vec{r}_o}{M} - \frac{\Delta z_o}{M^2} \cdot \frac{\vec{r}_o}{d} \right) \quad (24)$$

Ou seja, a variação na posição do ponto P_i no plano da imagem é influenciada pela variação da coordenada z_o do ponto P_o do objeto. As grandes variações em z determinam que o objeto seja focalizado a fim de que apenas os pontos que o compõe com distâncias z_o semelhantes (plano do objeto) formem a imagem, evitando sua distorção.

Até o momento, consideraram-se objetos estáticos de dimensões finitas e sua respectiva imagem formada através da transformação p-p. No entanto, há muitos casos onde objetos quase que pontuais descrevem certa trajetória ao longo do tempo. Assim, deve-se inserir este caráter dinâmico na equação (24), resultando:

$$\frac{\Delta \vec{r}_i}{\Delta t} = - \left(\frac{l}{M} \cdot \frac{\Delta \vec{r}_o}{\Delta t} - \frac{\Delta z_o}{\Delta t} \cdot \frac{\vec{r}_o}{M^2 \cdot d} \right) \quad (25)$$

Em casos de formação paraxial da imagem, então $\frac{\vec{r}_o}{M^2 \cdot d} \ll \bar{l}$ [Fingerson et al., 1991] e assim

(25) simplifica-se a:

$$\frac{\Delta \vec{r}_i}{\Delta t} \approx - \frac{l}{M} \cdot \frac{\Delta \vec{r}_o}{\Delta t} \therefore \vec{v}_{it} \approx - \frac{l}{M} \cdot \vec{v}_{ot} \quad (26)$$

sendo \vec{v}_{it} a velocidade média temporal do deslocamento da imagem do ponto do objeto e \vec{v}_{ot} a velocidade média temporal do deslocamento do objeto real, no intervalo Δt de análise. Considerando ainda que $z_o \approx \text{constante}$, caso típico de um movimento 2D na profundidade de campo da lente, então (26) torna-se uma equação absolutamente linear e, assim, \vec{v}_{ot} pode ser obtido através de \vec{v}_{it} mediante um fator constante $-M$.

3.1.3. CCD

O CCD é um sensor eletrônico capaz de converter fótons gerados pelo objeto em cargas elétricas, formando a imagem. Um modelo simplificado de sua seção de corte é mostrado na Figura 3.5. Nesta, um material semiconductor (tipicamente silício) serve de substrato para dopagem do tipo n (ânions) e p (cátions). Uma tensão positiva é aplicada entre o terminal C e o substrato, gerando um campo elétrico que aumenta a ausência de portadores de carga na junção p-n, formando a chamada zona de depleção [Sedra et al., 2000]. Ligeiramente acima, há uma região onde a tensão atinge um valor mínimo, denominada de poço de potencial, a qual se comporta como um capacitor.

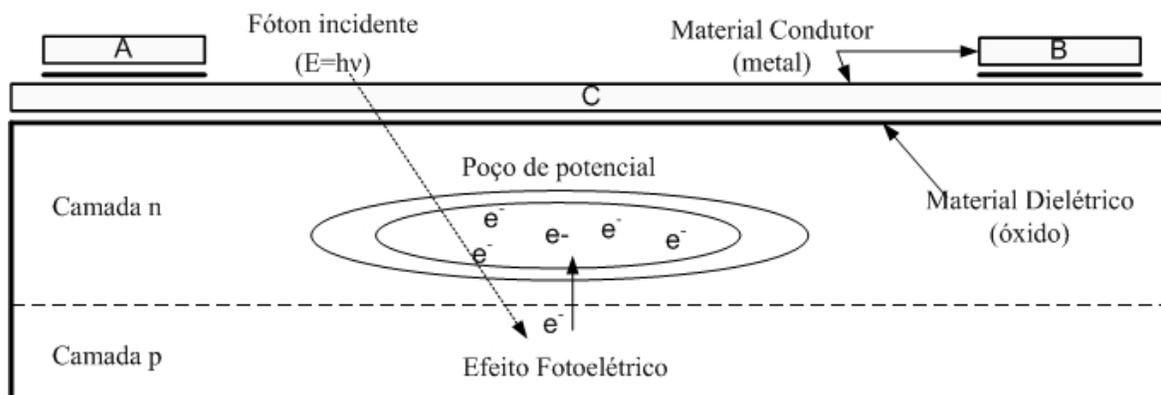


Figura 3.5 – Modelo simplificado de um dispositivo CCD.

Cada fóton incidente na junção p-n, através do efeito fotoelétrico [Eisberg et al., 1983], gera um elétron livre que, devido ao gradiente de campo elétrico, migra para o poço de potencial onde é armazenado. O acúmulo de elétrons perdura durante todo o período de exposição do CCD. Contudo, há um limite de elétrons a serem acumulados no poço que depende das características físicas do CCD. Caso este, devido à superexposição, seja ultrapassado, ocorre um processo de difusão de elétrons para os CCDs vizinhos, ocasionando o borramento da imagem. Após este processo, uma tensão é aplicada aos terminais A e B para que as cargas sejam deslocadas até um registrador horizontal de deslocamento.

Uma vez no registrador horizontal de deslocamento, as cargas acumuladas são transformadas em tensão, gerando a informação de intensidade luminosa ou luminância [Janesick, 2002]. Esta tensão corresponde ao sinal de vídeo, podendo ser transmitida analogicamente ou digitalmente, conforme o sistema de aquisição utilizado. Para a formação da imagem por completa, os CCDs são dispostos espacialmente em matrizes bidimensionais, conforme a Figura 3.6, compondo o sensor CCD e sendo cada elemento CCD associado a 1 picture element (pixel) da imagem [Schalkoff, 1989]. O formato de cada elemento CCD pode variar, sendo as geometrias retangulares e quadradas as mais comuns.

A relação entre o número de pixels horizontais e verticais é denominada de Relação de Aspecto de Quadro (RAQ):

$$RAQ = \frac{n_c}{n_l} \quad (27)$$

sendo n_c o número de colunas e n_l o número de linhas de pixels presentes no sensor CCD.

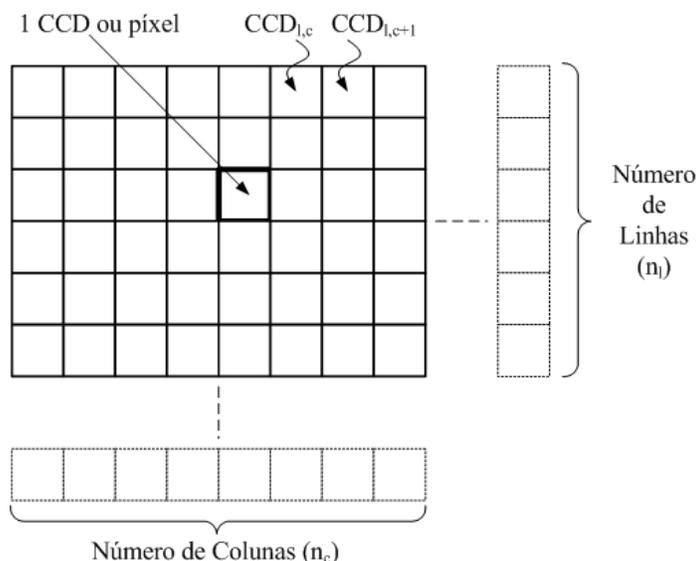


Figura 3.6 – Matriz que compõe a arquitetura de um sensor CCD de imagem com RAQ=4/3.

Na utilização em velocimetria por processamento de imagens, uma série de características do sensor CCD são relevantes e devem ser observadas, tais como: a resolução e a taxa de quadros, o sistema de reset, o fator de preenchimento e a arquitetura de transferência [Lai et al., 1998].

3.1.3.1. A resolução e a taxa de quadros

Visando a compatibilização com os dispositivos óticos associados à formação da imagem, a área dos sensores CCD tende a seguir um padrão. Os mais comuns possuem formato retangular e diagonal de $\frac{1}{2}$ " e $\frac{1}{3}$ ", mantendo uma RAQ de 4/3. Sendo assim, quanto menor for a dimensão do elemento CCD, maior será sua quantidade em uma dada dimensão do sensor e assim maior será a capacidade de diferenciar pontos muito próximos do objeto que irradiaram o fóton, ocasionando um aumento da resolução. Ou seja, a resolução de um sensor CCD está diretamente ligada ao tamanho físico real do elemento CCD que o compõe, sendo o incremento do seu número de pixels decorrência deste fato, quando considera-se a área do sensor como um parâmetro fixo. Essa miniaturização é que constitui o embate tecnológico no campo da microeletrônica, uma vez que quanto menor o elemento CCD, mais sensível o material que o constitui deverá ser e um maior isolamento dos elementos CCDs vizinhos deverá ter, devido a menor incidência de fótons e a maior difusão de portadores, respectivamente.

A Figura 3.7 ilustra a característica da imagem projetada sobre o sensor CCD e o efeito da quantização espacial e temporal para transmissão digital do sinal de imagem. Em geral, o processo de quantização temporal (ou digitalização) causa limitação da banda de frequências pertencente ao sinal original, ocasionando perda de resolução na imagem recebida. Da mesma maneira, a característica finita do elemento CCD implica em degradação da imagem projetada pelas lentes, sendo a equação (17) não mais contínua em relação às coordenadas, mas quantizada, possuindo o seguinte formato:

$$I_j = I_j(l, c, j \cdot \Delta t) \quad (28)$$

onde I é a intensidade luminosa, l corresponde à linha e c à coluna referente a cada pixel, j é o indexador temporal e Δt o intervalo de tempo em que a imagem persiste imutável. Devido à simplicidade na notação, o argumento $j \cdot \Delta t$ também será omitido a partir de então.

É esta matriz de elementos CCDs que origina uma matriz de pixels com todas as imagens captadas que usualmente é denominada de quadro. A taxa com que quadros podem ser capturados por unidade de tempo constitui a taxa de quadros T_q ou *frame rate*. Matematicamente:

$$T_q = \frac{N_q}{T} \quad (29)$$

onde N_q é o número de quadros capturados em um determinado tempo T . Este parâmetro é fortemente limitado pelo protocolo utilizado e pela capacidade de banda do canal de transmissão.

Devido à persistência visual, quadros estáticos mostrados em um tempo suficiente causam a integração da imagem no olho humano gerando a noção de movimento [Gonzalez, 2000]. No cinema utilizam-se taxas de 24 quadros e na televisão 30 quadros para estabelecimento desta dinâmica [Grob, 1989].

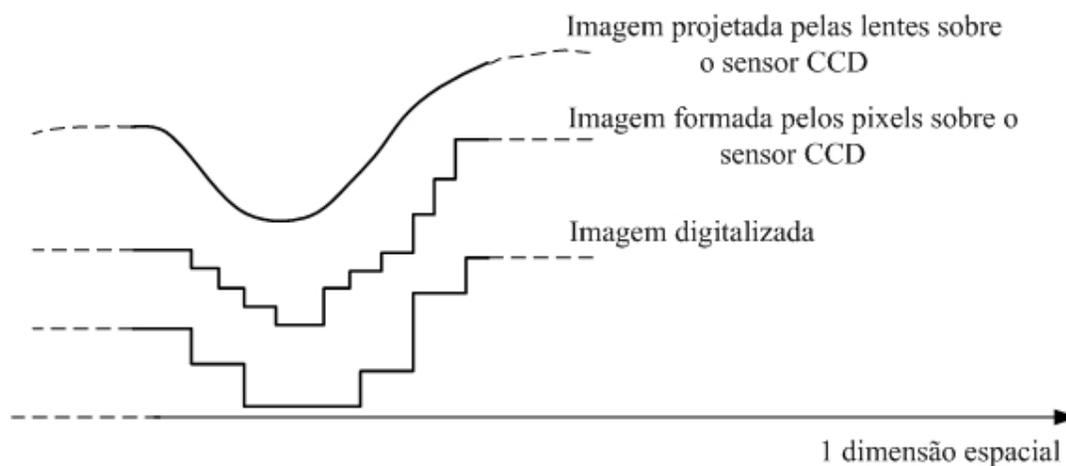


Figura 3.7 – Imagem real e seus sinais após quantização espacial e temporal.

Usualmente, a resolução de um sensor CCD relaciona-se inversamente com a taxa de quadros. Quanto maior é um, menor é o outro. Isto se deve a enorme quantidade de informação contida em uma imagem e nas dificuldades envolvidas na eletrônica em, posteriormente, transferi-las analogicamente ou digitalmente em tempo real para seu processamento. É importante frisar que a taxa de quadros está diretamente associada à quantidade de informação temporal enquanto a resolução está associada à quantidade de informação espacial que se obterá do objeto em análise.

3.1.3.2. O sistema de Reset

O reset de um sensor CCD está associado ao processo onde a carga acumulada na exposição anterior é eliminada e uma nova integração da carga gerada pelos fótons incidentes é iniciada para a formação da imagem. O tempo que o sensor CCD está disponível a essa absorção de fótons é denominado tempo de obturação ou *shutter*. Na maioria nos sensores CCD, esta seqüência de procedimentos para a formação da imagem é desenvolvida de forma automática e sincronizada com o seu *clock* interno. Sendo assim, o experimento deve ser sincronizado com a câmera, o que em determinadas situações se torna inviável. No entanto, projetos modernos têm propiciado que isto seja efetuado de forma assíncrona, através de um controle de gatilho externo determinado pelo usuário, propiciando sincronizar a captura das imagens a um evento do sistema físico o qual se está analisando.

3.1.3.3. O Fator de preenchimento

Devido a grande densidade de componentes eletrônicos utilizados para leitura, reset, conversão de carga em tensão bem como barramentos de interligação, nem toda a área disponível no sensor CCD é utilizada para captação de fótons. Isso significa que um fóton incidente em uma região intermediária a 2 pixels pode ser parcialmente ou até mesmo não detectado. Este fator é crítico quando se utilizam partículas cada vez menores ocasionando erros consideráveis nas medições. O fator de preenchimento de um sensor CCD é então definido como a razão entre a área do sensor CCD sensível aos fótons e a sua área total. Quanto menos área não sensível possui o sensor, maior é este fator.

3.1.3.4. A Arquitetura de Transferência

Existem 3 tipos básicos de projetos de sensores CCDs: *full frame transfer*, *frame transfer* e *interline transfer*. Em todas as arquiteturas, o sensor CCD é lido serialmente através do registrador horizontal de deslocamento sendo o seu tempo total o fator limitante para o número de quadros por segundo. A forma com que a carga de cada elemento CCD é transferida para o registrador de deslocamento é que diferencia cada um. Devido ao fato da arquitetura do sensor CCD estar diretamente relacionada, em velocimetria por processamento de imagem, à técnica de captura das imagens das partículas, uma breve descrição de cada uma destas arquiteturas será realizada abaixo.

3.1.3.4.1. *Full frame transfer*

Nesta arquitetura os pixels também são registradores de deslocamento vertical. Ou seja, após o período de exposição, a carga presente em cada linha é deslocada para a próxima inferior sendo a última transferida para o registrador horizontal de deslocamento, o qual é lido, seqüencialmente, pixel a pixel. Esse processo é repetido até que todas as linhas do sensor CCD sejam transferidas para o registrador horizontal estando, assim, disponível para a próxima exposição. Esta arquitetura é mostrada na Figura 3.8.

As principais vantagens proporcionadas por esta arquitetura são um fator de preenchimento de 100% e possibilidade de integração de um vasto número de elementos CCDs. A maior desvantagem é que o número total de pixels do sensor deve ser lido serialmente para que uma nova exposição se inicie, ocasionando um tempo da ordem de centenas de ms para a leitura de um quadro. Este processo limita a taxa de quadros T_q e, conseqüentemente, a quantidade de informação que pode ser obtida do escoamento em um determinado tempo.

3.1.3.4.2. *Frame transfer*

Esta arquitetura, exposta na Figura 3.9, é similar a anterior, com exceção de contar com uma memória integrada para onde a imagem formada no sensor CCD é transferida coluna a

coluna, sendo posteriormente enviada ao registrador de deslocamento horizontal para estabelecimento do sinal de vídeo. Desta forma, o período de exposição pode ser iniciado imediatamente após a imagem ser transferida para a memória e o número de transferências de carga entre quadros se restringe ao número de linhas e não mais ao número total de pixels do sensor, como no caso anterior. Com este processo, o tempo de leitura de um quadro é da ordem de centenas de us, propiciando uma maior taxa de quadros T_q . O fator de preenchimento usualmente é de 100%.

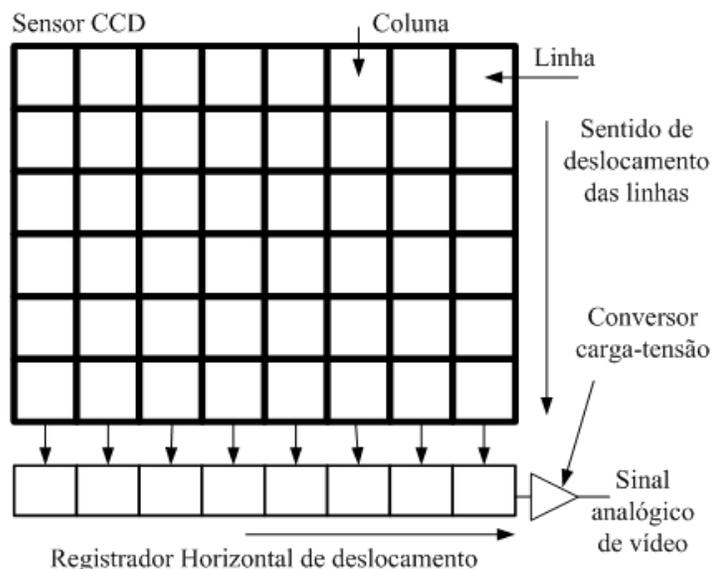


Figura 3.8 – Arquitetura *Full frame transfer*.

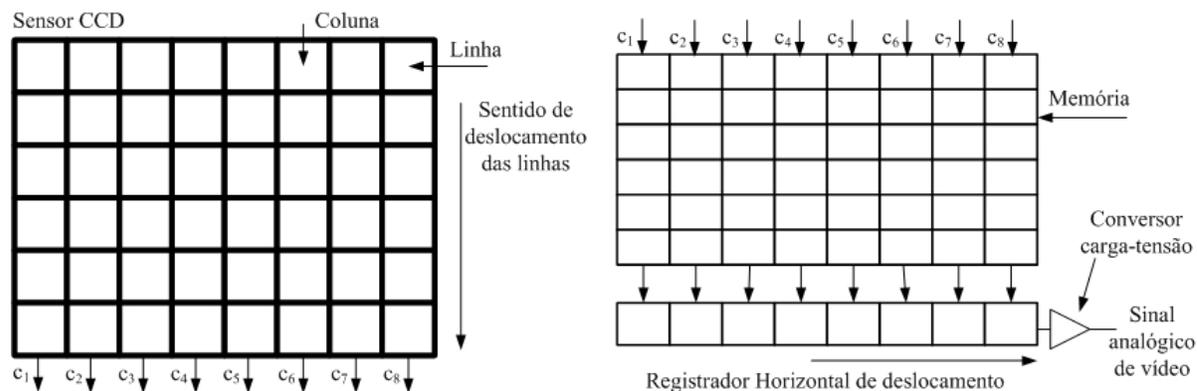


Figura 3.9 – Arquitetura *Frame transfer*.

3.1.3.4.3. *Interline transfer*

Diferentemente das anteriores, nesta arquitetura, há a presença de um registrador vertical de deslocamento para cada coluna de pixel. Ao final do tempo de *shutter*, a informação de cada coluna de pixels simultaneamente é repassada ao seu respectivo registrador vertical, disponibilizando o sensor CCD para a próxima exposição. Assim, o número de transferências de cargas entre quadros é 1, ocasionando uma drástica diminuição do tempo entre exposições (o

qual limita a taxa de quadros T_q). Contudo, devido à presença destes registradores, uma área significativa do sensor é ocupada, diminuindo o fator de preenchimento. Geralmente, para amenizar tal fato, um conjunto de micro-lentes é utilizado para aumentar o fator em 2 ou mais vezes. Há 2 tipos de sensores com a arquitetura *interline transfer* CCD: *interlaced-scan interline transfer* CCD e *progressive scan interline transfer* CCD.

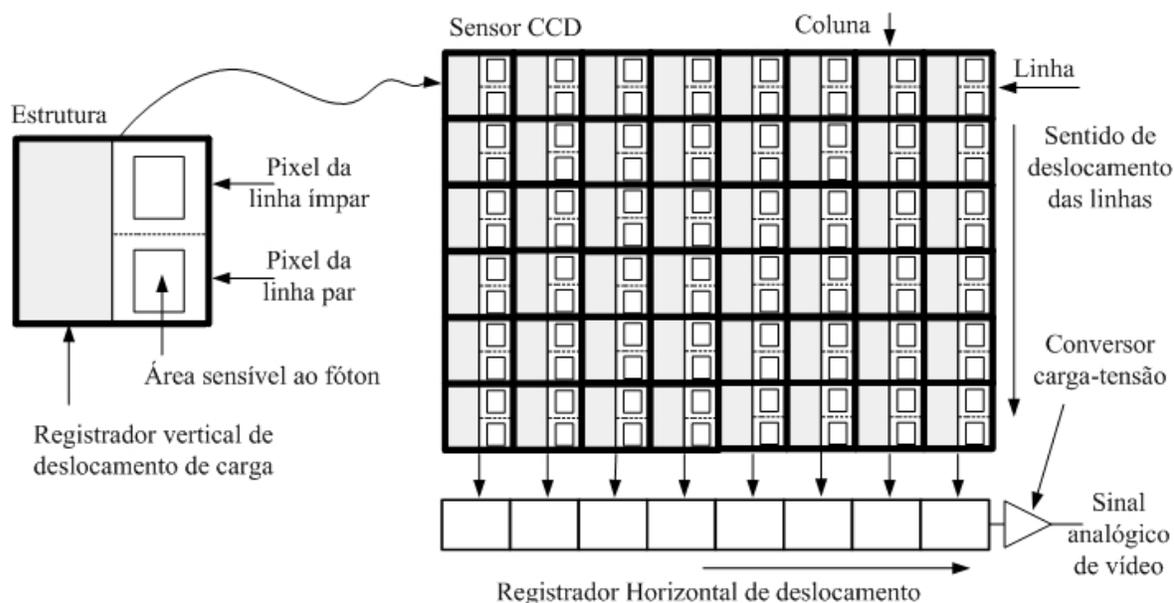


Figura 3.10 – Arquitetura Interlaced Interline transfer.

3.1.3.4.3.1. *Interlaced-scan interline transfer*

A característica principal deste sensor CCD é que a transferência de carga de um quadro inteiro é dividida em campos de linhas de pixels ímpares O e pares E, conforme a Figura 3.10. Ainda, a exposição do sensor pode ocorrer com um campo a cada determinado momento ou com ambos os campos simultaneamente. A diferença entre os dois casos é o defasamento na formação do campo ímpar em relação ao campo par dado pelo tempo referente à obturação de um campo.

Após a formação da imagem, cada pixel transfere sua informação para o registrador vertical, o qual é compartilhado pelos pixels das linhas pares e ímpares, e posteriormente a envia ao registrador horizontal. Devido ao seu baixo custo relacionado ao projeto do *hardware*, este tipo de CCD tem larga utilização em câmeras e aparelhos de vídeo. A técnica de divisão de um quadro em um campo ímpar e um par remonta o tempo da televisão analógica, onde com isto visava-se a diminuição da cintilação ocorrida devido à baixa taxa de quadros T_q [Grob, 1989].

3.1.3.4.3.2. *Progressive scan interline transfer*

O método progressivo de varredura dos pixels ou não-entrelaçado baseia-se diretamente na não divisão do quadro em campos, lendo linha por linha, consecutivamente (vide a Figura 3.11). As informações de cada coluna de pixels são transferidas para os registradores verticais e a área

do CCD torna-se disponível novamente para a integração da luz incidente. Enquanto a segunda imagem é formada a primeira já está sendo transferida dos registradores verticais para os horizontais de deslocamento e o sinal de vídeo digital ou analógico formado seqüencialmente. Devido ao determinismo temporal e a maior fidelidade espacial na formação da imagem em relação ao caso anterior, esta topologia de sensor possui particular interesse em velocimetria por processamento de imagens.

3.1.3.5. Comparação CCD x CMOS

Nos últimos 3 anos, o avanço nas tecnologias envolvidas na microeletrônica propiciou uma maior integração e uniformidade nos sensores de imagem CMOS implementados, atingindo qualidade não mais tão inferior aos CCDs [Theuwissen et al., 2001]. Ao contrário dos CCDs, todos os componentes eletrônicos periféricos referentes à sincronização e leitura do sensor são integrados em seu próprio *chip*, diminuindo custo, volume, potência consumida e aumentando a flexibilidade através da possibilidade de programação da área a ser varrida. Desta forma, a sua utilização tem crescido enormemente [Litwiller, 2001]. No entanto, devido a maior qualidade ainda da imagem formada, a utilização dos CCDs deverá perdurar por mais alguns anos em aplicações que requerem alta definição.

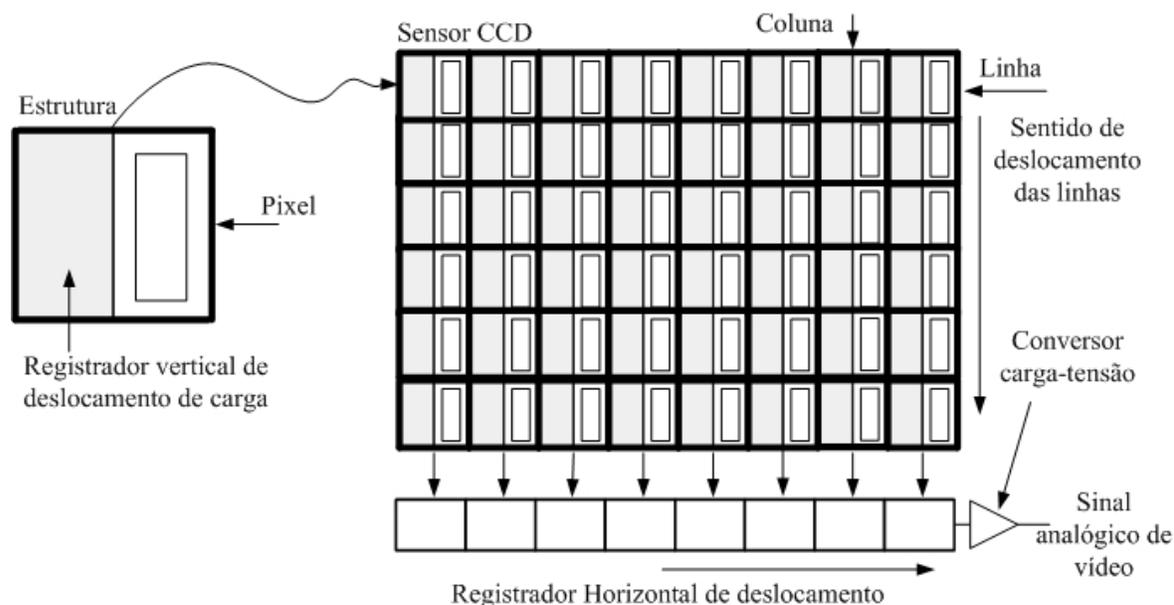


Figura 3.11 – Arquitetura *Progressive scan interline transfer*.

3.1.4. Transmissão da imagem

O processo de transmissão da imagem pode ser tanto analógico quanto digital, sendo cada um baseado em regras e temporizações que formam o protocolo de comunicação para a transferência da informação.

Até 10 anos atrás, devido às restrições da eletrônica em capturar e após processar a grande quantidade de informação envolvida em um sinal de imagem, predominava a utilização de transmissão analógica.

A tendência atual é a utilização do padrão digital, devido, dentre muitos, a versatilidade de conexão, configuração, utilização de algoritmos de compactação e programação através de um computador da câmera utilizada. Neste, o sinal proveniente do conversor carga-tensão do sensor CCD é discretizado através de um conversor analógico/digital (A/D), sendo cada bit oriundo de cada pixel transmitido serialmente. Supondo um sensor CCD com $n_c=640$ e $n_l=480$ pixels, com uma $T_q=30Q/s$ e quantização de 8bits para os níveis de luminância, tem-se que, para transmissão em tempo real, é necessário operar com uma velocidade de, aproximadamente, 74Mbits/s no canal. Assim, as dificuldades envolvidas nas altas frequências de transmissão e no processamento desta grande quantidade de informação tornam a taxa de quadros T_q sempre limitada. A utilização de algoritmos de compactação como MPEG (Moving Picture Experts Group) [Richardson, 2003] tem contribuído muito para o aumento das taxas de quadros, número de pixels e níveis de quantização utilizados nas câmeras. Esta técnica aliada com uma outra vasta quantidade de algoritmos de processamento de imagens propiciou que o protocolo de HDTV (High Definition Television) fosse desenvolvido.

Contudo, câmeras com padrão analógico continuam a ser fabricadas devido a enorme existência de dispositivos capazes de decodificar este sinal. O protocolo base para transmissão de vídeo é o RS-170, o qual define apenas o caráter monocromático, resolução de 525 linhas, taxa de quadro T_q de 30 Q/s, padrão entrelaçado, pulsos de sincronismo vertical e horizontal e banda de 6MHz [Zworykin, 1940]. O fato de agregar toda informação necessária à sua interpretação determinou que estes fossem chamados de sinais compostos de vídeo. Para transmissão de sinais com cores, criou-se o padrão RS-170A ou mais comumente NTSC (National Television System Committee). A partir de então, dezenas de outros protocolos (PAL, SECAM, CCIR e outros) foram sendo criados por empresas e adotados em diferentes países, sempre baseados sobre o RS-170, o qual passou a ser denominado de padrão SDTV (Standard Television). A Figura 3.12 mostra uma imagem com seu respectivo sinal analógico elétrico de vídeo do tipo RS-170. Nesta pode-se observar os pulsos de sincronismo vertical e horizontal, os apagamentos e o sinal de luminância que implementam o protocolo de transmissão.

3.2. Fontes de Luz

Para que a imagem seja formada é necessário que as partículas sejam irradiadas com luz e assim parte dos raios espalhados sensibilizem o sensor eletrônico de imagem utilizado. Devido as suas características principais de ser colimado (pouca divergência), monocromático (estreita

banda de emissão), alta densidade de energia (maior resolução espacial) e coerência (emissão de forma ordenada e com mesma fase) [Muncheryan, 1980] o LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) possui ampla utilização em velocimetria por processamento de imagens de partículas e seu princípio será tratado brevemente neste trabalho. No entanto, fontes de luz branca também são utilizadas devido ao seu baixo custo, sendo as lâmpadas de xeon as mais usuais devido à alta eficiência e ao casamento com o espectro sensível do sensor eletrônico de imagem [Raffel et al.,1998].

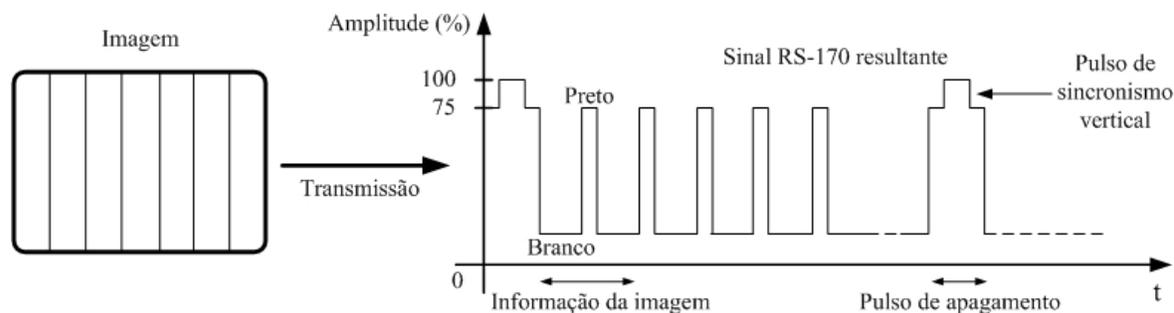


Figura 3.12 – Imagem e seu respectivo sinal RS-170 transmitido.

Uma típica estrutura de construção de um LASER é mostrado na Figura 3.13. Genericamente, tal equipamento pode ser dividido em 3 partes principais: o material de excitação, a fonte de energia e o arranjo ótico. O material geralmente consiste em um gás, um semiconductor ou um sólido. A fonte é responsável em fornecer energia para a excitação dos elétrons dos átomos que compõe o material. O arranjo ótico forma uma cavidade ressonante que confina a radiação gerada amplificando-a até que esta seja extraída.

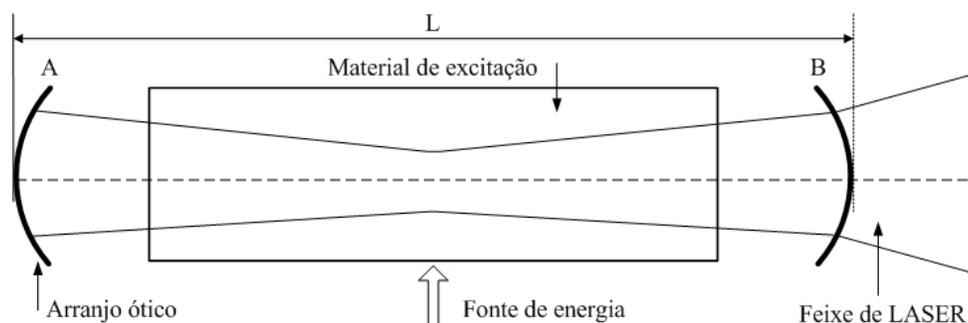


Figura 3.13 – Topologia de uma fonte de LASER.

Uma vez o átomo tendo seu elétron em um nível excitado de energia, um fóton é inserido como gatilho ocasionando a emissão estimulada, onde o elétron decai para um nível de menor energia, no entanto, estável, emitindo um fóton com igual frequência ao incidente [Chin, 1989]. Tal processo é mostrado na Figura 3.14. Estes 2 fótons são então refletidos pelo espelho B e retornam a cavidade, causando novas emissões estimuladas, cujo feixe resultante será novamente refletido pelo espelho A. Inicia-se assim um processo de avalanche, onde a intensidade de luz

crece exponencialmente em relação ao número de reflexões, até atingir regime estacionário. Estas ondas estacionárias produzidas na cavidade ressonante são regidas pela seguinte condição:

$$L = \frac{m_l \cdot \lambda}{2 \cdot n_r} \quad (30)$$

Sendo L o comprimento da cavidade ressonante, m_l um número inteiro, λ é o comprimento de onda do fóton e n_r é o índice de refração do material.

No entanto, para a formação do feixe de LASER, o processo de emissão estimulada deve ocorrer não apenas em um, mas em uma grande quantidade de átomos presentes no material de excitação. O fato de uma larga escala de átomos possuírem seus elétrons em estados excitados é denominado de inversão de população [Beesley, 1976]. O processo de obtenção da inversão de população é altamente dependente do tipo de material utilizado. Em materiais sólidos, utiliza-se radiação eletromagnética, em gases, força-se a colisão entre os átomos e em semicondutores introduz-se corrente elétrica.

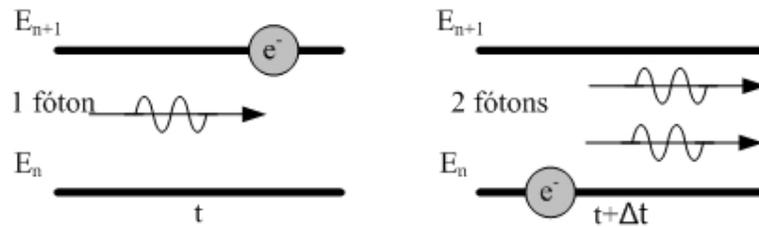


Figura 3.14 – Processo de emissão estimulada.

A geometria do arranjo óptico define quais os modos transversais elétricos e magnéticos (TEM) [Jackson, 1999] são permitidos existir dentro da cavidade. Geralmente são utilizados espelhos confocais uma vez que formam uma configuração estável e de fácil ajuste. O modo de menor ordem, o TEM_{00} , possui particular interesse, pois produz um feixe de seção com distribuição espacial Gaussiana de intensidade, com alta coerência, dado pela equação:

$$I_l(r) = e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}} \quad (31)$$

sendo I_l a intensidade do feixe, r a coordenada radial e w_0 a largura do feixe, distância na qual a sua intensidade decai para $1/e^2$ de seu máximo valor. Uma cavidade ressonante com arranjo óptico confocal é mostrada na Figura 3.15. Nesta, pode-se observar 2 diferentes modos TEM com suas correspondentes seções de feixe geradas. Os seus padrões de intensidade são mostrados na Figura 3.16.

As fontes de LASERs podem operar de forma uniforme no tempo, sendo denominadas de fontes de LASER contínuo ou *continuous-wave* (CW) e estando relacionadas a aplicações onde o requisito é alta energia e/ou potência média. Por outro lado, pode-se operar no modo *Q-switched* ou *giant-pulse*, onde se excita o material LASER da cavidade até que a inversão de população

atinja certo valor limite. Neste momento, permite-se que seja iniciado o processo de emissão estimulada, gerando um pulso de LASER com alta potência instantânea, mas baixa energia [Young, 1993]. Este LASER também é denominado de LASER pulsado ou *pulsed-wave* (PW).

A seguir, alguns tipos mais utilizados de fontes de LASER com modos TEM_{00} serão expostos.

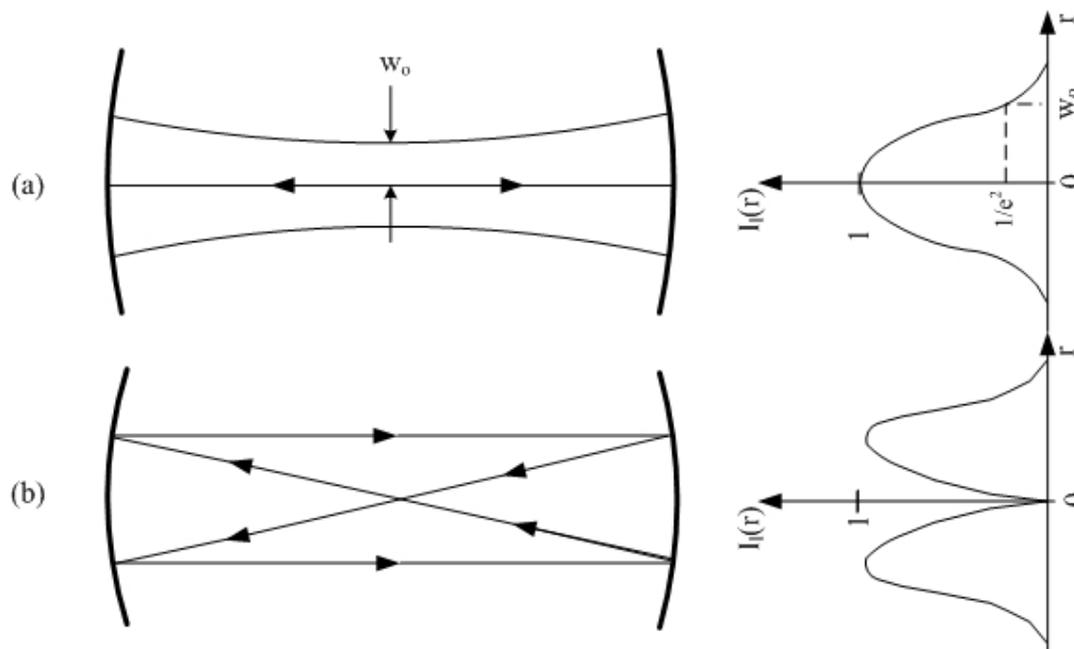


Figura 3.15 – Modos transversos em uma cavidade confocal: (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01} .

3.2.1. LASER de Hélio-Neônio (He-Ne, $\lambda=633\text{nm}$, contínuo)

O material LASER é composto por 5 partes de He para cada parte de Ne. Descargas elétricas são aplicadas pela fonte na cavidade ressonante excitando os elétrons pertencentes ao He, os quais instáveis, causam a inversão de população no Ne. Os modelos comerciais possuem potência que variam desde 1mW até 15mW. Este tipo de LASER foi muito utilizado para velocimetria mediante a sensibilização de filmes fotográficos.

3.2.2. LASER de íons de Argônio (Ar^+ , $\lambda=514\text{nm}$, contínuo)

Devido às diversas camadas eletrônicas do Ar, feixes com comprimentos de onda do azul até o final do espectro visível podem ser obtidos. Neste sentido, prismas são inseridos dentro da cavidade ressonante com intuito de possibilitar a seleção de cada um destes comprimentos de onda. No entanto, geralmente utiliza-se a linha mais importante do Ar, a qual consta no título deste sub-item.

A necessidade de excitação e ionização do átomo de Ar determina que arcos de tensão na cavidade ressonante sejam produzidos, diminuindo drasticamente sua eficiência. Contudo, potências de até 100W são obtidas nestes sistemas.

Fontes de LASER com este material têm sido largamente utilizadas em LDV e em velocimetria por processamento de imagens.

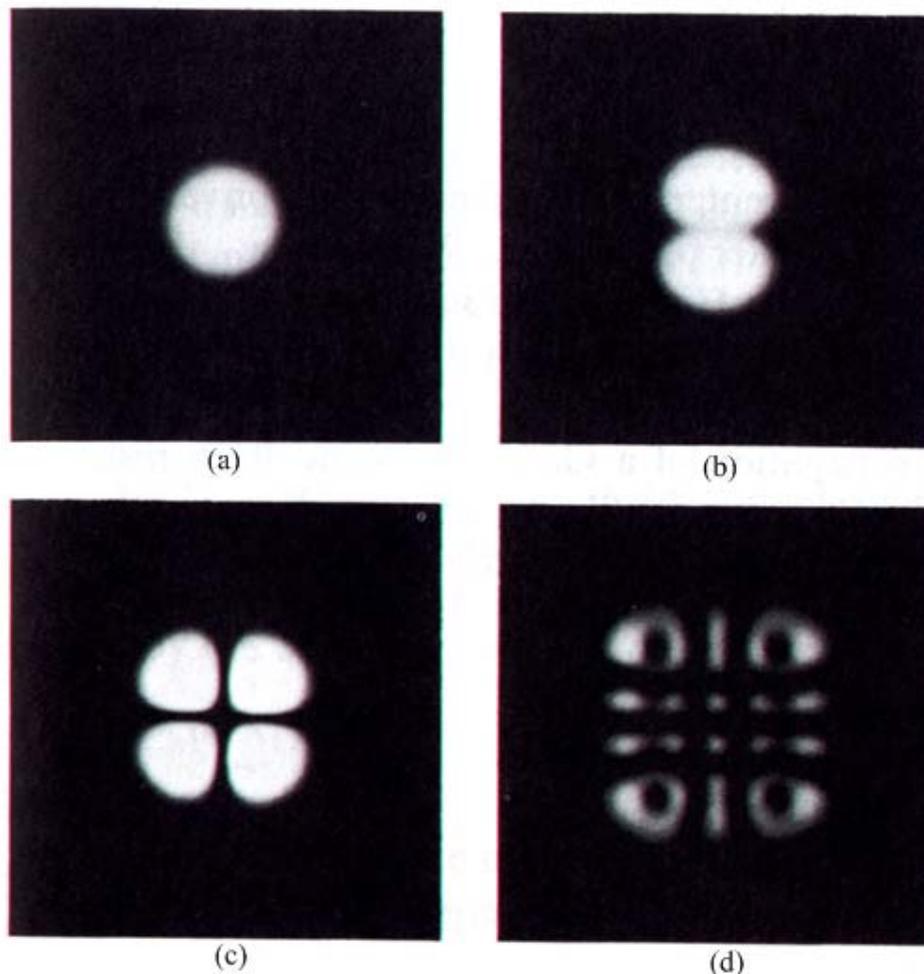


Figura 3.16 – Padrões dos modos transversos: (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01} , (c) TEM_{11} , (d) uma superposição 2 ou mais modos transversos.

3.2.3. LASER de Neodímio-YAG (Nd:YAG, $\lambda=532\text{nm}$, pulsado)

É o mais importante material LASER de estado sólido. O íon Nd^{+3} é incorporado em cristais denominados Yttrium Aluminum Garnet (YAG), o qual proporciona boas propriedades mecânicas e térmicas. Os átomos são excitados através de luz branca convencional e um sistema denominado chave de qualidade (*Q-switch*) controla o nível de energia oscilante dentro da cavidade. Desta forma, pulsos gigantes de até 70mJ (com alta potência instantânea) podem ser obtidos. Tais sistemas têm sido largamente utilizados em velocimetria por processamento de imagens.

3.2.4. LASER de semicondutores (Junções de Gálio e Arsênio, $\lambda=840\text{nm}$, contínuo)

São basicamente formados de junções PN tais como os diodos emissores de luz (LEDs). São compactos, podendo fornecer potências de até 100mW. Usualmente são empregados para aumentar a coerência de feixes produzidos por materiais do tipo Nd:YAG.

3.3. Plano de luz

Para proporcionar a análise espacial, o feixe de LASER deve ser espalhado a fim de que ilumine um volume da região de análise do sistema físico. Devido a isto é importante que a fonte de luz possua alta densidade de energia e que o volume ocupe exatamente o volume de análise do sistema físico, a fim de que o espalhamento do feixe (em consequência, da energia) não influencie e prejudique na caracterização das imagens das partículas.

Em velocimetria 2D, é idealmente interessante que tal volume possua uma espessura tão pequena quanto o diâmetro máximo das partículas presentes, formando aproximadamente um plano de LASER. Assim, é possível caracterizar somente as componentes de velocidade envolvidas neste plano, diminuindo a influência da componente transversal. A Figura 3.17 ilustra as 2 possíveis situações, de um volume de análise Z_v e de um plano de análise Δz_p .

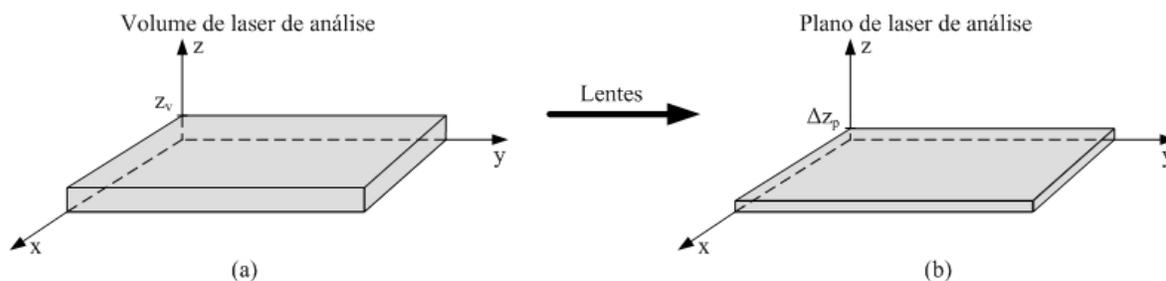


Figura 3.17 – (a) Volume de LASER, (b) plano de LASER.

O espalhamento do feixe de LASER é efetuado por lentes. A escolha de qual arranjo de lentes a ser utilizado para formar um determinado plano pode ser facilmente obtido através de aspectos cinemáticos. No caso de feixes de LASER com diâmetro suficientemente pequeno e com baixa divergência (como por exemplo, de íons de Ar), somente é necessário uma lente cilíndrica. Por outro lado, para LASERs tipo Nd:YAG, uma combinação com lentes esféricas torna-se importante para que o plano formado possua uma menor espessura.

A Figura 3.18 mostra uma configuração envolvendo lentes cilíndricas e esféricas e suas influências sobre o plano de LASER formado. Para obter um plano de largura constante, pode-se ainda utilizar uma terceira lente, com formato cilíndrico.

3.4. Partículas traçadoras

A necessidade de disseminação de partículas em escoamentos não constitui uma regra. Em muitos casos, o próprio sistema físico possui naturalmente pequenos elementos que podem ser

utilizados para validar a trajetória do fluido em escoamento. Um caso típico é o ar, onde geralmente os minúsculos grãos de pó podem ser utilizados como partículas traçadoras.

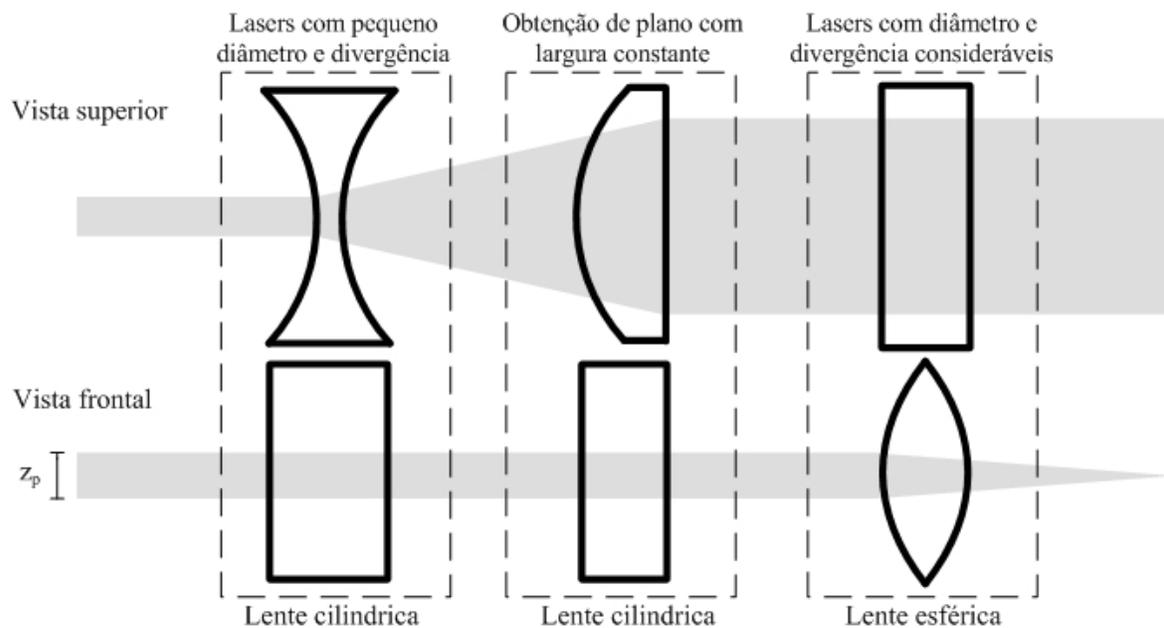


Figura 3.18 – Plano de luz formado através de um arranjo de lentes.

3.4.1. Geração e inserção das partículas no escoamento

Diferentes materiais e diâmetros de partículas traçadoras têm sido utilizados e os seus resultados apresentados em trabalhos científicos. A característica da partícula a ser utilizada está relacionada ao tipo (líquido ou gasoso) e ao regime (laminar ou turbulento) do escoamento em questão. A Tabela 3.1 mostra estes tipos de materiais utilizados para obtenção das partículas bem como seu diâmetro d_p usual e seu estado físico para utilização em escoamento de líquidos [Raffel et al., 1998]. Particularmente, materiais como vidro e alumínio permitem que geometrias muito próximas a uma esfera, com um diâmetro d_p muito pequeno, possam ser obtidas, facilitando a identificação de seu centro em sua imagem bem como a quantificação do arrasto sofrido e da luz espalhada. No entanto, este tipo de partícula apresenta valores exorbitantes, atingindo um custo de centenas de dólares por apenas poucas gramas.

Tabela 3.1 – Diferentes características de partículas utilizadas em escoamento de líquidos.

Material	Estado Físico	Diâmetro d_p (μm)
Poliestireno	Sólido	1 a 100
Alumínio	Sólido	2 a 7
Esferas de vidro	Sólido	10 a 100
Óleos	Líquido	50 a 500
Bolhas de oxigênio	Gasoso	50 a 1000

A inserção destas partículas no escoamento e sua conseqüente disseminação também estão associadas ao sistema físico em questão. Para escoamentos líquidos internos, geralmente as

partículas podem ser inseridas em um ponto do escoamento e um tempo deve-se ser esperado para que haja a sua disseminação de forma homogênea. Em escoamentos externos, deve-se anteriormente forçar a mistura das partículas no líquido e após inserir a solução para que o escoamento seja gerado.

3.4.2. Comportamento frente ao espalhamento da luz

O contraste e assim a intensidade da imagem formada está diretamente associada com a quantidade de potência luminosa espalhada pela partícula. Neste sentido, torna-se importante a escolha da partícula adequada ao invés do simples aumento da potência do feixe de LASER.

A Figura 3.19 demonstra o espalhamento do feixe de LASER frente a 3 diferentes diâmetros de partículas presentes em água. Em todos os casos pode-se observar que o maior espalhamento ocorre a 180° . No entanto, a este ângulo, não há campo de visão para obtenção das imagens e, assim, a câmera deve ser posicionada a 90° . Nesta posição, pode-se observar que a medida que o diâmetro d_p cresce, aumenta também a intensidade de luz espalhada. Estes diagramas são oriundos da teoria de espalhamento de Mie, válida apenas para sistemas físicos clássicos onde $d_p \gg \lambda$ [van de Hulst, 1957].

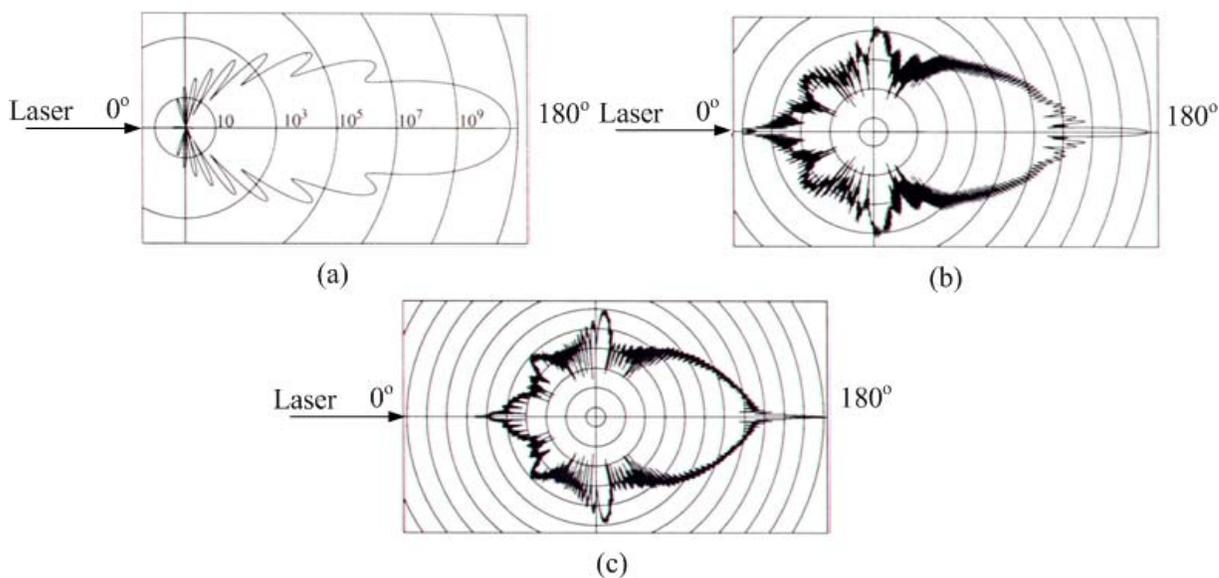


Figura 3.19 – LASER espalhado por partículas de poliestireno de diâmetro d_p igual a: a) $1\mu\text{m}$, b) $10\mu\text{m}$ e c) $30\mu\text{m}$.

3.4.3. A imagem de uma partícula

Devido ao fenômeno de difração, o diâmetro da imagem de uma partícula não é determinado unicamente por seu diâmetro geométrico. A luz espalhada por uma partícula pode ser comparada a uma fonte de luz pontual distante, cujos raios ao interagir com as lentes da objetiva formam um padrão de difração. Este padrão é constituído de círculos concêntricos cuja intensidade varia de acordo com a Função de Airy, a qual pode ser matematicamente

representada através do quadrado da função de Bessel de 1ª. Ordem [Hecht et al., 1974]. Contudo, usualmente adota-se uma aproximação Gaussiana obtendo-se o seguinte diâmetro d_{dif} devido a difração [Goodman, 1996]:

$$d_{dif} = 2.44 f_{\#} (M^{-1} + 1) \lambda \quad (32)$$

Considerando-se que as lentes utilizadas sejam ideais, então o diâmetro d_{pi} da imagem da partícula é determinado por [Adrian et al., 1985]:

$$d_{pi} = \sqrt{(M^{-1} \cdot d_p)^2 + d_{dif}^2} \quad (33)$$

Tanto a equação (32) quanto a equação (33) somente são validas para partículas presentes dentro da profundidade de campo δz das lentes [Riethmuller, 1996]:

$$\delta z = 4 \cdot (M + 1)^2 \cdot f_{\#}^2 \cdot \lambda \quad (34)$$

Conforme comentado anteriormente, a profundidade de campo δz de uma lente determina a capacidade desta ser insensível as variações da coordenada z_o do objeto (perpendicular ao plano da imagem para sistemas global e local coincidentes), mantendo a sua imagem focalizada. Sendo assim, para que as imagens das partículas não sejam formadas com distorções de foco, convém que a espessura do plano de LASER Δz_p seja menor que a profundidade de campo da lente δz . Matematicamente, é recomendável então que:

$$\Delta z_p < \delta z \quad (35)$$

Observe que as partículas desfocalizadas são naturalmente filtradas mediante este procedimento.

3.5. Dispositivo sincronizador

O dispositivo sincronizador geralmente não se faz necessário quando utilizados LASERs CW, devido a sua característica contínua de operação. A única exceção ocorre quando o usuário deseja vincular a captação das imagens a um determinado evento do sistema físico em análise.

Contudo este se torna importante quando utilizados LASERs PW para a formação do plano de análise. Nesta ocasião, o disparo do pulso de LASER deve estar sincronizado com o tempo de obturação da câmera, a fim de que a imagem seja formada.

Este dispositivo pode ser facilmente construído através de um circuito microcontrolado que analise os sinais de saída de estado e controle as entradas de disparo, tanto da câmera, quanto da fonte de LASER.

4. SUB-SISTEMA DE PROCESSAMENTO DA IMAGEM

Os elementos que compõe o SPI são mostrados na Figura 4.1. A placa de aquisição tem como função interpretar o protocolo utilizado pelo SFI, tornando o sinal de imagem $S_I(t)$ recebido em quadros $Q_j(l,c)$ inteligíveis ao programa de processamento executado em um computador.

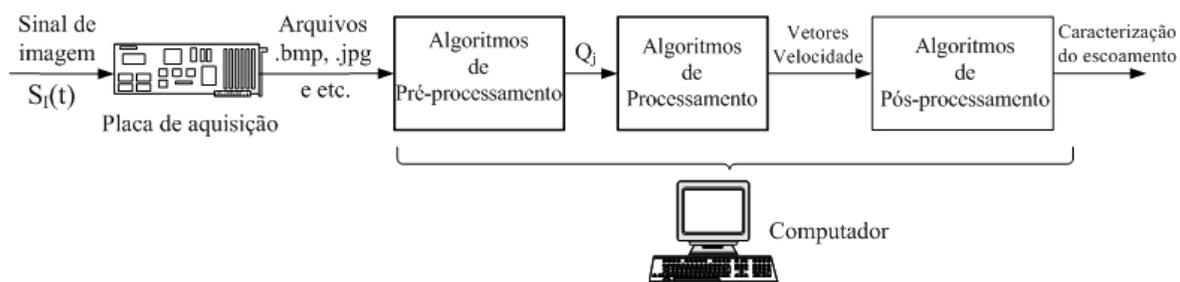


Figura 4.1 – Diagrama dos itens que compõe o SPI.

O processamento digital das imagens pode ser dividido em 3 blocos principais, os quais constituem a unidade de inteligência do sistema digital de velocimetria por processamento de imagem. Quando a imagem não pode ser diretamente processada para obtenção dos vetores velocidade, algoritmos de pré-processamento devem ser aplicados. Estes consistem em filtros para eliminação de ruído, segmentação, realce e restauração da imagem, dentre outros. Após, a imagem é aplicada aos algoritmos de processamento que visam a extração dos vetores velocidade. Por fim, algoritmos de pós-processamento são aplicados para validação dos vetores velocidade obtidos e para cálculo das grandezas que irão caracterizar o escoamento. Devido ao fato da aplicação de algoritmos de pré-processamento estar vinculada a condição local de medição e sendo a implementação de algoritmos de pós-processamento não o objetivo principal deste trabalho, a seguir irá se explorar apenas as técnicas envolvidas na captura e no processamento das imagens.

Ao longo dos anos, a variedade de equipamentos disponíveis para compor o SFI bem como o aumento de sua versatilidade de operação determinaram que inúmeros métodos de captura das imagens fossem desenvolvidos. Contribuíram para isto principalmente a possibilidade de utilização de fontes de LASER pulsados ou contínuos juntamente a câmeras com sensores CCDs de diferentes arquiteturas, altas taxas de quadros e pequenos tempos de obturação. A combinação da utilização destas características junto com a variedade das formas de sincronização da câmera com a fonte de LASER determinaram que também novas formas de processamento digital das imagens fossem empregadas para extração do campo de velocidades.

As técnicas de captura neste trabalho são originalmente divididas em *intraframe* e *interframe*. Na técnica *intraframe* toda a informação a respeito do deslocamento da partícula se

encontra dentro de um quadro capturado. Por outro lado, na técnica *interframe*, o deslocamento da partícula ao longo do tempo é analisado em 2 ou mais quadros adquiridos sucessivamente.

O fato da taxa de quadro em câmeras ser limitada, devido a fatores tecnológicos comentados no item 3.1.4, impõe que a base de tempo para cálculo do vetor velocidade em técnicas *interframe* também seja restrita. Este gargalo tem limitado o processo de medição até velocidades da ordem de 1m/s. Por outro lado, nas técnicas *intraframe*, a base de tempo utilizada é obtida do intervalo de disparo dos pulsos de LASER ou do tempo em que a câmera está com o obturador eletrônico em operação. Em ambos os casos, este valor é muito menor que o tempo pertinente a aquisição de quadros consecutivos através da técnica *interframe*, tornando esta última uma técnica poderosa para medição de fenômenos da ordem de centenas de m/s.

Os quadros presentes na Figura 4.2 demonstram a diferença na obtenção da informação pertencente ao escoamento em ambas as técnicas. Nesta, um conjunto hipotético de partículas p_1 , p_2 , p_3 , p_4 e p_5 , presentes em uma determinada posição do escoamento, tem sua trajetória analisada através de quadros capturados nas duas modalidades comentadas anteriormente.

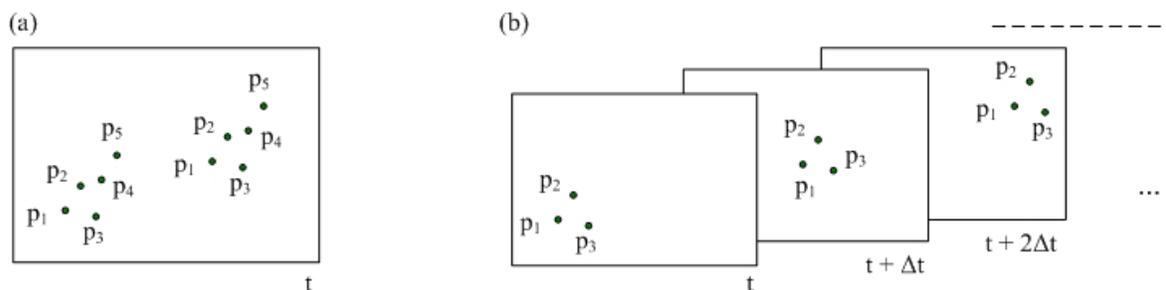


Figura 4.2 – Técnicas de captura da imagem: (a) *Intraframe*, (b) *Interframe*.

Desta maneira, a seguir, cada uma destas formas de captura serão expostas e o tipo de processamento da imagem associado será indicado. No caso particular da técnica escolhida para ser implementada neste trabalho, será realizada uma análise mais detalhada. Observe que nos sub-itens abaixo a base de tempo Δt , dependendo da situação, será constantemente redefinida, ora significando o tempo de obturação, ora o inverso da taxa de quadros T_q e ora o tempo entre pulsos de LASER.

4.1. Técnicas *intraframe*

A informação a respeito do deslocamento da partícula no escoamento em 1 quadro de imagem pode ser obtida conforme a arquitetura do CCD, a sua obturação e a fonte de LASER utilizada. Para facilitar o entendimento, dividir-se-á a análise conforme o tipo de iluminação a LASER.

4.1.1. Mediante LASER pulsado

Através deste tipo de fonte, os pulsos de iluminação devem ser estrategicamente disparados dentro do intervalo de obturação da câmera, momento no qual os elementos CCDs do sensor estão sensíveis a luz incidente para a formação do quadro. Sendo a diferença temporal entre os disparos o suficiente para que um deslocamento da imagem da partícula sobre o sensor CCD seja observado, então uma sucessão de suas imagens pode ser capturada em um mesmo quadro. É importante salientar que os pulsos devem ser os mais estreitos temporalmente possíveis para que a imagem de cada partícula seja formada fielmente, sem borrões. Também, quanto mais o pulso de LASER se aproximar de um impulso, mais precisamente o intervalo de tempo em que foram realizados os disparos poderá ser estabelecido, conferindo maior precisão a medida. O tempo de obturação não constitui uma variável importante, podendo ser o maior possível e até atingindo o tempo de formação do quadro.

O quadro obtido deve ser processado através de algoritmos de rastreamento de partículas individuais (para o caso do modo PTV) [Keane et al., 1992] ou então através da autocorrelação da área de interesse (para o caso do modo PIV) a fim de que a distância percorrida na imagem seja computada [Adrian et al., 1990]. Assim, a velocidade pode ser diretamente obtida mediante a divisão pelo tempo Δt entre os disparos dos pulsos de LASER, o qual é conhecido.

A sincronização dos disparos dos pulsos de LASER em relação a formação de um quadro Q_j da imagem, para os diferentes tipos de arquitetura de CCDs existentes, pode ser visualizada na Figura 4.3. Para o caso de sensores CCDs do tipo *full-frame*, *frame* e *progressive-scan interline transfer* a seqüência de pulsos de iluminação deve ser estabelecida no tempo pertinente a obturação de cada quadro. Contudo, devido a não distinção entre a imagem formada em cada pulso de LASER, o sentido do vetor velocidade não pode ser determinado. Por outro lado, utilizando sensores CCDs do tipo *interlaced-scan interline transfer*, essa ambigüidade é removida uma vez que cada pulso é efetuado na formação de cada campo pertencente ao quadro. Como o campo ímpar é formado primeiro que o par, o sentido da trajetória percorrida pela partícula pode ser conhecido e o vetor velocidade completamente validado.

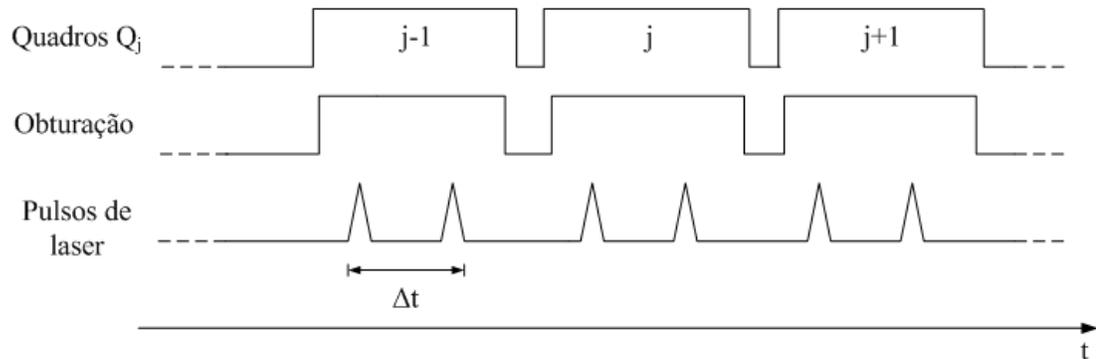
4.1.2. Mediante LASER contínuo

Quando utilizada uma forma contínua de iluminação, ao contrário do caso anterior, o tempo destinado a obturação torna-se o parâmetro mais importante para a captura *intraframe* das imagens. Devido ao fato de utilizá-lo como base de tempo, torna a medida muito mais precisa em relação a anterior, a qual utiliza LASER pulsado, pelos motivos já comentados acima.

Para os casos de arquiteturas CCDs do tipo *full-frame*, *frame* e *progressive-scan interline transfer* o tempo de obturação deve ser o suficiente para que a trajetória da partícula proporcione

um rastro na imagem. Tal fato ocorre pois, devido a iluminação ininterrupta da partícula, esta espalha continuamente ao longo de sua trajetória o LASER incidente. Estando o obturador aberto, esta radiação espalhada é integrada ao longo do tempo, proporcionando que seu histórico seja armazenado mediante a sensibilização de pixels sucessivos. A quantidade de pixels sensibilizados relacionado com o tempo destinado à obturação possibilitará o cálculo do vetor velocidade.

(a) *Full-Frame transfer, Frame transfer e Progressive-scan Interline transfer*



(b) *Interlaced-scan Interline transfer*

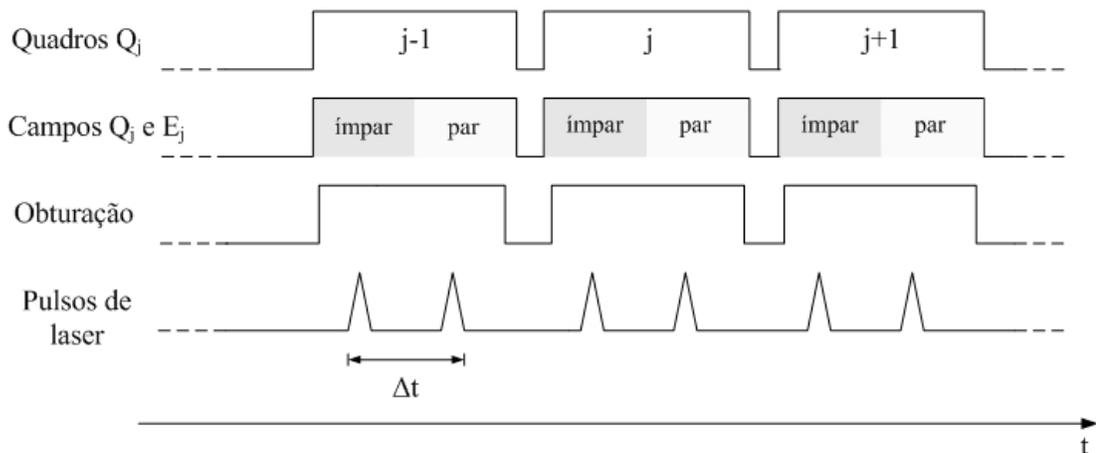


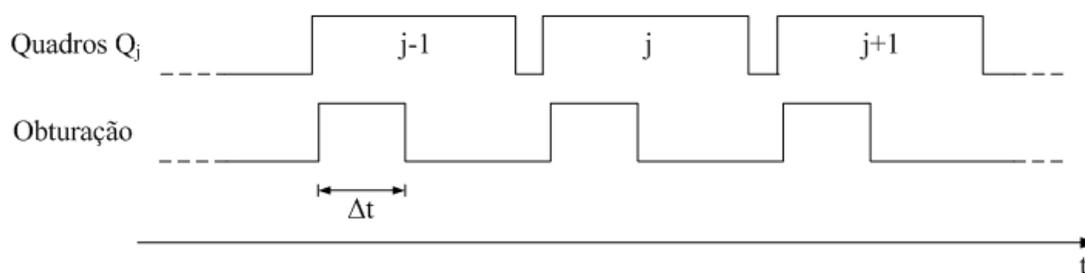
Figura 4.3 – Sincronização do LASER pulsado em relação ao tempo de obturação para os 4 tipos de arquiteturas de sensores CCD na técnica *intraframe*.

No emprego de sensores CCDs do tipo *interlaced-scan interline transfer*, por outro lado, o tempo de obturação idealmente deve ser o menor possível, propiciando que a imagem da partícula seja capturada intercaladamente em cada campo sem nenhuma espécie de rastro. A junção do campo ímpar ao par que formará o quadro propicia que algoritmos de rastreamento possam ser adotados e assim que a velocidade seja computada.

O diagrama temporal da Figura 4.4 demonstra, de forma qualitativa, o processo descrito nos parágrafos anteriores.

Estas técnicas *intraframe* de captura de imagem utilizando LASER contínuo possuem o nome de rastro e campos entrelaçados, respectivamente [van der Laan et al., 1998]. As suas imagens capturadas típicas podem ser visualizadas na Figura 4.5. Nesta pode-se observar visivelmente a formação do rastro e dos pares de partículas. O autor destas foi um dos pioneiros em vislumbrar a importância do vínculo da arquitetura do sensor CCD no tipo de medição, tendo a perspicácia em desenvolver duas técnicas novas com aplicação em velocimetria de fenômenos com centenas de metros por segundo. Os métodos para processamento das imagens capturadas podem ser obtidos em [van der Laan, 2001] e suas incertezas são melhor detalhadas em [van der Laan et al., 2002].

(a) *Full-Frame transfer, Frame transfer e Progressive-scan Interline transfer*



(b) *Interlaced-scan Interline transfer*

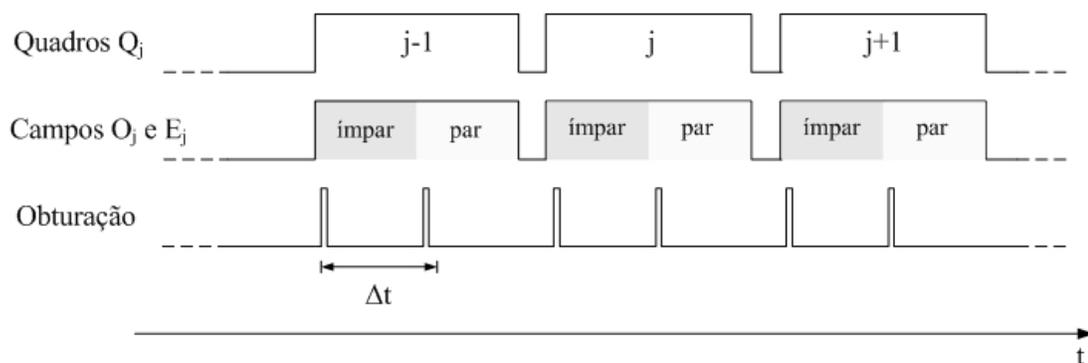
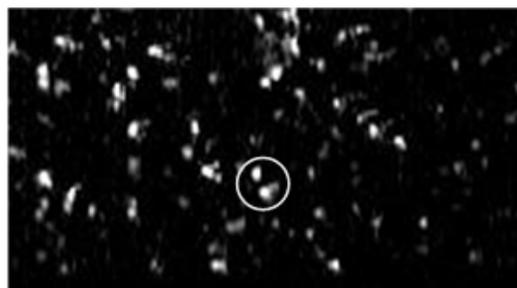


Figura 4.4 – Variação do tempo de obturação na técnica *intraframe* com LASER contínuo.



(a)



(b)

Figura 4.5 – *Intraframe* LASER contínuo: (a) Rastro, (b) Campos entrelaçados.

4.2. Técnicas *interframe*

Devido ao fato das informações relativas ao escoamento serem obtidas em mais de um quadro, a arquitetura do sensor CCD utilizado deixa de ser um parâmetro importante nesta técnica *interframe* de captura.

A imagem da partícula capturada deve ser a mais fiel possível, sem nenhuma espécie de rastro. Para tanto, no caso de utilização de LASER contínuo, o tempo de obturação em cada quadro, conforme é demonstrado qualitativamente na Figura 4.6, deve ser idealmente o menor possível. A variação na posição da partícula em um determinado quadro Q_j em relação a um Q_{j-1} juntamente com a base de tempo dada pelo tempo de aquisição de um quadro, possibilitará o cálculo do vetor velocidade.

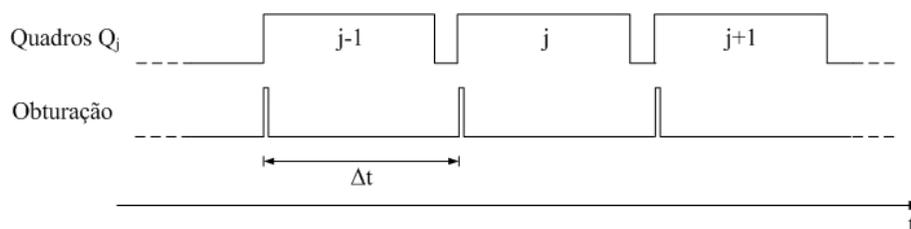


Figura 4.6 – Captura *interframe* das imagens mediante LASER contínuo.

No caso de emprego de iluminação a LASER pulsado, o tempo em que o obturador permanece em aberto deve ser o suficiente para que 1 pulso de LASER seja efetuado, sensibilizando o sensor CCD. A menos da base de tempo utilizada, a qual agora é dada pelo tempo entre os pulsos sucessivos, o princípio de obtenção do vetor velocidade é o mesmo que o caso anterior. Contudo, estes pulsos de LASER podem ser estrategicamente posicionados para que o intervalo de tempo em que são efetuados seja fortemente minimizado. Tal fato ocorre quando um pulso é disparado no término de um quadro Q_{j-1} e outro é disparado no início de um quadro Q_j . Esta técnica é conhecida como *frame straddling* [TSI Incorporated, 1995]. Ambas situações estão ilustradas no diagrama temporal Figura 4.7.

Para o caso de modo PTV, visando o processamento das imagens, algoritmos de rastreamento da partícula devem ser empregados entre os quadros capturados do escoamento. Informações a respeito da implementação de um SVPI, modo PTV, podem ser obtidas em [Gutkoski, 2001].

Visando a obtenção de uma maior densidade superficial de vetores, em muitos casos, utiliza-se o modo PIV para obtenção das imagens do escoamento. Faz-se então necessária a utilização de um método estatístico para que a trajetória do grupo de partículas ou de um padrão de interesse seja computada. Este padrão de interesse corresponde a uma pequena parte do primeiro quadro Q_{j-1} adquirido, de tal forma que, mediante um pequeno intervalo Δt , este não se descaracterize completamente e esteja localizado em outra posição no quadro Q_j . Deve-se então

correlacionar o padrão determinado em Q_{j-1} com uma área maior pertencente ao quadro Q_j . O ato de correlacionar significa mensurar a semelhança do padrão selecionado em Q_{j-1} em diversas posições de Q_j . Correlacionar de forma cruzada determina que necessariamente o padrão selecionado deve ser verificado em quadros Q_{j-1} e Q_j distintos, ou seja, neste caso, obtidos em tempos diferentes. A diferença espacial entre as coordenadas que localiza este padrão tanto em Q_j quanto em Q_{j-1} determina a sua distância percorrida na imagem.

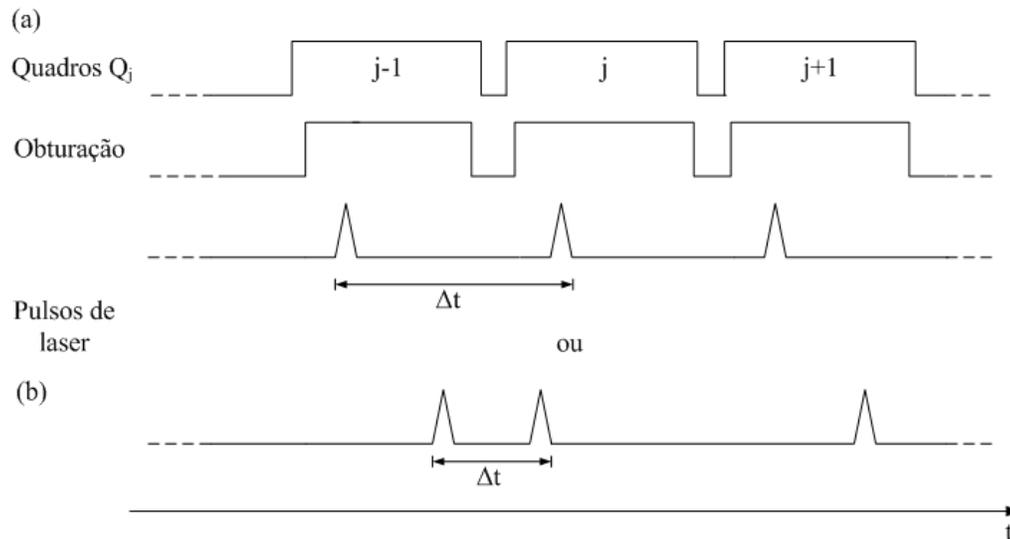


Figura 4.7 – Captura *interframe* das imagens: (a) Convencional, (b) *Frame straddling*.

A Figura 4.8 ilustra qualitativamente o caso comentado acima, onde uma determinada área $I_{j-1}(x,y)$ do quadro Q_{j-1} capturado em um tempo t é selecionada e, sobre uma área de interesse maior $I_j(x,y)$ em Q_j capturado em $t+\Delta t$, é linearmente deslocada buscando a posição onde haja maior semelhança.

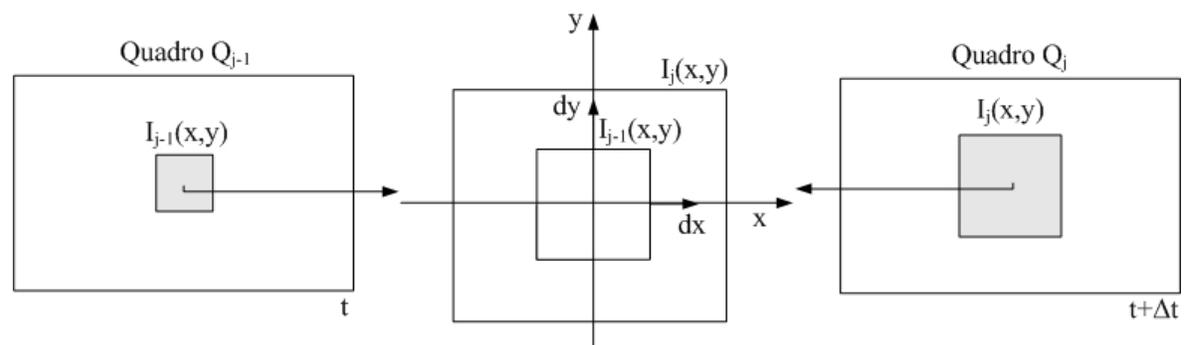


Figura 4.8 – Princípio de semelhança de um padrão em quadros na técnica *interframe*.

A distância percorrida é obtida através da utilização da correlação cruzada entre $I_{j-1}(x,y)$ e $I_j(x,y)$. Matematicamente este operador estatístico $R_{I_{j-1}I_j}$ é definido para funções reais pela equação abaixo [Bendat et al., 1986]:

$$R_{I_{j-1}I_j}(\alpha, \beta) = I_{j-1}(x, y) \circ I_j(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{j-1}(x, y) \cdot I_j(x + \alpha, y + \beta) dx dy \quad (36)$$

Sendo α o deslocamento na direção x, β o deslocamento na direção y e j o indexador temporal do quadro.

Pode ser visto que $R_{I_{j-1}I_j}$ é uma nova função, dependente agora do deslocamento efetuado e correspondente a um novo espaço, denominado espaço de correlação entre o padrão $I_{j-1}(x,y)$ e o padrão $I_j(x,y)$. A Figura 4.9 demonstra graficamente a atuação deste operador matemático e o espaço de correlação formado, determinado pelas variáveis α e β . Na posição, por exemplo, denominada de 1, $I_{j-1}(x,y)$ é correlacionado com $I_j(x,y)$ e o valor resultante desta operação é armazenado na coordenada (α,β) corresponde, também simbolizada por 1 no plano de correlação. O mesmo procedimento ocorre para as posições 2, 3, 4 e 5 apresentadas nesta mesma figura. O plano de correlação por completo é formado considerando todos os deslocamentos α e β possíveis de serem efetuados.

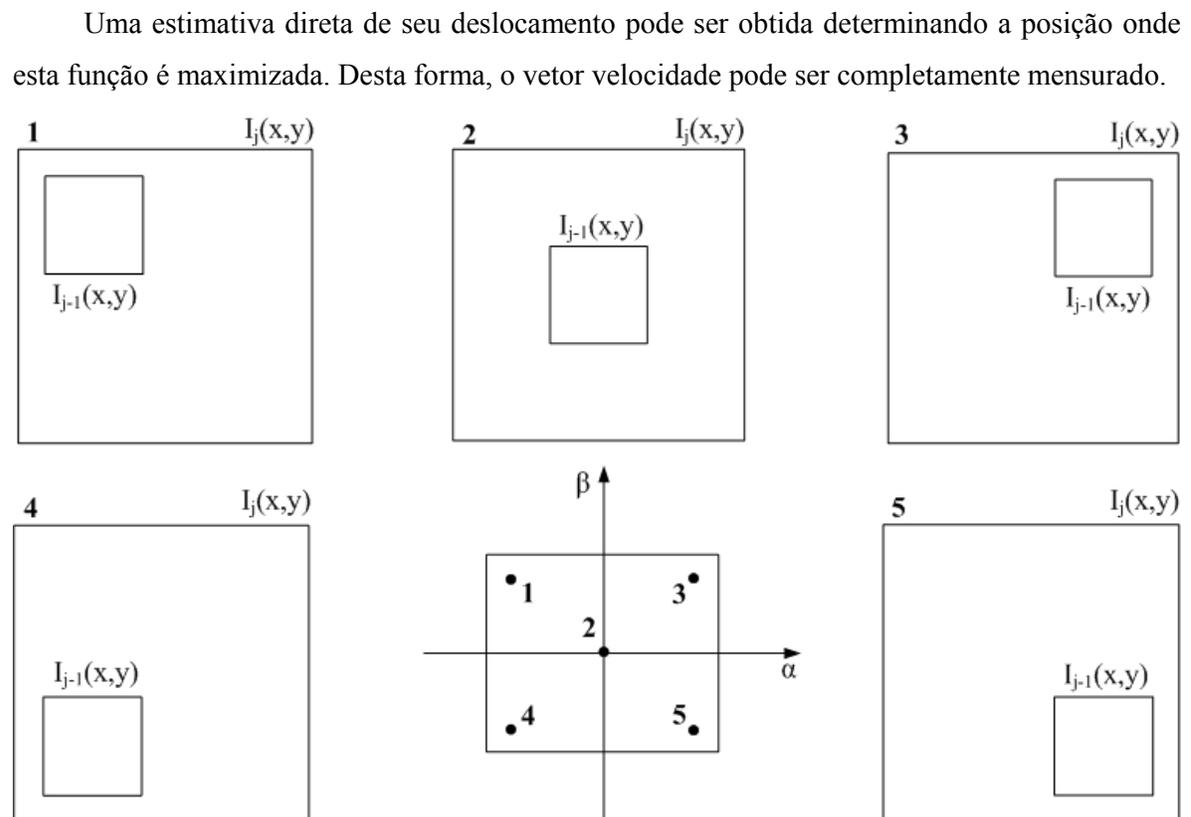


Figura 4.9 – Plano de correlação entre $I_{j-1}(x,y)$ e $I_j(x,y)$.

5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE VELOCIMETRIA 2D POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O princípio da técnica de velocimetria por processamento de imagens e os conceitos envolvidos na sua utilização foram apresentados nos capítulos anteriores. Estes servem de suporte para o projeto e a implementação de um SVPI bem como para a otimização de alguns de seus parâmetros caso necessário.

Os equipamentos utilizados no SFI foram selecionados a partir da disponibilidade existente no LAMAC. Alguns foram adquiridos recentemente no projeto PADCT 62.0017/99-6-SFA.4 e até então não utilizados. Isto justifica por si só o seu emprego.

Para o SPI, devido à maior densidade superficial de vetores proporcionada e a inexistência de trabalhos desenvolvidos nesta Universidade, escolheu-se o modo PIV com processamento digital das imagens capturadas.

5.1. Implementação do Sub-sistema de Formação da Imagem

Embora tenha-se enfatizado somente os equipamentos necessários, uma série de outros dispositivos devem ser utilizados para que o SFI seja montado. Isto envolve tripés para suporte da câmera, posicionadores x-y para ajuste, estruturas metálicas para fixação e outras que serão descritas a seguir. Muitas destas foram adquiridas no mercado e outras fabricadas com o auxílio da Prefeitura Universitária do Campus do Centro, no setor de Serralheria.

5.1.1. Câmera com sensor eletrônico de imagem utilizada

Utilizou-se uma câmera com uma taxa de quadro T_q de captura elevada do fabricante Redlake MASD, antiga Kodak, modelo MotionMeter 500, cuja foto consta na Figura 5.1. O sensor CCD empregado é o modelo TC237 pertencente a Texas Instruments, com características detalhadamente exploradas em seu *datasheet* [Texas Instruments Incorporated, 2001]. Seus pixels são quadrados, sensíveis a tons de cinza, quantizados em 8bits e com dimensão lateral de $l_{CCD}=7.4\mu\text{m}$. Estes estão arrançados em colunas de $n_c=658$ pixels e linhas de $n_l=496$ pixels, possuindo tanto o modo *progressive-scan* ou *interlaced-scan* de leitura, com baixo tempo de reset e obturação eletrônica de 1/60 a 1/50000s. A curva de responsividade espectral deste sensor consta no Apêndice I. Sobre este sensor é utilizado um filtro, modelo CM500, para que os comprimentos de onda maiores e igual ao infravermelho sejam atenuados. O infravermelho é irradiado por qualquer corpo com temperatura não nula, constituindo assim um nível de ruído intrínseco a captura da imagem e que pode denegrir a sua qualidade, mediante efeitos de saturação no sensor CCD. A resposta espectral deste filtro consta também no Apêndice I.

Para transmissão, esta câmera possui uma saída de vídeo analógico ou no padrão RS-170 ou no padrão PAL-M, escolhidos mediante configuração. Também, esta dispõe de saídas e

entradas para sincronização da captura das imagens. No entanto, dentre outras funcionalidades presentes e que estão detalhadamente descritas no manual [Redlake MASD, 2001], há uma que merece ressaltar, pois se tornou decisiva na implementação do presente SVPI. Ao projeto desta câmera foi agregado um buffer de memória que permite o armazenamento de até 64kbytes de dados. Isto propicia que imagens sejam capturadas com alta taxa de quadros T_q e armazenadas rapidamente. As taxas de quadro podem ser programadas em 60Q/s, 125Q/s, 250Q/s e 500Q/s, constituindo um avanço em relação as usuais que operam a 30Q/s. Infelizmente, devido a enorme quantidade de informação agregada a estas altas taxas de quadro, o fabricante restringiu a leitura a apenas uma área composta por $n_c=292$ e $n_l=220$ pixels do sensor CCD com, segundo a equação (27), um $RAQ \approx 4/3$. Posteriormente, estas imagens podem ser lidas e então transferidas através da saída analógica para que sejam armazenadas em um computador ou em algum outro sistema de vídeo. Também, estas imagens podem ser visualizadas localmente através de um visor de LCD (Liquid Cristal Display) de 3 1/2" presente na câmera.



Figura 5.1 – A câmera Redlake MotionMeter 500.

A Figura 5.2 ilustra o diagrama temporal do armazenamento das imagens no buffer de memória a uma $T_q=500Q/s$. Nesta taxa, até 1024 quadros podem ser armazenados, correspondendo a um tempo de aproximadamente 2s de análise do escoamento. Cada quadro Q_j capturado do escoamento é sucessivamente armazenado em cada buffer até o completo preenchimento da memória, quando o processo de armazenamento reinicia, subscrevendo os dados anteriores.

A esta câmera foi fixada uma objetiva Pentax modelo C60812 com encapsulamento c-mount, zoom e regulagem da íris manual. A sua distância focal f pode ser variada de 8 a 48mm,

e o seu número $f_{\#}$ é dado por $f_{\#}=f/1,0$. Com as estes parâmetros, a menor aproximação possível do objeto prevista no manual é de 1,2m. Cabe salientar aqui que, devido a não utilização da área total do sensor CCD pela câmera, nem todas as lentes com encapsulamento c-mount podem ser nesta utilizada, com risco de promover distorção. Adotou-se, portanto, este modelo de objetiva por recomendação direta do fabricante. Maiores detalhes podem ser encontrados em seu manual [Pentax, 1998].

A magnificação M para uma determinada partícula na posição z_o é dada pela equação (22). No entanto, usualmente é mais fácil determiná-la em função das dimensões perpendiculares a z , presentes no plano da imagem. Por semelhança geométrica, considerando a Figura 3.4, pode-se então reescrever (22) através de:

$$M = \frac{z_o}{d} = \frac{d_f}{d_{pix} \cdot l_{CCD}} \quad (37)$$

sendo d_f um dimensão de referência do sistema físico analisado em unidade do SI a escolher e d_{pix} é sua distância correspondente em pixels na imagem.

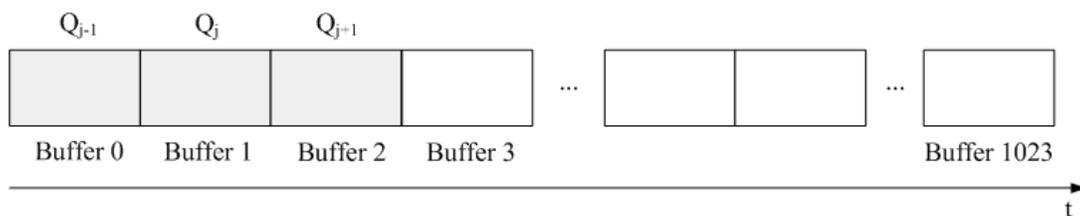


Figura 5.2 – Armazenamento dos Q_j em buffers na Redlake MotionMeter 500.

Para suporte da câmera foi utilizado um tripé de ferro, o qual se apresentou imune a vibrações. A este suporte foi aderida uma peça L confeccionada também em ferro. A ponta desta peça foi presa a um trilho Optron TR1 no qual a câmera foi fixada mediante um carro Optron C1. O tripé de ferro permite que o braço em L seja posicionado a qualquer ângulo. O carro permite que a câmera seja deslocada radialmente ao longo do braço. Este arranjo é mostrado na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

Nos ensaios preliminares observou-se uma grande distorção nas imagens capturadas. Uma inspeção cuidadosa verificou que o problema residia no filtro CM500 onde uma substância pastosa estava presente. Sobre ampliação de até 50X ao microscópio, percebeu-se também erupções em certas partes de sua superfície, cujas fotos constam no Apêndice II. A hipótese mais provável é de que, na fabricação da câmera, não tenha sido efetuado o processo de vácuo, permitindo que o ar presente sofresse condensação devido as variações da temperatura no ambiente. A umidade interna propiciou que fungos se instalassem e erodissem a lente.

Felizmente, após limpeza com um produto abrasivo, os efeitos irreversíveis causados pelo fungo a lente não se mostraram influentes na qualidade das imagens capturadas.



Figura 5.3 – Vista panorâmica do sistema de fixação.

5.1.2. Fonte de luz utilizada

As partículas disseminadas no escoamento foram iluminadas através de uma fonte de LASER contínuo do fabricante Spectra-Physics modelo 2016. Esta fonte utiliza como material LASER íons de Argônio, cujo comprimento de onda principal de emissão corresponde a uma banda estreita no entorno de $\lambda=514\text{nm}$ (tonalidade verde), em uma cavidade ressonante com comprimento $L=0.96\text{m}$. Um campo magnético é aplicado a cavidade ressonante proporcionando um feixe colimado com $w_0=2\text{mm}$, divergência de 0.5mrad e com potência de até 20W . Devido a alta potência consumida, esta fonte de LASER é dotada de uma fonte de alimentação própria e de um sistema de refrigeração a água com vazão mínima de 8.4l/min . Esta água é retirada da rede de abastecimento, filtrada e bombeada para circulação interna ao redor da cavidade ressonante.

A fonte de LASER é posicionada sobre um carro DANTEC e o feixe de LASER produzido é então inserido em um dispositivo ótico composto de divisores óticos também da DANTEC e

acoplado a um guia de onda tipo fibra-ótica, o qual é utilizado como sonda. Esta sonda permite flexibilidade na utilização do feixe de tal forma que este possa ser aplicado, em conjunto com a lente cilíndrica (descrita no item a seguir) no escoamento para a formação do plano de iluminação.

A Figura 5.5 mostra em detalhe a fonte de LASER utilizada bem como o divisor ótico e o carro DANTEC.

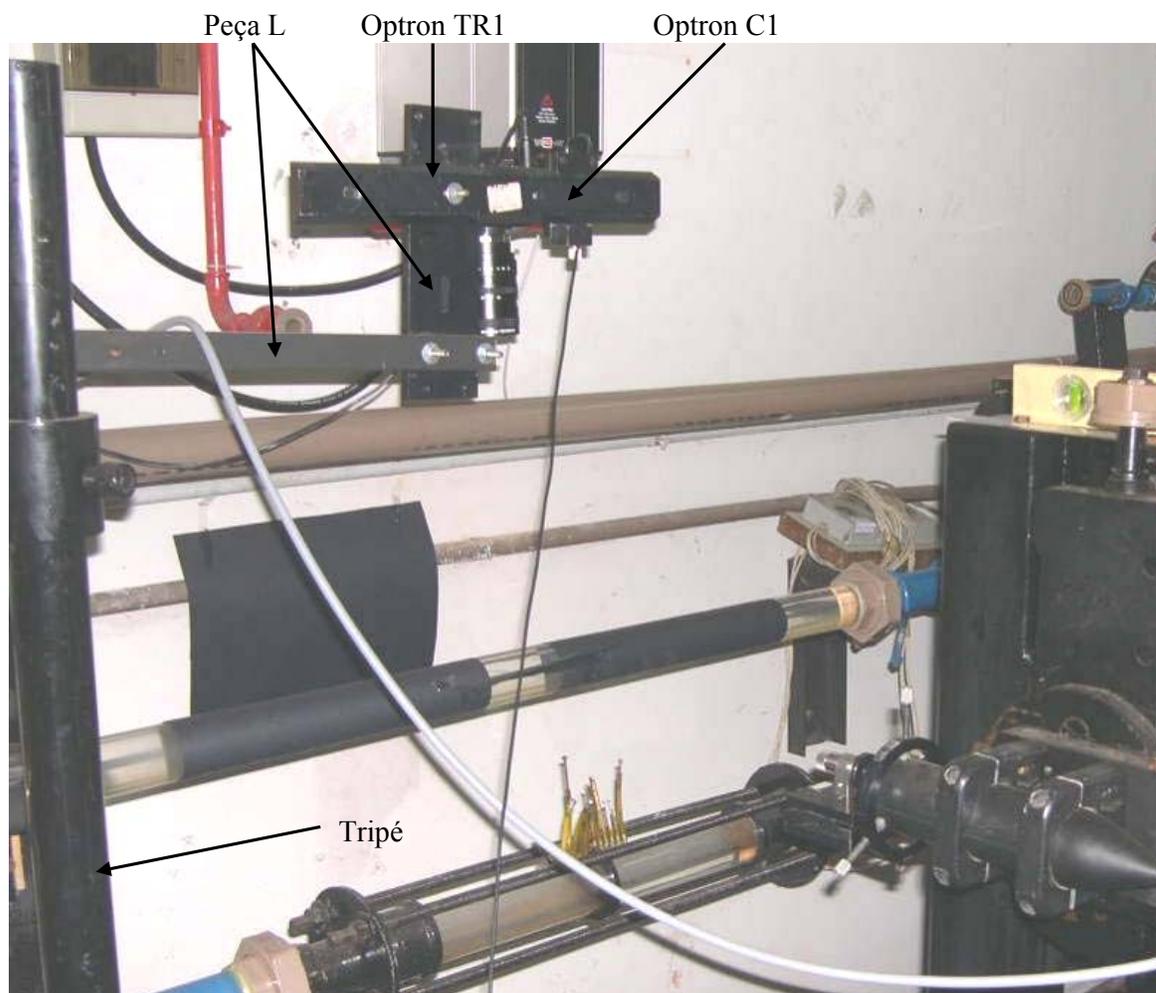


Figura 5.4 – Ampliação no sistema de fixação utilizado para a câmera.

5.1.3. Plano de luz utilizado

O plano de luz foi obtido mediante a utilização de uma lente cilíndrica DANTEC, modelo 3060. Esta foi montada sobre um translador Optron TX1 com regulagem de 1 dimensão e fixada a ponteira de LASER através de um suporte de 3 pontos Optron SL1. Assim, pode-se precisamente posicionar o feixe de LASER de tal modo que a sua reflexão fosse mínima perante a lente. A Figura 5.6 expõe o sistema de fixação tanto da sonda LASER quanto da lente cilíndrica DANTEC 3060. O plano de LASER obtido possui espessura da ordem de:

$$\Delta z_p \cong 2mm \quad (38)$$

5.1.4. Partículas traçadoras utilizadas

As partículas utilizadas são constituídas de polietileno, material cuja densidade possui o valor $\rho_p = 0,92g/cm^3$, a qual é próxima a da água. Desta forma, os efeitos oriundos do desequilíbrio da força de empuxo e da força gravitacional podem ser desprezados em regimes altamente turbulentos.

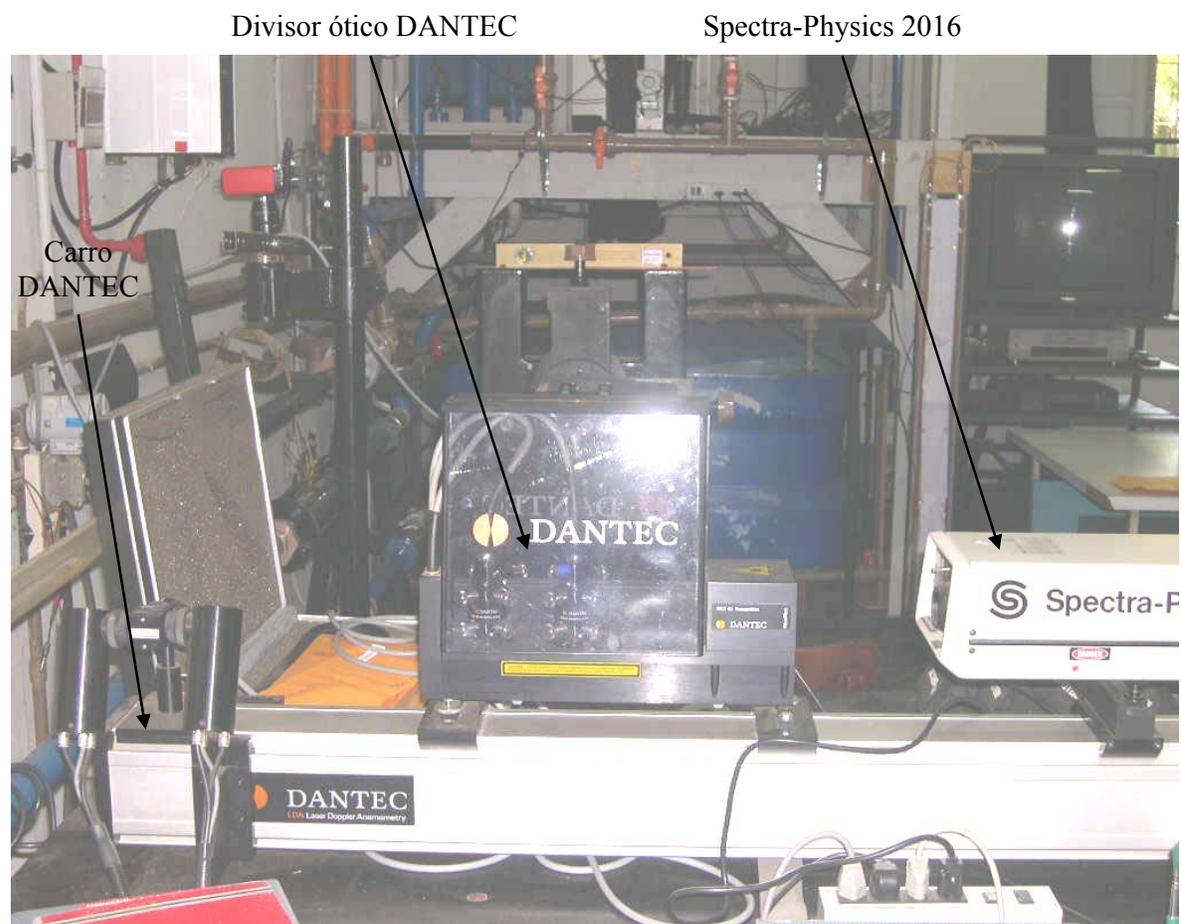


Figura 5.5 – Fonte de LASER utilizada.

Tratando-se de um material obtido junto a indústria de polímeros, uma grande variedade de diâmetros d_p está presente. Uma análise granulométrica de sua composição, realizada junto ao Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS, consta no Apêndice III. Pode-se observar que o diâmetro médio ocorre para partículas com valores de $d_p=159,17\mu m$ e o diâmetro a 50% para valores de $d_p=152,46\mu m$. A sua baixa frequência acumulada para valores menores que $60\mu m$ impediu que sua seleção pudesse ser efetuada para utilização no escoamento.

Pelo mesmo motivo anterior, a geometria das partículas possui uma forma arbitrária. As suas fotos, realizadas com ampliação ótica de 50X, 100X e 200X ao microscópio junto ao

Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRGS, constam no Apêndice IV.

Por último, o seu comportamento frente ao espalhamento de luz não foi efetuado devido ao não conhecimento da existência de equipamentos na UFRGS para executar tal tarefa.

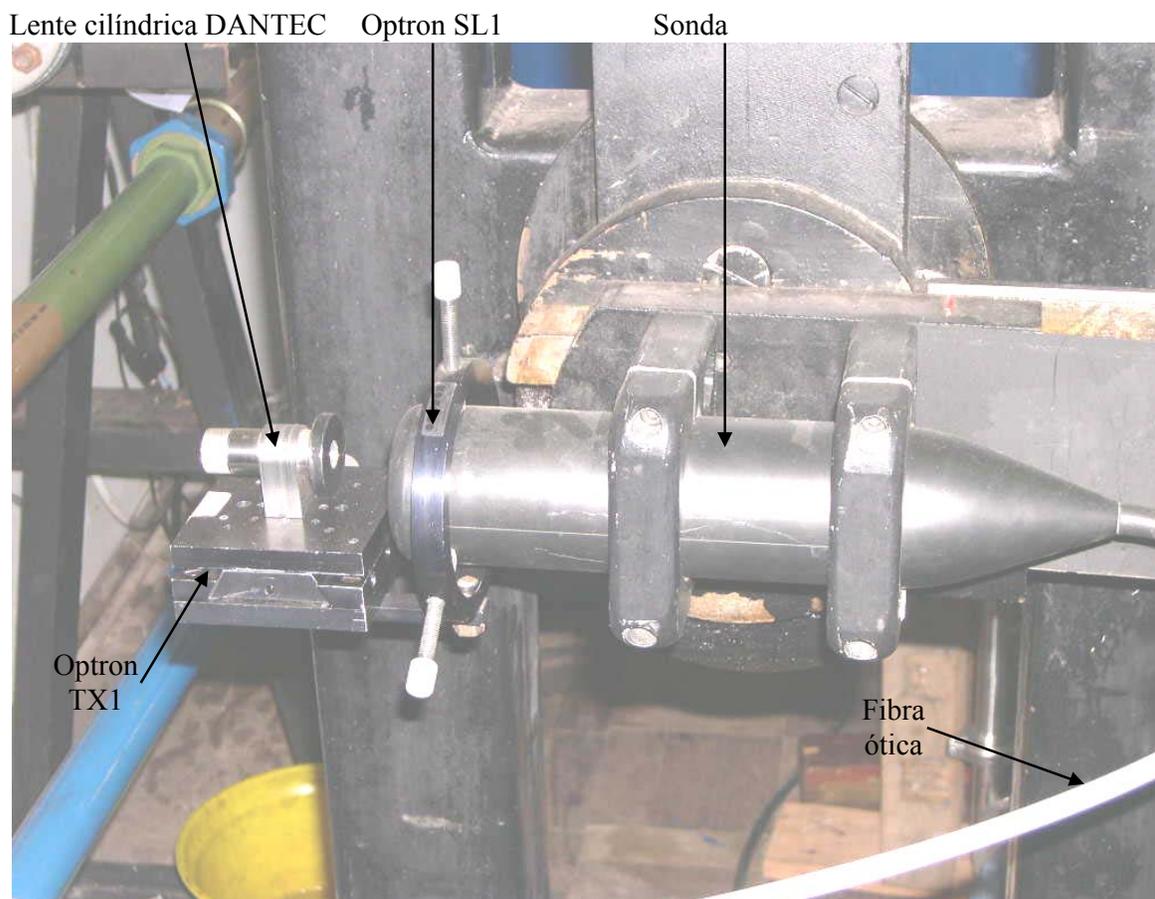


Figura 5.6 – Dispositivos utilizados para acoplamento da lente cilíndrica ao LASER.

5.2. Implementação do Sub-sistema de Processamento da Imagem

O sinal de vídeo proveniente da câmera foi transmitido no padrão RS-170 e digitalizado mediante a placa de aquisição EPIX 4MEG VIDEO Modelo 12. A taxa de amostragem interna de até 50MHz aliada a possibilidade de configuração dos parâmetros de temporização permite que protocolos não usuais utilizados em câmeras na indústria sejam configurados, assegurando compatibilidade. Assim, taxas T_q de até 9000Q/s para quadros com $n_c=32$ e $n_l=32$ pixels são possíveis. Também, são permitidas até 16000 linhas por campo ou quadro e até $n_c=8000$ pixels.

Esta placa é instalada junto ao barramento ISA (Industry Standard Architecture) presente na placa-mãe de um computador Pentium 166 MHz, sendo acessada mediante aos drivers presentes no programa 4MIPTM, fornecido pelo fabricante. As imagens podem ser então visualizadas e até mesmo processadas mediante uma série de algoritmos presentes. Ao final

podem ser armazenadas através dos mais diversos padrões como JPEG (Joint Photographic Experts Group), GIF (Graphics Interchange Format) e BMP (Bit Map), dentre outros. A versão disponível deste programa pode apenas ser executada sobre o sistema operacional Windows 95.

Devido a esta alta taxa de amostragem interna utilizada, os quadros Q_i de 292x220 pixels transmitidos pela câmera Redlake MotionMeter 500 tiveram de ser configurados no programa 4MIPTM para aquisição como 624x470 pixels. Observe que não houve aumento de resolução e sim apenas um incremento de pixels devido ao fato da taxa de amostragem utilizada na placa de aquisição ser maior que a taxa empregada na leitura do sensor CCD pela câmera Redlake MotionMeter 500. Este processo foi executado sobre orientação do fabricante, a EPIX.

A utilização de linguagens de mais baixo nível sempre tem como objetivo a otimização dos algoritmos e o acesso a periféricos de um computador. Desta forma, pode-se obter códigos mais enxutos, com tempos de execução menores, bem como maior determinismo temporal, respectivamente. Sem mencionar a portabilidade, de grande valor quando se deseja uma ferramenta comercial. No entanto, nem sempre estes são requisitos imprescindíveis. Em muitos casos, principalmente no meio acadêmico, deseja-se o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, sendo apenas necessário a validação dos métodos e dos modelos desenvolvidos na pesquisa. Por estes motivos, linguagens de script têm sido largamente empregadas no meio científico em detrimento de linguagens de baixo nível como C. Esta última é mais utilizada na implementação de programas comerciais, onde técnicas de engenharia de software como UML (Unified Modeling Language) desempenham papel fundamental no reaproveitamento do código.

Para implementação do programa de processamento das imagens utilizou-se a plataforma MATLAB (Matrix Laboratory), propriedade da Mathworks, em uma em versão 6.0 R12 de utilização livre para estudantes. O MATLAB, com larga utilização no meio científico, disponibiliza uma linguagem de *script* que propicia o desenvolvimento direto do objetivo, encurtando o que se denomina de ciclo de prototipação de uma ferramenta. O tratamento matricial das variáveis aliado às muitas funções de interface e composição de gráficos potencializa a implementação e validação de algoritmos complexos envolvendo matemática avançada. Utilizou-se como bibliografia de apoio os manuais disponibilizados pela Mathworks e os livros [Hanselman et al., 1999][McClellan et al., 1998].

A seguir, os algoritmos implementados no processamento digital das imagens capturadas na técnica *interframe* modo PIV serão descritos.

5.2.1. Técnica *interframe* através de métodos estatísticos

O diagrama de bloco do programa para o processamento digital das imagens desenvolvido consta na Figura 5.7. Este consiste em etapas de pré-processamento, processamento e pós-

processamento dos quadros capturados do escoamento. As variáveis que devem ser inseridas como argumento bem como as variáveis geradas como saídas também estão indicadas nesta figura. A variável NOMEDIR armazena o diretório que contém as imagens, VETREC armazena o vetor de recorte da imagem, AINT corresponde a dimensão em pixel da área de interesse selecionada, GRAD determina o espaçamento em pixels entre duas áreas de interesse consecutivas, FE determina o fator de escala em questão e T_q a taxa de quadros utilizada nas imagens capturadas.

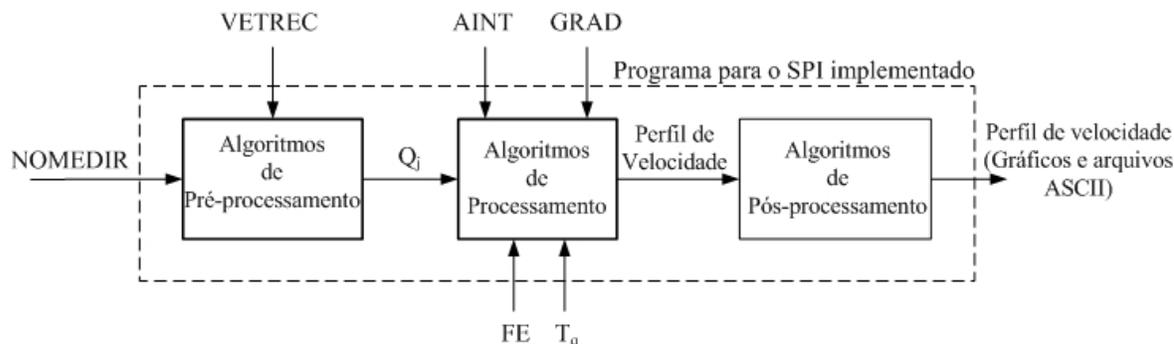


Figura 5.7 – Topologia do programa desenvolvido com suas entradas e saídas.

A seguir, descrever-se-á, separadamente, cada um dos blocos.

5.2.1.1. Algoritmos de pré-processamento desenvolvidos

A seqüência de algoritmos para pré-processamento dos quadros provenientes do escoamento é mostrado na Figura 5.8. O zelo na captura das imagens, cujo procedimento será descrito no capítulo seguinte, permitiu que estas possuíssem qualidade tal que não houvesse necessidade de aplicação de nenhum filtro anti-ruído.

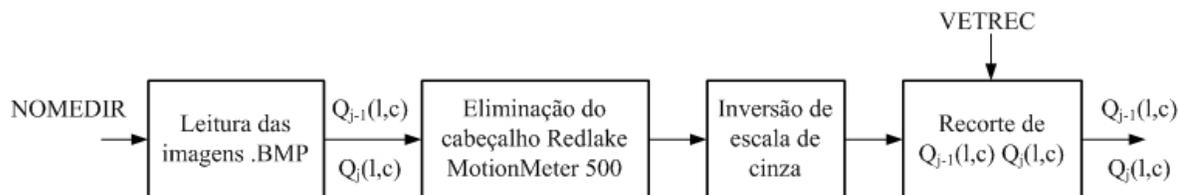


Figura 5.8 – Algoritmos presentes na etapa de pré-processamento.

Os quadros Q_j foram previamente armazenados no formato .bmp através do software 4MIPTM em escala de cinza quantizada em 8bits. A Figura 5.9 permite a visualização das cores pertencentes a este tipo de escala, desde o seu menor valor, 0, até seu maior valor, 255.



Figura 5.9 – Variação da luminância na escala de cinza de 8bits.

Posteriormente, estes quadros são lidos em pares do diretório fornecido NOMEDIR e transformados em matrizes para manipulação algébrica e estabelecimento dos algoritmos posteriores de processamento. A Figura 5.10 ilustra o caso de uma imagem de 180x160 pixels e o gráfico de superfície relativo a sua matriz de luminância.

A Redlake MotionMeter 500, quando configurada para tanto, insere sobre o quadro um cabeçalho onde o seu número, o seu tempo de aquisição bem como outros detalhes são mostrados. Este cabeçalho é importante pois indexa a seqüência temporal das imagens capturadas, permitindo que enganos não sejam cometidos, fato fácil de ocorrer devido a enorme quantidade de quadros que eventualmente devam ser processados.

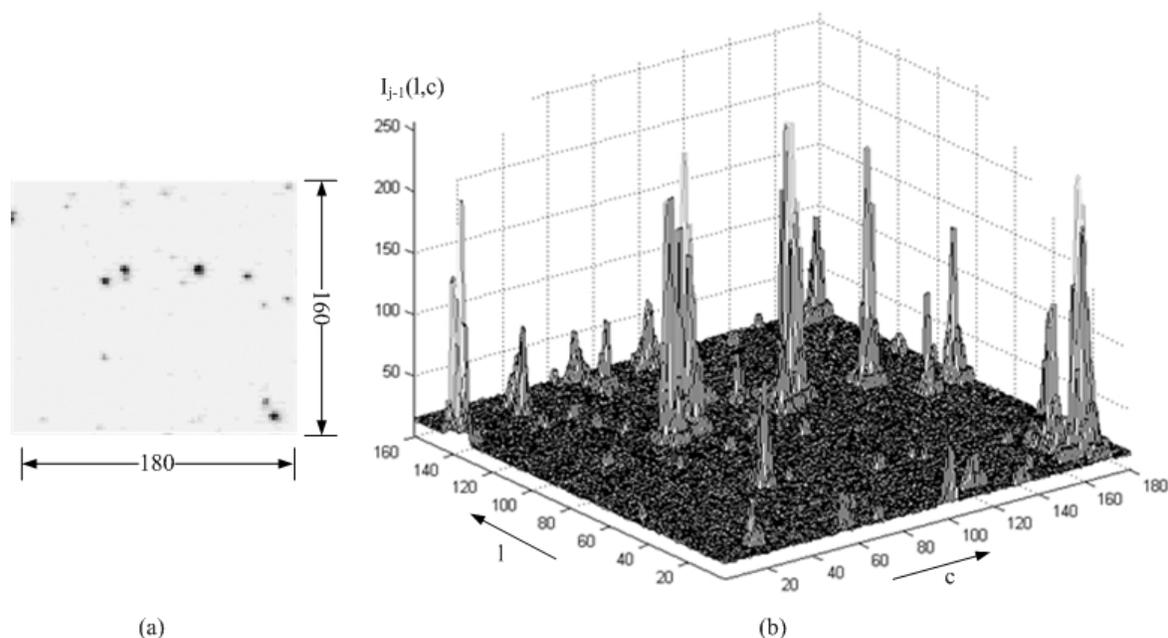


Figura 5.10 – Representação: (a) Imagem, (b) Gráfico de superfície de sua matriz correspondente.

A seguir, para facilitar a visualização e contraste, aplica-se a inversão dos tons da escala de cinza. A Figura 5.11 mostra um determinado quadro Q_j capturado do escoamento antes e depois da aplicação destas 2 funções.

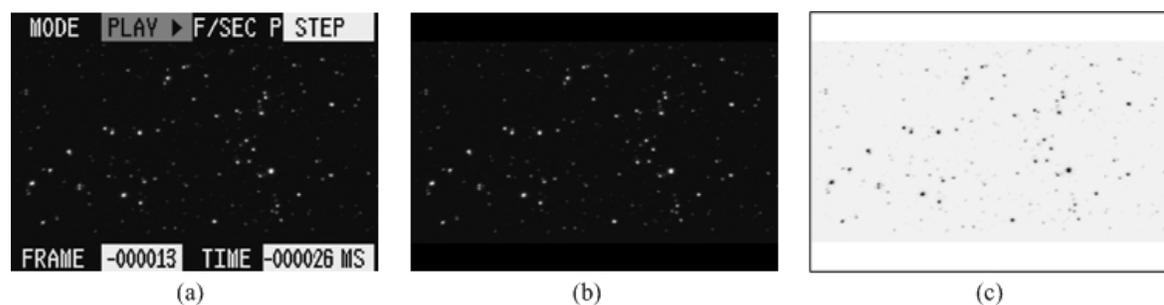


Figura 5.11 – O quadro: (a) Com cabeçalho, (b) Sem cabeçalho, (c) Inversão na tonalidade.

Em muitos casos, os quadros possuem áreas perto de suas bordas que devem ser eliminadas devido ao fato de ou possuírem pouca densidade de partículas, ou corresponderem a paredes do meio físico, áreas mortas ou até mesmo devido a aberração geométrica da objetiva utilizada. Para tanto, desenvolveu-se um algoritmo de recorte onde estas áreas pode ser removidas através de um vetor VETREC. Este vetor contém a informação de quantas áreas de interesse a partir de cada borda (esquerda, direita, superior e inferior) devem ser retiradas. A Figura 5.12 mostra um exemplo da operação de recorte com $VETREC=[1\ 1\ 1\ 1]$.

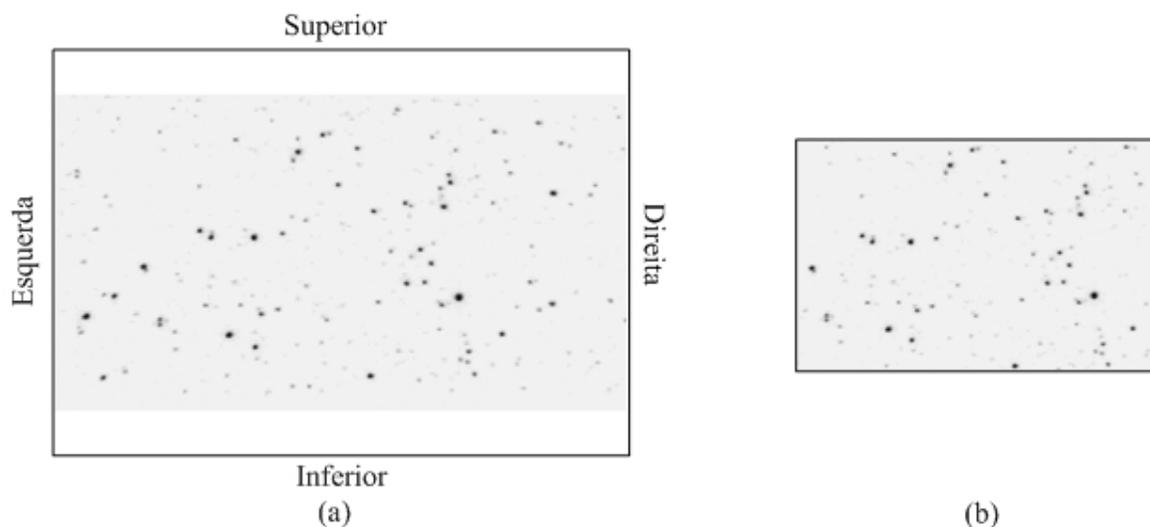


Figura 5.12 – Término do pré-processamento: (a) Quadro original, (b) Quadro recortado.

5.2.1.2. Algoritmos de processamento desenvolvidos

Os algoritmos empregados na etapa de processamento constam na Figura 5.13. Os quadros pré-processados anteriormente, $Q_{j-1}(l,c)$ e $Q_j(l,c)$, são segmentados em imagens, $I_{j-1}(l,c)$ e $I_j(l,c)$, e processados através do operador correlação cruzada. Detecta-se então o pico de maior correlação presente em $R_{I_{j-1}I_j}$. As coordenadas deste pico, $picosm$ e $picosn$, são repassadas ao bloco seguinte para o cálculo do campo de velocidade. Devido extensão de cada bloco, a seguir ir-se-á descrevê-los em separado.

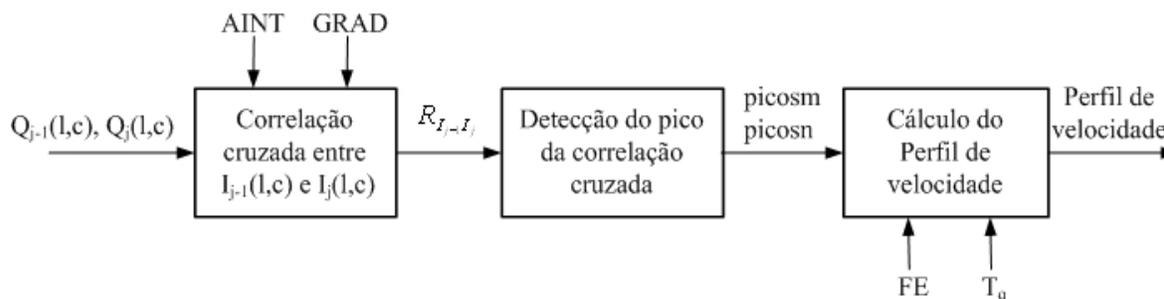


Figura 5.13 – Algoritmos envolvidos na etapa de processamento.

5.2.1.2.1. Correlação cruzada entre $I_{j-1}(l,c)$ e $I_j(l,c)$

Conforme comentado anteriormente, os quadros são segmentados em uma imagem $I_{j-1}(l,c)$, a qual corresponde a área de interesse, e $I_j(l,c)$, a qual corresponde a área de busca. Estas regiões são quadradas e sua dimensão é estabelecida pela variável AINT, definida pelo usuário. A variável GRAD especifica o deslocamento em pixels para que a próxima área de interesse seja selecionada, no caso $I_{j-1}(l+GRAD,c+GRAD)$. Caso $GRAD < AINT$, então há superposição das áreas de interesse. Ou seja, haverá partículas que são comuns tanto a área de interesse indexada por (l,c) como por $(l+GRAD,c+GRAD)$, proporcionando maior densidade de vetores em relação ao caso sem superposição. Em nenhum outro trabalho relacionado a velocimetria por processamento de imagens observou-se a utilização deste método. Todo este processo está ilustrado na Figura 5.14, para o caso particular de $AINT=80$ pixels e $GRAD=40$ pixels.

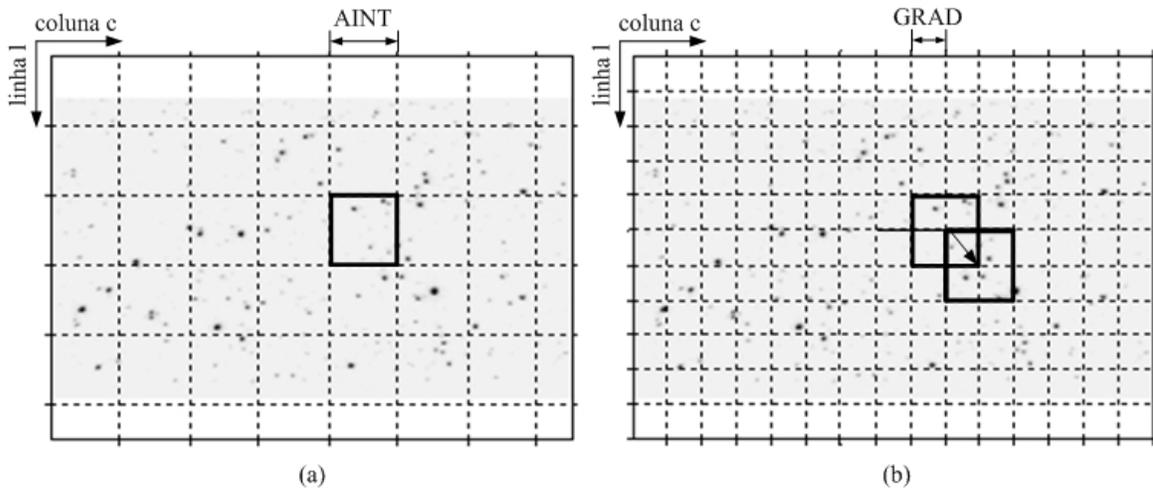


Figura 5.14 – Segmentação do quadro: (a) Malha dada por AINT, (b) Malha dada por GRAD.

Determinada a forma com que a área de interesse será selecionada, deve-se aplicar o operador correlação cruzada. Para utilização em processamento digital, a equação (36) deve ser discretizada. Tem-se então a seguinte forma para o operador:

$$R_{I_{j-1}I_j}(m,n) = I_{j-1}(l,c) \circ I_j(l,c) = \sum_{l=-L}^L \sum_{c=-C}^C I_{j-1}(l,c) \cdot I_j(l+m,c+n) \quad (39)$$

Onde m e n correspondem ao deslocamento de, respectivamente, uma linha l e uma coluna c de pixels. L e C definem o tamanho da área de busca em que será realizada a correlação cruzada e no caso em questão, para uma área quadrada:

$$L = C = \frac{AINT}{2} \quad (40)$$

No entanto, a utilização direta do operador correlação cruzada determina um esforço computacional elevado. Para quadros com uma grande quantidade de pixels, este procedimento pode acarretar o aumento exagerado no tempo de processamento. Neste sentido, utilizou-se neste

trabalho, um método alternativo baseado no teorema da correlação, o qual é proveniente das relações de Wiener–Khinchine e especifica que a correlação entre duas funções é equivalente a transformada inversa de Fourier da multiplicação complexa conjugada de seus espectros [Bendat et al., 1986]. Matematicamente isto significa:

$$R_{I_{j-1}I_j}(m,n) = I_{j-1}(l,c) \circ I_j(l,c) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F} \{ I_{j-1}(l,c) \} \cdot \mathfrak{F}^* \{ I_j(l,c) \} \right\} \quad (41)$$

Onde $\mathfrak{F} \{ I_{j-1}(l,c) \}$ significa a transformada discreta de Fourier (DFT) da função $I_{j-1}(l,c)$ e $\mathfrak{F}^* \{ I_j(l,c) \}$ o complexo conjugado da DFT de $I_j(l,c)$. Por definição, a DFT para uma função bidimensional como $I_j(l,c)$ é dada por [Gonzalez et al.,2000]:

$$\mathfrak{F} \{ I_j(l,c) \} = F_j(q,s) = \frac{1}{LC} \sum_{l=-L}^L \sum_{c=-C}^C I_j(l,c) \cdot e^{-i \left[2\pi \left(q \frac{l}{L} + s \frac{c}{C} \right) \right]} \quad (42)$$

Onde q e s correspondem as variáveis do domínio frequência e i é o número imaginário. Observe que a DFT é uma transformada linear, podendo ser operada em cada dimensão (no caso l e c) separadamente, independente da ordem.

O processo de obtenção dos coeficientes de correlação restringe-se então a operações envolvendo DFTs e suas inversas. Pode-se assim empregar as técnicas de cálculo envolvendo os seus algoritmos rápidos denominados de Fast Fourier Transform (FFT). Os mais conhecidos são os de Cooley-Tukey e Sand-Tukey, os quais podem ser aplicados em funções com número de amostras L e C inteiras quaisquer [Brigham, 1974]. O diagrama da Figura 5.15 demonstra a seqüência de procedimentos comentados acima para o cálculo da correlação.

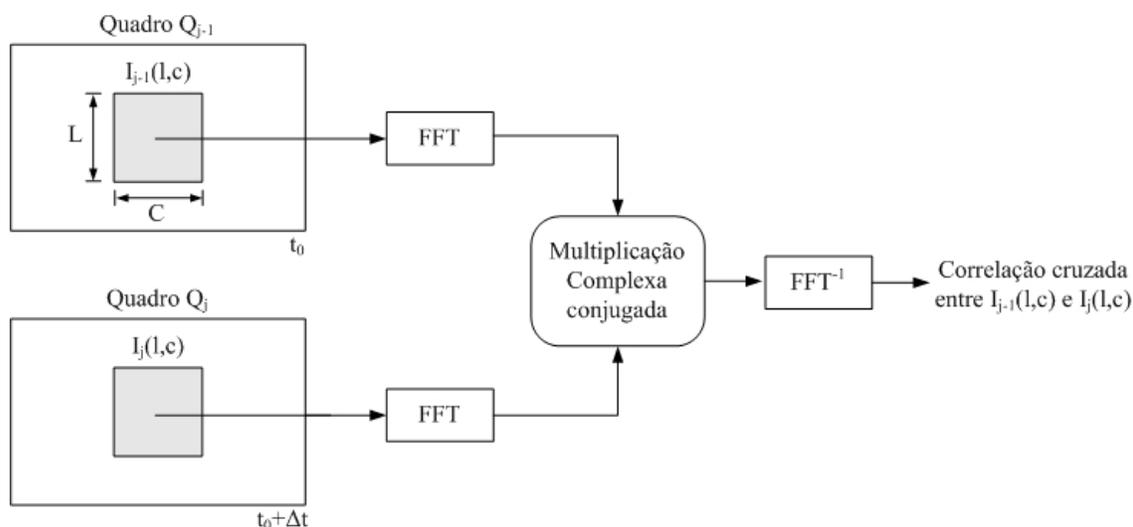


Figura 5.15 – Implementação da correlação cruzada envolvendo FFTs.

O resultado da aplicação do operador correlação cruzada em áreas com AINT=80 pixels é mostrado na Figura 5.16. Nesta, pode-se observar o resultado da segmentação dos quadros $Q_{j-1}(l,c)$ e $Q_j(l,c)$ em áreas de interesse e busca, $I_{j-1}(l,c)$ e $I_j(l,c)$, as quais sofreram um preenchimento

com zeros referente ao dobro de suas dimensões originais. Abaixo, a correlação destas áreas é representada em uma imagem $R_{I_{j-1},I_j}(m,n)$ e, ao lado, em seu respectivo gráfico de superfície. Pode-se observar nitidamente nesta última a presença de um ponto bem definido, o qual corresponde a coordenada (m,n) onde há maior coincidência entre os padrões. É este pico que fornece a informação a respeito do deslocamento do grupo de partículas.

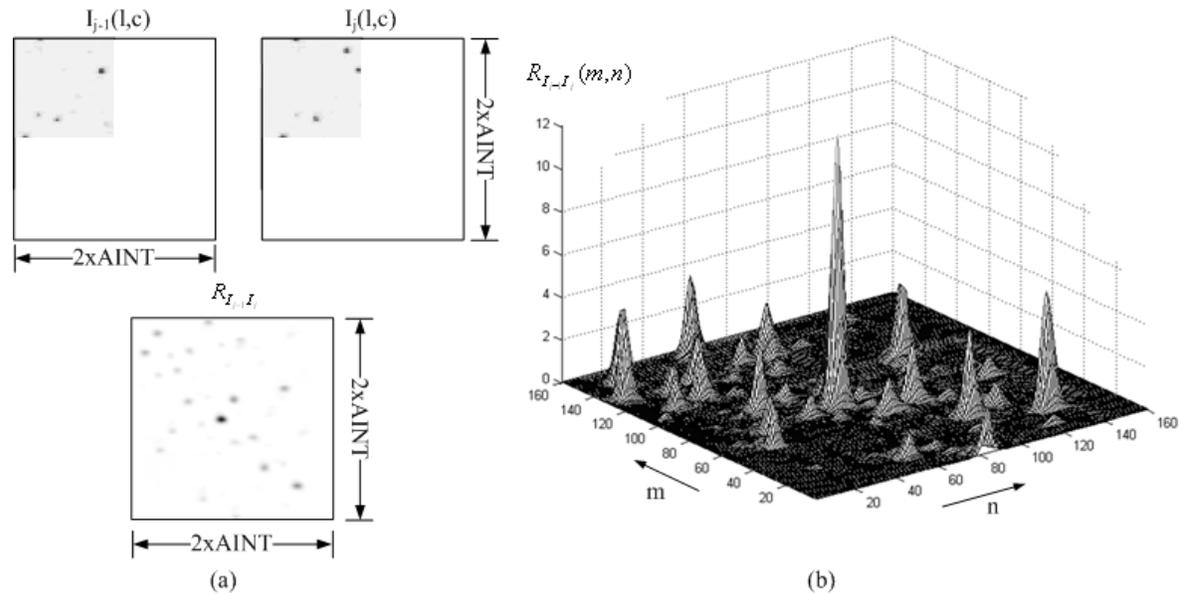


Figura 5.16 – (a) Área de interesse e busca e o plano de correlação, (b) Gráfico de superfície do plano de correlação.

Como sugestão para implementação futura, uma outra solução alternativa é a substituição da transformada discreta de Fourier, dada pela equação (42), por uma com núcleo puramente real, como a Transformada Hartley. Qualitativamente, esta última opera sobre um núcleo denominado *cas*, o qual é uma função real composta de senos e cossenos [Sun, 2002]. A substituição de operações envolvendo números complexos por reais significa uma ainda maior simplificação e redução no tempo de processamento.

Na Tabela 5.1 pode-se observar a diferença computacional entre o emprego direto da equação (39), a alternativa aqui implementada mediante o teorema da correlação dado pela equação (41) e a possibilidade de utilização da transformada Hartley, comentada anteriormente.

Tabela 5.1 – Eficiência computacional nos métodos de implementação da correlação.

Operações	Correlação direta	Correlação por FFT	Correlação por Hartley
No. de adições	$AINT^4$	$2AINT^2(\log_2 AINT-3)+8AINT$	$AINT^2(\log_2 AINT-3)+4AINT$
No. de multiplicações	$(AINT-1)^4$	$6AINT^2(\log_2 AINT-1)+8AINT$	$AINT^2(3\log_2 AINT-5)+12AINT$

5.2.1.2.2. Detecção do pico da correlação cruzada

Calculada a matriz resultante $R_{I_{j-1},I_j}(m,n)$ da correlação cruzada entre as áreas de interesse e busca, deve-se então determinar qual o maior pico ocorrido e qual são as suas coordenadas no

plano. Estas irão fornecer a informação necessária para a determinação do vetor velocidade de grupo das partículas presentes nestas áreas analisadas.

As coordenadas do pico de correlação cruzada são obtidas através de:

$$(picom, picon) = máx\{R_{I_j-I_j}(m, n)\} \quad (43)$$

onde picom e picon correspondem as coordenadas (m,n) respectivamente do pico com maior amplitude presente em $R_{I_j-I_j}$ detectado pela função máx\{\}. Para o caso exemplo da Figura 5.16, tem-se que (picom,picon)=(80,72) pixels.

No entanto, estas coordenadas correspondem a uma primeira aproximação do pico real. Devido a quantização espacial imposta pelo sensor CCD, o pico de maior luminância presente no plano de correlação não corresponde necessariamente ao pico real de maior correlação. Uma maior aproximação deste último pode ser obtida caso considere-se também os pixels vizinhos. Desta forma, pode-se obter uma estimativa subpixel de sua localização, proporcionando maior acuracidade na determinação no deslocamento e conseqüentemente do vetor velocidade do grupo de partículas. Com esta estratégia, pode-se estimar as coordenadas com resolução de 1/10 a 1/20 de pixel [Roesgen, 2003].

O feixe de LASER utilizado é gaussiano. No entanto, a luz espalhada pela partícula, conforme comentado anteriormente, possui um formato dado por uma figura de difração representada por um conjunto de discos concêntricos. Para partículas com diâmetros d_p suficientemente grandes tais que o efeito da difração possa ser minimizado, então é possível se adotar uma aproximação gaussiana para este padrão. Sendo a gaussiana uma função cujo formato se mostra invariável a transformações lineares como a transformada de Fourier, tem-se que o pico presente no plano de correlação também deve seguir um formato gaussiano.

Sendo conhecido o formato da imagem da partícula é possível efetuar o ajuste da função correspondente, obtendo com maior precisão as coordenadas do pico de correlação. Este procedimento corresponde a uma segunda aproximação em relação a determinação direta das coordenadas do pico de correlação anterior e portanto a uma aproximação de 2ª. ordem para estas. Esse ajuste é aplicado em separado em cada coordenada do par (picom,picon) obtida inicialmente, gerando novas coordenadas (picosm,picosn) [Bolinder, 1999]. A picosm é dada pela seguinte equação:

$$picosm = picom + \frac{\ln R_{I_j-I_j}(picom - 1) - \ln R_{I_j-I_j}(picom + 1)}{2 \ln R_{I_j-I_j}(picom - 1) - 4 \ln R_{I_j-I_j}(picom) + 2 \ln R_{I_j-I_j}(picom + 1)} \quad (44)$$

Onde a coordenada picon do funcional de $R_{I_j-I_j}(picom, picon)$ foi suprimida por simplificação da notação. Analogamente, a coordenada picosn é dada por:

$$pi \cos n = picon + \frac{\ln R_{I_j-I_j} (picon - 1) - \ln R_{I_j-I_j} (picon + 1)}{2 \ln R_{I_j-I_j} (picon - 1) - 4 \ln R_{I_j-I_j} (picon) + 2 \ln R_{I_j-I_j} (picon + 1)} \quad (45)$$

Onde novamente foi simplificada a notação do funcional. Essa correção aplicada ao caso exemplo da Figura 5.16 resulta em (picosm,picosn)=(80.1386,71.7656) pixels.

5.2.1.2.3. Cálculo do campo de velocidade

Computado o par coordenado (picom,picon), pode-se então determinar o vetor velocidade pertinente a este grupo de partículas. Para tanto, utiliza-se a equação (26) devendo-se apenas determinar a magnificação M. Como a distância percorrida pelo grupo de partículas é mensurado em pixels, convém utilizar a seguinte equação:

$$\vec{v}_{ot} \approx -M \cdot \vec{v}_{it} = FE \cdot \Delta \vec{r}_{ip} \cdot T_q \quad (46)$$

onde $\Delta \vec{r}_{ip}$ é o deslocamento em pixels do grupo de partículas e FE é o fator de escala. O sinal negativo desaparece devido ao processo de leitura do sensor CCD pelo circuito eletrônico de controle da câmera, o qual corrige a inversão na imagem inerente ao processo de reconstrução geométrica.

O deslocamento $\Delta \vec{r}_{ip}$ é obtido pela equação:

$$\Delta \vec{r}_{ip} = \Delta x_{ip} \vec{e}_x + \Delta y_{ip} \vec{e}_y = (AINT - pi \cos n) \vec{e}_x + (AINT - pi \cos m) \vec{e}_y \quad (47)$$

onde, devido ao procedimento de preenchimento por zeros das áreas de interesse e busca, deve-se diminuir do par coordenado (picosm,picosn) o valor acrescido de zeros, no caso AINT.

O fator de escala FE corresponde à relação existente entre o mundo físico real em análise e o mundo da imagem em pixel. Esta relação é diretamente obtida da magnificação da objetiva dada pela equação (37) mediante a multiplicação por um fator oriundo da largura l_{CCD} do elemento CCD:

$$FE = M \cdot l_{CCD} = \frac{d_f}{d_{pix}} \quad (48)$$

Por fim, tem-se que através de (46), (47) e (48) o vetor velocidade pode ser equacionado da seguinte forma:

$$\vec{v}_{ot} = u \vec{e}_x + v \vec{e}_y \approx [(AINT - pi \cos n) \vec{e}_x + (AINT - pi \cos m) \vec{e}_y] \cdot FE \cdot T_q \quad (49)$$

O campo de velocidade é então obtido calculando todos os vetores velocidade referentes a todas as áreas de interesse selecionadas através da segmentação do quadro em análise.

5.2.1.3. Algoritmos de pós-processamento desenvolvidos

Após o processamento, ao analisar os vetores velocidade \vec{v}_{ot} computados, doravante denominados de \vec{v} por motivos de simplificação na notação, em geral observa-se a presença de

vetores espúrios. Em um SVPI, modo PIV, a presença deste tipo de vetor ocorre por um motivo principal: baixa densidade de partículas na área de interesse analisada. As partículas fornecem a informação a respeito do escoamento e assim, quanto menor for a sua presença, menor será a relação sinal-ruído (S/R) da medida. Em outras palavras, o pico de correlação-cruzada pode ser incorretamente determinado, produzindo um resultado errático.

É necessário então distinguir quais são as medidas incorretas, permitindo que apenas as corretas permaneçam como resultado. Isto é usual em sistemas de instrumentação uma vez que todo e qualquer processo de medição possui limitação em sua operação. Isto implica que o campo de velocidade obtido no bloco de processamento anterior seja pós-processado ou de forma manual, através da simples inspeção visual do operador, ou automática, através de algoritmos. A forma manual é um processo tedioso, subjetivo, não reproduzível e não otimizado. Para uma grande quantidade de vetores, não há dúvida de seu insucesso. Por este motivo, algoritmos de pós-processamento devem ser desenvolvidos para automatizar este processo. Observe que toda a teoria de processamento digital envolvida em filtragem espacial tanto linear como não-linear de imagens pode ser adotada aqui ao campo de velocidade. O módulo ou o ângulo do vetor podem ser usados como variáveis análogas a luminância, utilizada no caso de uma imagem.

Os vetores espúrios apresentam a característica particular de diferirem muito de seus vizinhos. Assim, a derivada espacial de seu valor absoluto e/ou o seu ângulo varia muito de uma coordenada (l,c) para a sua vizinha. Isto sugere a implementação de um filtro passa-baixas, para que as componentes de alta freqüência que dominam os vetores espúrios sejam eliminadas. No entanto, devido aos filtros lineares passa-baixas se resumirem a uma média ponderada dos vetores da vizinhança, observou-se que o perfil por um todo era alterado suavemente. Optou-se por empregar então um filtro-passa altas, sendo os vetores resultantes subjugados a um critério de eliminação estatístico.

O filtro-passa altas espacial utilizado consiste em uma máscara $\{w\}$ que é convoluída sobre o campo de velocidade. Matematicamente:

$$\bar{R}_p(l,c) = \bar{v}(l',c') \otimes w(l',c') = \sum_{l'=-L}^L \sum_{c'=-C}^C \bar{v}(l',c') \cdot w(l'-l,c'-c) \quad (50)$$

onde l' e c' são variáveis temporárias para a realização da convolução e \bar{R}_p é a resposta do filtro.

Convolver significa multiplicar matricialmente $\{w\}$ por uma matriz de igual dimensão do campo de velocidade e posteriormente deslocá-la sobre o mesmo, multiplicando novamente. Este processo persiste até que todo o perfil seja atingido. Quanto maior a ordem de $\{w\}$ com mais

vetores vizinhos esta interage. Note que a convolução é essencialmente análoga à correlação, diferindo apenas por uma rotação de 180°.

Uma matriz $\{w\}$ com dimensão 3x3, usualmente utilizada em processamento de imagens, foi escolhida para implementação do filtro [Gonzalez et al., 2000]:

$$\{w\} = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -I & -I & -I \\ -I & 8 & -I \\ -I & -I & -I \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Onde w_{11} , w_{12} , w_{13} , w_{21} , w_{22} , w_{23} , w_{31} , w_{32} e w_{33} são os coeficientes do filtro. São estes valores que determinam o seu caráter ou passa-baixa, ou passa-banda e/ou passa-alta. A resposta \vec{R}_p deste filtro para os pesos dados por (51) sobre o módulo dos vetores do campo de velocidade \vec{v} é:

$$\vec{R}_p(l,c) = -\vec{v}_{l-G,c-G} - \vec{v}_{l-G,c} - \vec{v}_{l-G,c+G} - \vec{v}_{l+G,c-G} + 8 \cdot \vec{v}_{l,c} - \vec{v}_{l,c+G} - \vec{v}_{l+G,c-G} - \vec{v}_{l+G,c} - \vec{v}_{l+G,c+G} \quad (52)$$

Onde GRAD foi redefinida para G e o campo de velocidade teve sua notação de funcional alterado para notação de índices, ambas por motivos de compactação. Também, o par coordenado (l,c) só pode assumir valores múltiplos de GRAD. Pode-se observar que, para vetores muito semelhantes (baixa frequência), a resposta do filtro $\vec{R}_p(l,c)$ é um valor praticamente nulo. É esperado que assim apenas as componentes espaciais de alta frequência (vetores espúrios) permanecem em $\vec{R}_p(l,c)$.

No entanto, cada vetor de $\vec{R}_p(l,c)$ deve ser ainda submetido a um critério de eliminação, usualmente constituído de suas propriedades como média e desvio padrão. Assim:

$$(l_{esp}, c_{esp}) = coord\{\vec{R}_p > [média(\vec{R}_p) + 3 \cdot desvio_padrão(\vec{R}_p)]\} \quad (53)$$

Onde (l_e, c_e) são as coordenadas dos vetores espúrios detectados pela função $coord\{\}$, $média()$ é uma função que retorna a média e $desvio_padrão()$ é uma função que calcula o desvio padrão dos vetores velocidade presentes em $\vec{R}_p(l,c)$. Determinadas estas coordenadas, então se elimina os vetores por elas localizados no campo de velocidade:

$$\vec{v}(l_e, c_e) = 0 \quad (54)$$

O resultado desta operação de filtragem espacial sobre o campo de velocidade obtido através do processamento de dois quadros arbitrários consta na Figura 5.17.

No entanto, as coordenadas referentes aos vetores filtrados devem ser preenchidas. Adotou-se para esta finalidade um algoritmo de interpolação onde os vetores vizinhos a coordenada em questão são utilizados para composição de um novo vetor.

A Figura 5.18 demonstra a situação onde um vetor espúrio tenha sido filtrado da coordenada (l_e, c_e) . Então, através da média de seus vetores velocidade vizinhos, pode-se aproximar um valor para o novo vetor velocidade nesta coordenada. Matematicamente:

$$\vec{v}_{l_e, c_e} = \frac{\vec{v}_{l_e-G, c_e-G} + \vec{v}_{l_e-G, c_e} + \vec{v}_{l_e-G, c_e+G} + \vec{v}_{l_e+G, c_e-G} + \vec{v}_{l_e, c_e+G} + \vec{v}_{l_e+G, c_e-G} + \vec{v}_{l_e+G, c_e} + \vec{v}_{l_e+G, c_e+G}}{8} \quad (55)$$

Onde novamente a notação para o campo de velocidade foi levemente modificada por motivos de compactação e (l_e, c_e) são múltiplos de GRAD.

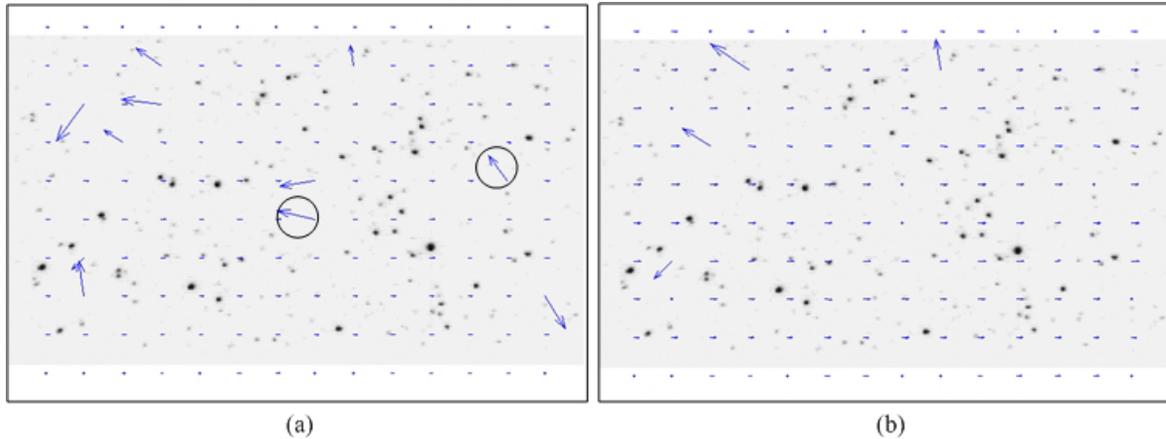


Figura 5.17 – (a) Campo de velocidade após processamento, (b) Campo de velocidade filtrado.

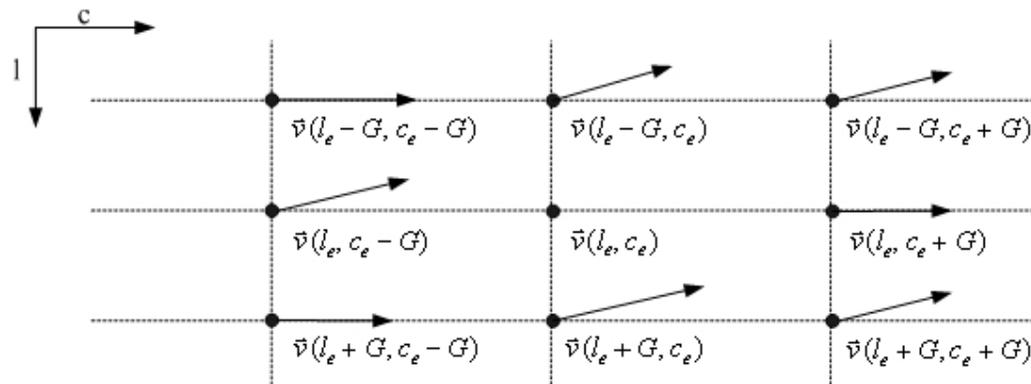


Figura 5.18 – Esquema de interpolação de vetores utilizado para a coordenada (l, c) .

A Figura 5.19 ilustra a situação do campo de velocidade anteriormente filtrado ao qual foi aplicado o algoritmo de interpolação. Para exemplo, sinalizou-se 2 pontos onde o processo de filtragem havia eliminado o vetor espúrio e que o algoritmo de interpolação efetuou o preenchimento através da média aritmética de seus vizinhos.

O campo de velocidade, depois de pós-processado (filtrado e interpolado), na etapa final do programa, é plotado sobre o quadro Q_{j-1} e os seus valores numéricos juntamente com a sua respectiva coordenada (l, c) armazenados em um arquivo do tipo ASCII.

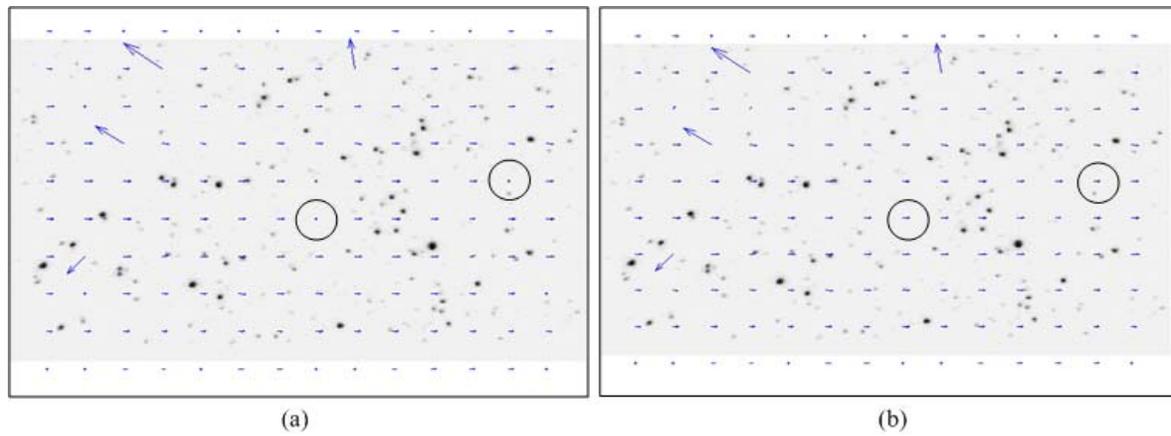


Figura 5.19 – (a) Campo de velocidade filtrado, (b) Campo de velocidade interpolado.

6. APLICAÇÃO A UM ESCOAMENTO INTERNO AO DUTO CIRCULAR

Para validação do sistema digital velocimetria por processamento de imagens modo PIV projetado e implementado escolheu-se como sistema físico a ser analisado o escoamento interno a um duto circular em regime turbulento. Este constitui um caso clássico de estudo em Mecânica dos Fluidos pois, através de algumas aproximações, soluções analíticas bem como soluções empíricas com eficácia comprovada puderam ser obtidas ao longo dos anos tanto para o problema hidrodinâmico, quanto para o térmico. A seguir, será efetuada uma análise teórica a respeito do problema, o aparato experimental envolvido no meio físico será descrito e o emprego do sistema de instrumentação desenvolvido bem como o procedimento experimental será elucidado.

6.1. Análise teórica do meio físico

O escoamento interno a um duto circular tem a sua geometria exposta na Figura 6.1 em uma vista de corte, sendo a coordenada r pertencente ao plano perpendicular a x e, neste caso, coincidente com o eixo y . Este apresenta 2 regiões distintas, cada uma dominada por um processo físico diferente. A primeira, denominada região de entrada, é observada quando um perfil de velocidade U_{∞} não-perturbado acopla-se ao duto. No início desta região, os efeitos advectivos predominam e há a coexistência de um escoamento perturbado pela ação das paredes mediante a viscosidade e um núcleo não-perturbado que mantém as características originais. No entanto, a medida que evolui-se sobre a coordenada x , os efeitos das paredes se difundem completamente e a camada limite $\delta(x)$ aumenta até atingir o valor do raio R do duto. Neste momento, os efeitos viscosos se sobressaem sobre os advectivos, o perfil de velocidades se torna invariável frente a coordenada x e, portanto, considera-se que o escoamento se encontra plenamente desenvolvido. Para escoamentos turbulentos, a distância em relação a entrada do duto em que isto ocorre é denominada de comprimento de entrada hidrodinâmico X_T , o qual é dado por [Bejan, 1984]:

$$X_T \approx 20R \quad (56)$$

sendo R o raio do duto.

Na região plenamente desenvolvida, o perfil de velocidade é independente de x e possui um valor máximo U no centro do duto, diminuindo progressivamente até valores nulos na parede. Este perfil, através de uma abordagem média temporal a respeito das variáveis envolvidas, torna-se ainda independente do tempo. Têm-se então apenas uma dependência explícita da coordenada r . Sobre essas considerações, Nikuradse investigou experimentalmente a ação da Lei da Parede sobre os perfis de velocidade em escoamentos com diferentes números de Reynolds (Re). Empiricamente, obteve uma equação a qual passou a ser denominada de Lei da

Potência $1/n$. Esta Lei de distribuição de velocidades, a posteriori, foi embasada teoricamente através de sua derivação a partir da Lei de Atrito desenvolvida por Blasius. Sobre estes argumentos, tem-se que o perfil de velocidade médio temporal u_t é dado por [Schlichting, 1968]:

$$u_t = u_t(r) = U \cdot \left(\frac{R-r}{R} \right)^{1/n}, \text{ válida para } 0 \leq r \leq R \quad (57)$$

Onde U é a velocidade média temporal máxima do perfil, n é um número real dependente do Re do escoamento em questão e r é a coordenada radial perpendicular a x .

Integrando-se a equação (57) sobre a seção transversal do escoamento e dividindo por sua área, obtém-se uma relação entre a velocidade média geométrica u_g e a velocidade máxima U do perfil:

$$U = U(u_g, n) = u_g \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{2n^2} \quad (58)$$

Pode-se observar que a equação (58) depende linearmente de u_g e não-linearmente de n , fator que determina o formato do perfil de velocidade.

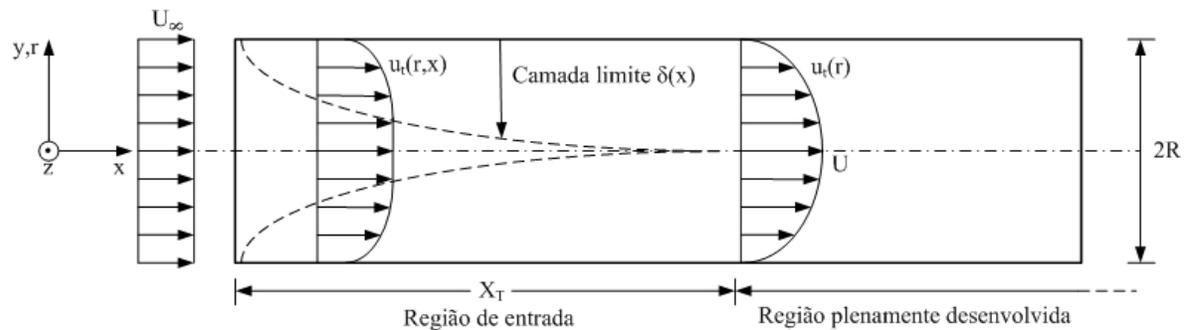


Figura 6.1 – Análise teórica do escoamento turbulento interno ao duto circular.

6.2. Aparato experimental para o meio físico

O meio físico foi implementado através de água captada da rede de distribuição e colocada a escoar em um circuito mecânico fechado cuja descrição encontra-se em detalhe no Apêndice V. Em certa parte, há a transição entre o duto de PVC para um duto em acrílico transparente ao LASER, onde os ensaios e medições puderam ser realizados.

Como unidade propulsora do escoamento foi utilizada uma Motobomba Centrífuga Schneider BC-92SJC, obtida através de doação mediante uma parceria com a indústria Schneider. Esta é composta por um motor elétrico WEG trifásico de 2 pólos com 3450 RPM (Rotações Por Minuto) quando conectada a rede de alimentação de 60Hz e por uma bomba com rotor em alumínio. Maiores detalhes a respeito de suas características constam em seu *datasheet* presente no Apêndice VI. Esta Motobomba foi escolhida devido a flexibilidade de operação em diversos valores de AMT (Altura Manométrica Total) e também ao fato do material que compõe o seu rotor ser imune a oxidação, dado que, a presença de ferrugem em ensaios com

Motobombas anteriores, prejudicava a medição. A Figura 6.2 mostra a Motobomba instalada externamente as dependências do LAMAC. Junto a sucção, embora não conste nesta figura, foi instalada uma válvula para sangria da tubulação. A partir desta, é possível eliminar o ar inserido concomitantemente com o seu processo de enchimento com água. A presença de qualquer bolha de ar influencia na qualidade da imagem capturada e interfere no escoamento.



Figura 6.2 – Motobomba Centrífuga Schneider BC-92SJC instalada.

Para controlar a velocidade de rotação da Motobomba e assim a velocidade média geométrica u_g do escoamento, utilizou-se para excitação de seu estator um inversor de frequência Danfoss VLT 5000. Este consiste em um circuito eletrônico de potência capaz de, a partir da alimentação convencional presente na rede elétrica, gerar tensões com amplitudes e frequências variáveis mediante programação. Assim, tornou-se possível compatibilizar a escala de tempo do escoamento com a envolvida na taxa de quadro T_q utilizada pela câmera, propiciando que imagens adequadas fossem capturadas. Para obtenção de u_g utilizou-se um medidor de vazão Danfoss VORFLO atrelado a tubulação. A Figura 6.3 mostra o inversor de frequência utilizado, o qual está presente internamente às dependências do laboratório. Sua ligação elétrica com a bomba é estabelecida mediante um cabo constituído de 2 pares de fios, 3 correspondentes as fases conectadas ao estator e 1 para aterramento do motor elétrico externo ao laboratório. É

importante salientar que os parâmetros elétricos do motor como impedância do enrolamento do estator, potência, frequência máxima de operação, dentre outros, devem ser previamente configurados no inversor para que não haja sua sobrecarga e aquecimento.



Figura 6.3 – Inversor de frequência Danfoss VLT 5000 utilizado.

6.3. Emprego do SVPI desenvolvido e o procedimento experimental

Para captura das imagens, selecionou-se uma área da tubulação cujo comprimento X_T fosse muito maior que o estabelecido pela equação (56). Neste caso:

$$X_T \gg 20 \cdot 22\text{mm} = 440\text{mm} \quad (59)$$

Posicionou-se então a câmera paralelamente a face superior da tubulação e o plano de LASER perpendicularmente a esta e a uma das faces laterais da tubulação. Isto pode ser estabelecido mediante a utilização de um nível, o qual assegurou que tanto o plano, a câmera e a tubulação estariam perfeitamente horizontais em relação a ação vertical da gravidade. Assegura-se assim que as imagens capturadas sejam relativas ao movimento de 2 dimensões das partículas. A Figura 6.4 ilustra esta situação.

A partir de então se ajustou experimentalmente a câmera até a distância mínima permitida ao foco por sua objetiva. Utilizou-se para isto uma circunferência impressa em folha de papel e verificou-se qual a distância limiar em que a imagem capturada apresentava definição e ausência

de distorções provenientes das lentes. Para melhor visualização destas imagens, conectou-se a saída analógica da câmera a entrada de uma televisão de 20". Posteriormente, ajustou-se a objetiva para o menor ângulo de tomada possível. Desta forma, pode-se preencher o quadro Q_j capturado com a maior quantidade de informação proveniente do escoamento.



Figura 6.4 – Posicionamento dos itens pertencentes ao sistema.

A área do quadro Q_j que não corresponde ao escoamento é denominada aqui de área morta.

A Figura 6.5 mostra uma composição de quadro típico capturado do escoamento. Nesta pode-se observar a presença de uma área morta, representada pela cor preta, e uma área referente ao duto circular, a qual contém as informações provenientes do escoamento.

Por fim, regulou-se a câmera para que as bordas da tubulação estivessem totalmente paralelas as bordas da imagem. Para isto, utilizou-se uma régua e mensurou-se, em diversos pontos de uma mesma linha de pixels, a espessura da área morta da imagem na tela da televisão até que esta possuísse um valor aproximadamente constante.

Esta área física do escoamento capturada no quadro Q_j é denominada de seção de teste, sendo as suas dimensões obtidas em decorrência do procedimento anterior. Na Figura 6.6 pode-se observar as suas dimensões.

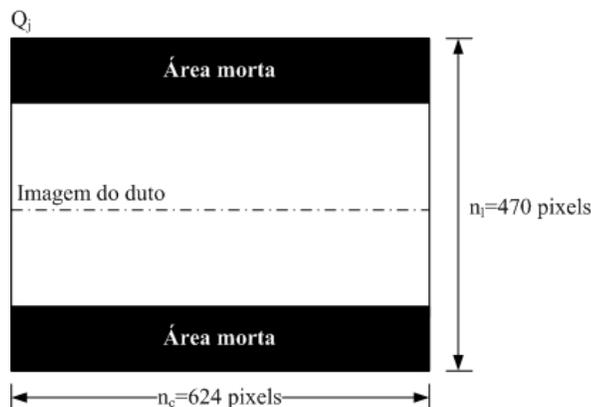


Figura 6.5 – Composição do quadro capturado do escoamento.

De acordo com a equação (48), então tem-se que o fator de escala FE é dado por:

$$FE = \frac{90 \cdot 10^{-3}}{624} \cong 1.442307 \cdot 10^{-4} \frac{m}{pixel} \quad (60)$$

O conjunto formado pela sonda LASER e pela lente DANTEC foi posicionado de tal forma que o plano LASER gerado possuísse a largura aproximadamente igual a da seção de teste. Quanto mais concentrado estiver o plano, maior a sua densidade de energia e menor é a potência requerida da fonte de LASER para a formação de um mesmo quadro Q_j . Este fato é importante pois a vida útil de uma fonte LASER esta relacionada diretamente com a potência dispendida sobre determinado tempo. Por último, ajustou-se o plano de LASER para que este atingisse a parte central do duto. Isto pode ser verificado com precisão pois nesta posição, a luz refratada e transmitida forma uma figura simétrica na parede branca atrás da tubulação.

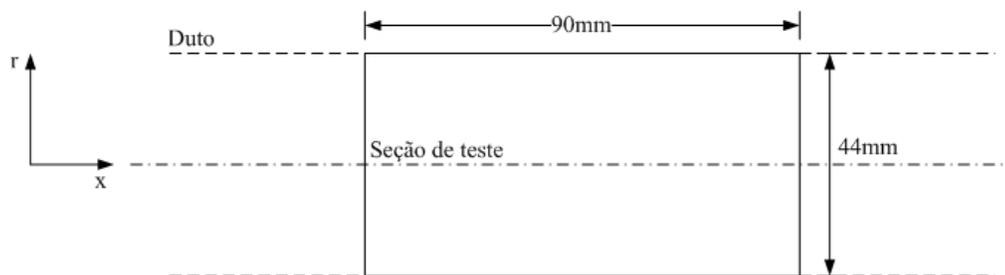


Figura 6.6 – Esquemático da seção de teste.

Neste ponto cabe uma observação. Devido a presença de ferrugem em tubulações antigas, o sistema utilizado para filtrar a água captada da rede externa para refrigeração do LASER tem seu filtro rapidamente impregnado com resíduos. Este então obstrui a passagem da água, diminuindo a vazão, disparando o sistema de segurança do LASER e causando o seu desligamento de imediato. Deve-se então retirar o filtro e escová-lo até a remoção, ao menos, da forte cor vermelha. Muitas vezes, no entanto, este é danificado irreversivelmente e deve ser trocado. Neste sentido, deve-se manter o sistema em funcionamento somente quando necessário.

Esta questão pode parecer sem nenhuma importância, mas este filtro é de difícil compra no mercado e a sua limpeza exige tempo, podendo comprometer a medição e vários dias de trabalho.

Para evitar que os raios refletidos pelo duto de acrílico prejudicassem a formação do quadro Q_i , limitou-se a seção de teste com papel preto. Adotou-se este mesmo método para a parte do plano de LASER que é transmitido e atinge a parede atrás da tubulação. Este procedimento bem como todo o SVPI em operação pode ser visto na Figura 6.7. A última reflexão espúria proveniente do primeiro contato entre o plano de LASER e o acrílico foi eliminada através da fixação do material anterior logo acima desta interação, conforme é visto em detalhe na Figura 6.8. Por curiosidade, observe nesta o efeito de rastro, comentado no item 4.1.2, devido ao alto tempo de obturação da câmera fotográfica digital utilizada frente as escalas de tempo do escoamento.

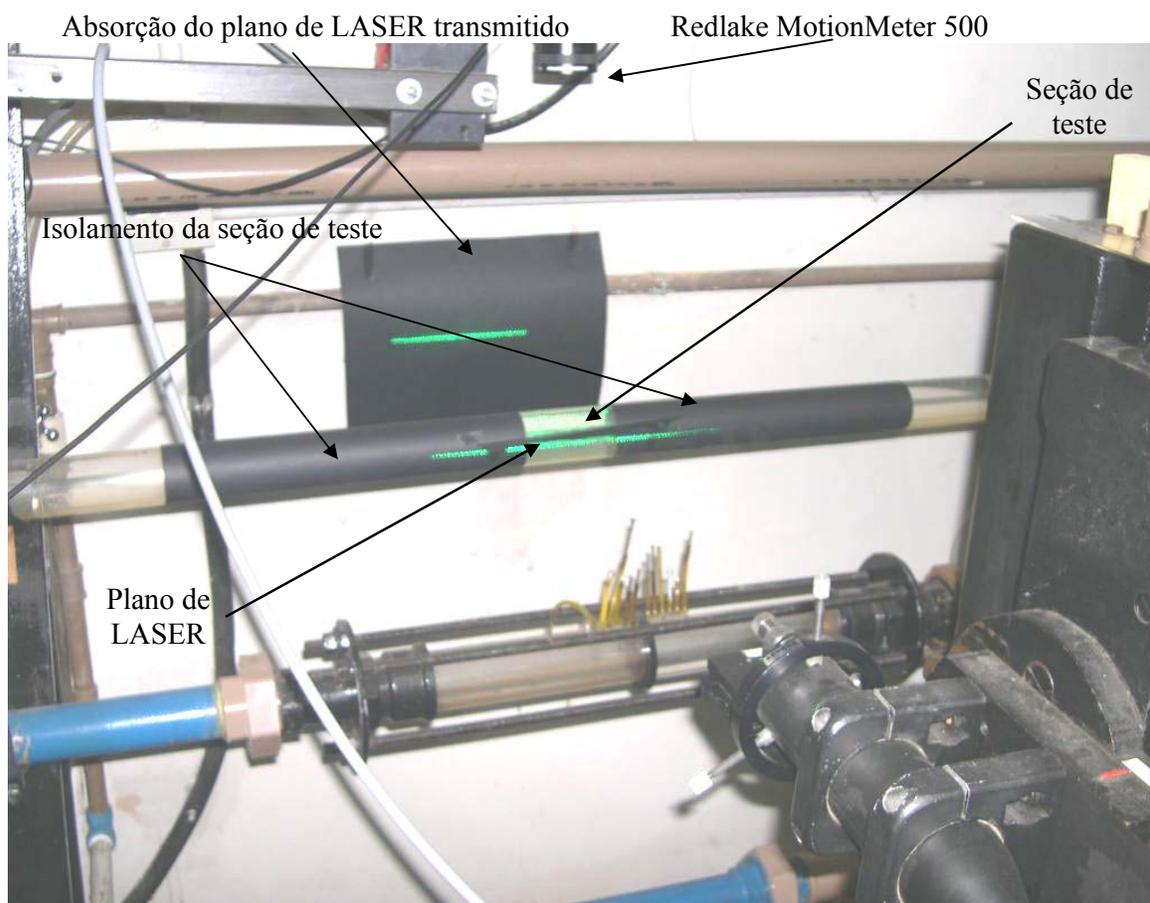


Figura 6.7 – A seção de teste, o seu isolamento e o SVPI em operação.

Convém também salientar que é importante realizar os ensaios ao menor nível de intensidade luminosa ambiente pois, sendo o sensor CCD sensível a uma banda de comprimentos de onda, esta afetará a qualidade da imagem, diminuindo a sua relação S/R.

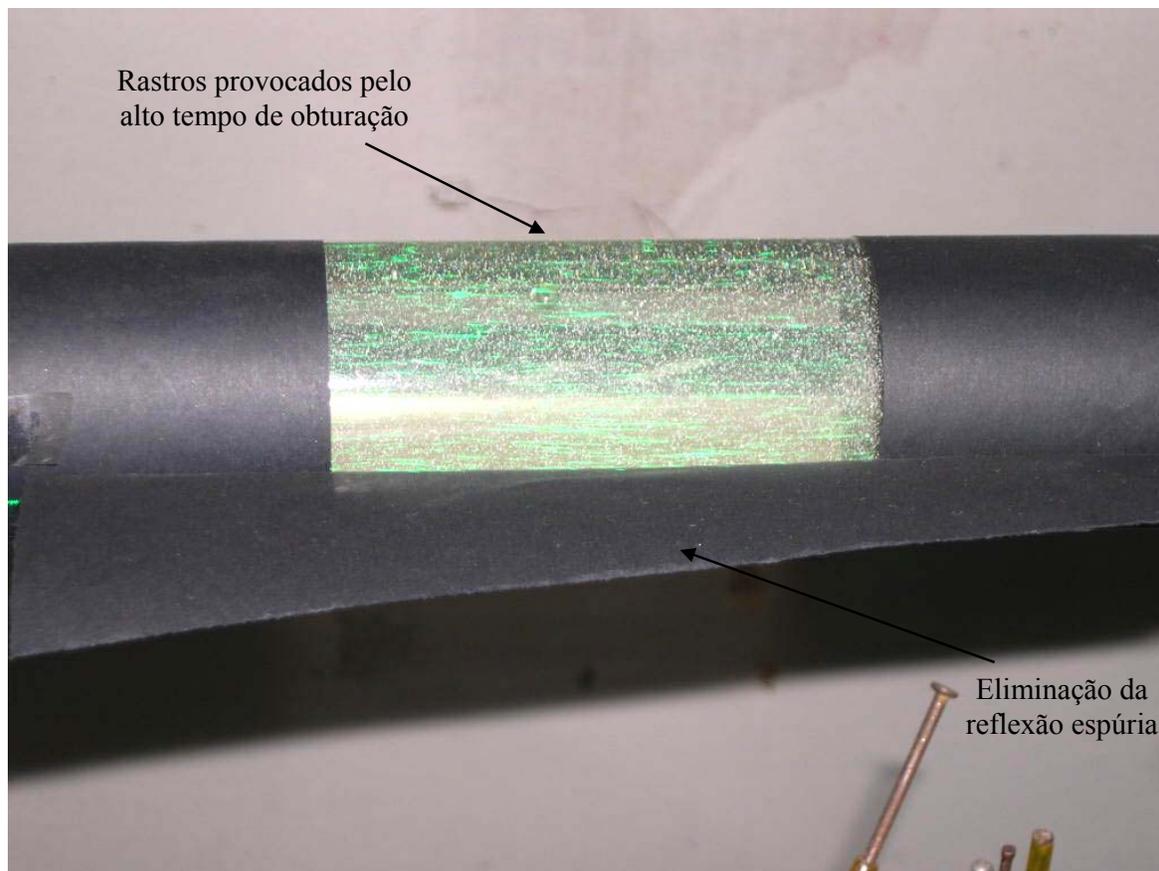


Figura 6.8 – Seção de teste em detalhe.

Uma vez corretamente posicionado o SVPI em rela o a se o de teste da tubula o, deve-se então enchê-la com água e disseminar as partículas. Para auxiliar na descri o desta opera o, representou-se 4 segmentos relevantes da tubula o na Figura 6.9. No princípio, todas as válvulas estão fechadas e não há água presente na tubula o.

Inicialmente, com a Motobomba desligada, abre-se a válvula V5, para que a água da rede preencha, e a V3, para que esta circule internamente a tubula o. No entanto, usualmente há a presença de um volume considerável de ar. Liga-se e desliga-se então brevemente a Motobomba para que o ar seja comprimido. Abre-se então a válvula de sangria V6 até que seja observado que todo este grande volume de ar seja expelido. Fecha-se então esta válvula e liga-se novamente a motobomba permitindo que água circule livremente. Abrem-se então as válvulas V4 para que haja a extra o total das bolhas de ar presentes. A  gua deve percorrer diversos ciclos até que o ar seja retirado por completo, quando as válvulas V4 são fechadas novamente. Este processo pode demorar até 10 minutos.

Após, fecha-se a válvula V5, para que a água circule em circuito fechado, sem interferência da rede. Desliga-se então a Motobomba, abre-se o tampão a rosca e insere-se um volume de aproximadamente 325ml de partículas, valor verificado experimentalmente para

produção da densidade adequada ao modo PIV. Em seqüência, preenche-se completamente com água este segmento. Fecha-se o tampão e liga-se novamente a Motobomba. Progressivamente e lentamente, abre-se a válvula V1 e V2, enquanto fecha-se a válvula V3. A água então passa a escoar pela parte b do segmento 4 da tubulação ao invés da parte a, sendo todas as partículas entregues ao escoamento. Abre-se então novamente as válvulas V4 para extrair as bolhas de ar resultantes da inserção das partículas, fechando-a ao final do processo. Deve-se então esperar que água circule inúmeras vezes até que haja a completa homogeneização das partículas no escoamento. Este processo demora até 15 minutos.

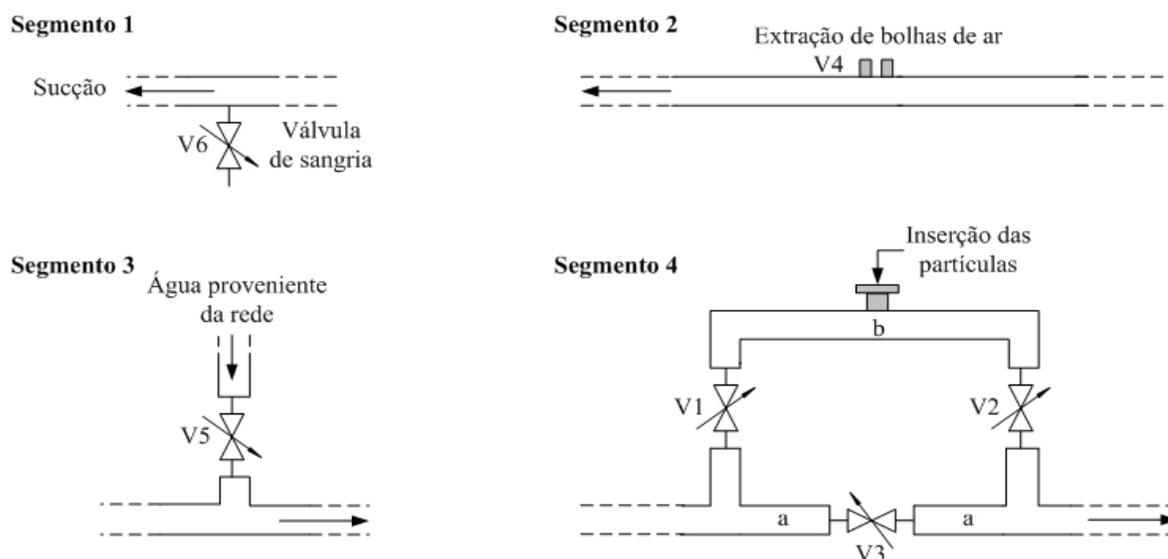


Figura 6.9 – Quatro segmentos da tubulação utilizada.

Estando as partículas disseminadas, deve-se calibrar o tempo de obturação da câmera, a íris da objetiva e a potência de LASER utilizada para proporcionar contraste aos quadros capturados, os quais são avaliados novamente, por conforto, na televisão. Visando diminuir a influência do ruído ambiente, preferiu-se diminuir ao máximo a abertura da íris bem como o tempo de obturação da câmera, sem depender um excesso de potência da fonte de LASER. Obteve-se, experimentalmente, um equilíbrio nestas variáveis mediante a configuração de um tempo de obturação de 0,5ms, potência da fonte de LASER em 2,5W e íris a mínima abertura.

Então, a câmera Redlake MotionMeter 500 foi configurada para a seguinte taxa de captura:

$$T_q = 500Q / s \quad (61)$$

Em seguida, configurou-se o inversor de frequência para que a velocidade média geométrica, verificada através do medidor de vazão instalado, proporcionasse um deslocamento da partícula na imagem de no máximo 10 pixels. Assim, assegurou-se que as escalas de turbulência dos fenômenos perpendiculares ao plano fossem minimizadas, permitindo que o padrão analisado se mantivesse quase invariável entre Q_{j-1} e Q_j . A frequência obtida para tanto

foi de 25Hz e a velocidade média geométrica decorrente, obtidas através de 10 amostragens da vazão Q_v ao longo do tempo e que podem ser visualizadas na Tabela 6.1, foi:

$$u_g = \frac{Q_{vt}}{\pi R^2} = \frac{800,558 \text{ cm}^3 / \text{s}}{\pi (2,2 \text{ cm})^2} \cong 0,5265 \text{ m / s} \quad (62)$$

onde Q_{vt} é a vazão média temporal. O número de Reynolds para este escoamento é dado por:

$$Re_D = \frac{u_g \cdot D}{\nu_f} = \frac{4 \cdot Q_{vt}}{\pi \cdot D \cdot \nu_f} \cong \frac{4 \cdot 800,558 \text{ cm}^3 / \text{s}}{3,1415 \cdot 4,4 \text{ cm} \cdot 0,00894 \text{ cm}^2 / \text{s}} \cong 25914,5 \quad (63)$$

onde ν_f a viscosidade cinemática da água a 25°C e D o diâmetro do duto. Pode-se observar claramente que se trata de um regime altamente turbulento.

O tempo característico das grandes escalas da turbulência neste fenômeno é dado pela equação (6):

$$\tau = \frac{L_c}{U_c} = \frac{D}{u_g} \cong \frac{44 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,5265 \text{ m / s}} \cong 8,3571 \cdot 10^{-2} \text{ s} \quad (64)$$

No entanto, para que o SVPI desenvolvido seja capaz de averiguar estas estruturas, o critério de Nyquist dado pela equação (7) também deve ser verificado. Inserindo os parâmetros do sistema nesta equação, pode-se verificar que o tempo Δt é em torno de 20 vezes menor que τ , cumprindo o quesito necessário. Numericamente:

$$\Delta t = \frac{l}{T_q} = \frac{l}{500 \cdot l / \text{s}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s} \leq \frac{\tau}{2} = \frac{8,3571 \cdot 10^{-2}}{2} = 4,1785 \cdot 10^{-2} \text{ s} \quad (65)$$

Para que imagens de partículas não apareçam desfocadas é preciso que a condição dada pela equação (35) seja estabelecida. Para tanto, é necessário calcular a magnificação M da objetiva utilizada. Segundo a equação (37):

$$M = \frac{d_f}{d_{pix} \cdot l_{CCD}} = \frac{9 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{292 \cdot 7,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 41,6512 \quad (66)$$

A profundidade de campo da objetiva mediante esta magnificação é dada por:

$$\delta z = 4 \cdot (M + 1)^2 \cdot f_{\#}^2 \cdot \lambda = 4 \cdot (41,6512 + 1)^2 \cdot 1,2^2 \cdot 514 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5,3858 \text{ mm} \quad (67)$$

Verificando a condição dada pela equação (35), observa-se que, juntamente com a espessura do plano de LASER dado pela equação (38), há o seu comprimento:

$$\Delta z_p = 2 \text{ mm} < \delta z = 5,3858 \text{ mm} \quad (68)$$

A contribuição dos efeitos de difração para formação da imagem da partícula não foram contabilizados pois são desprezíveis frente a magnificação e o diâmetro médio d_p verificado através do histograma realizado.

Por fim, à taxa de captura T_q configurada, analisou-se durante 2s o escoamento em questão, obtendo um total 1024 quadros armazenados no buffer interno da câmera Redlake MotionMeter 500.

Tabela 6.1 – Medições de vazão na tubulação.

Medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_v (cm ³ /s)	802,24	796,98	796,44	798,45	798,22	809,09	801,97	802,08	798,76	801,35
Q_{vt} (cm ³ /s)	800,558									

A partir de então, pode-se iniciar o processo de digitalização das imagens. Conectou-se então a câmera a placa de aquisição. Ambas devem estar próximas para que o cabo BNC (Bayonet-Niell-Concelman) que os interligue seja o menor possível pois se observou que este se comporta como uma antena a captação de ruídos de alta frequência, degradando a qualidade dos quadros capturados. Selecionaram-se então 100 imagens, sendo uma a uma transferidas analogicamente da câmera a placa de aquisição e assim armazenadas através do programa 4MIPTM em formatos BMP. Esta atividade, para um operador experiente e treinado, requereu 4 horas contínuas de trabalho. Ao total, obteve-se 27Mbytes em imagens do escoamento. Estas foram transferidas a um computador Pentium IV Celeron 2,26GHz com 512MB de memória RAM onde foram processadas na plataforma MATLAB com o programa desenvolvido e descrito no item 5.2.

7. INCERTEZAS ENVOLVIDAS NA MEDIÇÃO

A incerteza é um fator inerente ao processo de medição. Devido a grande complexidade envolvida atualmente nos sistemas de instrumentação é fato que se pode despende esforços para tentar minimizá-la ao máximo, mas dificilmente eliminá-la. Em sistemas de velocimetria por processamento de imagens tal situação não é diferente.

Estas incertezas são provenientes de erros que podem ser divididos em 2 grupos principais dados por erros sistemáticos e por erros aleatórios. Os sistemáticos constituem em uma função que perturba igualmente um seqüência de medidas, sendo em muitos casos, difíceis de serem determinados, por motivos descritos a seguir. Os aleatórios, por outro lado, a cada medida efetuada perturbam de maneira diferente, proporcionando oscilações em seu valor. Dentre cada um desses grupos há os erros passíveis de se determinar, os quais originam incertezas quantificáveis, e os que não são, os quais originam incertezas não-quantificáveis.

As componentes do vetor velocidade são computadas diretamente através da equação (46), a qual é dependente do fator de escala FE, da taxa de quadros T_q e do deslocamento em pixels do grupo de partículas $\Delta \vec{r}_p$. Embora as incertezas relacionadas a cada um de seus argumentos, em última instância, serão as realmente quantificadas, é necessário observar que uma série de outras atuam sobre o SVPI desenvolvido, as quais não são quantificadas, mas que podem ser desprezíveis tendo conhecimento de sua existência e habilidade em configurar o sistema.

A seguir, descrever-se-á sucintamente as incertezas não-quantificáveis e as quantificáveis envolvidas no sistema IPV desenvolvido. Posteriormente, as incertezas quantificáveis serão determinadas para a obtenção da incerteza máxima combinada no resultado de medição.

7.1. Incertezas não-quantificáveis

As principais incertezas não-quantificáveis são o não paralelismo entre o plano de LASER e o sensor CCD, a resposta em frequência da partícula, a velocidade de grupo das partículas e a distorção ótica por refração.

7.1.1. Não-paralelismo entre o plano de LASER e o sensor CCD

O paralelismo entre o plano de LASER e o sensor CCD é de difícil obtenção. A intensidade de inclinação entre um plano e outro pode ser determinada mediante o ângulo formado pela normal de um dos planos e a linha de visada. No entanto, este tipo de erro sistemático em geral não influencia de forma determinante a medida. Segundo [Almeida, 1997], para que este ângulo prejudique a medida em 1% é necessário que possua um valor de $8,1^\circ$. Experimentalmente, através da utilização de um simples nível, é factível a obtenção de ângulos muito menores. Por este fato, desprezou-se esta incerteza.

7.1.2. Resposta em frequência da partícula

A velocidade medida no escoamento, conforme comentado anteriormente, corresponde a velocidade da partícula. Deste modo, esta última, quando dentro de um meio viscoso, devido a força de Stokes, possui um tempo de resposta quando submetida a alguma excitação. Este tempo de relaxação é dado pela equação (13). Podendo as variáveis serem decompostas através de transformadas de Fourier, pode-se então prever uma frequência máxima f_s de sua resposta dentro do escoamento. Numericamente, para uma temperatura de 25°C:

$$f_s = \frac{1}{\tau_s} = \frac{18\mu}{\rho_p \cdot d_p^2} = \frac{18 \cdot 0,00891 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}}{0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot (159,17 \mu\text{m})^2} \cong 688,0816 \text{ Hz} \quad (69)$$

Onde utilizou-se como diâmetro d_p o valor médio das partículas obtidos no histograma realizado. Devido a sua ocorrência indiscriminada em toda a parte do escoamento, trata-se de um erro sistemático. Deve ser observado também que, embora a frequência de corte para a partícula possua o valor dado pela equação (69), em geral este não é determinante, uma vez que a frequência limitante será imposta pela taxa de quadro T_q .

7.1.3. Velocidade de grupo das partículas

Como foi adotada a metodologia estatística, implementando um sistema IPV em modo PIV com processamento através de correlação cruzada, a velocidade obtida corresponde a velocidade de um grupo ou a velocidade média sobre todas as partículas da área de interesse. Desta forma, há um erro inerente ao fato de posteriormente impor que esta velocidade esteja relacionada a uma coordenada específica, no caso, o centro da área de interesse AINT. Devido à turbulência, é sensato concluir que isto constitui um erro aleatório, diferindo em cada área de interesse. Para minimizá-lo, as partículas presentes internamente à área de interesse não devem possuir movimentos relativos entre si, o que se traduz em uma não deformação do padrão analisado. Tal fato só é possível de se obter aumentando a taxa T_q .

7.1.4. Distorção ótica por refração

Devido à interface fluido/acrílico/ar é esperado que a posição da imagem da partícula capturada no quadro sofra um desvio devido a refração do LASER por ela espalhado ao passar por materiais cuja velocidade natural de propagação no meio são diferentes. Devido à geometria do duto e ao posicionamento da câmera, a distorção por refração é um erro sistemático que possui uma dependência espacial, sendo mais intensa nas extremidades do quadro capturado e menos intensa nas posições centrais. Este estudo foi realizado detalhadamente em [van der Laan, 2001], onde o autor inseriu um padrão milimetrado na tubulação preenchida com água e sobre a sua imagem capturada, um padrão idêntico gerado computacionalmente foi superposto. A

diferença entre os pontos dos dois padrões determina a influência da refração sobre a coordenada. Pode-se mostrar então que estes efeitos para a parte central da seção de teste são irrelevantes, sendo importante apenas considerá-los quando partículas se encontram muito perto da parede do duto. Como o sistema de medição não possui resolução de parede, é sensato desprezar tal efeito. Por resolução de parede, entenda-se aqui a capacidade de mensurar o campo de velocidade tão próximo à interfaces quanto possível.

7.2. Incertezas quantificáveis

As incertezas quantificáveis são as que estão relacionadas diretamente com a equação (46), a qual determina a velocidade. Admitindo incertezas σ sobre cada uma das variáveis independentes, tem-se que seu novo funcional é dado por:

$$\bar{v} = \bar{v}(T_q \pm \sigma_{T_q}, \Delta \bar{r}_{ip} \pm \sigma_q, FE \pm \sigma_{FE}) \quad (70)$$

Onde σ_{T_q} é a incerteza sobre T_q , σ_q é a incerteza de quantização para o deslocamento em pixels e σ_{FE} é a incerteza sobre o fator de escala FE. Expandindo tal função por séries de Taylor, pode-se demonstrar que:

$$\bar{v} = \bar{v}(x_1, x_2, \dots, x_k) + \sum_k \left[\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_k} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_k} \right) (\pm \sigma_k) \right] + O(2) \quad (71)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_k e σ_k são as variáveis que representam o funcional da equação (70) com notação modificada apenas para compactar a representação matemática e $O(2)$ são os termos de 2ª. ordem. Desprezando-se então estes últimos, pode-se aproximar a incerteza combinada $\sigma_{\bar{v}}$ na medida de v apenas pelos termos de 1ª ordem da série. Matematicamente:

$$\sigma_{\bar{v}}^2 = \sum_k \left[\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_k} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_k} \right)^2 \sigma_k^2 \right] \quad (72)$$

Sendo assim, a seguir analisar-se-á a incerteza devido a taxa de quadros T_q , fator de escala FE e da quantização espacial sendo posteriormente computada a incerteza total $\sigma_{\bar{v}}$ sobre a medida. Note que muitas destas variáveis também são funções de outras variáveis e portanto, em alguns itens, serão calculadas as suas incertezas combinadas.

7.2.1. Taxa de quadros T_q

A origem física da incerteza na base de tempo provém da aleatoriedade do comportamento dos elétrons. Dependendo do circuito eletrônico utilizado, esta pode ou não ser amplificada. Contudo, as bases de tempo utilizadas em câmeras usualmente possuem ótima precisão. Isto está relacionado ao fato do sincronismo que deve existir entre a captura e a transmissão, cujo protocolo é implementado, conforme o item 3.1.4, através de temporizações. Para que a

informação seja trocada então com eficiência, é necessário que estas temporizações possuam uma pequena incerteza. Embora a incerteza na base de tempo seja dada pelo conjunto, ou seja, não somente pelo tempo máximo de resposta do sensor CCD como também pelo tempo máximo de resposta do circuito eletrônico de leitura presente na câmera, utilizar-se-á o primeiro como uma estimativa, pois está presente em seu *datasheet* [Texas Instruments Incorporated, 2001]. Segundo este, a incerteza máxima em uma leitura é dada por:

$$\sigma_{\Delta t} = \pm 12,5 ns \quad (73)$$

Esta incerteza se transfere a T_q pelo mesmo tipo de equação dada por (72). Para uma taxa de quadro estabelecida pela equação (61) tem-se que a incerteza sobre T_q possui o seguinte valor:

$$\sigma_{T_q} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_q}{\partial \Delta t}\right)^2 \cdot \sigma_{\Delta t}^2} = \sqrt{T_q^4 \cdot \sigma_{\Delta t}^2} = \sqrt{(500)^4 \cdot (2 \cdot 10^{-9})^2} = \pm 5 \cdot 10^{-4} Q/s \quad (74)$$

7.2.2. Fator de escala FE

Este erro sistemático é originário da combinação da incerteza pertence a medida de referência do escoamento dado por d_f e a incerteza pertinente a quantização de seu comprimento em pixels na imagem d_{pix} . Sendo a equação para o fator de escala FE dada em (48), a sua incerteza combinada pode ser expressa por:

$$\sigma_{FE} = \sqrt{\left(\frac{\partial FE}{\partial d_f}\right)^2 \cdot \sigma_{d_f}^2 + \left(\frac{\partial FE}{\partial d_{pix}}\right)^2 \cdot \sigma_{d_{pix}}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{d_{pix}}\right)^2 \cdot \sigma_{d_f}^2 + \left(\frac{d_f}{d_{pix}^2}\right)^2 \cdot \sigma_{d_{pix}}^2} \quad (75)$$

Onde σ_{d_f} é a incerteza na medição de d_f e $\sigma_{d_{pix}}$ a incerteza na quantificação de d_{pix} .

A medida d_f foi obtida mediante a utilização de um paquímetro com resolução de 0,1mm e portanto adota-se este valor para sua incerteza σ_{d_f} . A incerteza em relação a d_{pix} é a quantização mínima espacial em um sensor CCD, ou seja, $\sigma_{d_{pix}} = \pm 1 pixel$. Assim, para $d_f=0,09m$ e $d_{pix}=292$ tem-se que (75) torna-se:

$$\sigma_{FE} = \sqrt{\left(\frac{1}{292}\right)^2 \cdot (0,1^{-3})^2 + \left(\frac{0,09}{292^2}\right)^2 \cdot (1)^2} \cong \pm 1,1097 \cdot 10^{-6} m/pixel \quad (76)$$

7.2.3. Quantização do deslocamento

Esta é a incerteza aleatória limitante em um SVPI. Isto por que a incerteza de quantização usualmente atribuída a um sensor CCD é a de 1 pixel. Quando considera-se grandes comprimentos em pixels, como é o caso da equação (76), esta incerteza é insignificante. Contudo, quando considera-se pequenos comprimentos em pixels, a incerteza pode atingir valores enormes. Portanto, em um SVPI, onde o deslocamento do grupo de partículas geralmente

é da ordem de 10 pixels, a incerteza de quantização atinge um valor da ordem de 10% da medida.

Felizmente, o algoritmo subpixel implementado, pelos motivos explicados no item 0, permite que a incerteza na quantização do deslocamento, para o caso em que a luminância é discretizada em 8bits, seja reduzida para:

$$\sigma_q = \pm \frac{1}{15} \text{pixel} \quad (77)$$

7.3. Cálculo da incerteza combinada

O procedimento de cálculo para a incerteza combinada é idêntico tanto para a componente u quanto para a componente v do vetor velocidade. Usualmente seus valores são distintos, pois os deslocamentos em pixels Δx_{ip} e Δy_{ip} referentes a equação (47) são diferentes. No entanto, como a contribuição da incerteza de quantização σ_q sobre a incerteza combinada é dominante frente as contribuições das incertezas do fator de escala σ_{FE} e da taxa de quadros σ_{T_q} , pode-se assumir que a incerteza sobre cada uma das componentes do vetor velocidade é aproximadamente igual, independente do seu deslocamento em pixels.

Desta forma, calcular-se-á a incerteza combinada sobre apenas a componente u do vetor velocidade, sendo o seu resultado extensível a outra componente. Assim, tem-se que, segundo (47), (49) e (72), a incerteza combinada sobre a componente u do vetor velocidade é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial \Delta x_{ip}}\right)^2 \cdot \sigma_q^2 + \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial FE}\right)^2 \cdot \sigma_{FE}^2 + \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial T_q}\right)^2 \cdot \sigma_{T_q}^2} \quad (78)$$

Calculando-se as derivadas:

$$\sigma_u = \sqrt{(FE \cdot T_q \cdot \sigma_q)^2 + (\Delta x_{ip} \cdot T_q \cdot \sigma_{FE})^2 + (\Delta x_{ip} \cdot FE \cdot \sigma_{T_q})^2} \quad (79)$$

Considerando as equações (74), (76) e (77) juntamente com os valores para T_q e FE disponíveis nos itens 7.2.1 e 7.2.2 respectivamente e sendo o deslocamento máximo em pixels Δx_{ip} das partículas sobre o sensor CCD de 4,2 pixels, tem-se que, segundo a equação (79), a incerteza máxima sobre a componente u do vetor velocidade possui o seguinte valor:

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{3,0821}{10^4} \cdot 500 \cdot \frac{1}{15}\right)^2 + \left(4,2 \cdot 500 \cdot \frac{1,1097}{10^6}\right)^2 + \left(4,2 \cdot \frac{3,0821}{10^4} \cdot \frac{5}{10^4}\right)^2} \cong 0,0105 \text{ m/s} \quad (80)$$

Em termos percentuais, considerando-se a velocidade máxima do perfil dada pela equação (81), a incerteza σ_u da equação (80) corresponde a 1,6%.

8. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para o Re do escoamento dado pela equação (63), tem-se que o número n referente à equação (58) possui o valor n=7 [Schlichting, 1968]. Assim, inserindo a equação (62) em (58), tem-se que:

$$U = U(u_g = 0,5265, n = 7) = 0,5265 \frac{(7 + 1) \cdot (14 + 1)}{2 \cdot 49} \cong 0,6447 \text{ m/s} \quad (81)$$

Utilizando a equação (81) na equação (57), ter-se-á a curva analítica com a qual se estabelecerá a validação do resultado experimental. Assim:

$$u_t = u_t(r) = 0,6447 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^{-3} - r}{22 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/7} \quad (82)$$

Das 100 imagens capturadas, selecionou-se duas ao acaso para a medição do campo de velocidade instantâneo, as quais constam na Figura 8.1. Determinou-se para tanto AINT=80 pixels, uma vez que assim assegurou-se que mais de 3 partículas estivessem presentes internamente à área de interesse [Huang et al., 1997]. Este valor foi comprovado experimentalmente e permitiu que poucos vetores espúrios estivessem presentes. Também, empregou-se GRAD=40 pixels, proporcionando uma sobreposição de meia área de interesse.

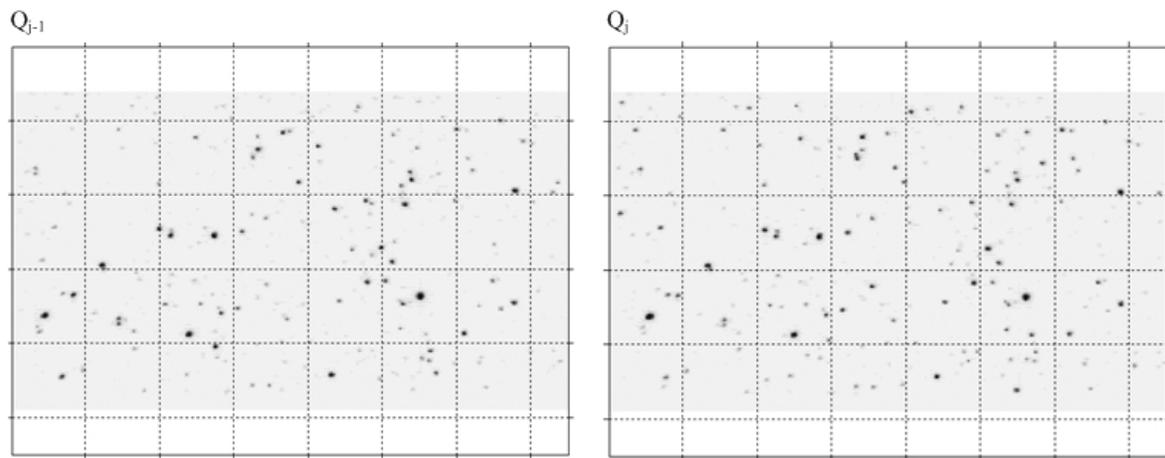


Figura 8.1 – Quadros utilizados na medição do campo de velocidade.

O campo de velocidade instantâneo resultante da aplicação do programa desenvolvido consta na Figura 8.2. Nesta, pode-se observar a presença de 4 vetores espúrios bem definidos, os quais estão presentes justamente nas regiões do quadro onde há ausência de partículas, justificando o erro proporcionado. Este fato está diretamente relacionado à não homogeneização dos diâmetros d_p das partículas utilizadas. A sua grande variabilidade determina que haja também uma grande variação na intensidade de luz por estas espalhadas. Assim, as com maior d_p , as quais espalham mais, predominam na imagem uma vez que a íris ou o tempo de obturação são ajustados para não proporcionar a saturação dos elementos CCDs. Este processo constitui um

filtro ótico natural por luminância. Esta restrição pode ser eliminada selecionando-se previamente as partículas com diâmetros semelhantes. Os valores numéricos de cada vetor pertencente a este campo de velocidade juntamente com suas coordenadas (l,c) em pixels constam no Apêndice VII.

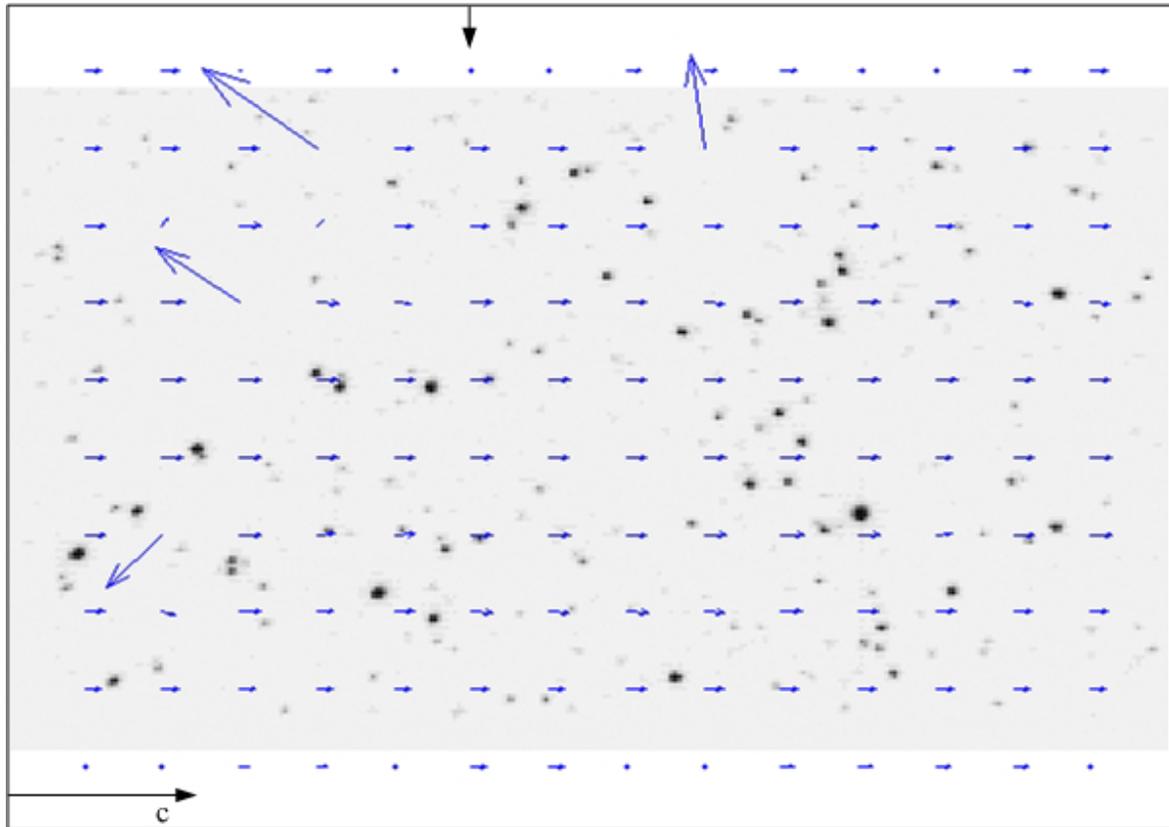


Figura 8.2 – Campo de velocidade resultante da aplicação do programa desenvolvido.

O procedimento de filtragem implementado não funcionou por completo pois, neste método linear, os vetores espúrios também participam, contaminando os critérios de eliminação. Assim, em certas circunstâncias, estes acabam por não serem eliminados. Uma solução é a utilização de um filtro não-linear através de mediana [Westerweel, 1994]. Esta topologia de filtro é muito utilizada em imagens para a eliminação de ruídos dominados por espigadas. Estas espigadas usualmente são de tão alta intensidade que constituem um ruído do tipo binário, aleatoriamente distribuído sobre a imagem [Gonzalez, 2000].

O campo de velocidade médio também foi mensurado e consta na Figura 8.3. Este foi obtido através da média dos campos de velocidade instantâneos referentes aos 100 quadros capturados do escoamento, correspondendo a aproximadamente 3,33s. A operação de média temporal determinou que a contribuição dos vetores espúrios fosse minimizada nos resultados, diminuindo a variação espacial da magnitude dos vetores que compõe o campo de velocidade. Também, devido ao caráter quase-aleatório da turbulência, as pequenas flutuações observadas no

campo de velocidade foram atenuadas, propiciando uma maior uniformidade. Estes 2 fatores facilitaram a apresentação gráfica do campo de velocidade médio, o qual é mais harmônico em relação ao campo instantâneo anterior.

Considerou-se para comparação com o resultado analítico os perfis referentes à coordenada $c=240$ do campo de velocidade instantâneo e médio. Tal coordenada esta assinalada tanto na Figura 8.2 quanto na Figura 8.3. A coordenada l destes perfis foi limitada pelo programa a apenas os vetores que estivessem presentes na área do quadro referente à imagem do escoamento analisado, descartando os vetores presentes na área morta. Preferiu-se assim pós-processar a imagem, mediante um algoritmo especialmente desenvolvido para a geometria duto circular, a pré-processar a imagem através da função recorte.

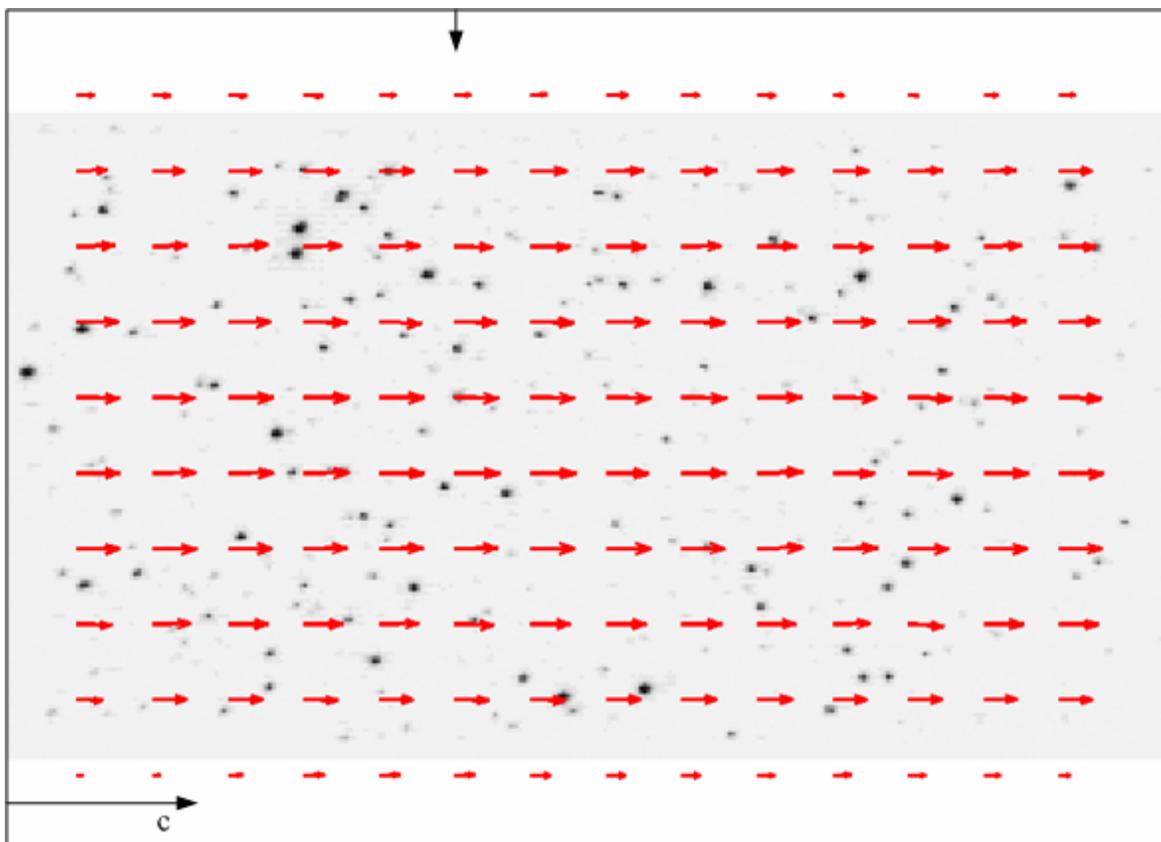


Figura 8.3 – Campo de velocidade médio resultante da aplicação do programa desenvolvido.

Estes perfis instantâneo e médio (referentes à coordenada $c=240$ pixels) foram plotados juntamente com o perfil analítico no gráfico adimensional presente na Figura 8.4. Tanto o perfil instantâneo quanto o médio estão abaixo do analítico, confirmando a tendência de que qualquer medição que utilize partículas irá fornecer um valor inferior ao analítico ou ao numérico calculado. Isto se deve à presença da força de arrasto, oriunda da viscosidade do fluido e que impede que a velocidade da partícula seja próxima a do escoamento [Rodrigues, 2003]. Juntamente, pode-se observar uma maior concordância do perfil médio com o perfil analítico.

Este fato está relacionado à fundamentação teórica a partir de médias temporais, a qual origina a equação (82).

Os resultados numéricos referentes a cada coordenada l para os perfis de velocidade analítico, experimental instantâneo e experimental médio bem como seus erros relativos e absolutos constam na Tabela 8.1. O tempo total requerido para processamento das imagens pelo programa atingiu 7,5930s para o campo de velocidade instantâneo e 965,3453s para o campo de velocidade médio, valores mensurados através de uma função interna do MATLAB.

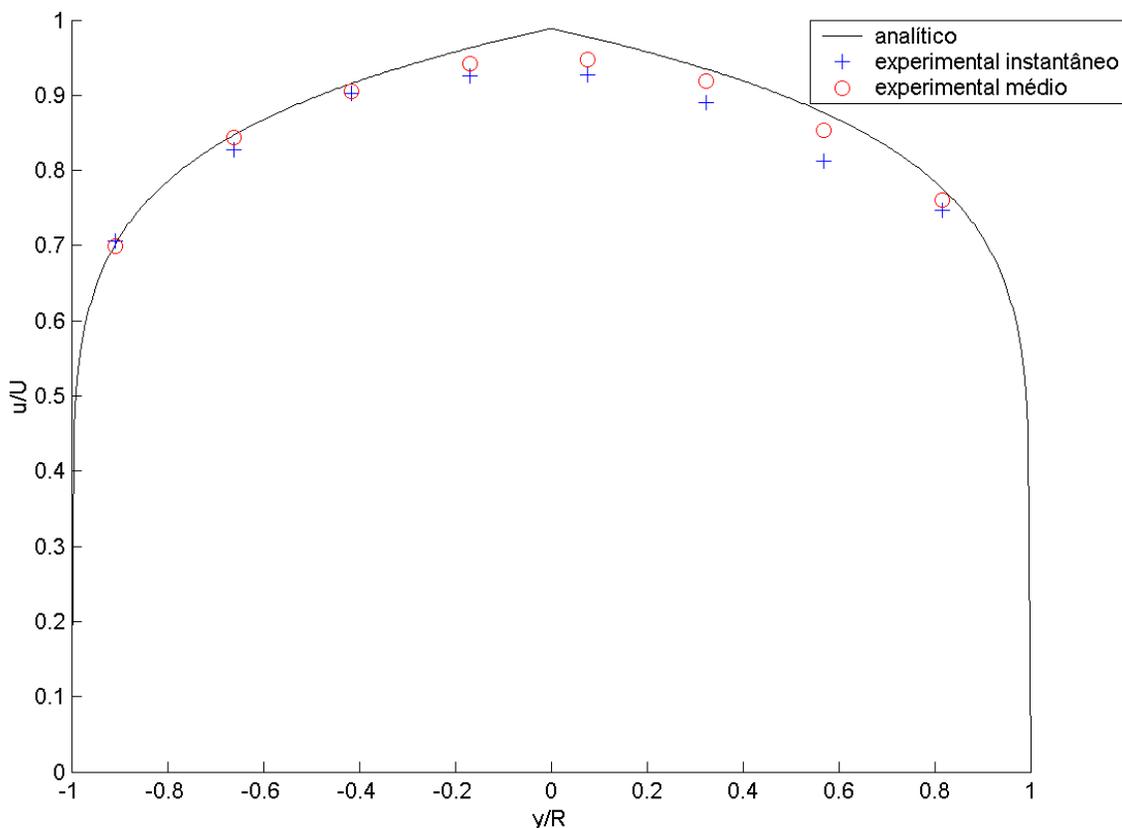


Figura 8.4 – Comparação resultado analítico e experimental para a coordenada $c=240$ pixels.

O escoamento interno ao duto circular não possui componentes de velocidade na direção y expressivas. Por este motivo, todos os vetores, a menos de uma pequena flutuação em y , devido à turbulência, estão direcionados em x .

No entanto, para mostrar a eficácia do SVPI desenvolvido, independentemente do sistema físico, obteve-se quadros relativos a um escoamento cisalhante perto de uma parede, disponíveis em um banco de imagens para velocimetria. Estes quadros e o seu resultado obtido após o processamento são mostrados no Apêndice VIII. Pode-se observar a ausência de vetores velocidade espúrios e uma maior densidade de vetores velocidade na imagem. Isto deve ao fato das partículas utilizadas para captação destes quadros serem menores, mais uniformes em

relação ao diâmetro d_p e assim proporcionar uma densidade maior que a possível de se obter neste trabalho.

Tabela 8.1 – Resultados do perfil de velocidade na coordenada $c=240$ pixels.

l (pixels)	80	120	160	200	240	280	320	360
y (cm)	1,8006	1,2591	0,7175	0,1760	-0,3655	-0,9071	-1,4486	-1,9902
Análítico (m/s)	0,5111	0,5777	0,6164	0,6445	0,6355	0,6045	0,5594	0,4662
Experimental instantâneo (m/s)	0,4874	0,5302	0,5804	0,6050	0,6040	0,5982	0,5522	0,4653
Erro absoluto (m/s)	0,0238	0,0475	0,0360	0,0395	0,0315	0,0063	0,0072	0,0010
Erro relativo (%)	4,6494	8,2222	5,8427	6,1325	4,9587	1,0423	1,2870	0,2054
Experimental médio (m/s)	0,4963	0,5565	0,5992	0,6182	0,6143	0,5998	0,5589	0,4634
Erro absoluto (m/s)	0,0148	0,0212	0,0172	0,0263	0,0212	0,0047	0,0005	0,0028
Erro relativo (%)	2,8957	3,6697	2,7903	4,0806	3,3359	0,7775	0,0893	0,6006

9. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado o projeto e a implementação de um sistema de instrumentação eletro-eletrônica para caracterização de escoamentos através de processamento digital de imagens.

Para tanto, atualizou-se a nomenclatura, a qual é muitas vezes erroneamente utilizada, estabelecendo o conceito de velocimetria por processamento de imagens e descrevendo as suas limitações intrínsecas. Relacionou-se então esta técnica aos seus modos particulares de operação e que são empregados em geral na literatura como PTV, PIV e LSV, denominação utilizada em razão da densidade de partículas presentes na imagem.

Desenvolveu-se então uma metodologia nova de concepção e análise. Dividiu-se o SVPI em um Sub-sistema de Formação da Imagem (SFI) e em um Sub-Sistema de Processamento da Imagem (SPI). Visou-se com isto demonstrar a separabilidade entre ambos e a sua independência em relação ao meio físico analisado.

O SFI contém todos os equipamentos pertinentes à formação da imagem da partícula como a câmera com sensor eletrônico de imagem, a fonte de luz, o plano de luz, as partículas traçadoras, o dispositivo sincronizador e a transmissão do sinal de imagem. Cada um destes itens componentes foi então analisado em detalhe. Priorizou-se no entanto, as arquiteturas dos sensores CCDs pois, como foi exposto, o processo de medição depende diretamente de como a imagem é formada.

O SPI envolve a placa de aquisição de imagens, a técnica de captura e os algoritmos de pré-processamento, processamento e pós-processamento. Estabeleceu-se então uma revisão de todas as técnicas de captura e seus algoritmos de processamento associado. Aproveitou-se este contexto então para inserir formalmente as novas técnicas desenvolvidas nesta Universidade em anos anteriores.

A complexidade bem como a grande quantidade de equipamentos envolvendo diferentes conceitos físicos utilizados determinou que, previamente, um estudo detalhado do seu funcionamento fosse efetuado. Familiarizou-se então com as teorias envolvidas na sua concepção e os utilizou exaustivamente de forma individual. Assim, adquiriu-se segurança e treino em seu emprego.

Implementou-se então um SVPI, modo PIV. Utilizou-se no SFI os equipamentos disponíveis em laboratório. Dentre estes, salienta-se a câmera Redlake MotionMeter 500, a qual propicia a aquisição de informações do escoamento com taxas de quadro T_q de até 500Q/s. Com este número de quadros por segundo foi demonstrado que as grandes estruturas da turbulência envolvidas no meio físico utilizado para validação do SVPI podem ser determinadas. O

programa para o SPI foi implementado utilizando um algoritmo estatístico baseado na correlação-cruzada. Os seus resultados são apresentados nas formas de gráficos e em arquivos ASCII.

Para validação do SVPI desenvolvido, efetuou-se medições sobre um escoamento interno ao duto circular, em regime de alta turbulência. Tal geometria foi escolhida pois, devido aos resultados suficientemente embasados pela teoria ao longo dos anos passados, propicia uma referência segura para comparação. Este sistema físico também teve de ser implementado e um procedimento experimental foi desenvolvido para que a medição se tornasse possível.

O desempenho do sistema se mostrou satisfatório, aproximando-se muito do comportamento previsto pela teoria, tanto para o perfil de velocidade instantâneo quanto para o médio. A utilização dos algoritmos subpixel para estimar o deslocamento do grupo de partículas permitiu que uma incerteza de apenas 1,6% fosse obtida. A presença de alguns poucos vetores espúrios ocorreu devido à baixa densidade de partículas em certas regiões das imagens, quase tendendo ao modo PTV. Isto ocorreu devido a grande variedade de diâmetros nas partículas utilizadas, sendo as menores filtradas óticamente por sua baixa intensidade de LASER espalhada em relação à abertura da íris utilizada. O filtro empregado não propiciou que todos estes vetores velocidade espúrios fossem eliminados pois, de certa maneira, estes participam dos critérios de eliminação.

10. TRABALHOS FUTUROS

O SVPI desenvolvido, principalmente do ponto de vista do seu programa para processamento digital das imagens no SPI, teve por objetivo servir de base para que sobre ele novos algoritmos sejam implementados, constituindo uma ferramenta robusta. Assim, sugere-se para trabalhos futuros, os itens descritos nos parágrafos abaixo.

Do ponto de vista do pré-processamento das imagens, é interessante o desenvolvimento de um algoritmo de contagem do número de partículas presentes no quadro Q_j . Assim, é possível implementar outro algoritmo que selecione de forma automática o tamanho ótimo da área de interesse, eximindo do usuário tarefa que na forma atual é por ele realizada através de inspeção visual. Seguindo esta linha, outra sugestão é a de implementar áreas de interesse com geometrias diferentes da quadrada, a qual é utilizada atualmente. Desta forma, pode-se tentar minimizar a distorção ocorrida no padrão entre dois quadros capturados sucessivamente, proporcionando maior precisão na medição.

Uma melhora substancial pode ser atingida na etapa de processamento. O programa atual, como exaustivamente comentado, mensura a velocidade de um grupo de partículas internas a uma área de interesse segmentada. No entanto, com esta informação é possível tentar estabelecer o rastreamento desta partícula no quadro seguinte. Ou seja, através da velocidade de grupo é possível inferir a velocidade individual de cada partícula interna a área de interesse. Isto constitui um procedimento computacional poderoso, envolvendo algoritmos a serem desenvolvidos de forma precisa e robusta. Assim, pode-se obter maior resolução espacial na medida. Não se observou na bibliografia utilizada a existência de tal forma de processamento, constituindo portanto uma inovação. Do ponto de vista de tempo de processamento, pode-se testar a implementação da transformada Hartley ao invés da de Fourier, a qual é real e por isto deve aumentar substancialmente a velocidade de processamento, útil para quadros com grande número de pixels.

No pós-processamento, pode-se implementar outras topologias de filtros e verificar o seu funcionamento. Em particular, recomenda-se o filtro pela mediana dos vetores da vizinhança. Este filtro é não-linear e, caso não haja uma grande contaminação por vetores espúrios, os critérios de eliminação não serão influenciados por sua presença.

Para a caracterização completa do escoamento, é importante também a implementação de algoritmos de pós-processamento que utilizem o campo de velocidade pelo programa desenvolvido. Estes algoritmos consistem em estimar as grandezas diferenciais em relação às coordenadas espaciais (vorticidade, tensões normais e tensões cisalhantes), integrais em relação às coordenadas espaciais (circulação, fluxo de massa por unidade de profundidade, funções do

tipo potencial e corrente) e diferenciais em relação ao tempo (a intensidade de turbulência). Também é interessante o cálculo tanto das linhas de isovelocidade como a detecção das estruturas envolvidas na turbulência.

Por fim, para versatilização e diversificação, pode-se implementar as técnicas *intraframe* utilizando LASER contínuo (rastros e campos entrelaçados) e LASER pulsado, agregando-as ao programa já desenvolvido. Ter-se-á assim uma ferramenta unificada com todos os algoritmos, a qual poderá ser implementada em linguagens de programação de baixo nível como C++, garantindo portabilidade em sua utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adrian, R. J., 1991. “Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics”, **Annual Reviews in Fluid Mechanics**, vol. 23, pp 261-304.

Adrian, R. J., Keane, R. D., 1990. “Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems”, **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 1, pp. 1202-1215.

Adrian, R. J., Yao, C. S., 1985. “Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials”, **Applied Optics**, vol. 24, pp. 44-52.

Almeida, J. A., 1997. “**Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas**”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RJ, Rio de Janeiro.

Beesley, M. J., 1976. “**Lasers and their applications**”, Halsted Press, New York.

Bejan, A., 1984. “**Convection Heat Transfer**”, John Wiley & Sons, Canada.

Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1986. “**Random Data, Analysis and Measurement Procedures**”, John Wiley, New York.

Bernabeu, E., Amaré, J. C., Arroyo, M. P., 1982. “White-light speckle method of measurement of flow velocity distribution”, **Applied Optics**, vol. 21, pp. 2583-2593.

Bolinder, J., 1999. “**On the accuracy of a digital particle image velocimetry system**”, Department of Heat and Power Engineering division of Fluid Mechanics, Lund Institute of Technology, Sweden.

Brigham, E. O., 1974. “**The Fast Fourier Transform**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Camussi, R., 2002. “Coherent structure identification from wavelet analysis of particle image velocimetry data”, **Experiments in Fluids**, vol. 32, pp. 76–86.

Castleman, K. R., 1996. “**Digital Image Processing**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Chen, P. H., Yean, J. Y., Chen, J. L., 1998. “An artificial neural network for double exposure PIV image analysis”, **Experiments in Fluids**, vol. 23, pp. 373–374.

Chin, S. L., 1989. “**Fundamentals of Laser Optoelectronics**”, World Scientific Publishing, Singapore.

Eisberg, R., Resnick, R., 1983. “**Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**”, Campus, Rio de Janeiro.

Doebelin, E. O., 1990. “**Measurement Systems Application and Design**”, McGraw-Hill, New York.

Fingerson, L. M., Adrian, R. J., Menon, R. K., Kaufman, S. L., 1991. “**Data Analysis, Laser Doppler Velocimetry and Particle Image Velocimetry**”, TSI Short Course Text.

Freire, A. P. S., Menut, P. P. M., Su, J., 2002. “**Turbulência**”, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM), Rio de Janeiro.

Gonzalez, R. C., Woods, R. E., 2000. “**Processamento de Imagens Digitais**”, Edgard Blücher, São Paulo.

Goodman, J. W., 1996. “**Introduction to Fourier Optics**”, McGraw-Hill Book Company, San Francisco.

Grant, I., Pan, X., 1997. “The use of neural techniques in PIV and PTV”, **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 8, pp. 1399-1405.

Grob, B., 1989. “**Televisão e Sistemas de Vídeo**”, Guanabara, Rio de Janeiro.

Gutkoski, L. L., 2001. “**Ferramenta Computacional para Medição de Campos de Velocidade utilizando Processamento Digital de Imagens**”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

Hanselman, D., Littlefield, B., 1999. “**MATLAB 5, versão do estudante, Guia de Usuário**”, MAKRON Books do Brasil, São Paulo.

Hecht, E., Zajac, A., 1974. “**Optics**”, Addison-Wesley Pub. Company, Massachusetts.

Huang, H., Dabiri, D., Gharib, M. 1997. “On errors of digital particle image velocimetry”, **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 8, pp. 1427-1440.

Janesick, J., 2002. “Dueling Detectors”, **Spies OEMagazine**, vol. 4669A, San Jose.

Jackson, J. D., 1999. “**Classical Electrodynamics**”, John Wiley & Sons, New York.

Jenkins, F. A., White, H. E., 1950. “**Fundamentals of Optics**”, McGraw-Hill Book Company, New York.

Keane, R. D., Adrian, R. J., 1989. “**Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images**”, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Keane, R. D., Adrian, R. J., 1992. “**Optimization of particle image velocimeters. Part II: Multiple pulsed systems**”, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Labonté, G., 2001. “A new neural network for particle-tracking velocimetry”, **Experiments in Fluids**, vol. 26, pp. 340–346.

Lai, W. T., Bjorkquist, D. C., Abbott, M. P., Naqwi, A. A., 1998. “Video systems for PIV recording”, **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 9, pp. 297-308.

Lai, W. T., 1996. “**A New Approach in Experimental Fluid Research**”, Fluid Mechanics Instrument Division, TSI Incorporated, Minnesota.

Landau, L. D., Lifshitz, E. M., 1959. **“Fluid Mechanics”**, Volume 6 of Course of Theoretical Physics, Addison-Wesley, London.

Lee, S. J., Kim, G. B., 2003. “X-ray particle image velocimetry for measuring quantitative flow information inside opaque objects”, **Journal of Applied Physics**, vol. 94, pp. 3620-3623.

Liang, D. F., Jiang, C. B., Li, Y. L., 2003. “Cellular neural network to detect spurious vectors in PIV data”, **Experiments in Fluids**, vol. 34, pp. 52–62.

Litwiller, D., 2001. “CCD vs. CMOS: Facts and Fiction”, **Photonics Spectra**, Laurin Publishing CO. Inc., Canada.

McClellan, J. H., Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., Burrus, C. S., Parks, T. W., Schuessler, H. W., 1998. **“Signal Processing Using Matlab 5”**, Prentice-Hall, New Jersey.

Menon, R., Kronewetter, H., 1992. **“Quantitative Flow Measurement System Using the PIV Technique”**, Fluid Mechanics Instrument Division, TSI Incorporated, Minnesota.

Muncheryan, H. M., 1980. **“Laser Technology”**, Howard W. Sams & CO., Indiana.

Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., 1998. **“Discrete-Time Signal Processing”**, Prentice-Hall, New Jersey.

Pentax, 1998. **“CCTV Certified ISO9001 e ISO14001”**, Manual EN50130-4 /A-1, US.

Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., 1998. **“Particle Image Velocimetry”**, Springer-Verlag, New York.

Redlake MASD, 2001. **“The MotionMeter™ High Speed Digital Imaging Camera”**, Manual No. 9400-0024 Revision G, California.

Richardson, I. E. G., 2003. **“H.264 and MPEG-4 Video Compression - Video Coding for Next-generation Multimedia”**, John Wiley & Sons, England.

Riethmuller, M. L., 1996. “Particle Image Velocimetry”, **Lecture Series**, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.

Rodrigues, R. E. S., 2003. **“Comportamento de Partículas em Fluido frente a Variações de Velocidade”**, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.

Roesgen, T., 2003. “Optimal subpixel interpolation in particle image velocimetry”, **Experiments in Fluids**, vol. 35, pp. 252-256.

Schalkoff, R. J., 1989. **“Digital Image Processing and Computer Vision”**, John Wiley & Sons, Canada.

Schlichting, H., 1968. **“Boundary-Layer Theory”**, McGraw-Hill, New York.

Schlicke, T., 2001. **“Breaking Waves and the Dispersion of Surface Films”**, Doctor of Philosophy Thesis, University of Edinburgh.

Sedra, A. S., Smith, K. C., 2000. **“Microeletrônica”**, Makron Books, São Paulo.

- Shames, I. H., 1992. “**Mechanics of Fluids**”, McGraw-Hill, New York.
- Sheng, J., Meng, H., 1998. “A genetic algorithm particle pairing technique for 3D velocity field extraction in holographic particle image velocimetry”, **Experiments in Fluids**, vol. 25, pp. 461-473.
- Sun, H., 2002. “The Hartley transform applied to particle image velocimetry”, **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 13, pp. 1996-2000.
- Texas Instruments Incorporated, 2001. “**TC237B 680×500-Pixel CCD Image Sensor**”, Datasheet SOCS063, Texas.
- Theuwissen, A., Roks, E., 2001. “Building a Better Mousetrap”, **Spies OEMagazine**, San Jose.
- Thornton, S. T., Marion, J. B., 2004. “**Classical Dynamics of Particles and Systems**”, Thomson Brooks/Cole, Belmont.
- Thomas, E. J., Watson, M., 1999. “First experiments in the Dusty Plasma Experiment device”, **Physics of Plasmas**, vol. 6, pp. 4111-4117.
- TSI Incorporated, 1995. “**Particle Image Velocimetry (PIV): Theory of Operation**”, Manual.
- van de Hulst, H. C., 1957. “**Light scattering by small particles**”, John Wiley & Sons, New York.
- van der Laan, F. T., 2001. “**Medição de Campos de Velocidade em Fluidos com Técnicas Intraframe de Processamento de Imagens**”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.
- van der Laan, F. T., Ferreira, V. C. S., Cornélius, V., 1998. “Medição de Fluidos em Alta Velocidade usando a Técnica PIV com Processamento Intraframe de Imagens”, **Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor Y Matéria**, vol. 2, pp. 575-579.
- van der Laan, F. T., Rodrigues, R. E. S., Elbern, A., 2002. “Uncertainty Analysis in Velocity Fields Using PIV”, **10 International symposium on flow visualization**, vol. FO118, pp. 1-8.
- Vieira, E.D.R., Dall’Agnol, E., Mansur, S.S., 1999. “Flow visualization of heart valves prostheses in a steady flow model”, **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, vol. 15, pp. 63-68.
- Zworykin, V. K., 1940. “**Television: the electronics of image transmission**”, John Wiley & Sons, New York.
- Wernet, M. P., 1993. “Fuzzy Logic Particle Tracking Velocimetry”, **SPIE Conference on Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow**, San Diego.

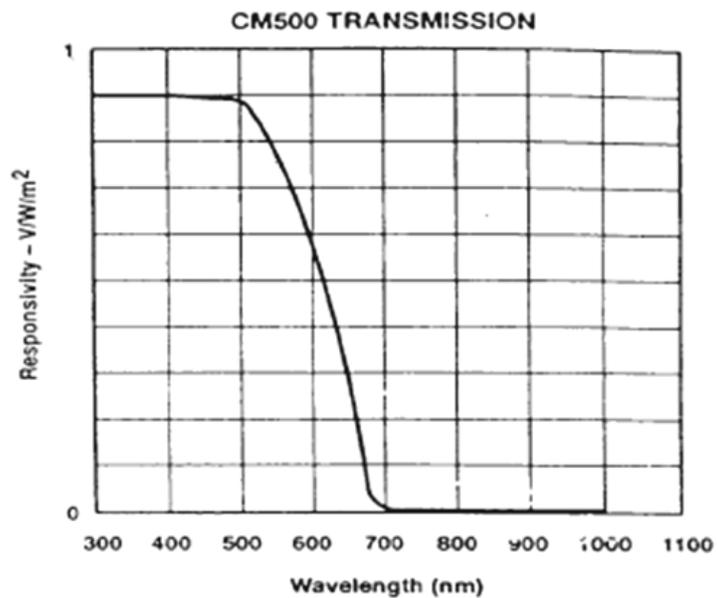
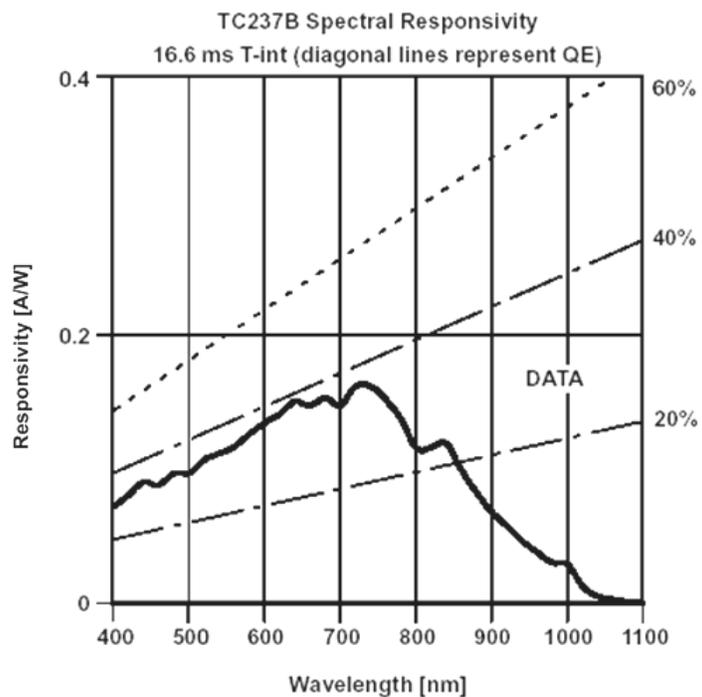
Wernet, M. P., 1999. "Fuzzy Logic Enhanced Digital PIV Processing Software", **18th International Congress on Instrumentation for use in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF)**, Toulouse.

Westerweel, J., 1994. "Efficient Detection of Spurious vectors in particle image velocimetry data", **Experiments in Fluids**, vol. 16, pp. 236-247.

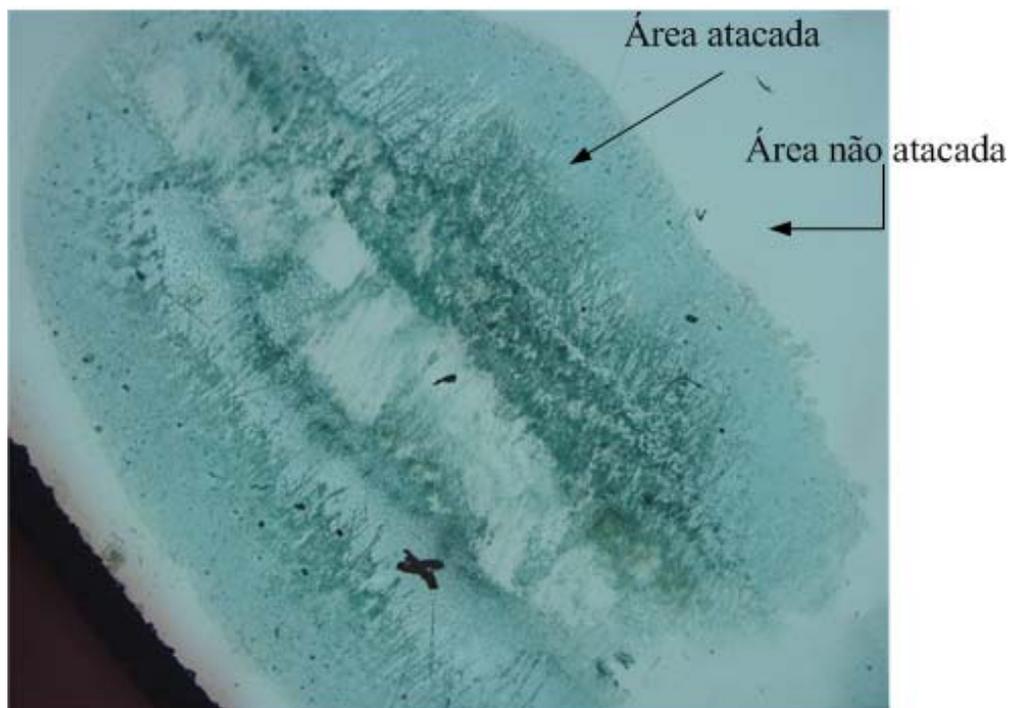
Westerweel, J., 1997. "Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry", **Journal of Measurement Science and Technology**, vol. 8, pp. 1379-1392.

Young, M., 1993. "**Optics and Lasers**", Springer-Verlag, New York.

APÊNDICE I



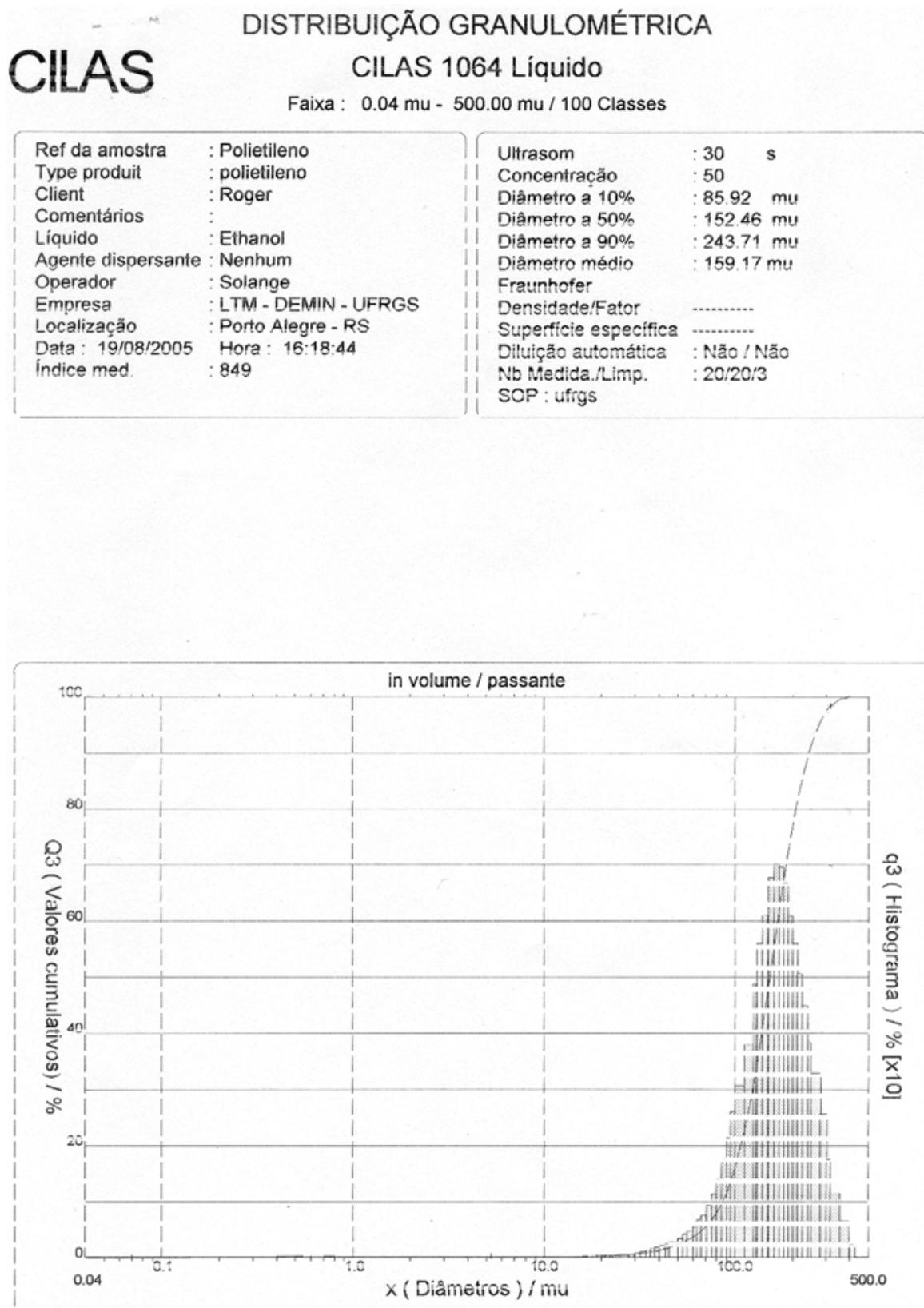
APÊNDICE II



Área atacada ampliada



APÊNDICE III



CILAS**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA****CILAS 1064 Líquido**

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra	: Polietileno	Ultrasom	: 30 s
Type produit	: polietileno	Concentração	: 50
Client	: Roger	Diâmetro a 10%	: 85.92 mu
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 152.46 mu
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 243.71 mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 159.17 mu
Operador	: Solange	Fraunhofer	:
Empresa	: LTM - DEMIN - UFRGS	Densidade/Fator	: -----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	: -----
Data : 19/08/2005	Hora : 16:18:44	Diluição automática	: Não / Não
Índice med.	: 849	Nb Medida./Limp.	: 20/20/3
		SOP : ufrgs	

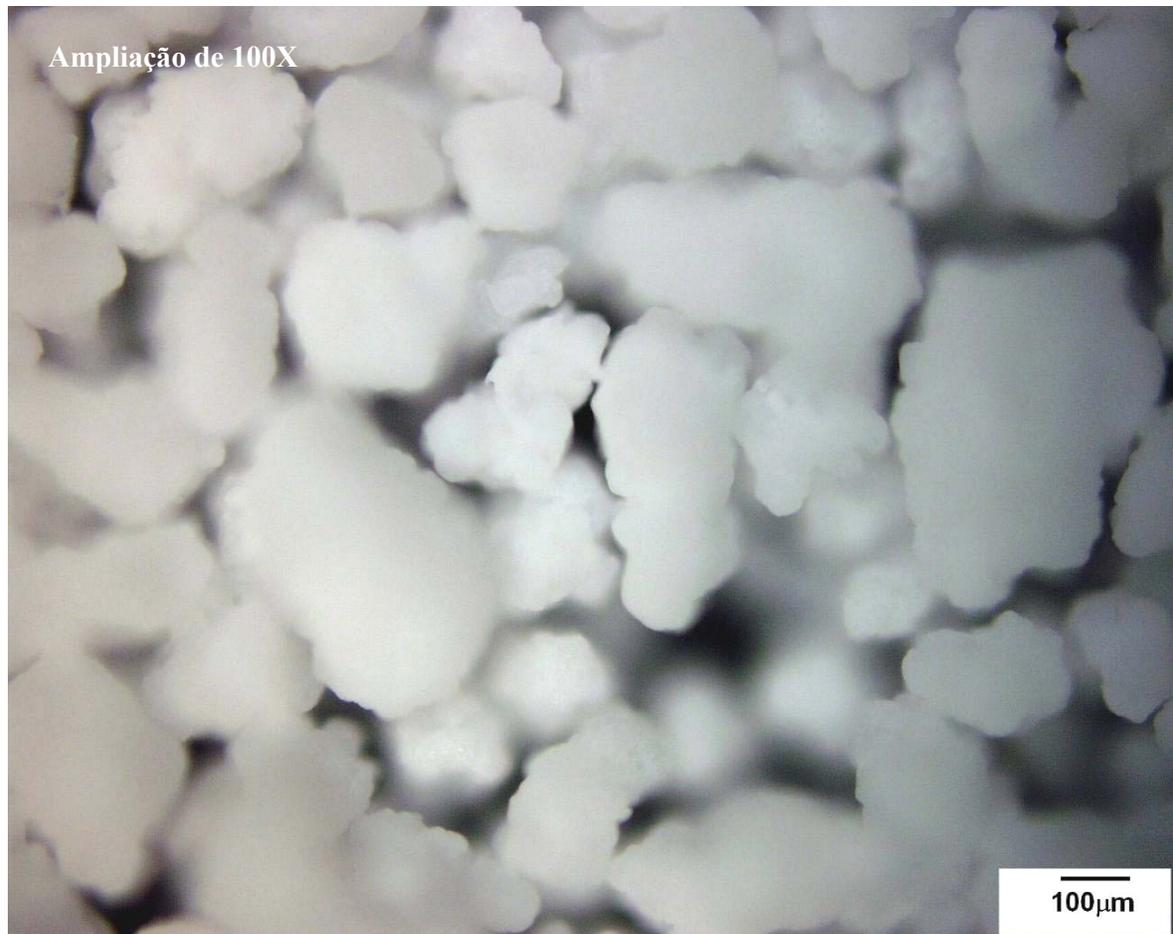
Valores acumulados característicos in volume / percento

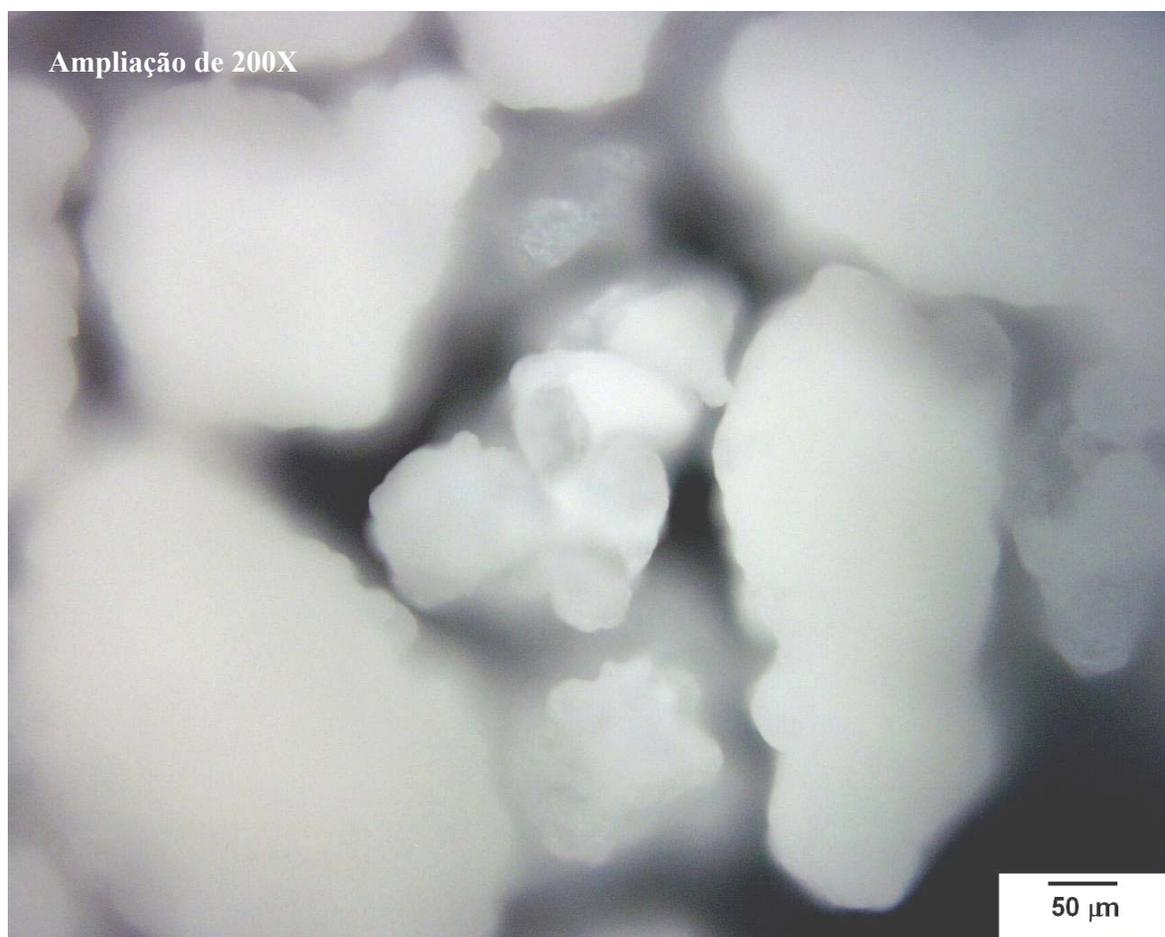
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.03	0.05	0.11	0.16	0.23	0.31	0.38	0.41	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.44	0.46
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.58	0.65	0.73	0.82	0.93
q3	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.03	0.04	0.08	0.09	0.12
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	1.06	1.20	1.36	1.62	1.81	2.34	2.70	3.09	3.67	4.16
q3	0.15	0.17	0.20	0.23	0.27	0.33	0.40	0.46	0.55	0.66
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	4.69	5.72	6.66	8.03	9.65	11.51	13.66	16.06	22.63	30.82
q3	0.74	0.92	1.12	1.38	1.74	2.12	2.59	3.05	3.78	4.87
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	34.18	41.10	48.25	55.18	61.64	67.48	72.52	76.91	81.41	85.18
q3	5.59	6.09	6.76	7.00	6.95	6.66	6.08	5.58	5.04	4.47
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	89.23	91.28	95.71	97.55	98.40	99.59	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	3.83	3.28	2.55	1.74	1.14	0.65	0.22	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

APÊNDICE IV







APÊNDICE V

A tubulação utilizada possui as seguintes características:

- Tubo em PVC e acrílico;
- Comprimento linear total de 70,56m;
- 4 curvas 45°;
- 30 joelhos 90°;

A altura manométrica total AMT é definida pela equação abaixo

$$AMT = AS + AR + hf \cdot c_h \quad (83)$$

Onde AS é a altura de sucção, AR é a altura de recalque, hf são as perdas totais na sucção e no recalque devido à utilização de conexões e c_h é um coeficiente que depende do material que compõe o duto, de seu diâmetro e da vazão Q_{vt} do escoamento.

A altura de sucção AS medida na tubulação é:

$$AS = 3,6m \quad (84)$$

A altura de sucção AR medida na tubulação é:

$$AR = 1,8m \quad (85)$$

Os joelhos 90° e as curvas 45° possuem um comprimento equivalente. Ou seja, a perda de carga efetuada por estes pode ser convertida, mediante a um fator, a perda de carga caso esta conexão fosse um duto linear. Assim, as perdas totais podem ser computadas em unidades de comprimento. Tem-se que as perdas totais hf, considerando o fator recomendado pela NBR-5626/82, totalizam:

$$hf = 4 \cdot 1,2m + 30 \cdot 3,2m + 70,56m = 171,36m \quad (86)$$

Como o comprimento linear em PVC da tubulação é muito maior que o comprimento linear em acrílico, o coeficiente c_h será aproximado para uma tubulação unicamente composta de PVC. Este coeficiente, para os parâmetros da tubulação utilizada como $D=44\text{mm}$ e $Q_{vt}=800,558\text{cm}^3/\text{s}$, pode ser obtido de tabelas e assume o seguinte valor:

$$c_h = 1,5\% \quad (87)$$

Tem se então que, com os valores de (84), (85), (86) e (87), que a AMT é dada por:

$$AMT = 3,6m + 1,8m + 171,36m \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 7,970mca \quad (88)$$

APÊNDICE VI



Bombas Centrífugas

Série BC-92S J



Aplicações

- Agricultura
- Chácaras
- Indústrias
- Prédios
- Residências

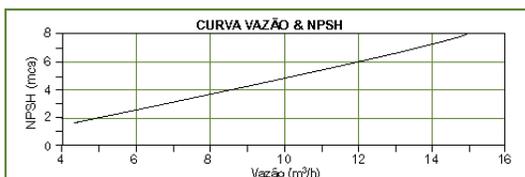
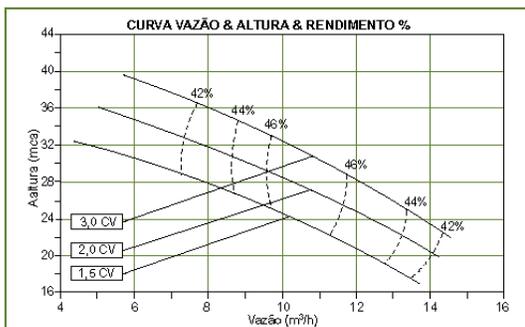
Materiais

- Carcaça da bomba em ferro fundido GG-15
- Rotor em alumínio
- Selo construído em inox 304, buna N, grafite e cerâmica
- Motor elétrico II pólos, 60 Hz, 3450 RPM, IP-21

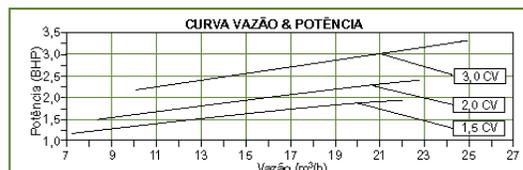
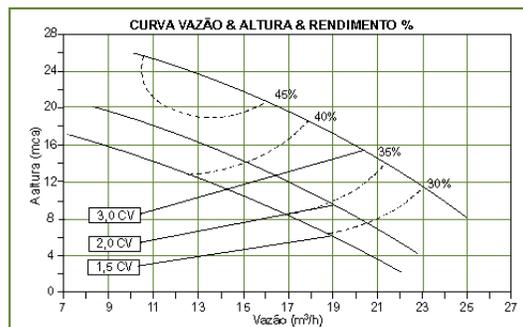
Opções

- Rotor: Bronze
- Selo: Viton
- Flange: 2.1/2" x 2.1/2"

BC-92S JA



BC-92S JC



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E HIDRÁULICAS DAS BOMBAS

MODELO	Potência (CV)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (BSP)	Ø Recalque (BSP)	Pressão Máxima (mca)	Altura de Sucção (mca)	ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL EM (mca)														
								2	5	8	11	14	17	20	23	26	30	34	38			
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS								VAZÕES EM m ³ /h VÁLIDAS PARA ALTURA DE SUÇÃO DE 0 mca														
BC-92S JC	1.1/2	x	x	2	1.1/2	21	8	22,00	19,70	17,10	14,30	11,10	7,20									
BC-92S JA	1.1/2	x	x	2	1.1/2	35	8	*	*	*	*	*	13,70	12,30	10,90	9,20	6,40					
BC-92S JC	2	x	x	2	1.1/2	23	8	*	22,10	20,00	17,70	15,10	12,00	8,20								
BC-92S JA	2	x	x	2	1.1/2	40	8	*	*	*	*	*	*	14,00	12,80	11,30	9,10	6,50				
BC-92S JC	3	x	x	2	1.1/2	29	8	*	*	25,00	23,10	21,20	19,00	16,60	13,70	10,00						
BC-92S JA	3	x	x	2	1.1/2	44	8	*	*	*	*	*	*	*	14,10	13,00	11,20	9,20	6,80			

OBS.: - Não utilizar a bomba na faixa com asteriscos.
 - Curvas características válidas para motores de linha (IP-21).
 - Outros tipos de motores, consultar alteração de potência junto à fábrica.

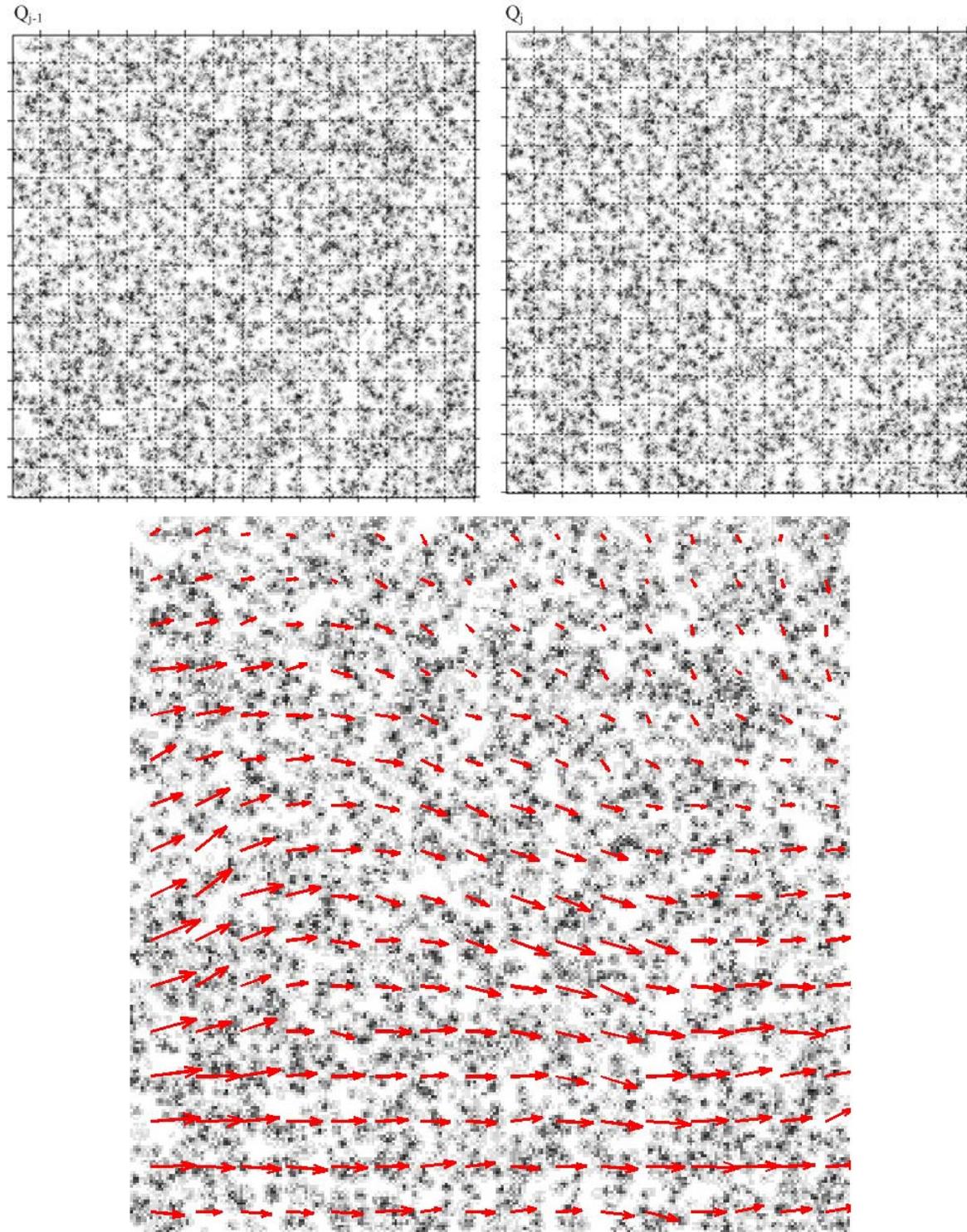
APÊNDICE VII

c (pixel)	l (pixel)	u(m/s)	v(m/s)		c (pixel)	l (pixel)	u(m/s)	v(m/s)
40	40	0.4769	-0.0006		160	360	0.4545	-0.0077
40	80	0.4983	-0.0026		160	400	0.2997	0.0011
40	120	0.5416	-0.0075		200	40	-0.0026	0.0005
40	160	0.5984	-0.0078		200	80	0.4994	0.0133
40	200	0.6111	-0.0069		200	120	0.5455	0.0174
40	240	0.6034	-0.0066		200	160	0.5835	0.0083
40	280	0.5938	-0.0044		200	200	0.5961	0.0056
40	320	0.5686	-0.0070		200	240	0.6048	0.0027
40	360	0.4795	-0.0134		200	280	0.5903	-0.0075
40	400	0.0007	-0.0003		200	320	0.5606	-0.0078
80	40	0.4772	-0.0010		200	360	0.4642	-0.0018
80	80	0.4968	-0.0011		200	400	0.0136	0.0008
80	120	0.1487	-0.2210		240	40	-0.0116	-0.0001
80	160	0.6424	-0.0126		240	80	0.4874	-0.0026
80	200	0.6472	-0.0109		240	120	0.5302	-0.0012
80	240	0.6243	-0.0123		240	160	0.5804	-0.0006
80	280	-16.207	15.883		240	200	0.6050	0.0074
80	320	0.3543	0.0774		240	240	0.6040	0.0043
80	360	0.4760	-0.0147		240	280	0.5982	0.0155
80	400	0.0010	-0.0002		240	320	0.5522	0.0166
120	40	0.0191	0.0012		240	360	0.4653	-0.0009
120	80	0.5376	-0.0027		240	400	0.4333	-0.0023
120	120	0.6175	-0.0047		280	40	0.0071	0.0032
120	160	-24.900	-16.132		280	80	0.4974	0.0002
120	200	0.6457	-0.0114		280	120	0.5236	-0.0049
120	240	0.6451	-0.0128		280	160	0.5938	-0.0100
120	280	0.6275	0.0004		280	200	0.6157	-0.0017
120	320	0.6232	-0.0035		280	240	0.5920	0.0174
120	360	0.4546	-0.0084		280	280	0.5926	0.0180
120	400	0.2970	0.0017		280	320	0.5623	0.0139
160	40	0.4160	-0.0004		280	360	0.4501	0.0032
160	80	-33.818	-23.129		280	400	0.4440	0.0024
160	120	0.1802	-0.1719		320	40	0.4127	0.0015
160	160	0.6265	0.0129		320	80	0.4964	0.0081
160	200	0.6153	0.0040		320	120	0.5373	-0.0079
160	240	0.6047	-0.0005		320	160	0.5906	-0.0089
160	280	0.5094	-0.0118		320	200	0.6096	0.0025
160	320	0.4894	-0.0166		320	240	0.6036	0.0049

320	320	0.5589	0.0113		480	280	0.5943	-0.0091
320	360	0.4625	0.0116		480	320	0.5551	-0.0160
320	400	0.0295	-0.0014		480	360	0.4686	-0.0092
360	40	0.3933	-0.0058		480	400	0.4307	-0.0000
360	80	-0.4001	-27.223		520	40	0.5004	0.0039
360	120	0.5252	0.0153		520	80	0.4960	0.0025
360	160	0.5926	0.0197		520	120	0.5271	0.0096
360	200	0.6008	0.0170		520	160	0.5813	0.0175
360	240	0.6358	-0.0013		520	200	0.6069	0.0023
360	280	0.6294	-0.0016		520	240	0.6011	0.0111
360	320	0.5861	0.0105		520	280	0.5957	-0.0001
360	360	0.5849	0.0099		520	320	0.5641	-0.0159
360	400	-0.0002	-0.0001		520	360	0.4741	0.0015
400	40	0.4482	-0.0036		520	400	0.4379	0.0001
400	80	0.4985	-0.0041		560	40	0.4997	0.0036
400	120	0.5441	-0.0094		560	80	0.4801	0.0076
400	160	0.5859	-0.0095		560	120	0.5466	0.0161
400	200	0.6138	-0.0033		560	160	0.5904	0.0205
400	240	0.6164	-0.0007		560	200	0.6098	0.0125
400	280	0.5923	-0.0012		560	240	0.6030	0.0067
400	320	0.5643	-0.0017		560	280	0.5801	0.0086
400	360	0.4631	-0.0072		560	320	0.5677	-0.0015
400	400	0.3530	-0.0101		560	360	0.4502	0.0014
440	40	0.1339	-0.0002		560	400	-0.0028	0.0001
440	80	0.4936	-0.0028					
440	120	0.5483	-0.0089					
440	160	0.5826	-0.0200					
440	200	0.6102	-0.0154					
440	240	0.6062	-0.0027					
440	280	0.6075	-0.0042					
440	320	0.5750	-0.0094					
440	360	0.4971	-0.0126					
440	400	0.4202	-0.0115					
480	40	0.0185	-0.0008					
480	80	0.4830	-0.0012					
480	120	0.5378	-0.0044					

APÊNDICE VIII

Para processamento utilizou-se os seguintes parâmetros no programa implementado para o SPI do SVPI desenvolvido: AINT=16, GRAD=16, FE=1cm/pixel, $T_q=1Q/s$ e VETREC=[0 0 0]. Valores unitários foram adotados para as variáveis desconhecidas FE e T_q .



Fonte: <http://www.vsj.or.jp/piv>