

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

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A MEDIÇÃO DE CAMPOS DE  
VELOCIDADES UTILIZANDO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Por

Lucas Luis Gutkoski

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, fevereiro de 2001

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A MEDIÇÃO DE CAMPOS DE VELOCIDADE  
UTILIZANDO  
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Por

Lucas Luis Gutkoski  
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 dos Transportes  
Orientador: Prof. Dr. Vilson Carlos da. Silva Ferreira

Comissão de Avaliação:

Dr. Alwin W. Elbern

Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo

Prof. Dr. Alberto Tamagna  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de fevereiro de 2001.

Aos meus pais e meus irmãos pelo exemplo de trabalho, honestidade e bondade.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Wilson Carlos da Silva Ferreira pela orientação no trabalho, além de todo o apoio, compreensão e confiança, em todos os momentos.

A todos integrantes do LTMF - Laboratório de turbomáquinas e medição de Fluxo da UFRGS, Departamento de engenharia mecânica – que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento do trabalho.

Aos integrantes do LASID – Laboratório de siderurgia da UFRGS, Departamento de engenharia metalúrgica – Pela oportunidade, apoio e definição de foco.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilização da infraestrutura.

A CAPES pela concessão da Bolsa de pesquisa.

A FAPERGS e a GERDAU - Aços Finos Piratini, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

A proposta deste trabalho, consiste na elaboração de uma ferramenta computacional para a medição de campos de velocidades em escoamentos com baixas velocidades ( $< 0,5$  m/s) utilizando o processamento digital de imagens.

Ao longo dos anos, inúmeras técnicas foram desenvolvidas com este objetivo. Para cada tipo de aplicação, uma técnica se aplica com maior ou menor eficiência do que outras. Para o caso de estudos em fluídos transparentes, onde o escoamento pode ser visualizado, técnicas que utilizam processamento digital de imagens vêm ganhando um grande impulso tecnológico nos últimos anos. Este impulso, é devido a fatores como: câmaras vídeo filmadoras de última geração, dispositivos de aquisição de imagens e componentes de processamento e armazenamento de dados cada vez mais poderosos. Neste contexto, está a velocimetria por processamento de imagens de partículas cuja sigla é PIV (particle image velocimetry). Existem várias formas de se implementar um sistema do tipo PIV. As variantes dependem, basicamente, do equipamento utilizado. Para sua implementação é necessário, inicialmente, um sistema de iluminação que incide em partículas traçadoras adicionadas ao fluido em estudo. Após, as partículas em movimento são filmadas ou fotografadas e suas imagens adquiridas por um computador através de dispositivos de captura de imagens. As imagens das partículas são então processadas, para a obtenção dos vetores velocidade. Existem diferentes formas de processamento para a obtenção das velocidades. Para o trabalho em questão, devido às características dos equipamentos disponíveis, optou-se por uma metodologia de determinação da trajetória de partículas individuais, que, apesar de limitada em termos de módulo de velocidade, pode ser aplicada a muitos escoamentos reais sob condições controladas.

Para validar a ferramenta computacional desenvolvida, imagens ideais de partículas foram simuladas como se estivessem em escoamento, através do deslocamento conhecido de vários pixels. Seguindo o objetivo de validação, foi utilizada ainda uma imagem real de partículas, obtida com o auxílio de um plano de iluminação de luz coerente (LASER) e câmaras de vídeo tipo CCD.

O programa desenvolvido foi aplicado em situações de escoamento real e os resultados obtidos foram satisfatórios dentro da escala de velocidades inicialmente presumida.

## ABSTRACT

**“Computational Tool for measuring flow field velocities using digital Image processing”**

The purpose of this work is to develop a computational package for measuring low velocity flow fields ( $<0.5$  m/s) in fluids using digital image processing.

Throughout the years, several techniques were developed with the same goal. Each application, though, has its own advantages and disadvantages. For studies with transparent fluids, where the flow can be visualized, techniques using digital image processing have experienced great technological impulse in the last years. This push, is due to factors such as: new generation of the video cameras, electronic devices for image acquisition, new algorithm for image processing and electronic devices for digital data storage. In this context, the particle image velocimetry (PIV) is defined. There are several ways of implementing a particular type of PIV system. The difference depends, basically, on the equipment used. In any case, it is necessary, an illumination system, a sheet shape type light and capability to spot tracer particles seeded in the fluid. After, with the fluid in movement, particles are filmed or photographed and their images acquired by a computer through an interface board designed to capture images. The particles images are processed by means of a special software developed to obtain the velocity vectors and others flow parameters. Different processing methodologies exist in order to obtain the flow field. In this work, due to the characteristics of the available equipment, a individual particle tracking methodology was adopted, in spite of the limited application in terms of velocity range

In order to validate the computational package developed, images with ideal particles were simulated to flow by displacing several pixels. A real image of particles produced by a laser sheet light and captured by a CCD video camera was also used to validate the program.

The program was applied to several other flow situations and the results obtained showed satisfactory values within the velocity range initially expected.

# ÍNDICE ANALÍTICO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.2. ESTADO DA ARTE.....	3
1.2.1. METODOLOGIAS DE PROCESSAMENTO.....	4
1.2.1.1. VELOCIMETRIA DE ALTA DENSIDADE DE IMAGEM DE PARTÍCULAS - PIV .....	4
1.2.1.2. VELOCIMETRIA POR ACOMPANHAMENTO DA PARTÍCULA - PTV.....	5
1.2.1.3. NOMENCLATURAS VARIANTES .....	6
1.2.1.4. TÉCNICAS PARA ANÁLISE TRI-DIMENSIONAL.....	7
1.3. ETAPAS E EQUIPAMENTOS.....	9
1.3.1. ILUMINAÇÃO.....	9
1.3.2. PARTÍCULAS.....	10
1.3.3. FILMAGEM/FOTOGRAFIA.....	11
1.3.4. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS.....	11
1.3.5. PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS.....	12
1.4. O PRESENTE TRABALHO .....	13
<b>2. METODOLOGIA EMPREGADA .....</b>	<b>14</b>
2.1. CONFIGURAÇÕES INICIAIS.....	14
2.1.1. PLANO DE LASER.....	15
2.1.2. ADIÇÃO DE PARTÍCULAS .....	16
2.2. AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	17
2.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS.....	20
2.3.1. IMAGEM COMO MATRIZ DE PIXELS .....	21
2.3.2. LIMIAR .....	23
2.3.3. CENTRO DA PARTÍCULA.....	24
2.4. OBTENÇÃO DAS VELOCIDADES.....	26
2.4.1. DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES INSTANTÂNEAS .....	27
2.4.2. VELOCIDADES MÉDIAS.....	28
2.4.3. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE TURBULÊNCIA .....	28
2.5. IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA FLOWVIEWER.....	29
2.5.1. LÓGICA DO PROGRAMA.....	29
2.5.2. LÓGICA DE PROCESSAMENTO.....	32
2.5.3. LÓGICA DE PÓS-PROCESSAMENTO.....	33
2.5.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	35
<b>3. VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>37</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	37
3.2. DESLOCAMENTO DE UMA IMAGEM DE PARTÍCULAS IDEAL .....	37
3.2.1. VALIDAÇÃO DE UM ESCOAMENTO RETILÍNEO UNIFORME (ERU) .....	38
3.2.2. VALIDAÇÃO DE UM ESCOAMENTO CIRCULAR UNIFORME (ECU) .....	41
3.3. DESLOCAMENTO DE UMA IMAGEM REAL.....	43
3.3.1. ANÁLISE QUALITATIVA.....	43
3.3.2. ANÁLISE QUANTITATIVA .....	45
<b>4. ANÁLISE DA INCERTEZA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1. ERROS EXPERIMENTAIS SISTEMÁTICOS.....	47
4.1.1. ERROS CAUSADOS PELAS PARTÍCULAS.....	47
4.1.2. ERROS CAUSADOS PELA CAPTURA DE IMAGENS.....	48
4.1.3. ERROS NA OBTENÇÃO DO FATOR DE ESCALA.....	48
4.1.4. ERROS CAUSADOS PELA ANÁLISE DAS IMAGENS.....	49
4.2. ERROS NÃO-SISTEMÁTICOS.....	49
4.2.1. MEDIDAS EM BAIXAS VELOCIDADES.....	49
4.2.2. ERROS DA VELOCIDADE MÉDIA.....	49
4.2.3. ERROS DA IMAGEM DE PARTÍCULAS.....	50
4.2.4. ERRO DO INTERVALO DE TEMPO.....	50
4.3. ANÁLISE DAS INCERTEZAS.....	50

4.3.1. INCERTEZAS NÃO QUANTIFICÁVEIS.....	51
4.3.1.1. NÃO ORTOGONALIDADE DO PLANO ILUMINADO.....	51
4.3.1.2. INCERTEZA DEVIDO AO MOVIMENTO RELATIVO DA PARTÍCULA COM O FLUÍDO.....	52
4.3.1.3. INCERTEZA DEVIDO À DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES POR EXTRAÇÃO DA MÉDIA.....	52
4.3.2. INCERTEZAS QUANTIFICÁVEIS.....	53
4.3.2.1. MEDIDA DO INTERVALO DE TEMPO $\Delta T$ .....	53
4.3.2.2. INCERTEZA NAS COORDENADAS ESPACIAIS.....	53
4.3.2.3. INCERTEZA DEVIDO AO PROCESSAMENTO DA IMAGEM.....	53
4.4. QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS NAS MEDIDAS FINAIS.....	54
4.4.1. INCERTEZA PARA O FATOR DE ESCALA.....	54
4.4.2. INCERTEZA NAS COORDENADAS ESPACIAIS.....	55
4.4.3. INCERTEZA NOS COMPONENTES DA VELOCIDADE.....	56
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>58</b>
5.1. TUBO CIRCULAR.....	58
5.2. MODELO FÍSICO DE UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....	60
5.2.1. RESULTADOS COM INIBIDOR DE TURBULÊNCIA.....	62
5.2.2. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA.....	63
5.3. APLICAÇÃO EM UM MODELO FÍSICO DE UMA PANELA DE AÇO LÍQUIDO.....	65
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>77</b>
A1.1. RESULTADOS COM INIBIDOR DE TURBULÊNCIA.....	77
A1.2. RESULTADOS DA ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA.....	79
A1.3. RESULTADOS COM O MODELO DA PANELA.....	81
<b>ANEXO II.....</b>	<b>84</b>
A2. TABELAS DOS RESULTADOS.....	84



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. TOPOLOGIA BÁSICA .....	14
FIGURA 2.2. ESQUEMA DE MONTAGEM DO PLANO DE ILUMINAÇÃO.....	15
FIGURA 2.3. FONTES DE LASER.....	16
FIGURA 2.4. VÍDEO GRAVADOR E COMPUTADOR PROCESSANDO AS IMAGENS. ....	20
FIGURA 2.5. ESCALA DE CINZA.....	21
FIGURA 2.6. IMAGENS DE PARTÍCULAS. A) IMAGEM REAL; B)IMAGEM COM LIMIAR.....	24
FIGURA 2.7. GRÁFICO DE UMA IMAGEM DA PARTÍCULA. ....	25
FIGURA 2.8. BASE PARA DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES.....	26
FIGURA 2.9. FLUTUAÇÕES TURBULENTAS NA DIREÇÃO DO ESCOAMENTO.....	29
FIGURA 2.10. LÓGICA DO PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	30
FIGURA 2.11. REGIÃO COM EXCLUSÃO DE BRILHO .....	31
FIGURA 2.12. TELA DE SELEÇÃO DO LIMIAR.....	31
FIGURA 2.13. TELA DE “SETUP” DO PROGRAMA FLOWVIEWER.....	32
FIGURA 2.14. LÓGICA DE PROCESSAMENTO.....	33
FIGURA 2.15. LÓGICA DO PÓS-PROCESSAMENTO.....	33
FIGURA 2.16. TELA DO PROGRAMA FLOWVIEWER PARA OBTENÇÃO DO FATOR DE ESCALA.....	34
FIGURA 2.17. ENTRADA DO FATOR DE ESCALA.....	34
FIGURA 2.19. TELA DE RECURSOS DO FLOWVIEWER.....	36
FIGURA 3.1. GRADE DE PARTÍCULAS GERADAS PARA TESTE.....	38
FIGURA 3.2. DESLOCAMENTO UNIFORME DOS PONTOS DE 5 PIXELS A DIREITA.....	39
FIGURA 3.3. RESULTADOS COM DESLOCAMENTO UNIFORME DE PARTÍCULA, 5 PIXELS NA VERTICAL. ....	40
FIGURA 3.4. DESLOCAMENTO UNIFORME NA HORIZONTAL E NA VERTICAL.....	41
FIGURA 3.5. RESULTADO DA APLICAÇÃO NO FLOWVIEWER COM ROTAÇÃO DA FIGURA BASE DE 4 GRAUS EM SENTIDO HORÁRIO.....	42
FIGURA 3.6. IMAGEM DE PARTÍCULAS ILUMINADAS UTILIZADAS COM BASE PARA VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS.....	43
FIGURA 3.7. RESULTADOS PARA ANÁLISE QUALITATIVA DO DESLOCAMENTO SIMULADO DA IMAGEM REAL .....	44
FIGURA 3.8. TELA DE RESULTADOS DO FV, PARA O DESLOCAMENTO SIMULADO DA IMAGEM MOSTRADA NA FIGURA 3.6 .....	45
FIGURA 5.1. RESULTADOS PARA UM TUBO CIRCULAR.....	59
FIGURA 5.2. RESULTADO PARA TUBO CIRCULAR COM FILTRO DE 0,1 DESVIOS PADRÕES EM X E Y .....	60
FIGURA 5.3. FOTOGRAFIA DO MODELO FÍSICO DO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....	61
FIGURA 5.4. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.....	61
FIGURA 5.5. NEGATIVO DE UMA DAS IMAGENS DE PARTÍCULAS ILUMINADAS PELO PLANO DE LASER.....	62
FIGURA 5.6. RESULTADO DO FLOWVIEWER COM TUBO MERGULHADO NO FLUÍDO EM 30CM. ....	63
FIGURA 5.7. NEGATIVO DE UMA DAS IMAGEM DO PLANO ILUMINADO DA ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA .....	64
FIGURA 5.8. RESULTADOS PARA A ENTRADA DO DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO .....	65
FIGURA 5.9. MODELO FÍSICO DA PANELA.....	66
FIGURA 5.10. AMOSTRAS DOS NEGATIVOS IMAGENS DO PLANO DO MODELO DA PANELA.....	66
FIGURA 5.11. RESULTADOS OBTIDOS NA PANELA COM UM PONTO DE INJEÇÃO DE AR.....	67
FIGURA 5.12. RESULTADOS OBTIDOS NA PANELA COM DOIS PONTOS DE ENTRADA DE AR.....	68
FIGURA A1.1. RESULTADO PARA O CASO DO INIBIDOR DE TURBULÊNCIA, COM SUB-REGIÃO DE 10X10 PIXELS .....	77
FIGURA A1.2. INIBIDOR DE TURBULÊNCIA COM SUB-REGIÃO DE 20X20 PIXELS .....	77
FIGURA A1.3. INIBIDOR DE TURBULÊNCIA COM SUB-REGIÃO DE 40X40 PIXELS .....	78
FIGURA A1.4. INIBIDOR DE TURBULÊNCIA COM SUB-REGIÃO DE 80X80 PIXELS .....	78
FIGURA A1.5. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA COM SUB-REGIÃO DE 10X10 PIXELS.....	79
FIGURA A1.6. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA COM SUB-REGIÃO DE 20X20 PIXELS.....	79
FIGURA A1.7. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA COM SUB-REGIÃO DE 40X40 PIXELS.....	80
FIGURA A1.8. ENTRADA DO DISTRIBUIDOR COM BARREIRA COM SUB-REGIÃO DE 80X80 PIXELS.....	80
FIGURA A1.9. MODELO DA PANELA COM 1 PLUG COM SUB-REGIÃO DE 10X10 PIXELS.....	81
FIGURA A1.10. MODELO DA PANELA COM 1 PLUG COM SUB-REGIÃO DE 20X20 PIXELS .....	81
FIGURA A1.11. MODELO DA PANELA COM 1 PLUG COM SUB-REGIÃO DE 80X80 PIXELS .....	82
FIGURA A1.12. MODELO DA PANELA COM 2 PLUGS COM SUB-REGIÃO DE 10X10 PIXEL .....	82
FIGURA A1.13. MODELO DA PANELA COM 2 PLUGS COM SUB-REGIÃO DE 20X20 PIXELS.....	83
FIGURA A1.14. MODELO DA PANELA COM 2 PLUGS COM SUB-REGIÃO DE 80X80 PIXELS .....	83

## ÍNDICE DE TABELAS.

TABELA 2.1. CÂMARAS DE VÍDEO UTILIZADAS.....	18
TABELA 2.2. MODELOS DE PLACAS DIGITALIZADORAS .....	18
TABELA 2.3. GRAVADORES DE VÍDEO.....	18
TABELA 3.1. COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS.....	42
TABELA 3.2. COMPARAÇÃO ENTRE CALCULADO E MEDIDO.....	46
TABELA A2.1 RESULTADOS PARA TUBO COM INIBIDOR DE TURBULÊNCIA, RELATIVA A FIGURA 4.6 .....	84
TABELA A2.2. RESULTADOS PARA ENTRADA DO DISTRIBUIDOR RELATIVA A FIGURA 4.8 .....	89
TABELA A2.3. RESULTADOS DO MODELO DA PANELA, RELATIVA A FIGURA 5.11 .....	95
TABELA A2.4. RESULTADOS DO MODELO DA PANELA COM DOIS PLUGS – RELATIVA A FIGURA 5.12.....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área,	$[m^2]$
$C$	Constante	
$C$	Concentração de partículas	$[partículas / m^3]$
$d$	Diâmetro	$[m]$
$e$	espessura planar	$(m)$
$F$ ,	Fator de escala	$[mm/pixel]$
$IT$	Intensidade de turbulência	$[%]$
$L$	Comprimento	$[m]$
$N_c$	Nível de cinza	$[adimensional]$
$P$	Potência luminosa	$[W]$
$Q$	Quadros de de uma câmara CCD.	
$S$	Fator de escala	$[adimensional]$
$t$	Coordenada de tempo	$[segundos]$
$u$	Componente horizontal de velocidade	$[mm/s]$
$v$	Componente vertical de velocidade	$[mm/s]$
$u'$	flutuações de velocidade	$[mm/s]$
$v'$	flutuações de velocidade	$[mm/s]$
$U$	velocidade média	$[mm/s]$
$V$	velocidade média	$[mm/s]$
$x$	Coordenada espacial	$[pixels]$
$y$	Coordenada espacial	$[pixels]$
$\Delta t$	constante de tempo	$[segundos]$
$\Delta x$	deslocamento horizontal	$[pixel] , [mm]$
$\Delta y$	deslocamento vertical	$[pixel], [mm]$
$S$	desvio padrão	
$w$	Frequência	$[Hertz]$

## 1. Introdução

A determinação da velocidade em fluidos é fundamental para a perfeita caracterização de um escoamento e para a solução de muitos problemas na engenharia. Inúmeras técnicas estão hoje disponíveis com esta finalidade. Umas, muito antigas, têm origem entre os anos de 1732 e 1797. Elas são devidas a John Bernoulli, Henrique Pitot e Giovanni Batista Venturi entre outros. Medem, indiretamente, a velocidade de um fluido através de uma grandeza física característica do escoamento a ela correlacionada (pressão estática ou dinâmica). Outras, mais modernas, empregam delicados e sofisticados sensores capazes de converter efeitos mecânicos em sinais elétricos que, depois de tratados (amplificados, filtrados etc.), são correlacionados com a velocidade do fluido no ponto medido. A calibração e a não-linearidade do sinal são alguns inconvenientes destes processos de medida, além do fato de alguns serem intrusivos, ou seja, perturbarem o escoamento no próprio local de medida. Tubos de Pitot estático, Pitot total e anemômetros de fio quente são exemplos das tecnologias referidas. Foram e ainda são bastante empregadas na determinação da velocidade pontual de um escoamento. A caracterização de um campo de velocidades com estes instrumentos é feita pela determinação da velocidade em sucessivos pontos do escoamento. É muito importante, nestes casos, que as dimensões destes transdutores sejam tão pequenas quanto possível para não perturbarem muito o escoamento e não mascararem as medidas pela sua presença. Isto os torna muito delicados e, conseqüentemente, muito frágeis para manipulação.

Modernamente, técnicas não intrusivas têm sido desenvolvidas e apresentam muitas vantagens sobre as antecessoras. O Laser Doppler Velocímetro - LDV foi uma das primeiras técnicas não intrusivas desenvolvidas para a medição pontual de velocidades. Utiliza as características de uma luz coerente (LASER) e suas propriedades para medir diretamente a velocidade de uma partícula que se desloca com o fluido. Sob certas circunstâncias esta velocidade é considerada a própria velocidade do fluido em estudo. Além de ser uma técnica não intrusiva, tem características “sui generis” pois apresenta uma resposta direta, muito rápida e pode atingir pontos até então não acessíveis às técnicas convencionais. Sua incerteza de medição, sob condições controladas, é baixa. A caracterização de um campo de velocidade é feita, também, através da determinação da velocidade em sucessivos pontos. Se o campo de velocidades a ser analisado tem dimensões reduzidas, o LDV não oferece grande inconveniente de medição, pois, normalmente, a taxa de aquisição é muito alta (da ordem de  $\mu\text{S}$ ) e os efeitos transientes podem ser desprezíveis. Quando as dimensões da região do problema forem muito grandes, porém, o tempo de medida é longo e as condições do escoamento, durante um teste,

podem facilmente se alterar. Ainda, em escoamentos complexos, onde o interesse de análise recai sobre as estruturas turbulentas do escoamento, as correlações espaciais ficam prejudicadas pois são realizadas necessariamente em tempos diferentes. Este é um dos maiores inconvenientes da medição não simultânea de velocidade. Note-se que, este inconveniente, não é uma prerrogativa somente do LDV, mas também de todas as outras técnicas intrusivas pontuais citadas anteriormente.

Mais recentemente, há pouco mais de duas décadas, o avanço da tecnologia de fabricação de microprocessadores, cada vez mais velozes e com grande capacidade de memória, a disponibilidade de técnicas modernas de processamento de imagens e novas tecnologias digitais para câmaras de vídeo permitiram o desenvolvimento de um novo processo para a medição de velocidades em fluidos, denominada de “Velocimetria por Processamento de Imagens de Partículas”. Esta técnica apresenta as vantagens do LDV, quais sejam, não intrusiva, com alta taxa de aquisição, aliada a simultaneidade de medição dos diferentes pontos do escoamento, não possível nas anteriores. Esta técnica tem sido desenvolvida e aperfeiçoada em universidades e em centros de pesquisa para inúmeras aplicações, assumindo, de acordo com diferentes metodologias, equipamentos e processamento empregados, denominações variadas, tais como: Particle Tracking Velocimetry – PTV, Laser Speckle Velocimetry – LSV, Holographic Particle Image Velocimetry – HPIV, Digital Particle Image Velocimetry – DPIV, etc.

Dentre as aplicações possíveis desta técnica está o levantamento dos campos de velocidade no interior de modelos físicos, como num distribuidor ou panela empregados no lingotamento contínuo de aço. Como estes modelos tem grandes dimensões, o mapeamento da velocidade, com sistemas convencionais pontuais, consumiria um tempo excessivo, tornando o processo de medição não econômico, e possivelmente, com menor confiabilidade, devido às condições do ensaio se alterarem ao longo do tempo de medição.

O presente trabalho objetiva apresentar um sistema de medição de campos de velocidade em escoamentos amplos baseado na velocimetria por processamento de imagens de partícula. A principal aplicação está no estudo de modelos físicos de distribuidores e painéis em diferentes configurações e regimes de escoamento. O sistema desenvolvido é próprio para baixas velocidades de escoamento ( $<0,5\text{m/s}$ ). No entanto, devido à forma e concepção utilizada, poderá ser aplicado para velocidades mais altas, desde que se disponham de técnicas mais rápidas de aquisição de imagens.

O trabalho em questão constituiu-se, basicamente, no desenvolvimento de uma ferramenta computacional que envolva o processo de aquisição, processamento, e análise das imagens bem como a apresentação do campo de velocidade analisado.

## **1.2. Estado da arte**

O processamento de imagens é atualmente empregado para solucionar problemas nas mais diferentes áreas da tecnologia moderna, tais como na medicina, nas engenharias, nas áreas espaciais, seja com finalidades de defesa nacional (fins militares), seja com finalidades civis, como por exemplo, no monitoramento do clima, controle de poluição, desmatamento, etc... Inicialmente, estas técnicas eram capazes de fornecerem informações de natureza mais qualitativa do que quantitativa, mas com o avanço tecnológico hoje operam com definições quantificáveis ao nível de um pixel.

As técnicas de processamento digital de imagens para a medição de velocidade em escoamentos de fluidos tiveram, por sua vez, considerável incremento nas últimas duas décadas, devido ao grande avanço tecnológico experimentado nas áreas da microeletrônica, informática e ótica. A produção de microprocessadores de alta performance a preços cada vez mais acessíveis, o desenvolvimento de novos e mais realísticos algoritmos matemáticos de interpretação de imagens e ainda a disponibilidade de fontes de produção de luz coerente de performance elevada (geração de grandes potências para o caso de fontes de laser contínuo, ou alta energia de pulso para as fontes intermitentes) a preços razoáveis tem concorrido para que a técnica da velocimetria por processamento de imagens de partículas tivesse também um considerável avanço nos últimos anos.

A grande variedade de técnicas possíveis tem motivado o aparecimento de inúmeros grupos de P&D em velocimetria por processamento de imagens de partículas no mundo inteiro. Existem variações tanto em termos do processamento das imagens (algoritmos e códigos de processamento) quanto na diversificação dos equipamentos empregados, seja para iluminação, captura e aquisição de imagens digitalizadas. Pode-se subdividir os diferentes sistemas de velocimetria por processamento de imagens de partículas em duas grandes categorias, conforme a metodologia de processamento ou conforme a instrumentação e acessórios empregados na captura das imagens.

### **1.2.1. Metodologias de processamento**

As diversas metodologias de processamento procuram, em princípio, ser identificadas por nomenclaturas escolhidas de tal forma a ser adequadamente caracterizada. Segundo [Adrian ,1991] e [Almeida ,1997] algumas nomenclaturas mais comuns são: Velocimetria Espectral a Laser (Laser Speckel Velocimetry - LSV), Velocimetria por Acompanhamento de Partículas (Particle Tracking Velocimetry - PTV) e Velocimetria de Alta Densidade de Imagem de Partículas (Particle Image Velocimetry - PIV). Para melhor situar-se ao longo deste trabalho, o termo “velocimetria por processamento de imagens de partículas” será usado para identificar genericamente a técnica de processamento de imagens com a finalidade de obter-se campos de velocidade em fluidos.

Os sistemas do tipo LSV, ao longo dos anos, foram sendo preteridos em relação aos demais porque exigem elevadas concentrações de partículas no fluido e desta forma apresentam dificuldades no processamento. Os fundamentos desta metodologia são apresentados por [Almeida ,1997] e [Lourenço ,1996], entre outros. Ficou demonstrado que, para a maioria das aplicações relevantes da mecânica dos fluidos, os níveis de concentração de partículas alcançados não são suficientes para satisfazer os critérios desta técnica [Adriam ,1991]. Como nenhum aspecto desta metodologia será empregado, esta não faz parte do escopo deste trabalho.

Os dois outros sistemas, o PIV e o PTV, são descritos com mais detalhes porque além de apresentarem, no atual estado da arte, importância significativa, são partes integrantes do sistema desenvolvido.

#### **1.2.1.1. Velocimetria de alta densidade de imagem de partículas - PIV**

A concentração de partículas traçadoras, para um sistema do tipo PIV, deve ser alta, mas muito inferior à concentração necessária para um sistema do tipo LSV [Lourenço,1997]. Ela deve ser suficiente a não dificultar a identificação unívoca das partículas tendo como parâmetros limitadores às características da instrumentação de captura disponível bem como o tipo de algoritmo de processamento adotado.

A identificação dos diferentes pares de partículas é feita por meio de correlações cruzadas nas regiões com imagens de partículas do escoamento deslocadas no tempo, ou então por meio de autocorrelação, quando se têm, para uma mesma imagem, duas exposições em tempos diferentes [Martins,1995]. Estes diferentes tipos de imagens que são obtidos,

basicamente em função da iluminação (fonte de laser) adotada: com iluminação pulsada, com uma iluminação contínua, ou ainda, com a combinação das duas.

Esta metodologia, além de exigir um razoável povoamento de partículas na região de interesse do escoamento, necessita ainda que sejam empregadas partículas com dimensões muito pequenas (diâmetros entre 10 a 50  $\mu\text{m}$ ). Quanto maior a velocidade do escoamento menor deverá ser suas dimensões, maior a intensidade da fonte de iluminação e, mais rápido deverá ser o sistema de captura de imagens. O emprego de fontes de laser pulsado ao invés de laser coerente tem sido uma alternativa eficiente para definir a solução de compromisso de projeto de um sistema PIV. Fontes de laser pulsado estão hoje disponíveis no mercado capazes de fornecer pulsos de curtíssima duração (7 nanosegundos) e com alta energia por pulso, permitindo a identificação de minúsculas partículas em alta velocidade.

Uma vez obtida uma série de imagens da mesma região de estudo, o processamento é feito com o objetivo de determinar a velocidade do escoamento em sub-regiões definidas, computando-se a velocidade das várias partículas de uma mesma sub-região bem como as demais propriedades do escoamento. Em última análise, está se promovendo uma média das velocidades de cada conjunto de partículas pertencentes a cada sub-região [Adrian,1991]. A montagem final destas sub-regiões promove a visão do escoamento na região total em estudo como se fosse um plano formado por “ladrilhos” de velocidade. Existe perfeita analogia com a simulação numérica, seja por elementos finitos ou volumes finitos, onde um escoamento é mapeado com as propriedades definidas em elemento discretizado.

A carga computacional para esta metodologia não é muito grande. Em compensação, para a maioria das aplicações em média e alta velocidade, é necessário à utilização de equipamentos mais sofisticados, como por exemplo: fonte de laser pulsado, sistema de aquisição e registro de imagens com sincronia perfeita com os pulsos de laser, etc.. Mais ainda, métodos adicionais são necessários nos casos de dupla exposição de uma imagem para resolver o problema de ambigüidade na direção das partículas [Almeida,1997].

O sistema PIV tem sido muito empregado nas aplicações de mecânica dos fluidos de média e alta velocidade, pois permite boa resolução espacial com boa exatidão.

### **1.2.1.2. Velocimetria por acompanhamento da partícula - PTV**

A velocimetria por acompanhamento da partícula possui uma sutil diferença na forma de análise das imagens das partículas quando comparada com os sistemas do tipo PIV. Ao invés



de ser analisada uma sub-região com diversas partículas, esta metodologia caracteriza-se pela busca do deslocamento individual de cada partícula ao longo do tempo [Bonna et al., 1990 e Wernet, 1993]. Deste modo, a concentração de partículas deve ser muito inferior a técnica anterior (PIV). Além disso, as partículas não podem estar agrupadas nas sub-regiões de análise, mas sim, serem as únicas em cada uma delas. Para se determinar o deslocamento da partícula, sua posição individual deve ser determinada em dois ou mais instantes subsequentes e desta forma sua velocidade pode ser encontrada a partir do seu traçado.

Nesta metodologia, a análise e definição dos algoritmos a serem empregados na determinação das velocidades podem ser mais complicadas em relação às empregadas nos sistemas PIV. Isto acontece, por necessitarem de maior carga computacional, tanto em tempo de processamento como em memória de máquina disponível. A causa, se deve a necessidade de uso mais efetiva das técnicas de processamento de imagens propriamente dita: para a identificação unívoca das partículas, de seus centros geométricos, da sua exata posição física e para a exclusão das partículas que, eventualmente, possuírem posição duvidosa. Por outro lado, neste tipo de sistema, as partículas podem ser maiores, desde que mantenham a premissa de seguirem adequadamente o escoamento. Além disso, podem se encontrar em forma mais esparsa, ou seja, com menores concentrações, permitindo o uso de fontes de luz contínua com menor potência.

Embora os resultados finais possam ter menor exatidão quando comparados com os resultados do PIV, a opção por esta metodologia, objeto do presente trabalho, é devida, a disponibilidade dos equipamentos, e a existência de uma situação prática e com aplicação industrial compatível com o seu emprego e validação.

### **1.2.1.3. Nomenclaturas variantes**

Variadas nomenclaturas de metodologias muito similares são freqüentemente encontradas na bibliografia especializada. A grande maioria delas são variantes na forma de processamento e não na concepção propriamente dita da metodologia. Retratam, de modo geral, alguma particularidade que o autor empregou e deseja ressaltar. Algumas nomenclaturas e definições são apresentadas a seguir:

DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) – Esta nomenclatura é aplicada devido à evolução natural das metodologias PIV e PTV e normalmente se aplica onde existe a utilização de processamento digital de imagens para a obtenção de velocidades em um escoamento [Westerweel,1993]. Deve-se lembrar que os primeiros processos desenvolvidos para a

velocimetria por processamento de imagens de partículas empregavam câmaras fotográficas comuns para a captura das imagens. A digitalização destas imagens é uma consequência natural do avanço tecnológico tanto das técnicas de captura como das de aquisição. Assim, o uso de placas de aquisição digitais conectadas a microcomputadores, bem como a utilização, mais recente, de câmaras CCD (Charge Coupled Device) para filmagem das partículas iluminadas proporcionaram uma nova nomenclatura para a tecnologia existente.

DPTV (Digital Particle Tracking Velocimetry) – Da mesma forma, a nomenclatura DPTV refere-se não somente a mesma metodologia para a velocimetria por acompanhamento da partícula quando processada digitalmente.

#### **1.2.1.4. Técnicas para análise tri-dimensional**

Qualquer técnica de medição tem pontos positivos e negativos. Se por um lado a técnica da velocimetria por processamento de imagens de partículas apresenta vantagens sobre o LDV com relação a simultaneidade de medição dos inúmeros pontos do escoamento, sua natureza bidimensional é seu ponto fraco e grande limitador. Os sistemas clássicos, tanto PIV (ou DPIV) quanto o PTV (ou DPTV) são considerados do tipo 2D2C<sup>\*</sup>, ou seja, para medições de velocidade do escoamento num plano fornecendo apenas duas componentes de velocidade. Este fato limitante e a necessidade de se obter informações tridimensionais para a maioria dos escoamentos estacionários levou muitos pesquisadores a tentarem estender a velocimetria por processamento de imagens de partículas para alcançar a terceira componente. Vários arranjos feitos sobre os tradicionais PIV e PTV, que normalmente incluem equipamentos adicionais de captura e aquisição de imagens, bem como diferentes e mais complicados processamentos, têm sido propostos. Entre eles, os mais difundidos são os denominados estereoscópicos e holográficos<sup>\*</sup>. Ambos foram desenvolvidos como metodologias do tipo 2D3C. Infelizmente, é comum serem enquadrados como tipo 2D2C, porque a exatidão da componente de velocidade normal ao plano de captura é muito menor do que a exatidão das componentes no plano. Desta forma se tornam instrumentos mais qualitativos para a terceira dimensão do que quantitativos.

Algumas metodologias tridimensionais são rapidamente comentadas a seguir:

---

<sup>\*</sup> H. Royer and M. Stanislas, "Stereoscopic and Holographic Approaches to get the third Velocity Component in PIV", von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lectures June/96.

Arranjos Estereoscópicos (Stereoscopic set-ups) – O termo tem origem devido o uso de dois sistemas de capturas simultâneas (duas câmaras de vídeo, por exemplo). Embora a iluminação do escoamento seja num único plano, dois registros da mesma imagem de partículas em diferentes ângulos ou diferentes deslocamentos paralelos ao plano iluminado são capturados. Muitas dificuldades são encontradas na realização destes arranjos e todas concorrem para que a exatidão das medidas (terceira componente) seja realmente baixa. Dentre elas estão: as aberrações geométricas, a curvatura do campo de visão, astigmatismo, aberrações esféricas, distorções, profundidade de campo, etc...

Arranjos Holográficos (Holographic Particle Image velocimetry - HPIV) – O PIV Holográfico é uma das formas de registrar um plano do escoamento e as três componentes do vetor velocidade, 2D3C [Royer e Stanislas,1996]. O arranjo é composto por dois feixes de luz coerente separados, sendo que um deles ilumina as partículas em movimento e outro não, passando fora do escoamento. Posteriormente eles são combinados para formarem o holograma. Na literatura, o termo HPIV é reservado para expressar a gravação de imagens de PIV holográficas, ou seja, em mapas bidimensionais que incluem duas ou três dimensões. O termo HV (Holographic Velocimetry) é utilizado para referir experimentos em volumes tridimensionais verdadeiros.

SPIV (Scanning Particle Image Velocimetry) – O SPIV [Brücker,1996] é outra técnica empregada com a finalidade de obter perfis tridimensionais de velocidade em planos de escoamentos.

No domínio totalmente tridimensional, os métodos a serem considerados são denominados de 3D2C ou 3D3C. O primeiro será alcançado quando um volume de interesse no escoamento for mostrado por uma composição de vários planos de laser e o segundo será obtido por meio de uma verdadeira imagem holográfica do campo tridimensional de velocidades, ou seja, um caso típico de PTV holográfico (HV). Este último caso está ainda muito longe de ser alcançado e permanece ainda como um sonho para muitos pesquisadores em dinâmica dos fluidos [Royer e Stanislas ,1996].

O atual estágio do presente trabalho não envolve ainda técnicas de captura, aquisição, ou mesmo, processamento de imagens com a finalidade de obter informações tridimensionais. Está portanto fora de escopo considerações adicionais sobre estes arranjos e metodologias. Será, naturalmente no futuro, um tema a ser desenvolvido, dado o grande interesse científico e prático.

### **1.3. Etapas e equipamentos**

Um sistema de velocimetria por imagens de partículas se constitui no conjunto de equipamentos, metodologias de produção e captura de imagens e de processamento destas imagens. Para se montar um sistema deste tipo, há necessidade do uso adequado destes equipamentos numa disposição que varia estruturalmente conforme cada modo de utilização. A estrutura básica não sofreu alteração significativa ao longo dos anos excetuando-se evoluções tecnológicas em termos individuais, como por exemplo, o aperfeiçoamento das câmaras CCD que substituíram rapidamente as câmaras de fotografia. A característica de determinado equipamento ou sua disposição no sistema, determina as premissas básicas para o desenvolvimento das etapas e dos algoritmos utilizados no processamento.

O projeto de um sistema de velocimetria por imagens de partículas depende de uma série de fatores que precisam ser escolhidos de acordo com uma solução de compromisso. O compromisso envolve a finalidade de uso do sistema, exatidão desejada para os resultados, flexibilidade de uso e custo (aquisição, montagem, operação e manutenção). Os pontos a serem analisados podem ser agrupados como: iluminação, partículas, captura de imagens, digitalização de imagens e processamento de imagens.

#### **1.3.1. Iluminação**

A iluminação do escoamento na região em estudo é feita normalmente por meio de um plano iluminado com fontes de luz incoerentes ou coerentes (LASER). Os primeiros sistemas empregavam fontes de luz branca (incoerentes) de grande intensidade. Hoje em dia, no entanto, com o desenvolvimento de fontes de LASER de custo relativamente baixo, um sistema de velocimetria por imagens praticamente usa somente luz coerente. Além de a intensidade ser muito maior, é mais fácil obter-se um feixe concentrado de luz coerente e, com o auxílio de lentes cilíndricas, obter-se facilmente em planos delgados (da ordem de 1 mm de espessura).

A grande vantagem de um sistema de iluminação plano é permitir gerar naturalmente o sistema de referência para o qual a análise do escoamento estará fixada. Neste caso, para melhor eficiência, é necessário que o feixe (de LASER) inicial seja bem colimado, com o ponto focal (seção de menor diâmetro) incidindo sobre a lente cilíndrica e tenha uma distribuição de intensidade luminosa gaussiana ( $e^{-2}$ ) em torno do eixo principal, formando assim, um plano homogêneo sem estrias ou zonas de sombra. O plano iluminado formado terá também uma

distribuição gaussiana em torno de um plano meridiano podendo ser visualizada numa interseção ortogonal. Assim, uma partícula tem sua máxima reflexão quando transita pelo meridiano do plano iluminado, tendo sua reflexão rapidamente diminuída frações de milímetros aquém ou além deste meridiano. Desta forma, o plano iluminado evidencia somente aquelas partículas que estão em foco no plano de referência, reduzindo a confusão de imagens de partículas a ele não pertencentes.

Fontes de laser pulsado são praticamente indispensáveis quando se trata da medição de altas velocidades, onde partículas muito pequenas são usadas. Já para casos de velocidades mais baixas, o sistema de iluminação coerente não necessita ser necessariamente pulsado, desde que se disponha de outra maneira para obtenção da base de tempo. Com o uso de câmaras CCD para visualização das partículas, a base de tempo pode ser a própria taxa de captura, em quadros por segundo. As câmaras comerciais comuns (domésticas) têm taxa fixa de trinta quadros por segundo, porém já estão disponíveis no mercado câmaras com taxas de captura variáveis escolhidas pelo operador.

A iluminação do escoamento numa região ampla pode ser feita também na forma de volume, para estudo tridimensional do escoamento. As técnicas holográficas perseguem esta tecnologia, no entanto, muito caminho há pela frente até que os problemas sejam contornados.

### **1.3.2. Partículas**

O princípio de funcionamento de um sistema de velocimetria por imagens de partículas está fortemente estruturado na hipótese de que as partículas disseminadas no escoamento seguem perfeitamente o campo de velocidade do fluido. Na velocimetria por efeito Doppler (LDV), muitas vezes, não há necessidade de se adicionar partículas estranhas ao fluido porque as próprias partículas existentes, como por exemplo, os sais minerais dissolvidos, ou micros bolhas formadas devido à dissolução de gases no escoamento, fazem o papel de traçadores.

Acrescentar as partículas ao fluido é uma etapa do processo de realização de medidas que deve ser analisada com cuidado, pois, na verdade, são suas imagens que no final das contas irão caracterizar o escoamento.

A primeira constatação é de que as partículas devem demonstrar o comportamento do fluido em análise com a maior fidelidade possível. Para que isso aconteça, é necessário que a densidade da partícula seja igual ou muito próxima à do fluido em análise.

Muitos materiais diferentes são disponíveis para traçar fluidos. As vantagens de se usar partículas [Adrian,1991] são de que elas podem ser traçadores muito pequenos e ainda assim impressionar a iluminação significativamente criando um padrão perfeitamente visível. Além disso, existe uma maturidade tecnológica quanto ao seu uso no LDV. As desvantagens estão na necessidade de adicioná-las ao escoamento e garantir que elas sigam o campo de aceleração.

### **1.3.3. Filmagem/Fotografia**

Imagens para velocimetria por imagens de partículas podem ser capturadas por fotografia convencional ou usando câmaras com sensores CCDs (Charge-Coupled Devices). As câmaras CCDs podem vir com resoluções de até 4096 x 4096 pixels (pixel é um elemento de resolução bi-dimensional de imagem), porém com custo extremamente elevado. As câmaras de vídeo convencionais possuem resolução em torno de 768 x 484 pixels. Por outro lado, um razoavelmente rápido filme fotográfico tal como Kodak Tmax 400 tem uma resolução de 125 linhas/mm que corresponde a 6250 x 6250 pixels em um quadrado de 50 mm de negativo.

As câmaras fotográficas, apesar de sua alta resolução e baixo custo, são limitadas pela pequena taxa de repetição, por volta de 2 segundos, comparados com 33ms para câmaras CCDs, além de possuir o inconveniente da revelação do filme. Devido a isto, as mais novas aplicações de velocimetria por imagens de partículas têm migrado para a utilização de câmaras CCDs.

### **1.3.4. Aquisição das imagens**

As imagens das partículas para serem processadas devem ser transferidas para um computador. Isto é feito através de dispositivos de aquisição de imagens.

Algumas câmaras CCDs já possuem um sistema de comunicação direta não necessitando de hardware adicional. No entanto, para a maioria das câmaras, a utilização de uma placa de captura de imagens é necessária para este fim. No mercado, existe uma enorme quantidade destas placas que se adaptam a diferentes situações para os sistemas de velocimetria por imagens de partículas.

### **1.3.5. Processamento digital das imagens**

Sem dúvida, a parte mais importante no desenvolvimento de um sistema de velocimetria por imagens de partículas é o seu processamento, já que desta forma as medidas de velocidade podem ser extraídas de imagens aparentemente incompreensíveis.

Felizmente, a literatura em processamento digital de imagens é muito vasta, apresentando diversas soluções para as necessidades dos sistemas de velocimetria por imagens de partículas. Basicamente, estas necessidades consistem de identificação das partículas pela separação do fundo e espúrios. A parte que estuda este tipo de abordagem em processamento de imagens é conhecida como segmentação [Gonzalez & Woods,1992] [Castleman,1996].

O processamento digital de imagens requer uma contrapartida de conhecimento de seus conceitos básicos para que seu uso tenha sucesso. As técnicas requerem o uso balanceado de conceitos matemáticos, óticos e tecnologia computacional, além do uso da intuição e do bom senso [Castleman,1996].

Um processamento digital de imagens começa com uma imagem base e produz uma versão modificada daquela imagem. É portanto definido como o processo de transformação de uma imagem em outra. As etapas que realizam este processo são denominadas análise digital da imagem.

Uma imagem digital pode ser considerada uma matriz cujos índices de linhas e colunas indicam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento da matriz representa o nível de cinza daquele ponto. Os elementos do array digital são chamados de elementos de imagem ou pixels. Para uma imagem monocromática o nível de cinza é a escala de tonalidades que vão de 0 para o negro e 255 para o branco.

A segmentação de uma imagem consiste na manipulação de seus pixels com a finalidade de se extrair alguma informação. A forma mais comum de análise com este objetivo é a análise do histograma da imagem. O histograma de uma imagem é a distribuição dos valores dos níveis de cinza na imagem. A partir do histograma é possível estabelecer um limiar (threshold) que irá separar, em um exemplo clássico, partes claras das mais escuras. Isto é de aplicação direta em velocimetria por processamento digital de imagens.

Se a imagem é colorida, normalmente ela é composta por um código RGB (Red, Green, Blue) que faz as combinações das cores vermelha, verde e azul. Nas aplicações para velocimetria por processamento de imagens, se a imagem é colorida, é aconselhável converter para o código de cinza, o que pode ser facilmente conseguido pela média das três componentes de cor.

#### **1.4. O presente trabalho**

A proposta deste trabalho é elaborar uma ferramenta computacional para a medição de campos de velocidades em escoamentos com baixas velocidades ( $< 0,5$  m/s) utilizando o processamento digital de imagens.

Uma vez que etapas importantes para a implementação de um sistema tipo PIV foram intensamente abordados de forma conclusiva por autores da referência bibliográfica, estudos como tipos de partículas e iluminação foram adotados conforme a recomendação. Assim, os esforços recaíram sobre a aquisição e processamento das imagens com o objetivo de gerar o campo dos vetores de velocidades.

A iluminação utilizada foi a luz coerente através de um plano de laser contínuo, com as imagens sendo obtidas através de câmaras CCDs. Para captura das imagens, foram utilizadas placas digitalizadoras.

A ordem para a obtenção dos resultados foi coletar imagens de partículas, processá-las para extrair as informações necessárias, determinar os vetores de velocidade de uma região sob estudo e, então, mostrar os campos de velocidade.

A organização do presente trabalho foi feita seguindo a ordem de implementação da ferramenta computacional desenvolvida.

No capítulo 2 é apresentada a metodologia empregada. Nesta parte, são descritos os métodos para obtenção das imagens utilizadas, a sustentação teórica e a implementação dos algoritmos de processamento de imagens, além da forma de obtenção dos vetores de velocidades, e uma descrição da lógica do programa computacional desenvolvido.

No capítulo 3 é apresentada uma validação do programa computacional.

No capítulo 4 é apresentada uma análise das incertezas que acompanham as medidas. Os cálculos foram feitos conforme a recomendações contidas na bibliografia, indicada quando da utilização dos conceitos envolvidos.

No capítulo 5 são apresentados resultados obtidos com a aplicação do programa, em conjunto com a sua análise.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

Para complementar, no anexo I são apresentadas, variantes dos resultados mostrados no capítulo 4. No Anexo II são mostradas as tabelas com valores quantitativos dos resultados obtidos.



## 2. Metodologia empregada

O presente capítulo descreve a metodologia empregada, que consiste desde a identificação dos parâmetros de configuração dos equipamentos, até a apresentação dos campos de velocidade, passando pela descrição lógica da ferramenta desenvolvida. Existem três etapas distintas a serem seguidas para se chegar até a obtenção dos campos de velocidade. A primeira, envolve ajustes para a captura das imagens e sua preparação para o processamento. Estes são procedimentos necessários para a obtenção de uma melhor qualidade de resultados. A segunda etapa é a aplicação dos algoritmos desenvolvidos para o cálculo dos vetores velocidade a partir das imagens de partículas adquiridas. Nesta etapa acontece o processamento das imagens até o ponto onde elas estão prontas para fornecer informações de velocidades. A terceira etapa consiste num pós-processamento que objetiva calcular as velocidades médias e outras características relevantes do escoamento, tais como, flutuações de velocidade e intensidade de turbulência.

Para execução da metodologia acima descrita, foi desenvolvido um programa computacional denominado FLOWVIEWER, desenvolvido em C++, objeto do presente trabalho.

### 2.1. Configurações iniciais

Antes do processamento das imagens, os equipamentos devem ser montados em uma disposição previamente elaborada a fim de se obter os melhores resultados. Esta montagem depende diretamente das características físicas do escoamento que se deseja estudar. A forma básica de um ensaio deve em princípio seguir uma topologia como a da mostrada na figura 2.1.

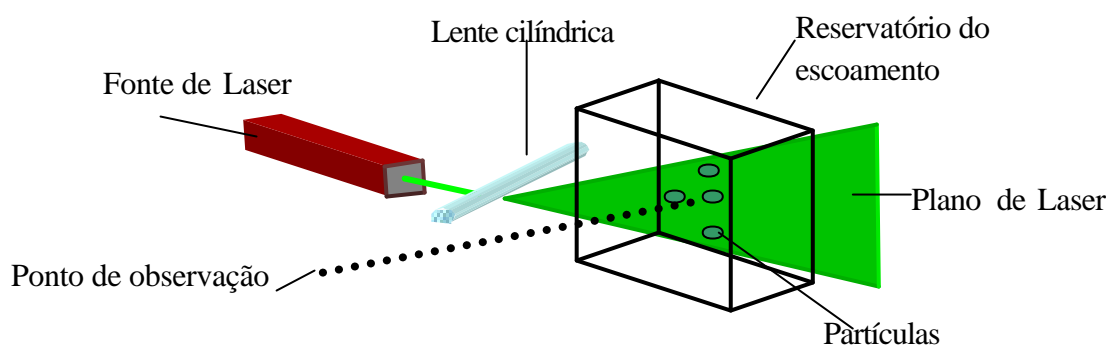


Figura 2.1. Topologia básica

Nesta figura é exemplificado um plano de luz coerente (LASER) que ilumina uma região do escoamento que se deseja analisar. São adicionadas partículas traçadoras que devem acompanhar perfeitamente o movimento do fluido. As imagens de partículas podem então ser obtidas através de um sistema de captura, composto por câmara de vídeo e placa digitalizadora de imagem.

### 2.1.1. Plano de laser

Antes de iniciar a captura das imagens, é necessário que o plano de laser seja ajustado de acordo com a região do escoamento que se deseja conhecer o campo de velocidades. Inicialmente, tem-se um feixe de laser de seção circular, com uma distribuição gaussiana de intensidade luminosa, colimado. Ao feixe, se acopla uma lente cilíndrica com a finalidade de transformá-lo num plano. A figura 2.2 exemplifica esta situação.

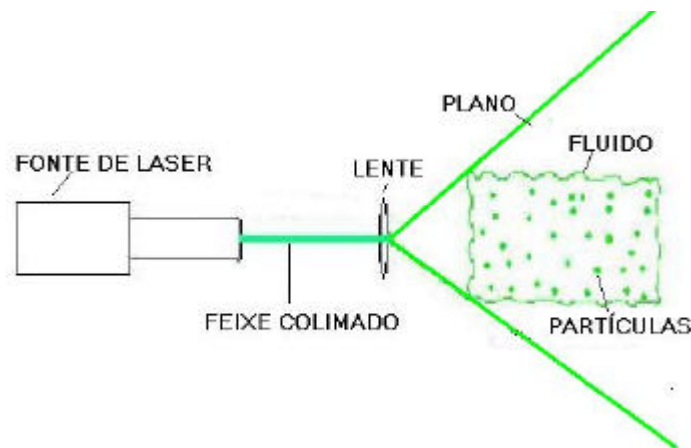


Figura 2.2. Esquema de montagem do plano de iluminação

Para que o plano de laser tenha mobilidade e possa ser levado para as regiões desejadas do escoamento, é interessante que tenha movimentação flexível, seja por meio de um posicionador do feixe de laser, seja através de uma fibra ótica.

Para a iluminação das partículas, no presente trabalho, foram utilizadas duas fontes de laser. A primeira localizada no LTMF<sup>1</sup>, e a segunda, localizada no LASID<sup>2</sup>, possuem as seguintes características:

Primeira:

Tipo: íons de argônio.

Modelo: Mobile® 2016 da Spectra Physics.

Potência Nominal: 4 Watts.

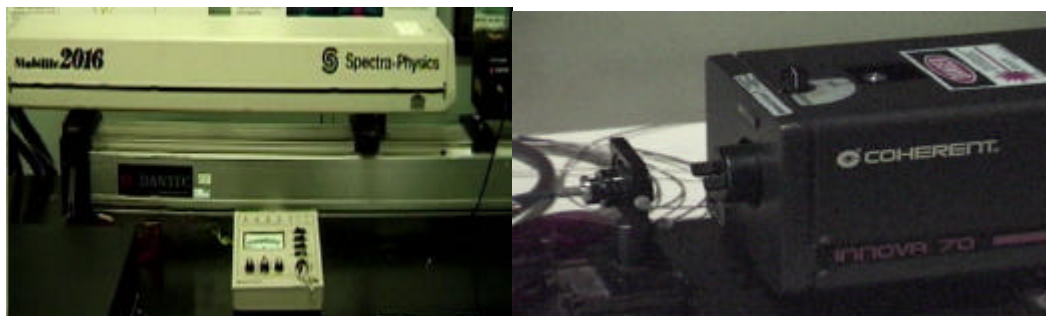
Segunda:

Tipo: íons de argônio.

Modelo: INOVA® 70 da Coherent

Potência nominal: 5 Watts

Na figura 2.3 é mostrada uma fotografia das fontes de laser utilizadas.



A) Primeira

B) Segunda

Figura 2.3. Fontes de Laser

### **2.1.2. Adição de partículas**

O objetivo do presente trabalho não é fazer uma análise aprofundada quanto à caracterização das partículas utilizadas. No entanto, para que os resultados pretendidos sejam

---

<sup>1</sup> Laboratório de Turbomáquinas e Medição de Fluxo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, departamento de Engenharia Mecânica.

<sup>2</sup> Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Metalúrgica

alcançados, uma série de premissas deve ser levada em consideração, principalmente no que se refere ao item adição de partículas.

As partículas, dispersas no escoamento, não devem perturbar o campo de velocidades. Para isto, devem ser suficientemente pequenas e não podem coalescer. Por outro lado, é interessante que a concentração seja suficientemente grande para a obtenção do campo de velocidades completo.

Como a velocidade medida, na realidade, é efetivamente a velocidade da partícula, esta deve acompanhar o movimento do fluido. Para isso, é importante que a massa específica da partícula seja aproximadamente igual a do fluido.

Estas características são minuciosamente descritas em [Adrian,1991], [Almeida,1997] e [Gonçalves,1998].

Para as aplicações propostas neste trabalho, a partícula utilizada foi a pliolite (polímero S6H), que atende as características necessárias quando o fluido do escoamento é água, pois possui densidade de 1,02\*.

O procedimento para a adição da pliolite ao fluido deve ser feito da seguinte forma:

Inicialmente as partículas são peneiradas para a obtenção de tamanhos menores do que 53  $\mu\text{m}$ .

Antes da adição ao fluido, é conveniente misturar um dispersante junto com as partículas para evitar a coalescência. Para este fim, foi utilizado um detergente.

As partículas são adicionadas ao fluido de forma que possam se distribuir uniformemente por todo o volume do escoamento.

## **2.2. Aquisição de imagens**

Uma vez obtido o plano de laser em um escoamento, com as partículas iluminadas, a etapa seguinte é a captura seqüencial das imagens de partículas para serem arquivadas digitalmente.

Os instrumentos envolvidos nesta etapa são: câmara de vídeo do tipo CCD, gravador de vídeo e um microcomputador que possua uma placa digitalizadora de imagens. As características dos equipamentos utilizados são as seguintes:

Câmaras de vídeo:

Tabela 2.1. Câmaras de vídeo utilizadas

Fabricante	Modelo	Shutter <sup>1</sup>	Taxa de quadros
SONY	DCR VX1000	1 / 4 - 1/ 2000	1/ 4 - 1/30
CE	CV M30	1/60 – 1/20000	1/30

Placas digitalizadoras:

Tabela 2.2. Modelos de Placas digitalizadoras

Fabricante	Modelo	Resolução Máxima
AIMS	Video Highway Xtreme 98®	640x480.
MIRO	MIROplus®	640x480
EPIX	4MVIDEO®	1024x1024

Gravador de vídeo:

Tabela 2.3. Gravadores de vídeo

Fabricante	Modelo
SONY	DSR-30 – DV

Uma característica muito importante no estudo do campo de velocidades de um escoamento é o tempo de processamento de todo o sistema. A resposta a este questionamento pode definir se um estudo é viável ou não. Nas primeiras aplicações de PIV, o processo de obtenção das velocidades era muito lento. Isto acontecia por causa do uso de imagens fotográficas de partículas digitalizadas através de scanner e que somente depois eram processadas. Para muitas aplicações, esta forma de aquisição das imagens mostrou-se muito satisfatória. No entanto, quando se necessita grande quantidade de imagens, os custos de revelação fotográfica e o tempo para o processamento tornam a técnica antieconômica.

---

\* massa específica da água, 1,00.

O ideal seria que os campos de velocidades pudessem ser gerados e processados de forma “on-line”. A medida em que o escoamento fosse filmado, as imagens seriam diretamente capturadas e processadas, gerando arquivos com os campos de velocidade da região registrada. Esta solução depende basicamente das características da placa de captura de imagens ou da câmara de vídeo. Com os equipamentos atualmente disponíveis, foi possível realizar um processamento “quasi-on-line”. Chamado assim, Porque numa primeira etapa as imagens das partículas são filmadas e gravadas em uma fita de vídeo do tipo DV. Depois disso, num segundo momento, o vídeo gravador é acionado quadro a quadro. Isto dá tempo suficiente para a placa de captura passar as imagens para o computador, processá-las, e assim obter as velocidades instantâneas.. A figura 2.4 mostra o vídeo gravador ao lado do computador onde foram feitos os processamentos “quasi-on-line”.

Para facilitar o uso do programa FLOWVIEWER, foram utilizadas placas de captura de imagens, descritas na tabela 2.2, que possuem interface para suas funções internas através do padrão utilizado por programas comerciais desenvolvidos para o Windows®. Isto implica em dizer que, em outro ambiente, onde o programa possa ser eventualmente usado, pode ser utilizada outra placa de diferente fabricante, se esta também possuir a mesma interface. Isto facilitou a implementação de um módulo de captura de imagens no programa FLOWVIEWER.

O usuário do programa FLOWVIEWER pode escolher entre a opção de captura das imagens – ou “quasi-on-line” ou por ciclos . A forma de processamento quasi-on-line, na verdade, é uma alternativa para quem possui um vídeo gravador com qualidade muito boa (digital) a sua disposição. De outra forma, não há problema algum, em primeiro lugar, armazenar uma seqüência de imagens em arquivos, para depois processá-las em um ciclo. Isto pode causar problemas de armazenamento em disco rígido, facilmente contornável atualmente, já que cada vez mais os dispositivos de armazenamento possuem maior capacidade.

As imagens de partículas podem ser processadas em grandes blocos separadamente. Assim, podem ser usadas imagens capturadas por outros padrões de placas, ou então imagens de fotografias provenientes de scanners, que apesar de tornarem a obtenção dos resultados mais lenta, permitem uma melhor resolução espacial.

---

<sup>1</sup> Tempo de varredura completa de uma imagem, para uma câmara de vídeo.



Figura 2.4. Vídeo gravador e computador processando as imagens.

Na etapa de captura de imagens, é necessário levar em conta a forma como as imagens chegam ao microcomputador para serem processados. Ao se fazer a filmagem, é necessário cuidados para que o plano de laser seja ortogonal a posição do eixo da lente da câmara de vídeo. É necessário, também, estar atento para que a filmagem contenha somente as imagens das partículas em escoamento, procurando evitar ao máximo, sinais espúrios que possam induzir erros de interpretação. Uma forma de otimizar o processo de captura de imagens é realizando filmagens durante a noite ou num ambiente onde a luz do plano de laser seja fortemente predominante.

### **2.3. Processamento digital das imagens**

O processamento digital das imagens tem a finalidade de preparar as imagens capturadas para que delas possam ser extraídas as informações dos campos de velocidades. Para isto, alguns parâmetros básicos precisam ser previamente estabelecidos. As imagens quando passadas ao microcomputador através da placa de captura possuem um padrão de formatação de arquivo. Com este padrão de formatação, é possível aos programas de computador e sistemas operacionais reproduzirem esta imagem para visualização, ou, como no caso presente, processá-la em busca de informação de deslocamento de partículas. Entre os formatos de arquivos de imagens conhecidos, podemos citar dois amplamente usados, os BMP e os JPEG. O formato

BMP é um formato cuja estrutura do arquivo de imagem é tal qual ele realmente é, ou seja, não faz nenhum tipo de compressão da imagem. Já no formato JPEG, a estrutura do arquivo utiliza somente os dados da imagem real que precisa para ser visualizada pelo olho humano. Este último é conhecido como um formato comprimido. Uma imagem JPEG ocupa muito menos espaço de armazenamento do que uma imagem BMP, no entanto, pode alterar levemente as características de uma imagem. Para que o processamento pudesse alcançar todas as características da imagem capturada, o formato BMP foi adotado.

Uma vez definido o formato de captura, as imagens passam pelas transformações que possibilitarão encontrar as velocidades. Estas transformações envolvem a decodificação do arquivo da imagem para uma matriz, a identificação das partículas na imagem e a obtenção do centro de todas as partículas.

### **2.3.1. Imagem como matriz de pixels**

Para que se possa aplicar os algoritmos de processamento de imagens, é conveniente que as imagens sejam tratadas como uma matriz de pixels. Cada elemento de imagem, ou seja, um pixel, é localizado na imagem por suas coordenadas no plano.

Para se aplicar os algoritmos de processamento de imagens desenvolvidos para a determinação da velocidade de partículas, é necessário que os valores dos pixels estejam identificados por uma escala de cinza. Isto é distribuído da seguinte forma: para pixels cujo valor corresponde ao preto o nível de cinza é zero e para pixels cujo valor corresponde ao branco o nível de cinza é 255. Na figura 2.5 é exemplificado o funcionamento da escala de cinza.

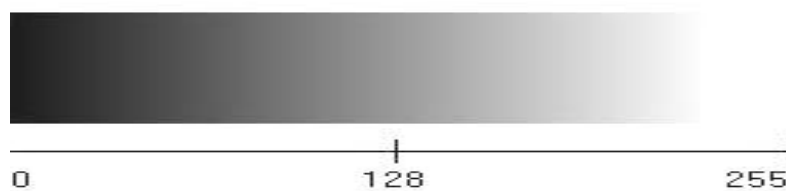


Figura 2.5. Escala de cinza

Quando se utilizam placas de captura de imagens, que são usadas, não só para os fins específicos de velocimetria por imagens de partículas, a captura originalmente não é feita em nível de cinza. Isto acontece porque o nível de cinza permite somente imagens em preto e branco, e para uma placa de captura de uso geral, é conveniente que as imagens sejam coloridas.



Na escala de cinza, a imagem é dita como sendo formada por oito bits, ou seja, a palavra que contém a informação do pixel tem tamanho 8. Isto na concepção de números binários quer dizer ser possível fazer 256 combinações diferentes. O que acontece, com as imagens coloridas, é de que os valores dos pixels são formados por 24 bits, permitindo uma combinação de 16777216 diferentes cores.

Na verdade todas as cores podem ser obtidas com uma combinação de três grupos de oito bits, conhecida como padrão RGB (Iniciais de Red., Green, Blue) que são formados por uma escala de vermelho, uma de azul e uma de verde, de forma similar à escala de cinza.

Como o processamento das imagens de partículas foi padronizado para trabalhar com níveis de cinza, é necessário então que as imagens quando capturadas coloridas sejam transformadas de RGB para valores de nível de cinza. Isto é possível fazendo-se a média dos níveis de RGB. como mostra a equação 2.1.

$$N_c = \frac{\text{Vermelho} [i][j] + \text{Verde} [i][j] + \text{Azul} [i][j]}{3} \quad (2.1)$$

O nível de cinza  $N_c$ , localizado na coordenada horizontal “i” com a coordenada vertical j, é dado pelas somas das componentes de cor do local dividido por 3. Deste modo, temos os valores dos pixels padronizados para a utilização dos algoritmos de análise das imagens.

Na formulação dos níveis de cinza que identificam um pixel, é observado que eles são localizados por suas coordenadas. No entanto, o arquivo de imagem no formato BMP que se propõe trabalhar não fornece esta identificação direta. Para isso, é necessário observar como o arquivo está estruturado para que a matriz de pixels possa ser montada.

Todos os arquivos possuem um cabeçalho que identifica a imagem como sendo BMP, qual o número de cores utilizado e as dimensões da imagem. Além disso, fornece em que byte do arquivo os dados da imagem propriamente dita se iniciam. Se a imagem é de oito bits, ela virá como espécie de aquarela, chamada “palette” que identificará os valores dos pixels. Se a imagem é de códigos de cinza, esta “palette” varia uniformemente de 0 a 255. Por outro lado, se a imagem é do tipo RGB, ela não possui “palette” e os valores dos pixels são identificados por três bytes cada um, ou seja, 24 bits.

A última relevância na passagem de um arquivo de imagem para uma matriz de pixels é de que a imagem no arquivo se posiciona da esquerda para a direita e de baixo para cima.

### 2.3.2. Limiar

O termo utilizado aqui como limiar provém da literatura de processamento de imagens do termo “threshold”. O estabelecimento de um limiar é um procedimento constantemente presente nas aplicações de processamento de imagens. A idéia básica é estabelecer um valor dentro da escala de cinzas (0 a 255), que separe determinadas características de uma imagem de outras que não são de interesse momentâneo. Para o desenvolvimento do programa FLOWVIEWER, foram estudadas técnicas para a implementação do limiar nas imagens de partículas. Baseando-se nos princípios expostos, um limiar pode ser visto como uma operação que envolve testes comparados a uma função T da forma:

$$T=T[x,y,p(x,y),f(x,y)] \quad (2.2)$$

Onde  $f(x,y)$  é o nível de cinza no ponto  $(x,y)$  e  $p(x,y)$  denota alguma propriedade local deste ponto – por exemplo, para o caso em questão, o nível de cinza médio que descreve uma partícula dentro da imagem.

Uma imagem após passar por um processo de definição do limiar seria definida por:

$$g(x,y) = 1 \text{ se } f(x,y) > T \quad (2.3)$$

$$g(x,y)=0 \text{ se } f(x,y) < T$$

Desta forma, os pixels que assumirem o valor 1, serão os objetos procurados na imagem, no caso, as partículas. Os pixels nomeados com 0, serão o fundo ou o restante da imagem.

Quando o limiar depende somente de  $f(x,y)$ , o limiar é chamado global, quando depende de ambos  $f(x,y)$  e  $p(x,y)$ , é chamado de local. Se depender das coordenadas espaciais  $x$  e  $y$  também, é chamado um limiar dinâmico.

No caso da implementação do limiar para o programa FLOWVIEWER, somente o limiar global foi utilizado, uma vez que as características das imagens apresentadas descrevem normalmente uma iluminação uniforme. A aplicação de limiares globais mostrou-se satisfatória para as imagens de partículas iluminadas com plano de laser. O algoritmo desenvolvido para o programa FLOWVIEWER segue as equações apresentadas neste capítulo.

Uma imagem de partículas “limiarizada” obtida com o FLOWVIEWER é mostrada na figura 2.6

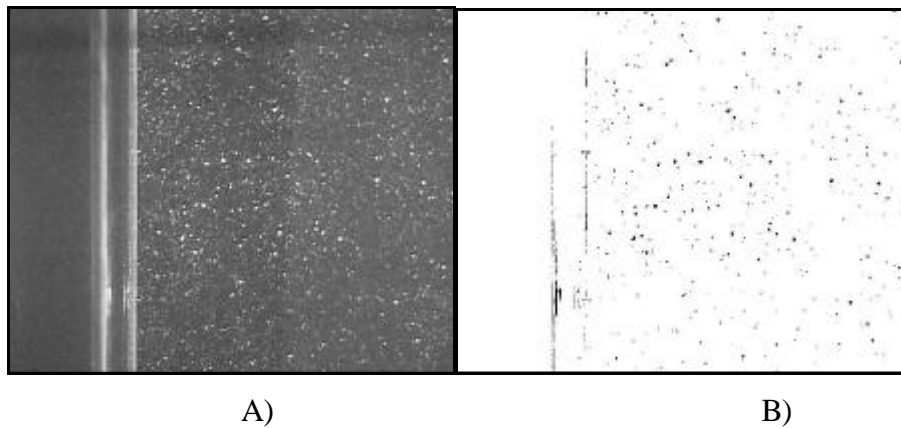


Figura 2.6. imagens de partículas. A) imagem real; B) imagem com limiar

Com este procedimento pode-se observar no resultado obtido que as partículas foram separadas do restante da imagem. No entanto, também algumas imagens de partículas espúrias, onde o brilho é relativamente forte, não foram excluídos na aplicação do limiar. Para estas imagens espúrias, antes de aplicar os algoritmos de identificação de partículas, o FLOWVIEWER fornece ao usuário uma opção de marcar os pontos de brilho semelhante às partículas com a finalidade de excluí-los do processamento.

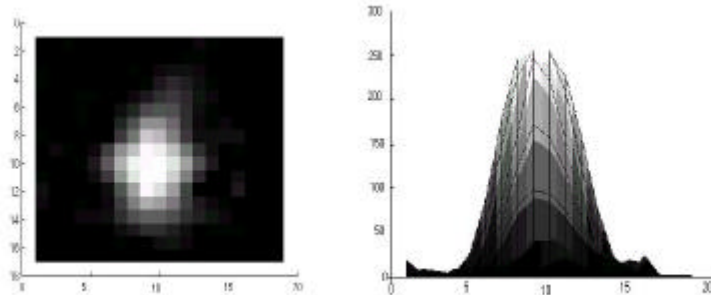
### **2.3.3. Centro da partícula**

Para determinar qual a velocidade de uma partícula entre duas imagens distintas, deve-se tomar como base a posição de seus centros na imagem. Por isso, a determinação destes pontos de forma exata e com algoritmos coerentes para todas as partículas é um dos fatores de sensibilidade para o FLOWVIEWER.

A figura 2.7 mostra uma representação gráfica de uma típica partícula iluminada que se encontra normalmente em uma imagem.



A) Vista espacial



B) Vista do plano

C) Vista de perfil

Figura 2.7. Gráfico de uma imagem da partícula.

A Figura 2.7 mostra a partícula em três ângulos diferentes conforme seu nível de cinza e posição espacial. Com a manipulação destes níveis e suas coordenadas, pode-se determinar o centro da partícula [Ferreira “et alli”,1997].

O centro da partícula é encontrado a partir da média de seus pontos com maior intensidade. O primeiro processo pelo qual a imagem da partícula passa é a seleção da região de corte, comandada pela aplicação do limiar. Aplicado o limiar, é obtida uma imagem chamada binária. Esta imagem é composta somente por dois níveis, preto e branco. Para encontrar o centro da partícula, é assumido que o restante dos pontos de maior intensidade são descritos no entorno de um círculo. Assim, o ponto central fica definido com sendo a média do ponto  $x$  mínimo e  $x$  máximo, para a coordenada  $X$  e a média dos pontos  $y$  mínimo com  $y$  máximo, para a coordenada  $Y$ . A equação 2.4 representa esta função.

$$C_p(x, y) = f\left(x + \frac{x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}}{2}, y + \frac{y_{m\acute{a}x} - y_{m\acute{i}n}}{2}\right) \quad (2.4)$$

## 2.4. Obtenção das velocidades

Depois que as imagens das partículas são processadas e identificadas por seus centros, os próximos algoritmos não mais as referenciam. Nesta etapa, os objetos de processamento são somente as coordenadas  $x$  e  $y$  que correspondem ao centro de cada partícula. Cada imagem forma um conjunto de pontos, cujas disposições no plano são relacionados com os conjuntos das imagens subseqüentes.

Num primeiro momento, são encontrados os vetores velocidades relacionados com cada par de imagens de partículas em seqüência. Num segundo momento, a região em estudo sofre uma discretização regular através da geração de uma malha análoga às utilizadas em simulação numérica. A finalidade é identificar o comportamento do vetor de velocidade em cada centro da malha.

A base teórica para a obtenção da velocidade de uma partícula em todas as metodologias de velocimetria pelo processamento de imagens de partículas (PIV) pode ser exemplificada pela figura 2.8, [Adrian,1991].

Cada centro de partícula exemplificado nesta figura ocorre em instantes diferentes, ou seja, o ponto sob investigação é o mesmo, apenas deslocado de  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , decorrido o instante  $\Delta t$ . No programa FLOWVIEWER, a constante de tempo considerada é obtida através da taxa de quadros por segundo, realizado pelas câmaras CCDs utilizadas.

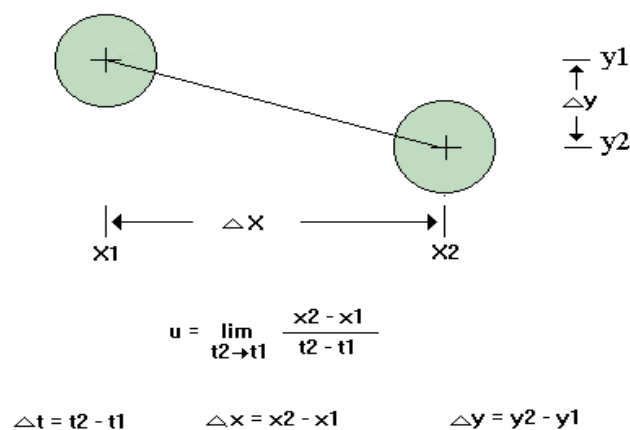


Figura 2.8. Base para determinação das velocidades

### **2.4.1. Determinação das velocidades instantâneas**

Levando em consideração uma faixa de separação entre as partículas, é possível determinar uma área de busca onde a mesma partícula, provavelmente, deverá estar na imagem seguinte. Em termos de pixels, esta área de busca, na maioria dos escoamentos analisados, permite possuir deslocamento máximo de dez pixels para a partícula. Isto implica, conforme a figura 2.8, que se em um determinado instante  $t_1$ , tivermos uma partícula num ponto determinado da imagem, poderemos buscá-la na imagem subsequente por uma região circunvizinha correspondente ao valor de dez pixels. Caso não se encontre partícula na segunda imagem, ou ainda existir uma outra partícula na mesma área de busca em ambas imagens, o processamento descarta as duas imagens, e nenhum vetor de velocidade é associado a esta região de busca. Caso todas as condições sejam satisfeitas um vetor velocidade é gerado. A forma de cálculo do vetor velocidade é dada por:

Velocidade  $u$  : Deslocamento da partícula no eixo horizontal/tempo entre as duas imagens(q/s).

Velocidade  $v$ : Deslocamento da partícula no eixo vertical/ tempo entre as duas imagens (q/s).

A partir destes dados, podem ser calculadas médias, ou ainda, ajustes de fator de escala, com a finalidade de transformar a medida em pixels por segundo para uma unidade do sistema métrico (mm/s).

À medida que as partículas estão sendo identificadas por pares de imagens e os vetores velocidades individuais gerados, os valores de velocidade vão sendo “empilhados”, formando um conjunto de vetores velocidade. A posição dos vetores é identificada com resolução de um pixel, dentro da disposição espacial da imagem. A coordenada base do vetor velocidade é considerada como sendo o ponto central da partícula encontrada na primeira imagem.

### 2.4.2. Velocidades médias

Para o cálculo das velocidades médias encontradas, os vetores velocidade instantâneos são agrupados em uma sub-região. Cada valor médio é calculado a partir de todos os valores que se encontram dentro daquela sub-região. O programa FLOWVIEWER define três tamanhos diferentes de sub-regiões, nas quais os vetores de velocidades são agrupados. O tamanho das imagens analisadas pelo programa, devido ao uso de placas de captura de imagens de uso comum, possui uma definição de 640 x 480 pixels.

Para agrupar os vetores de velocidade implementou-se em um primeiro momento, uma região de 10 x 10 pixels, o que, em termos totais de imagem, resulta em uma malha de 64 x 48 sub-regiões. Para melhor flexibilidade de análise, implementou-se também sub-regiões de 20 x 20 pixels e 40 x 40 pixels, correspondendo respectivamente 32 x 24 e 16 x 12 sub-regiões.

### 2.4.3. Cálculo dos parâmetros de turbulência

O programa FLOWVIEWER permite calcular os principais parâmetros de turbulência para escoamentos em estudo. Os principais parâmetros são: flutuação de velocidade  $u'$  e  $v'$  e intensidade de turbulência para cada componente, conforme a equação 2.4.

Os valores destes parâmetros são determinados conforme o tipo de malha escolhido. Assim, todos os pontos que caem em uma determinada sub-região, na mesma onde foram calculados os vetores médios, são considerados para o cálculo dos parâmetros.

A turbulência geralmente é especificada por duas grandezas, o tamanho e a intensidade das flutuações [Streeter, 1977]. Num escoamento permanente, as componentes da velocidade média num ponto são constantes com o tempo. Na figura 2.9, um gráfico descreve as flutuações de velocidade. Se estes valores médios são  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  e as componentes instantâneas da velocidade são  $u$  e  $v$  as flutuações são dadas por  $u'$  e  $v'$ , na forma da equação 2.4

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$
(2.4)

As raízes quadradas dos quadrados dos valores das flutuações são uma medida da intensidade de turbulência. As fórmulas utilizadas então pelo FLOWVIEWER para indicar a intensidade de turbulência na malha são dadas por:

$$IT(u) = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{u} \times 100 \quad (2.5)$$

$$IT(v) = \frac{\sqrt{\overline{(v')^2}}}{v} \times 100$$

Os valores são multiplicados por 100, para expressarem uma percentagem.

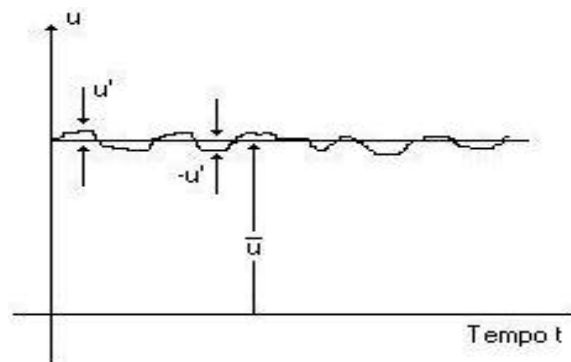


Figura 2.9. Flutuações turbulentas na direção do escoamento.

## 2.5. Implementação do programa FLOWVIEWER

### 2.5.1. Lógica do programa

Baseado nos conceitos e premissas estabelecidas nos itens anteriores deste capítulo, foi implementado o programa FLOWVIEWER. A lógica envolve três etapas distintas, de pré-processamento e processamento das imagens de partículas e pós-processamento para identificar e qualificar os vetores de velocidades obtidos.



A etapa de pré-processamento, envolve adquirir as imagens e preparar seus arquivos para o processamento seqüencial da etapa seguinte. Para isto, é utilizada a lógica demonstrada na figura 2.10.

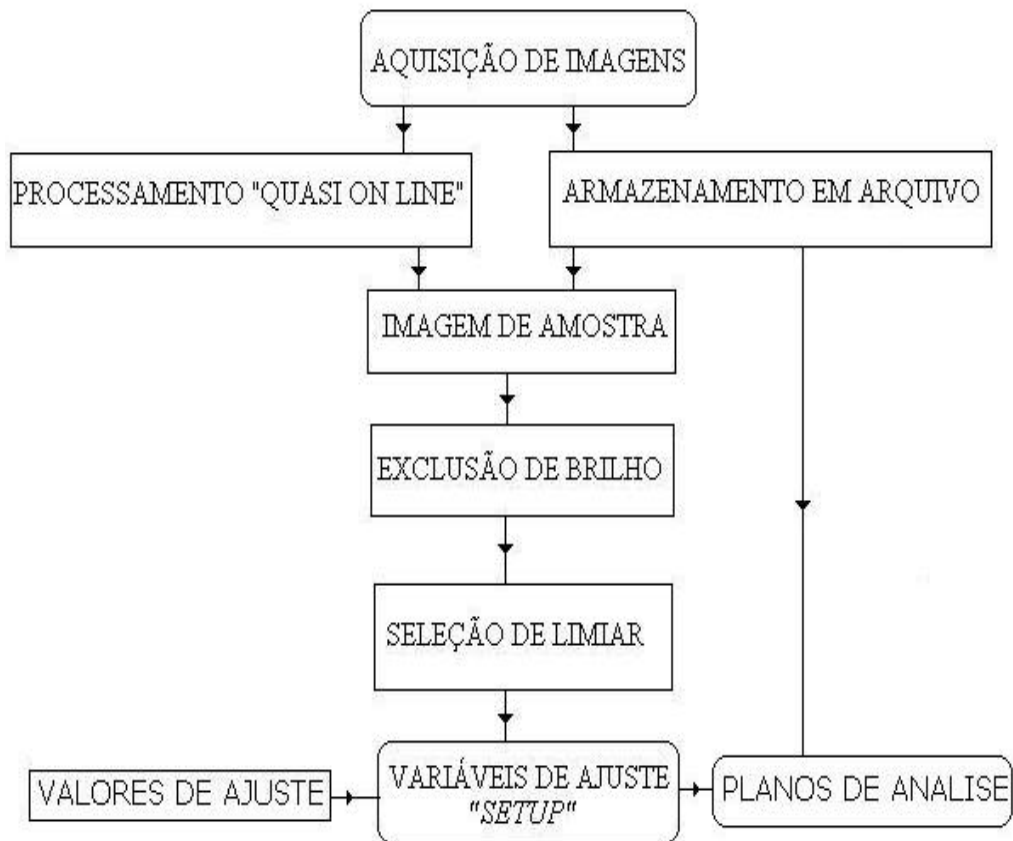


Figura 2.10. lógica do pré-processamento das imagens

O ponto inicial de utilização do programa FLOWVIEWER é a aquisição das imagens. Isto pode ser feito utilizando o próprio programa ou utilizando aqueles que acompanham as placas digitalizadoras de imagens. Para utilizar o próprio programa, as placas de captura devem possuir um “driver” padrão de interface de controle de mídia. As placas descritas na tabela 2.2 apresentam estas características.

Quando adquiridas, as imagens são armazenadas temporariamente em arquivo. Se for utilizado o processamento “quasi on line”, isto não é necessário. Em qualquer um dos casos, uma imagem de amostra deve ser selecionada para que alguns parâmetros necessários ao processamento sejam estabelecidos.

Na imagem de amostra, a primeira análise a ser feita é a identificação dos pontos de brilho intenso que possam estabelecer confusão aos algoritmos de identificação das partículas. Estes brilhos, normalmente são devido à reflexão causadas pelo plano de iluminação. Na figura 2.1.1 é mostrada uma tela do FLOWVIEWER onde são excluídos setores da imagem com brilho excessivo.

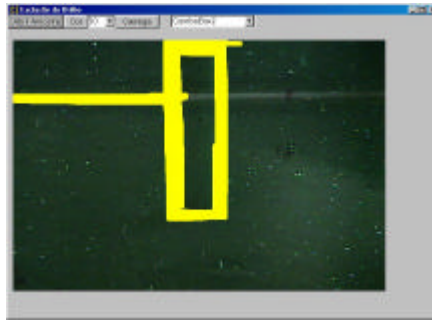


Figura 2.11. Região com exclusão de brilho

Uma vez que regiões de brilho são identificadas, uma seleção do limiar pode ser realizada. Para isto, o programa possui uma tela onde aparece a imagem original e a imagem com limiar aplicado. Desta forma, é possível ver se a aplicação do limiar está possibilitando distinguir corretamente as partículas do restante da imagem. A figura 2.12 mostra esta tela de usuário para esta função.

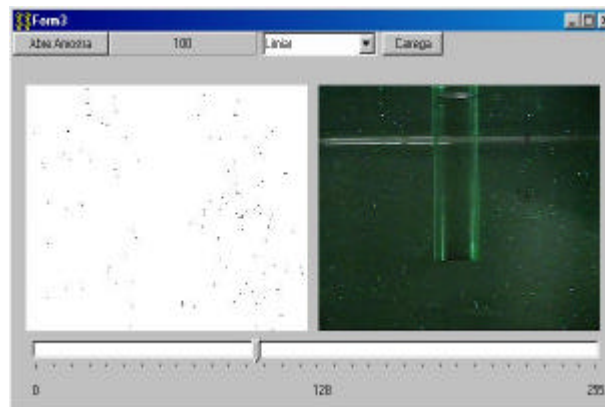


Figura 2.12. Tela de seleção do limiar.

Depois que parâmetros de limiar e exclusão de brilho são estabelecidos, estes valores ficam armazenados junto com uma série de variáveis de ajuste. Estas variáveis podem ser

atualizadas em uma tela de “setup”. Estas variáveis determinam os parâmetros de processamento. Na figura 2.13, é mostrada a tela.

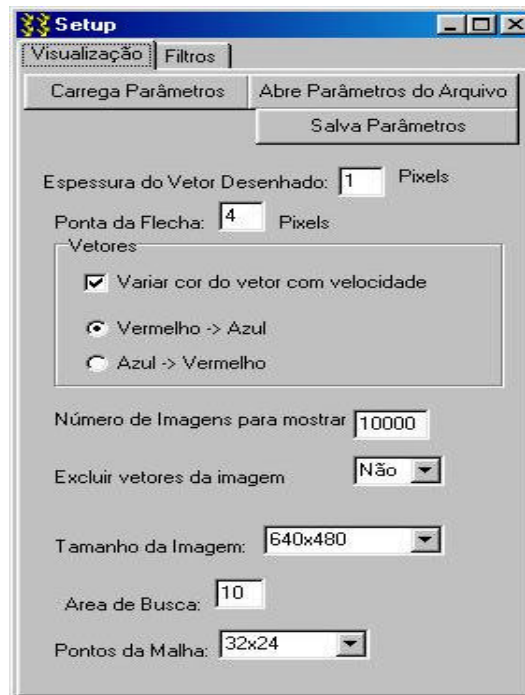


Figura 2.13. Tela de “setup” do programa FLOWVIEWER

Quando as imagens são previamente armazenadas em arquivo para serem processadas em blocos, é necessário criar uma lista com a seqüência dos arquivos de imagens para serem processados. Esta lista é chamada de planos de análise.

Com os procedimentos citados acima, os parâmetros que o programa FLOWVIEWER necessita para processar as imagens podem ser obtidos.

### **2.5.2. Lógica de processamento**

Na lógica do programa, as imagens são processadas a partir de parâmetros estabelecidos na etapa de pré-processamento. Em cada imagem de entrada para processamento, os setores de brilho excessivo são excluídos, o limiar é aplicado juntamente com os parâmetros de “setup”, até que o bloco de imagens desejadas se complete. Este procedimento pode ser feito, seja através de planos de análise, ou através do processamento “quasi on line”.

A figura 2.14 exemplifica a lógica de processamento das imagens utilizadas pelo FLOWVIEWER.

Nos parâmetros são indicadas informações como: quantas imagens devem ser processadas, qual a área de busca para identificar deslocamentos de partículas, entre outras.

Os centros das partículas contidas em imagens subseqüentes, são relacionados para dar origem aos vetores de velocidade.

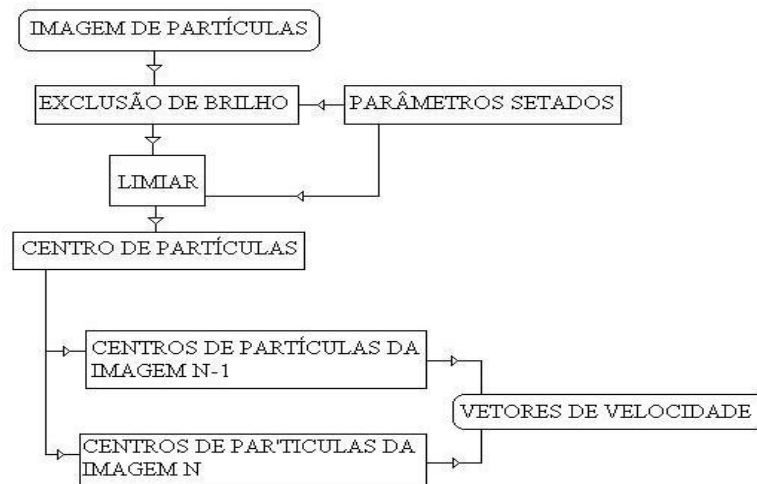


Figura 2.14. Lógica de processamento

### 2.5.3. Lógica de pós-processamento

A lógica de pós-processamento está no fluxograma mostrado na figura 2.15

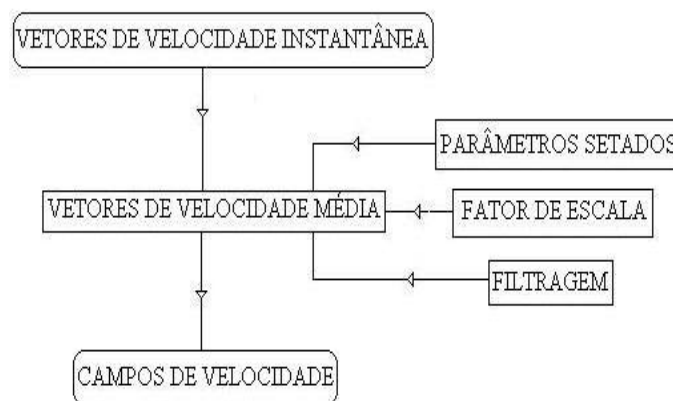


Figura 2.15. Lógica do pós-processamento

Uma vez que os vetores de velocidades instantâneas são obtidos pela etapa de processamento, estes são agrupados em sub-regiões para gerar os vetores de velocidade média. O conjunto de vetores de velocidade média forma o campo de velocidades da região de análise.

Para mostrar o campo de velocidades em mm/s ao invés de pixels/s, é necessário determinar o fator de escala. Para isto, o programa fornece uma tela, mostrada na figura 2.16

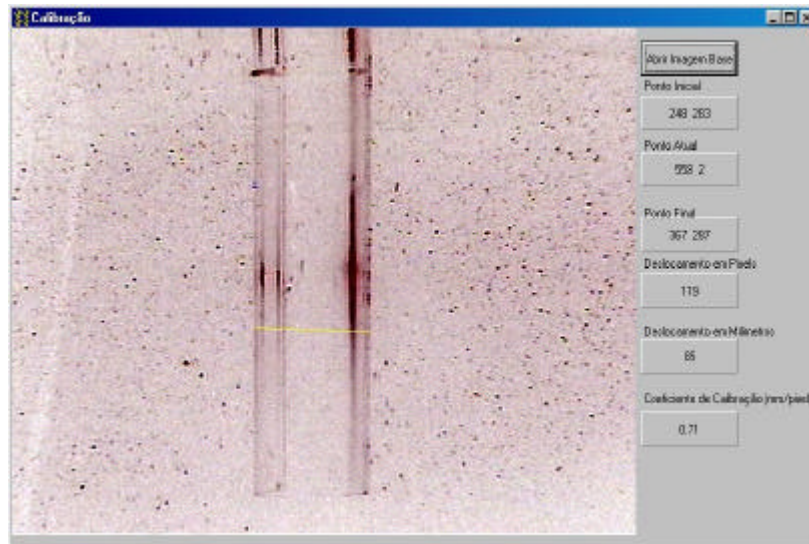


Figura 2.16. Tela do programa FLOWVIEWER para obtenção do fator de escala

Para a obtenção do fator de escala, deve ser traçada uma linha (utilizando o mouse) sobre um comprimento de referência que seja conhecido. Este valor conhecido pode então ser digitado em uma tela como a mostrada na figura 2.17.

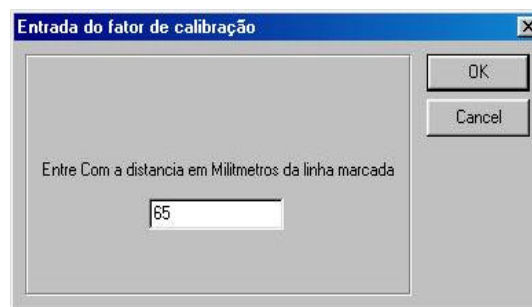


Figura 2.17. Entrada do fator de escala

Para uma melhor avaliação dos campos de velocidades, podem ser aplicados alguns filtros sobre os vetores de velocidade média. A entrada destes filtros é feita pela tela de “setup” do programa. Podem, por exemplo, ser excluídos da visualização final, vetores de velocidades

com amostragem muito pequena. Ou ainda, eliminar do cálculo da média, vetores de velocidade que se afastam da tendência dos demais, encontrados na mesma sub-região.

### 2.5.4. Interpretação dos resultados

Para a avaliação dos resultados o programa FLOWVIEWER fornece uma tela de resultados como a mostrada na figura 2.18.

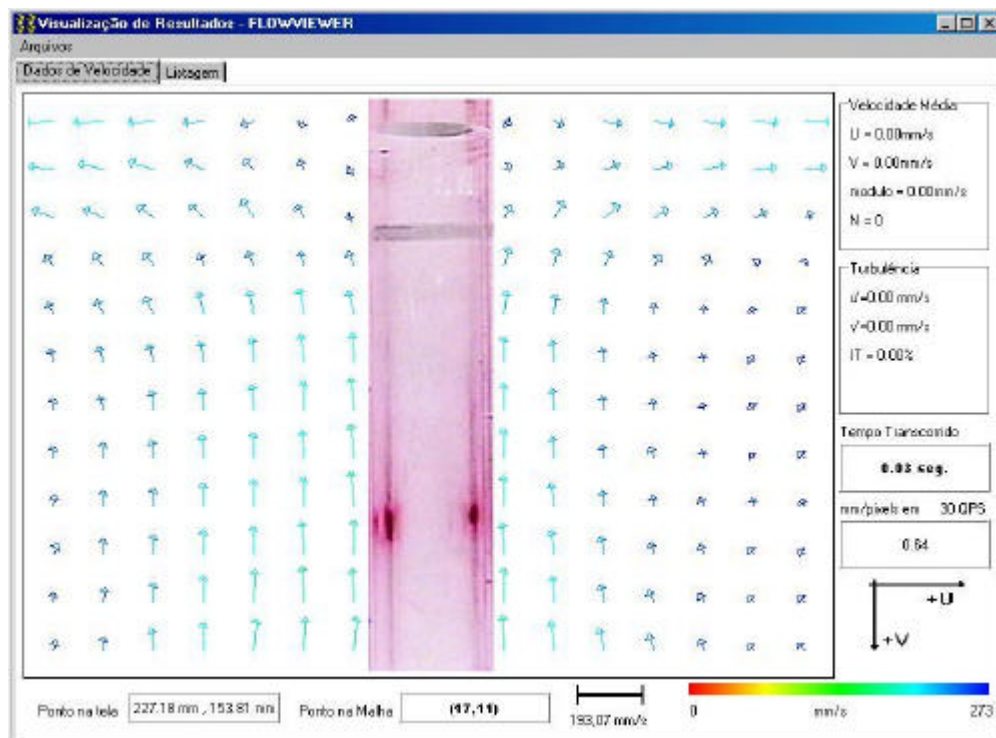


Figura 2.18. Tela de resultados do FLOWVIEWER

A tela de resultados foi desenvolvida para análise e interpretação dos campos de velocidade. Uma passada com o “mouse” por uma sub-região do campo de velocidades gerado mostra, para a sub-região, os valores de velocidade e os parâmetros de turbulência.

Pode ser visualizado também pela tela de resultados, o ponto na tela que identifica a localização espacial de onde está o ponteiro do “mouse” na imagem e a qual sub-região aquele ponto pertence, identificada pelo ponto na malha.

Para a análise na tela do computador, os vetores de velocidade são mostrados por variação de tamanho e também por código de cores, segundo seu módulo e mostrando a orientação de suas componentes.

São mostrados ainda, o fator de escala em mm/pixels e a taxa de quadros por segundo da câmara CCD utilizada. Este valor é utilizado como base de tempo para determinação dos valores das velocidades. Com isto, baseado no número de imagens processadas, é possível determinar o tempo total de medida transcorrido.

Todas as telas e recursos de parâmetros são chamados através da tela principal do programa, mostrada na figura 2.19



Figura 2.19. Tela de recursos do FLOWVIEWER

## **3. Validação Computacional**

### **3.1. Introdução**

O objetivo principal deste capítulo é colocar em teste os algoritmos desenvolvidos para a obtenção dos vetores velocidade.

A validação do programa FLOWVIEWER foi realizada baseando-se em duas imagens de teste. Para a geração, foram colocados inicialmente pontos, visualmente espaçados segundo uma matriz, simulando a posição de partículas em uma grade regular, formando a imagem. A segunda, foi uma imagem de partículas real, capturada segundo a metodologia de um experimento real.

Estas imagens, foram animadas com deslocamentos simulando casos reais de escoamento de partículas. Para o caso da primeira imagem, foram realizados deslocamentos uniformes na direção vertical, horizontal, a 45 graus e rotacional. Para a segunda imagem, a real, somente o movimento de rotação foi simulado.

A validação dos resultados por meio de outras técnicas experimentais, como por exemplo, através do Laser Doppler Velocímetro (LDV), estava, no início dos trabalhos, também prevista. Dada, no entanto, a complexidade deste trabalho e do consumo de tempo necessário para uma validação completa ponto a ponto de uma imagem processada, preferiu-se deixar para uma fase futura.

No entanto, são apresentadas no capítulo 4, diversas situações reais onde a metodologia PIV foi aplicada e as imagens processadas pelo programa FLOWVIEWER. Elas servem no presente momento, como uma validação qualitativa.

### **3.2. Deslocamento de uma imagem de partículas ideal**

O primeiro teste realizado com o FLOWVIEWER foi a análise de um deslocamento conhecido da imagem gerada. A imagem é deslocada de uma distância conhecida em pixels, fazendo com que o resultado obtido seja conhecido previamente. Na figura 3.1, temos a imagem gerada para o teste.



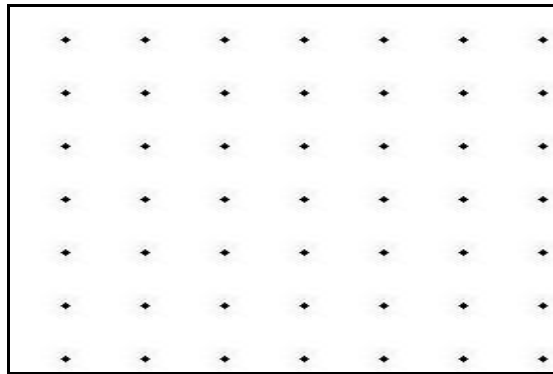


Figura 3.1. Grade de partículas geradas para teste.

### **3.2.1. Validação de um escoamento retilíneo uniforme (ERU).**

Para a validação de um escoamento de característica retilínea e uniforme, foram realizados três deslocamentos conhecidos da imagem formada: movimento para a direita, para baixo, e a 45°.

O primeiro deslocamento da imagem da figura 3.1 foi de 5 pixels à direita, o que corresponde a uma velocidade uniforme de cada ponto (partícula) de 150 Q/s, já que a constante de tempo entre dois quadros é normalmente de 0.03 s

Pela figura 3.2, pode-se perceber que 100% dos pontos apresentam valores de acordo com o esperado, indicando que os algoritmos estão corretos. Estes valores estão indicados na tela de resultados do programa. Conforme orientação na tela do programa, percebe-se que todos os vetores velocidade encontram-se na direção de U. Este comportamento é esperado, uma vez que aconteceu somente deslocamento no sentido horizontal, não existindo no sentido vertical.

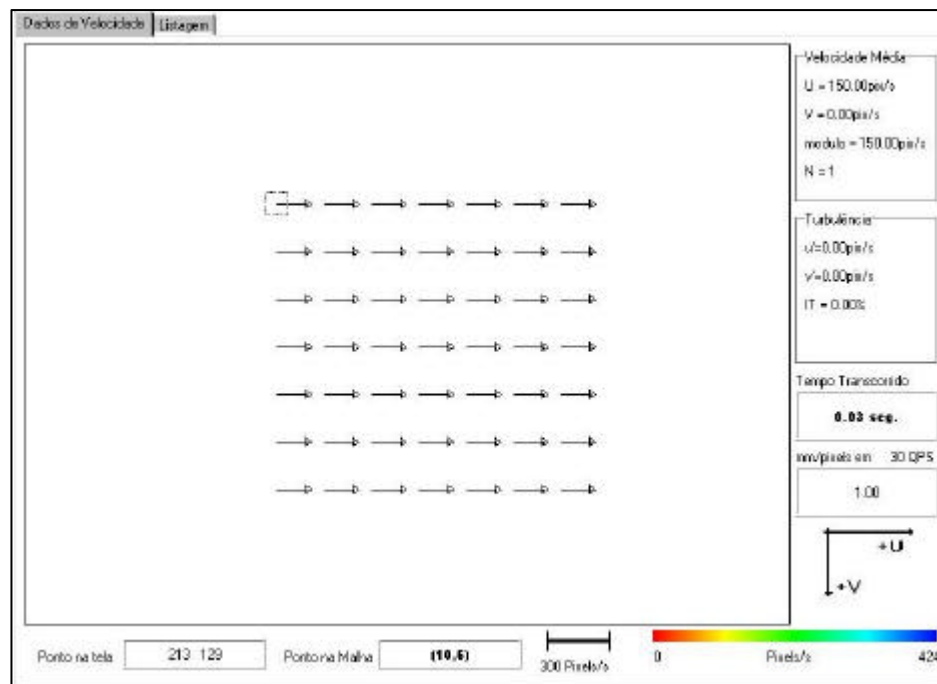


Figura 3.2. Deslocamento uniforme dos pontos de 5 pixels a direita

Foi também realizado um deslocamento uniforme da imagem gerada somente no sentido vertical, com a finalidade de se obter as velocidades nesta direção, e assim, analisar a eficiência do programa computacional para este caso particular.

A figura 3.3 aponta os resultados obtidos. Da mesma forma, conforme o esperado, é possível perceber na figura 3.3 que as partículas foram deslocadas uniformemente na vertical, mostrando que todos os vetores com módulo, direção e sentido estão corretos.

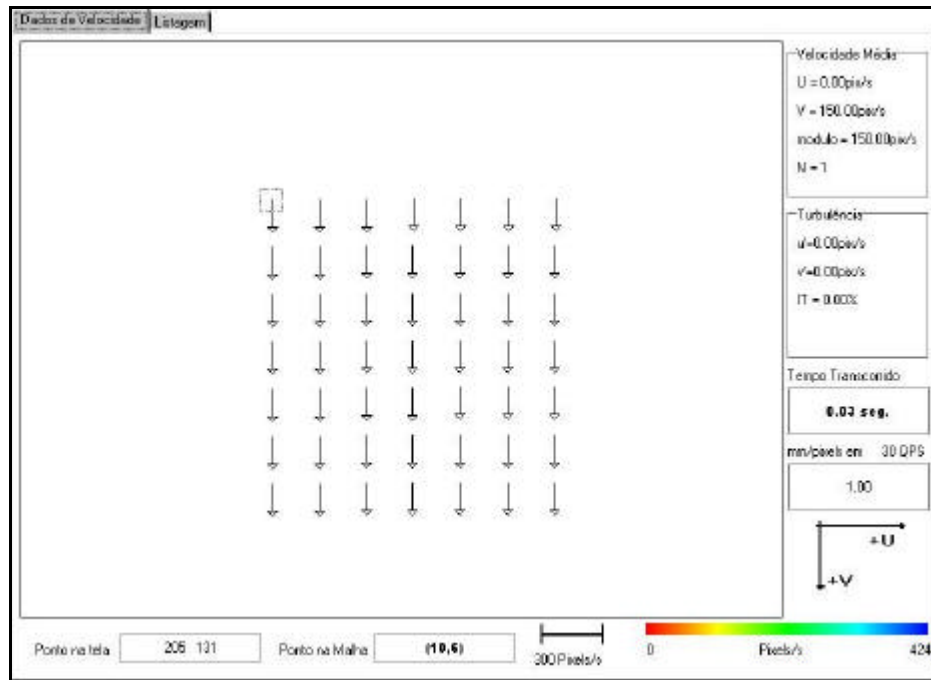


Figura 3.3. Resultados com deslocamento uniforme de partícula, 5 pixels na vertical.

O terceiro caso analisado foi a simulação do movimento a  $45^\circ$ , ou seja, comparado a um movimento horizontal e vertical com 5 pixels em cada direção. Para isto, novamente a imagem base mostrada na figura 3.1 foi utilizada, fazendo-se um deslocamento dos pontos na região. O resultado é apresentado na figura 3.4

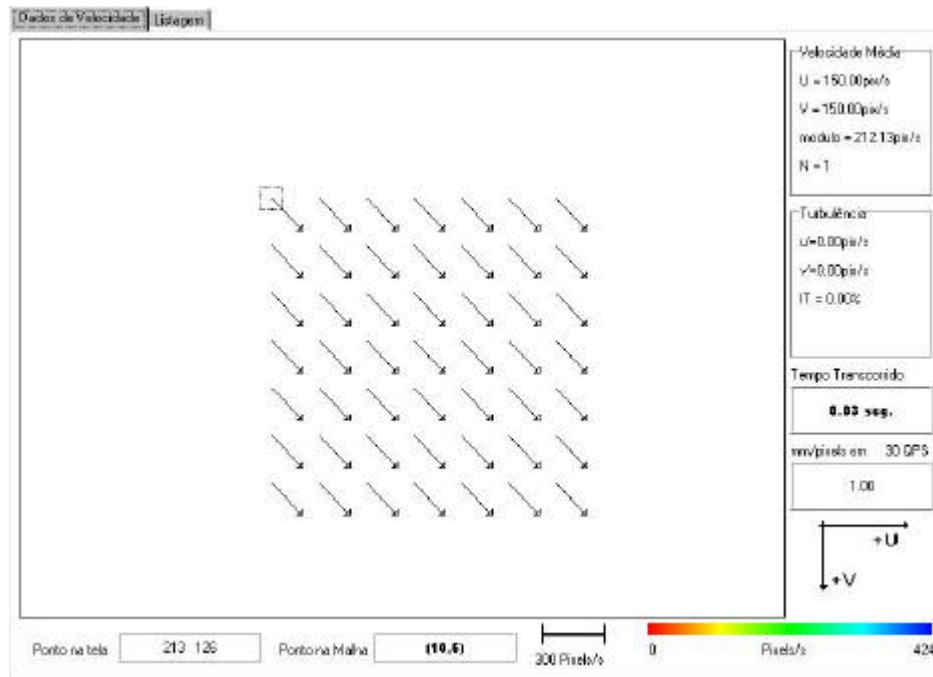


Figura 3.4. Deslocamento uniforme na horizontal e na vertical.

Novamente, conforme o esperado, os resultados coincidiram 100% com o previsto. Nota-se que tanto a velocidade na vertical (V), como na horizontal (U), possuem o valor de 150 pixels por segundo, correspondente com o deslocamento de 5 pixels em cada direção. Para este caso, o módulo resultante do vetor de velocidade foi então de 212,13 pixels/s para todos os pontos encontrados, como era de se esperar para esta situação.

### 3.2.2. Validação de um escoamento circular uniforme (ECU)

Com o objetivo de validar o programa em situações em que diferentes pontos da mesma imagem têm valores diferentes, foi usado o escoamento circular uniforme.

Para tanto, a imagem gerada sofreu um deslocamento em torno de um eixo central de  $4^\circ$ . Desta forma, os vetores de velocidades em todos os quadrantes do plano sofrem diferentes deslocamentos. Na figura 3.5, é mostrado o resultado para este caso.

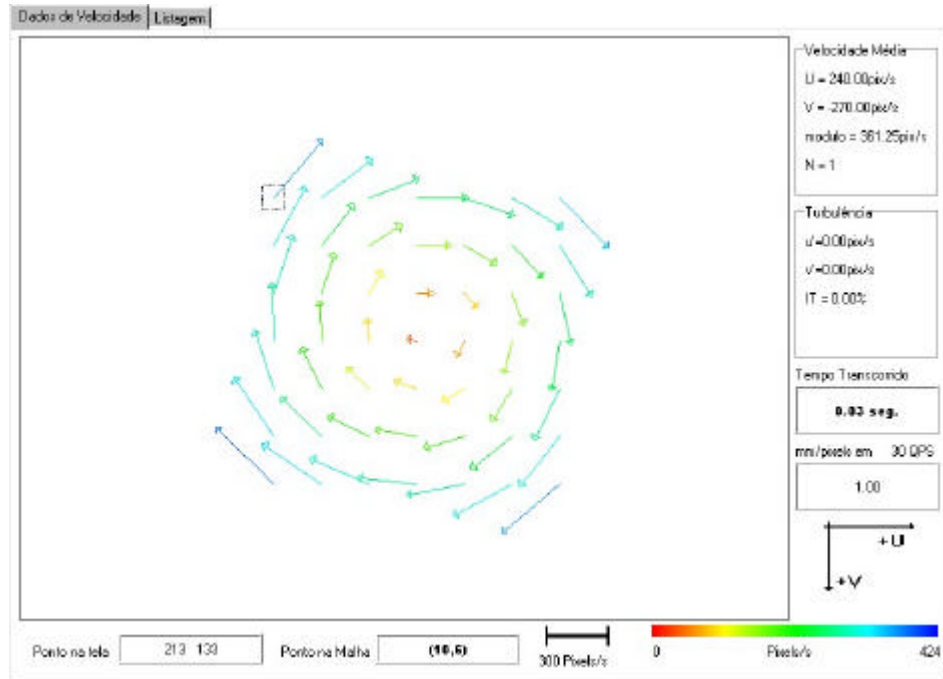


Figura 3.5. Resultado da aplicação no FLOWVIEWER com rotação da figura base de 4 graus em sentido horário.

Tabela 3.1. Comparação dos Valores obtidos

Sub-Região	Valor Obtido(modulo em pixels/s)	Valor Esperado (módulo em pixels (s))
1	90	90
2	180	180
3	240	240

O resultado para a rotação, mostrou também concordância em 100% dos valores obtidos. Isto demonstra que em condições ideais, os algoritmos desenvolvidos estão aplicados corretamente, e atendem ao objetivo do presente trabalho.

### 3.3. Deslocamento de uma imagem real

Neste item, será simulada uma rotação de uma imagem real adquirida a partir da iluminação de um plano de laser e filmagem da câmara CCD e capturada para o computador por uma placa digitalizadora. Esta imagem foi girada em torno do ponto central, identificado na figura 3.6 com a finalidade de verificar o comportamento do programa para uma situação de múltipla exposição de quadros. Nesta situação, problemas de identificação de partículas, de vetores e propagação de erros podem ser analisados. A figura 3.6 mostra esta imagem.

A imagem sofreu no total uma rotação discreta de 360 graus, com incremento de 1 grau, sendo geradas 360 imagens para processamento. A média dos vetores de velocidade pertencentes a uma mesma sub-região pode ser determinada

Para analisar o comportamento do programa FLOWVIEWER neste caso, a validação foi dividida em dois enfoques distintos, sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo.

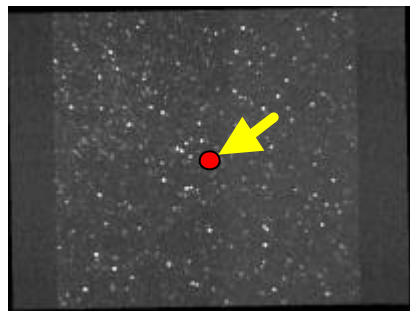


Figura 3.6. Imagem de partículas iluminadas utilizadas com base para validação dos algoritmos.

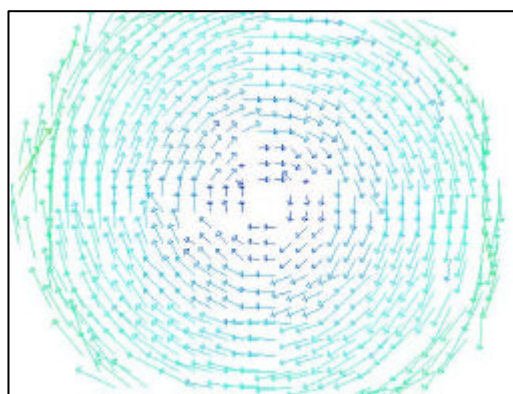
#### 3.3.1. Análise Qualitativa

Para analisar qualitativamente o programa, foram gerados quatro resultados com o deslocamento simulado da imagem da figura 3.6. Neles, variou-se o tamanho das sub-regiões de cálculo da velocidade média 20x20, 40x40, 80x80 e 160x160 pixels de área. Os campos de velocidade obtidos são mostrados na figura 3.7. Para estes casos, a quantidade de sub-regiões geradas são respectivamente 32x24, 16x12, 8x6 e 4x3. Nas quatro situações, é empregado um filtro que corta os vetores de velocidades encontrados abaixo e acima de dois desvios padrões da média obtida.

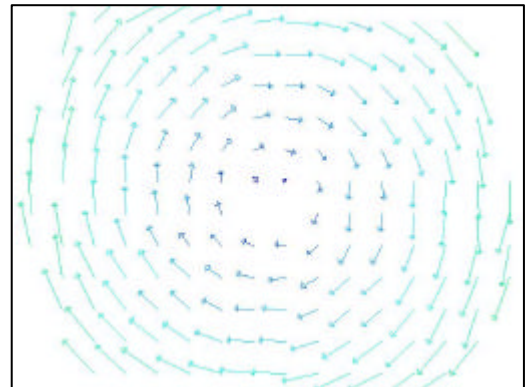
Analisando os resultados obtidos, pode-se perceber que a grande maioria dos vetores de velocidade obtida corresponde ao previsto, uma vez que identificam o movimento circular.

Na figura 3.7A pode-se notar alguns vetores de velocidade anômalos, em regiões localizadas. Nestes casos, os valores estão totalmente fora da tendência dos demais. Este problema pode ser resolvido através de uma análise crítica posterior (filtros).

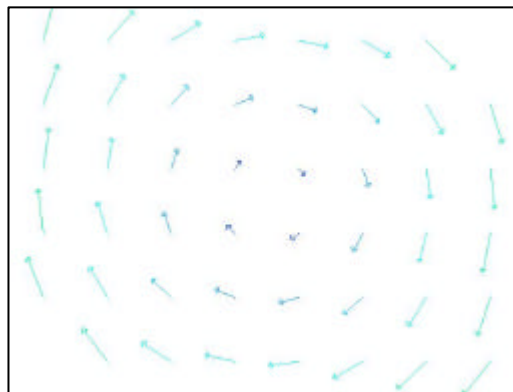
O programa permite uma análise mais aprofundada, diminuindo ou aumentando o tamanho da malha utilizada para calcular o valor dos vetores velocidades média. Para o resultado mostrado na figura 3.7B, o efeito sobre os vetores considerados espúrios são reduzidos porque o cálculo da velocidade média é realizado dentro de sub-regiões maiores do que as apresentadas na figura 3.7 A. Analogamente, para os resultados apresentados nas figuras 3.7 C e 3.7 D, a qualidade aumentou significativamente.



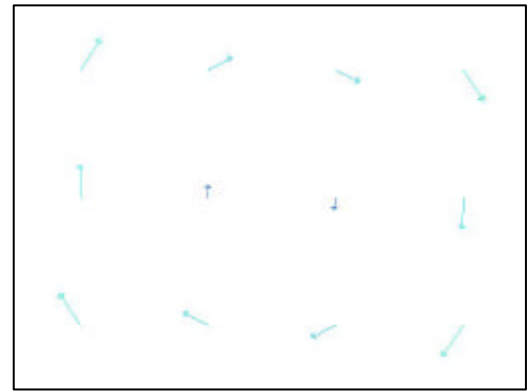
A) Sub-Região 20x20 pixels



B) Sub-Região 40x40 pixels.



C) Sub-Região 80x80 pixels.



D) Sub-Região 160x160 pixels

Figura 3.7. Resultados para análise qualitativo do deslocamento simulado da imagem real

Pode-se perceber com a análise dos resultados apresentados que o programa descreve o campo de velocidades qualitativamente com excelente confiabilidade.

### 3.3.2. Análise Quantitativa

Para analisar quantitativamente os resultados obtidos, estruturou-se uma tabela comparativa entre os valores encontrados pelo programa FLOWVIEWER e os valores esperados para o deslocamento simulado da imagem da figura 3.6. Para encontrar os valores esperados, os cálculos foram realizados segundo a equação 3.1, proveniente da teoria associada ao movimento circular uniforme.

$$v_t = \frac{p}{180} \cdot r \cdot (\Delta q) \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Onde:

$v_t$  = módulo da velocidade tangencial .

$r$  = raio (distância do ponto de medida ao eixo de rotação).

$\Delta q$  = variação do ângulo (graus).

$\Delta t$  = variação de tempo (segundos).

Para esta comparação, foi escolhido o tamanho de sub-região de 40 x 40 pixels por apresentar bons resultados na forma qualitativa e mesmo assim, gerando uma boa quantidade de vetores velocidade média, distribuídos na região de análise. A tela de resultados do FLOWVIEWER para esta situação é mostrada na figura 3.8

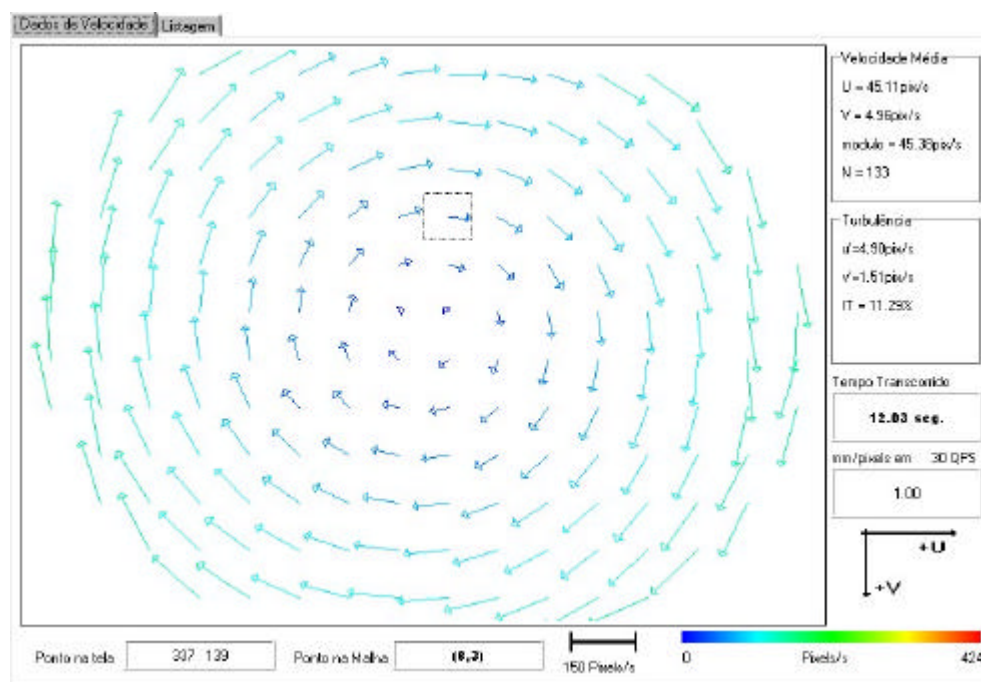


Figura 3.8. Tela de resultados do FLOWVIEWER, para o deslocamento simulado da imagem mostrada na figura 3.6



Na tabela 3.2 são mostrados os resultados comparativos dos módulos dos vetores velocidade encontrados em relação aos calculados. Para exemplificar, foram utilizadas algumas sub-regiões variando a distância “X” do centro da figura 3.6. Isto é coerente considerando-se que os valores encontrados devam ser simétricos.

Tabela 3.2. Comparação entre calculado e medido

X	Y	Calculado (pixels/s)	Medido (Pixels/s)	Erro(%)
0	20	157,34	153,41	2,50
0	20	136,46	136,28	0,13
00	20	115,60	110,53	4,38
40	20	94,77	95,76	1,03
80	20	74,00	74,12	0,14
20	20	53,3	48,78	8,59
60	20	33,09	32,02	3,24
00	20	14,79	4,28	71,08

Observa-se pela tabela 3.2 que os resultados para o caso analisado são satisfatórios. A máxima discrepância ocorre em uma sub-região onde a velocidade é extremamente baixa (próxima ao eixo). Nos demais casos, existe uma aproximação muito boa entre o valor calculado e o valor medido pelo programa FLOWVIEWER. Vale salientar que uma pequena discordância de valores, neste caso, é perfeitamente aceitável, uma vez que pequenos erros podem se propagar. Além disso, o cálculo da velocidade engloba todos os pontos da sub-região, enquanto que o valor calculado é o valor teórico absoluto para o ponto central da sub-região

## **4. Análise da incerteza dos resultados**

A todo sistema de medida deve proceder a uma análise de incerteza para qualificar os resultados obtidos. Particularmente, para um sistema de velocimetria por processamento de imagens de partículas, quantificar e garantir níveis de incerteza especificados pode não ser uma tarefa muito fácil, da mesma forma, como também não é para sistemas de velocimetria por laser Doppler. A qualidade dos resultados obtidos pode estar relacionada diretamente com a habilidade do operador e seu conhecimento em relação ao fenômeno que está investigando. Contudo, o sistema possui a parcela de erros mensuráveis que podem ser descritos e analisados. Estes estão relacionados com as características dos equipamentos, como qualidade da iluminação, resolução da câmara e placa de aquisição de imagens ou ainda eficácia dos algoritmos utilizados conforme as características do escoamento sob investigação. Para descrever os erros nas medidas que podem acontecer com a utilização do programa, dividiu-se a análise em duas etapas. Na primeira, as fontes de erros comuns são descritas e, na segunda, é feita uma análise das incertezas geradas pelas fontes de erro possíveis de serem quantificadas.

### **4.1. Erros Experimentais sistemáticos**

Os erros comuns em um sistema de velocimetria pelo processamento de imagens de partículas são sistemáticos ou não sistemáticos, conforme Almeida, [1997]. Os sistemáticos apresentam aproximadamente o mesmo valor em medidas repetidas. Não têm relação com a aplicação, ou seja, independem do tipo de escoamento sob investigação. Por outro lado, têm relação com os equipamentos utilizados e a dificuldade de determinar sua função.

Os erros que não são sistemáticos são chamados de erros aleatórios. Sua natureza é, basicamente, devida a erros suscetíveis de processamento.

#### **4.1.1. Erros causados pelas Partículas**

Uma importante premissa para os sistemas de velocimetria pelo processamento de imagens de partículas é que o movimento das partículas represente com fidelidade o movimento do fluido em investigação no escoamento. Para avaliar a real condição das partículas

acompanharem o fluido, devem ser consideradas as forças que agem em uma pequena partícula em um fluido.. Para uma pequena partícula, o movimento é governado pelo arraste de Stokes (que é linear) ocasionando um desvio de velocidade (diferença entre a velocidade da partícula e do fluido). Uma vez que a força de arraste é linear, a frequência de resposta do movimento da partícula pode ser avaliada. Os resultados obtidos indicam que ocorre um desvio de no máximo 1% entre a velocidade do fluido e a velocidade da partícula [Martin,1997]. A frequência das flutuações de velocidade no escoamento não deve ultrapassar 200 Hz. Estas flutuações não poderiam ser determinadas pelo sistema de velocimetria por processamento de imagens de partículas e não aparecem no escoamento de interesse.

#### ***4.1.2. Erros causados pela captura de imagens***

Os erros causados na etapa de captura podem ser causados por aberrações nas lentes das câmaras, ruído na imagem e dimensão dos pixels na imagem das partículas. Podem também ocorrer distorções por efeitos de refração da luz incidente na superfície da seção de testes.

O uso de câmaras de boa qualidade diminui muito o erro causado pelas aberrações causadas pelas lentes.

O uso de boa iluminação pode interferir a favor, se existe problema de ruído. Uma boa distinção das partículas na etapa de processamento pode excluir totalmente este erro.

No uso das câmaras CCDs existe uma grande incerteza devido à baixa resolução do dimensionamento dos pixels.

#### ***4.1.3. Erros na obtenção do fator de escala***

O fator de escala, o qual relaciona pixels com medidas do sistema métrico, é usado para a determinação da velocidade em mm/s. Para este relacionamento, um comprimento conhecido dentro do escoamento estudado é utilizado. Desta forma, um erro na interpretação destas medidas repercute na determinação das velocidades.

#### **4.1.4. Erros causados pela análise das imagens**

Os erros causados pela análise das imagens descrevem a forma como a metodologia interpretou a imagem que recebeu. Quando existem muitos espúrios na imagem, muitos erros podem aparecer. Com uma reclassificação dos valores encontrados, é possível reduzir muito os erros com a análise das imagens.

A principal fonte de erro encontrada em uma imagem é devido à escala de valores usada para mensurar distâncias. Ou seja, na imagem, uma partícula pode se deslocar em função de pixels, que são elementos indivisíveis na imagem. Quando a qualidade da imagem não é satisfatória, podem ocorrer erros de interpretação na análise das imagens, como por exemplo, a obtenção de um contraste deficiente que prejudique a obtenção exata do centro da partícula. Este fato pode acarretar que pixels não correspondentes às partículas sejam considerados como tal, ou vice-versa. Nestes casos, aparecem aberrações nos resultados, ocorrendo cálculo de velocidades e parâmetros errados.

### **4.2 . Erros não-sistemáticos**

#### **4.2.1. Medidas em baixas velocidades**

Quando os deslocamentos de partículas se tornam muito pequenos, podem ocorrer erros percentuais de quantificação muito grandes. Isto se manifesta quase da mesma forma do que um código binário. Para deslocamentos de um único pixel, isto seria interpretado com incerteza de 100%. Este tipo de situação pode ser amenizado com a média das medidas realizadas na região de análise. Com vários pontos de interpretação, a tendência do valor do vetor de velocidade encontrada, pode ser determinada.

#### **4.2.2. Erros da velocidade média**

No resultado final, a velocidade apontada não é a velocidade instantânea da partícula e, sim, a média de uma série de medidas em uma determinada região num intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Assim, em intervalos muito grandes de medida, a média de velocidades pode diferir da velocidade instantânea das partículas no fluido.

#### **4.2.3. Erros da imagem de partículas**

Se a imagem não for de boa qualidade muitos erros podem ser introduzidos nas medidas de velocidade. Um contraste deficiente pode introduzir partículas fictícias ao escoamento, fazendo com que pontos de medida corretos tenham que ser eliminados ou causando uma influência negativa no resultado final.

#### **4.2.4. Erro do intervalo de tempo**

O instante de tempo, que é uma característica física das câmaras, é também uma fonte de erro para as medidas. No caso do FLOWVIEWER, é dependente da taxa de quadros por segundo das câmaras CCDs e da incerteza que o fabricante da câmara apresenta.

### **4.3. Análise das Incertezas**

Para quantificar as incertezas encontradas na aplicação do programa, a bibliografia possui uma série de análises para sistemas de velocimetria por imagens de partículas que se aplicam diretamente ao caso. Uma vez que este trabalho foi desenvolvido a partir de metodologias já estudadas, a maioria das análises das incertezas atribuídas aos sistemas, são as mesmas utilizadas para o programa FLOWVIEWER. As principais análises foram retiradas então de [Almeida,1997] [Martins,1997] e [Bonna et al,1990].

Infelizmente, muitas das fontes de erros mencionadas não são possíveis de se quantificar de forma analítica ou numérica. Geralmente, é muito difícil de separar os efeitos causados. Nestes casos, somente o efeito destes erros, encontrado no resultado final, pode ser computado.

O mais fácil é quantificar o nível de incertezas contido na utilização dos algoritmos empregados para obtenção das velocidades. Para demonstrar a validade dos algoritmos

empregados, são feitas considerações sobre as incertezas. Destas, dois grupos podem ser distinguidos, os das incertezas possíveis de quantificar, as consideradas, e as não possíveis, e então, desconsideradas.

### **4.3.1. Incertezas não Quantificáveis**

#### **4.3.1.1. Não ortogonalidade do plano iluminado**

Com a finalidade de minimizar o efeito da refração na superfície de recipientes e condutos de testes, devemos ter um ângulo nulo entre a lente da câmara filmadora e o plano iluminado. Este ângulo será chamado  $\beta$ . Existe porém uma incerteza associada a este ângulo que pode causar problemas de interpretação das partículas. Conforme [Almeida,1997], pode-se determinar um valor limite para deste ângulo para cada situação que permita desprezar a incerteza associada.

A relação entre o comprimento de referência ( $L_v$ ) e sua projeção no plano de deslocamento ( $L_p$ ), é descrita na equação 4.1:

$$L_p = L_v \cos(\mathbf{b}) \quad (4.1)$$

Onde:

$\beta$  = ângulo entre o deslocamento e o comprimento de referência.

O erro  $E$  na medida obtida será:

$$E = |L_v - L_p| = L_v(1 - \cos(\mathbf{b})) \quad (4.2)$$

O módulo do erro relativo máximo  $emáx$  será:

$$emáx = 1 - \cos(\mathbf{b}) \quad (4.3)$$

Para que o erro percentual máximo seja inferior a 1%, é suficiente que  $\beta \leq 8,1$  [Almeida,1997].

#### 4.3.1.2. Incerteza devido ao movimento relativo da partícula com o fluído

Conforme Almeida, [1997] e Adrian, [1991], a frequência máxima  $w_{máx}$  a que uma partícula pode responder ao movimento do fluído é dada por:

$$w_{máx} = \frac{Vf}{d_p^2} \quad (4.4)$$

Onde :

$Vf$  é a viscosidade cinemática do fluído e  $d_p$  é o diâmetro da partícula.

Se considerarmos os seguintes valores utilizados no presente trabalho:

$$d_p = 50 \mu\text{m}$$

$$vf = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ (para a água)}$$

$$w_{máx} = 4000 \text{ Hz}$$

#### 4.3.1.3. Incerteza devido à determinação de velocidades por extração da média

Esta incerteza pode ser significativamente reduzida limitando-se o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as imagens relacionadas. Sendo  $w_{máx}$  a maior frequência que pode ocorrer no campo de velocidades, a incerteza analisada neste item pode ser desprezada se o intervalo de tempo obedecer a equação 4.5.

$$\Delta t \leq \frac{1}{w_{máx}} \quad (4.5)$$

Para as câmaras CCDs utilizadas,  $\Delta t = 0.03\text{s}$

Então,  $w_{máx} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.03} = 30\text{Hz}$  é o limite para as flutuações entre duas imagens.

Para o cálculo dos vetores velocidades médias em um período maior, esta incerteza sempre vai existir, segundo os conceitos apresentados no item 2.4.3.

#### **4.3.2. Incertezas quantificáveis**

##### **4.3.2.1. Medida do intervalo de tempo $\Delta t$**

O intervalo de tempo  $\Delta t$  é o tempo que separa duas imagens sob análise. Para o caso do FLOWVIEWER, este intervalo de tempo está relacionado com a taxa de quadros por segundo da câmara CCD utilizada. Para todos os resultados obtidos, este intervalo foi de 30 quadros por segundo, o que equivale a um tempo de (1/30s). Este erro é quantificável, mas normalmente muito pequeno e pode ser estabelecido como da ordem de 1%.

##### **4.3.2.2. incerteza nas coordenadas espaciais**

A incerteza das coordenadas espaciais é determinada pela resolução espacial da imagem. Como o elemento mínimo de uma imagem é um pixel, esta é incerteza mínima.

##### **4.3.2.3. Incerteza devido ao processamento da imagem**

A incerteza devido ao processamento das imagens está associada a outras análises realizadas. Os pontos mais críticos são relativos a busca do centro das partículas na imagem, bem como a sua deformação. A quantificação destes valores depende dos deslocamentos encontrados. Para quantificar esta incerteza, são utilizados os resultado da tabela 3.2, onde é feita uma análise comparativa em termos dos valores de velocidades médias encontradas. As discordâncias ocorridas nos resultados referem-se a erros de processamento das imagens, uma vez que o deslocamento das partículas é simulado e a velocidade média do ponto é obtida.

O valor para baixa velocidade ficou muito fora da tendência dos demais e foi desprezado. Assim, o menor valor de incerteza obtida foi de 0,13% e a máxima de 8,59%.



#### 4.4. Quantificação das incertezas nas medidas finais

As medidas finais que se deseja obter são os componentes u e v da velocidade e as coordenadas x e y da posição da região de análise a qual esta velocidade é atribuída. As incertezas quantificáveis podem, então, ser consideradas para determinar as incertezas totais em cada medida, empregando o procedimento descrito na bibliografia [Almeida,1997], [Bonna at all,1990]e [Adrian,1991]. Segundo os autores, a incerteza variável,  $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  é determinada pela expressão:

$$w_R = \left[ \sum_{i=0}^n \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Para o cálculo das incertezas, os valores de comprimento de referência, fator de escala e coordenadas espaciais são retirados das situações encontradas nos resultados analisados no presente trabalho.

##### 4.4.1. incerteza para o fator de escala

Para obter a incerteza do fator de escala, aplicamos a equação 5.6. Seu valor é dado por

$$F = \frac{L}{\Delta x} \quad (4.7)$$

Onde :

F = fator de escala (mm/pixel)

L = distância real conhecida entre dois pontos fixos do escoamento (mm)

$\Delta x$  = distância identificando L na imagem de amostra do escoamento (pixel).

Como os pixels são conceitualmente iguais nas duas coordenadas, o mesmo fator de escala pode se aplicado tanto na horizontal quanto na vertical. Isto é válido, assumindo que a razão de aspecto não causa distorção na imagem.

Aplicando a fórmula:

$$\frac{dF}{F} = \sqrt{\left(\frac{dL}{L}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta x}{\Delta x}\right)^2} \quad (4.8)$$

Com a fórmula, é possível observar que quanto menor for o valor da distância de referência (L), maior será a incerteza.

Utilizando os valores usados no presente trabalho, temos para a melhor situação:

$$dL = 1 \text{ mm}$$

$$d\Delta x = 1 \text{ Pixel}$$

$$L = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta x = 350 \text{ pixels}$$

resulta uma incerteza de 2,02%, a qual em valores absolutos, resulta em  $dF = 0.003$  mm/pixel

E para a pior situação,

$$dL = 2 \text{ mm}$$

$$d\Delta x = 1 \text{ Pixel}$$

$$L = 65 \text{ mm}$$

$$\Delta x = 100 \text{ pixels}$$

resulta uma incerteza de: 3,2%.

Sendo  $F_{\text{máx}} = 0,65$  mm/pixel, a incerteza absoluta máxima é  $dF = 0,022$  mm/pixel

#### 4.4.2. Incerteza nas coordenadas espaciais

As coordenadas espaciais são determinadas pelas equações em 5.11

$$X_L = F \cdot x_p \quad (4.11a)$$

$$Y_L = F \cdot y_p \quad (4.11b)$$

onde o índice L se refere à coordenada em milímetros e o índice p à coordenada em pixels.

Aplicando a equação descrita em 4.8.

$$\frac{dX_L}{X_L} = \sqrt{\left(\frac{dF}{F}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta x_p}{\Delta x_p}\right)^2} \quad (4.10)$$

então para a situação de maior incerteza encontrada no presente trabalho, com relação a coordenadas espaciais, terá:

$$F = 0,65 \text{ mm/pixel}$$

$$dF = 0,022 \text{ mm/pixel}$$

$$x_p = 10 \text{ pixels}$$

$$dx_p = 1 \text{ pixel}$$

Resulta uma incerteza máxima de 10 %. Para as coordenadas espaciais.

$$\text{Se } X_L = 0.65 \cdot 10 = 6.5 \text{ mm}$$

Tem-se em valores absolutos uma incerteza de 0.65 mm.

Para o melhor caso, de incerteza mínima teremos:

$$F = 0,15 \text{ mm/pixel}$$

$$dF = 0,003 \text{ mm/pixel}$$

$$x_p = 640 \text{ pixels}$$

$$dx_p = 1 \text{ pixel}$$

resulta em, uma incerteza mínima de 2%.

Se a resolução das imagens fosse aumentada, esta incerteza poderia ser bastante diminuída, o que, no entanto, poderia afetar significativamente o custo dos equipamentos envolvidos, já que teriam que ser utilizadas câmaras CCDs de alta resolução em conjunto com placas digitalizadora de imagens com as mesmas características

#### **4.4.3. Incerteza nos componentes da velocidade**

Os componentes de velocidade são determinados pelas equações em 4.11

$$u = F \cdot \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (4.11 \text{ a})$$

$$v = F \cdot \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad (4.11 \text{ b})$$

Aplicando para este caso a equação 5.8 para a componente em x e combinando com a incerteza devido ao processamento da imagem, para os resultados do presente trabalho, teremos:

$$\frac{du}{u} = \sqrt{\left(\frac{dF}{F}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta x_1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta x_2}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta t}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta PI}{\Delta PI}\right)^2} \quad (4.12)$$

utilizando os seguintes valores:

$$F = 0,15 \text{ mm/pixel}$$

$$dF = 0,003 \text{ mm/pixel}$$

$$\Delta x = 10 \text{ pixels}$$

$$dx_1 = dx_2 = 1 \text{ pixel}$$

$$\Delta t = 0,03 \text{ ms}$$

$$d\Delta t = 0,0003 \text{ ms}$$

$$\frac{dPI}{PI} = 0,0013$$

resulta uma incerteza mínima de 14,3 %, para a componente u da velocidade. A incerteza é a mesma nas direções de x e y.

Refazendo os cálculos para a pior situação:

$$F = 0,65 \text{ mm/pixel}$$

$$dF = 0,022 \text{ mm/pixel}$$

$$\Delta x = 10 \text{ pixels}$$

$$dx_1 = dx_2 = 1 \text{ pixel}$$

$$\Delta t = 0,03 \text{ ms}$$

$$d\Delta t = 0,0003 \text{ ms}$$

$$\frac{dPI}{PI} = 0,0859$$

resulta em uma incerteza máxima de 17%

## 5. Resultados e análise

O presente capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos com o processamento do programa FLOWVIEWER em imagens de escoamento em situação real.

As situações analisadas foram: escoamento em um tubo circular contendo uma placa de orifício e escoamentos em modelos físicos utilizados na indústria siderúrgica, como por exemplo, um distribuidor de lingotamento contínuo e uma panela de aço líquido.

Nestes testes, as velocidades encontradas muitas vezes ultrapassaram o limite superior de utilização do programa. A análise dos resultados obtidos é também apresentada neste capítulo.

### 5.1. Tubo circular

O tubo circular utilizado para a medição dos campos de velocidade tem dimensão interna de 50 mm, fabricado em acrílico transparente contendo uma placa de orifício de bordas chanfradas ( $\beta=0,7$ ) e faz parte de uma bancada projetada para medição de vazão em dispositivos hidráulicos e medidores de fluxo, na faixa de 0,5 l/s a 5 l/s, com uma incerteza expandida de 0,5%. Para ser possível a utilização do FLOWVIEWER, foi necessário usar a bancada na vazão mínima, tendo em vista as premissas básicas do programa. As imagens para processamento foram colhidas à montante da placa de orifício.

A Figura 5.1 mostra um resultado obtido pelo programa FLOWVIEWER para o tubo circular. Nela pode-se identificar a direção, sentido e módulo dos vetores de velocidade. Como era de se esperar neste tipo de escoamento, segundo a teoria sobre tubos circulares, as sub-regiões próximas às paredes possuem velocidades menores que nas sub-regiões centrais.

Pode-se perceber algumas características referentes à utilização do FLOWVIEWER para este escoamento. Para a obtenção de uma quantidade razoável de vetores de velocidade neste caso, foram necessárias mais de 4000 imagens, pois a densidade de partículas utilizadas no ensaio foi mínima.

Nota-se que as sub-regiões próximas da parede do tubo são de difícil interpretação para a determinação do campo de velocidades, pois ocorrem muitos vetores de velocidade não alinhados com o eixo do tubo. Isto acontece, na maioria dos casos, ou por influência de reflexos, ou por interpretação duvidosa do centro das partículas.

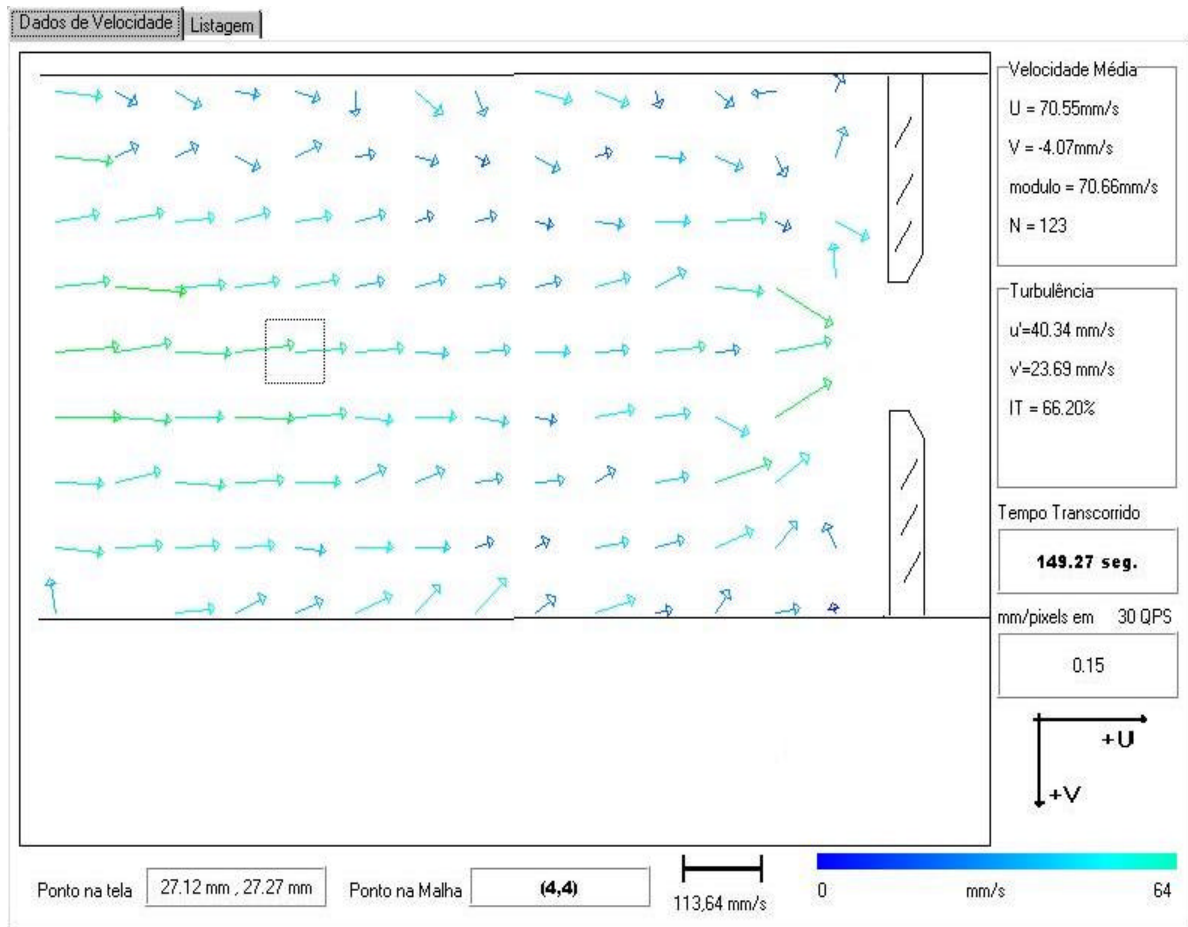


Figura 5.1. Resultados para um tubo circular

Para uma análise mais aprofundada foi gerado o resultado da figura 5.2, onde um filtro é aplicado sobre cada sub-região. Os valores utilizados foram de 0,1 do desvio padrão da distribuição normal dos vetores que compõe a sub-região.

Com o resultado da figura, pode-se identificar melhor o escoamento no interior do tubo circular. Nota-se que em termos qualitativos, os resultados obtidos correspondem às expectativas desta aplicação. Isto, porque o perfil de velocidades corresponde ao teoricamente esperado nesta situação, ou seja, os vetores de velocidade, são, maiores na região central, diminuindo à medida que se aproximam das paredes do tubo, característico para este caso, conforme Fox & McDonald [1981].

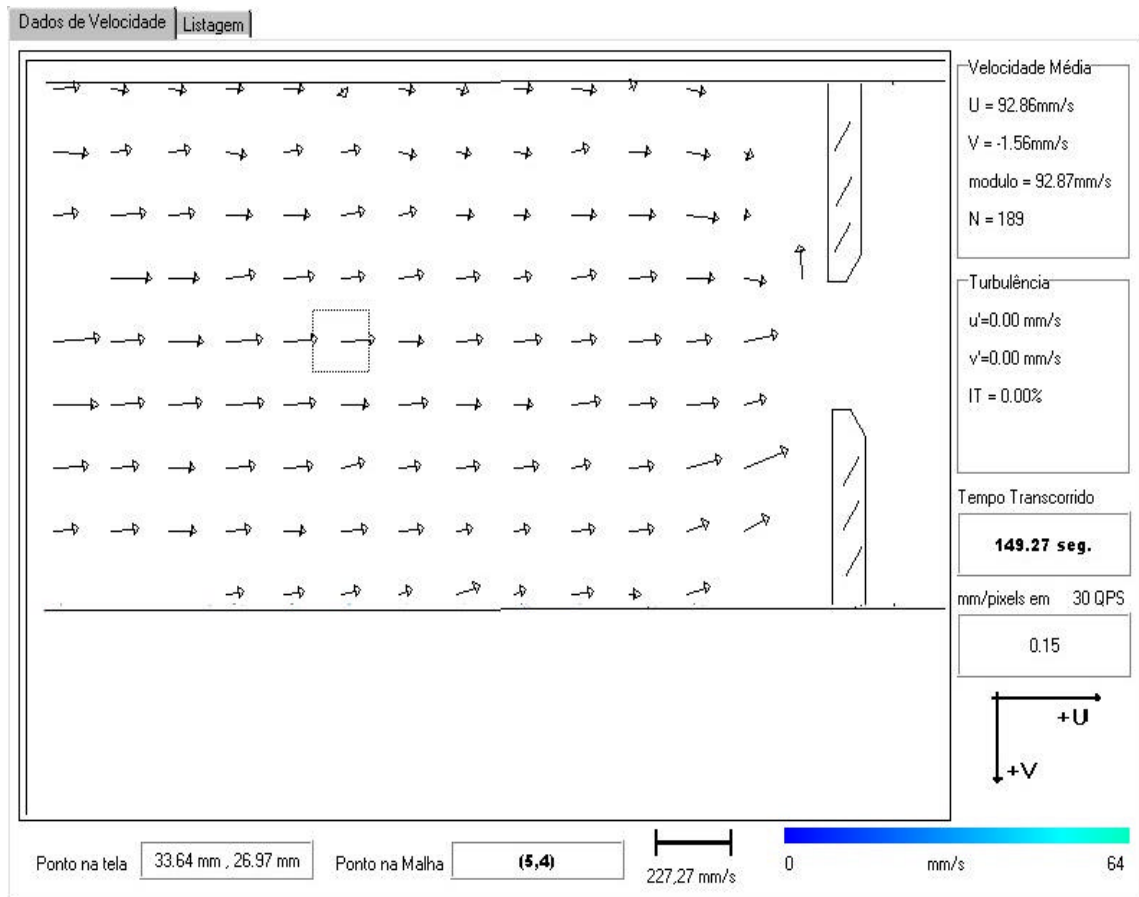


Figura 5.2. Resultado para tubo circular com filtro de 0,1 desvios padrões em x e y

## 5.2. Modelo Físico de um distribuidor de lingotamento contínuo.

O distribuidor de lingotamento contínuo é utilizado na produção de aço, sendo à parte que recebe o aço líquido para distribuir em veios que passarão pelo processo de solidificação.

Na figura 5.3, podemos ver uma foto do modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo onde o programa FLOWVIEWER foi aplicado.

O objetivo de se usar o programa FLOWVIEWER, neste caso, foi para estudar melhor o comportamento do escoamento em regiões características no modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo.

A principal análise consistiu na região de entrada do distribuidor. A análise visa determinar o comportamento do escoamento quando dois tipos de barreiras diferentes são usadas

na entrada do distribuidor. Na figura 5.4, é mostrada uma fotografia da entrada do distribuidor com uma das barreiras (anteparo abaixo do tubo de entrada).



Figura 5.3. Fotografia do modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo.

O modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo utiliza água como fluido, que no estado original, faria o papel do aço líquido. Vale lembrar também que o modelo físico possui as dimensões iguais a do distribuidor original (escala 1:1).



Figura 5.4. Entrada do distribuidor de lingotamento contínuo.



### **5.2.1. Resultados com Inibidor de Turbulência.**

O anteparo, consiste num recipiente em forma de bacia colocada no fundo do distribuidor, diretamente abaixo do tubo de entrada. O objetivo original é funcionar como um inibidor de turbulência. Para a finalidade do presente trabalho, é observada a característica de fazer com que o fluxo de entrada retorne rapidamente para a superfície (fluxo ascendente). Pode ser visualizado na figura 5.4, na parte inferior da entrada do distribuidor de lingotamento contínuo.

A figura 5.5 mostra o negativo de uma das 1800 imagens de partículas em movimento na entrada do modelo do distribuidor de lingotamento contínuo, com o tubo de entrada situado a uma profundidade de 30 cm.

Neste experimento, foram utilizados os seguintes equipamentos: câmara de vídeo CCD, e iluminação coerente com um plano de laser. O fluido utilizado é água e as partículas adicionadas são pliolite.

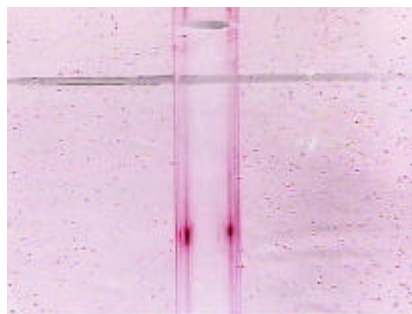


Figura 5.5. negativo de uma das imagens de partículas iluminadas pelo plano de laser

Como pode ser visto pela figura 5.5, a concentração de partículas foi elevada neste experimento, permitindo a obtenção de uma boa distribuição de vetores no campo de velocidades. Regiões de brilho intenso podem prejudicar as medidas. Na parte superior, é visto o reflexo do nível da água, que filtrado para o processamento da figura 5.5 e suas imagens subsequentes, tem seus efeitos significativamente minimizados. A figura 5.6 apresenta o resultado do processamento das 1800 imagens. A tabela contendo os valores para este resultado encontra-se no anexo 2, item A.2.1.

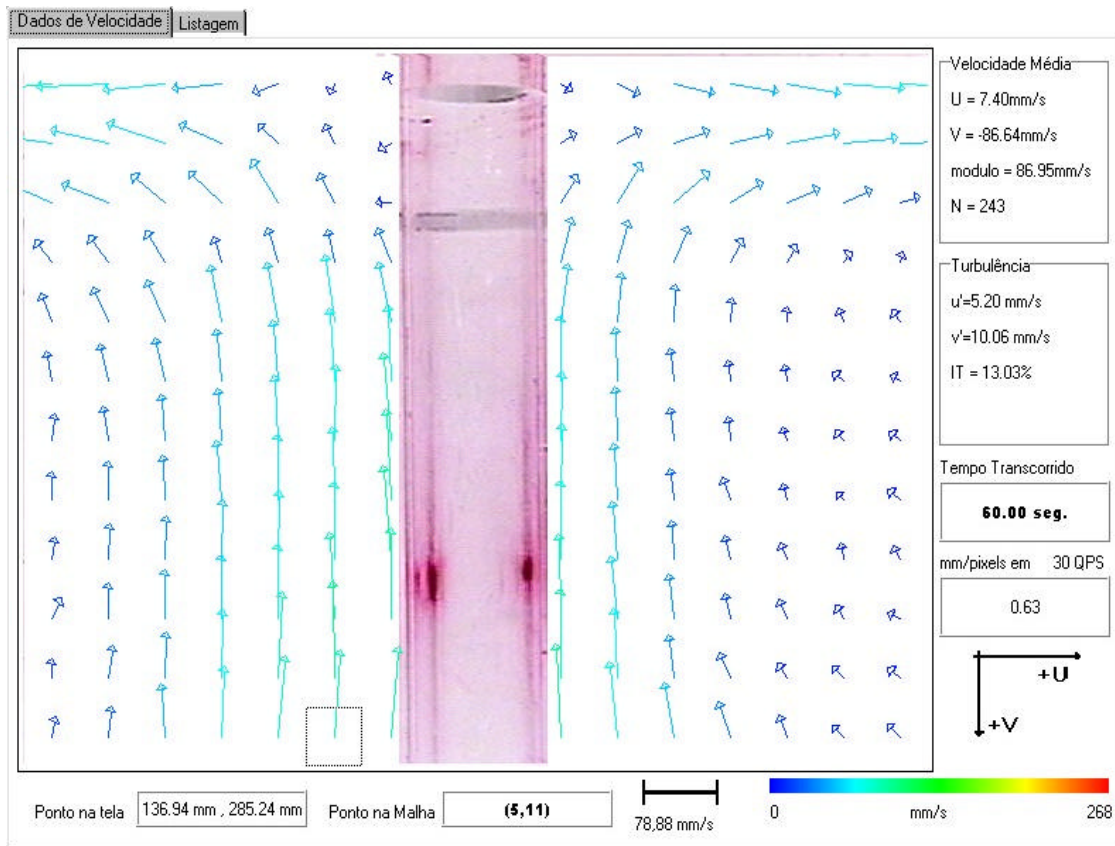


Figura 5.6. Resultado do FLOWVIEWER com tubo mergulhado no fluido em 30cm.

O fator de escala utilizado, foi determinado utilizando-se o comprimento do tubo de entrada do distribuidor como comprimento de referência. Para este caso, a resolução da imagem ficou em 0,63 mm/pixel.

O campo de velocidade obtido mostra uma característica regular, onde o escoamento ascendente é predominante. Isto corresponde ao resultado esperado. Este fato ficou comprovado virtualmente com a reprodução em vídeo das 1800 imagens em seqüência.

Para uma análise comparativa, visual, no anexo 1, no item A.1.1 são apresentados campos de vetores velocidades médias para esta mesma situação, com diferentes tamanhos de sub-regiões.

### 5.2.2. Entrada do distribuidor com barreira

Este experimento foi realizado no mesmo distribuidor de lingotamento contínuo sem o uso do inibidor de turbulência. Neste caso, foi adicionada uma barreira de obstrução do

escoamento. Nesta situação, o fluxo na região de análise deixa de ser ascendente para ser descendente. A região de interesse permanece a mesma, para permitir a realização de uma análise comparativa. A figura 5.7 apresenta o negativo de uma das 1800 imagens de partículas capturadas.

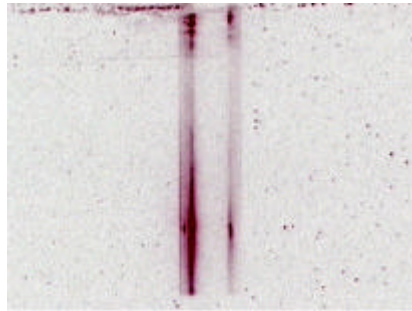


Figura 5.7. Negativo de uma das imagem do plano iluminado da entrada do distribuidor com barreira

Os resultado mostrados na figura 5.8 se referem ao processamento das 1800 imagens. Como pode ser observado numa rápida comparação entre as figuras 5.8 e 5.5, o programa identificou uma total mudança de orientação do escoamento na região de entrada do distribuidor nos dois casos. Novamente, as velocidades obtidas com o processamento foram menores do que 0.2 m/s, confirmando um campo de baixas velocidades. Os resultados quantitativos são mostrados na tabela A .2.2.

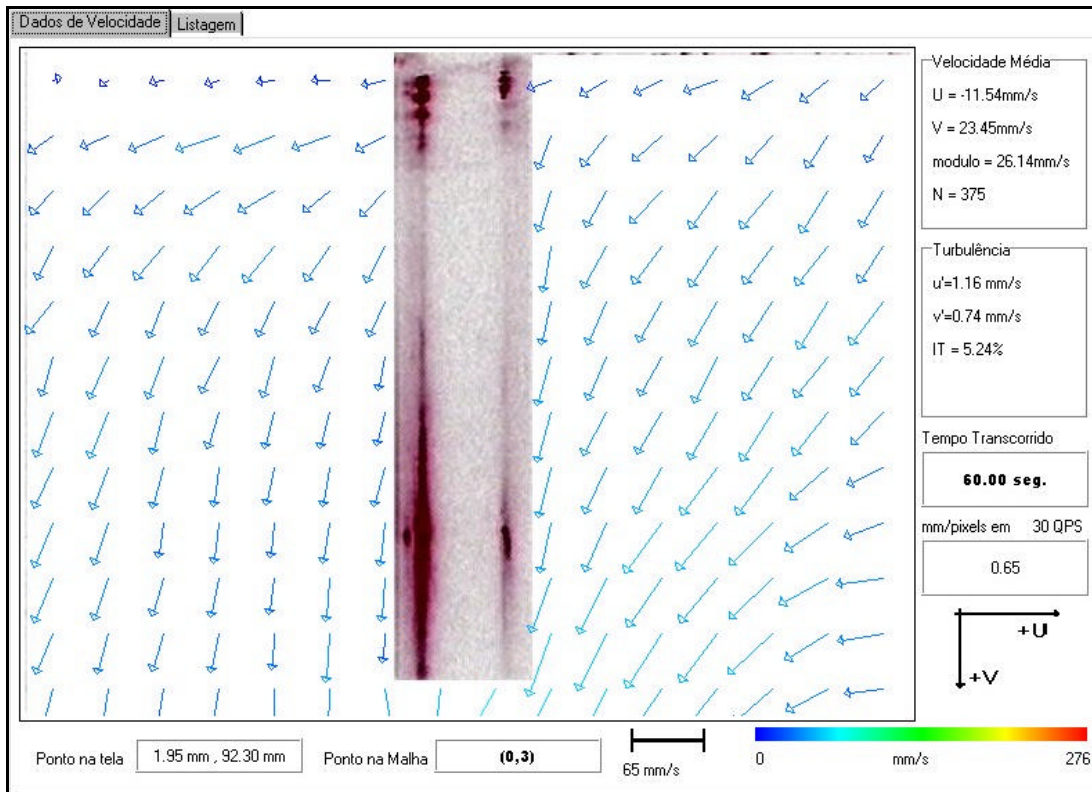


Figura 5.8. Resultados para a entrada do distribuidor de lingotamento contínuo

A resolução da imagem ficou também em 0,65 mm/pixel. As 1800 imagens somam em um tempo total de 60 segundos. Corresponde, portanto, ao escoamento médio durante 1 minuto.

Para uma análise comparativa, no anexo 1, item A.1.2, são mostrados resultados qualitativos com variação do tamanho da sub-região de cálculo dos vetores de velocidade média.

### 5.3. Aplicação em um Modelo Físico de uma panela de aço líquido

Uma panela de aço líquido é utilizada para a fabricação do aço, seja adicionando ligas, gases para agitação ou para manter a temperatura correta necessária ao lingotamento. O modelo físico da panela consiste num protótipo reduzido da panela na escala de 1: 6. A figura 5.9 mostra uma fotografia deste modelo.

Para a obtenção dos campos de velocidades no modelo físico da panela, foi utilizado o mesmo equipamento descrito nos experimentos anteriores. As partículas adicionadas foram de pliolite.

A resolução espacial para estas imagens foi de 0,63 mm/pixel. O comprimento utilizado como referência foi o diâmetro interno da panela de 300 mm. A sub-região dos vetores de velocidade média utilizada foi de 40 x 40 pixels, o que corresponde a 25,2 x 25,2 mm. O tempo entre duas imagens foi de 1/30 segundos

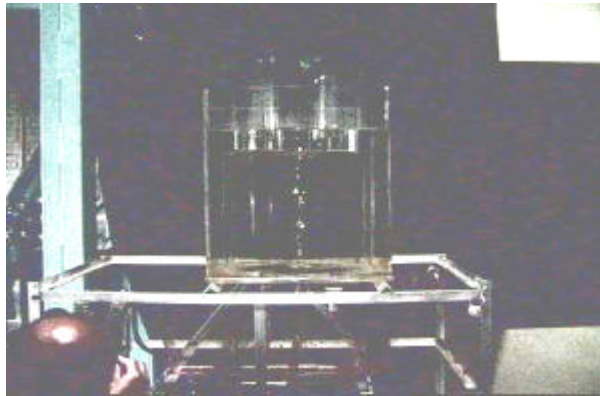


Figura 5.9. Modelo físico da panela.

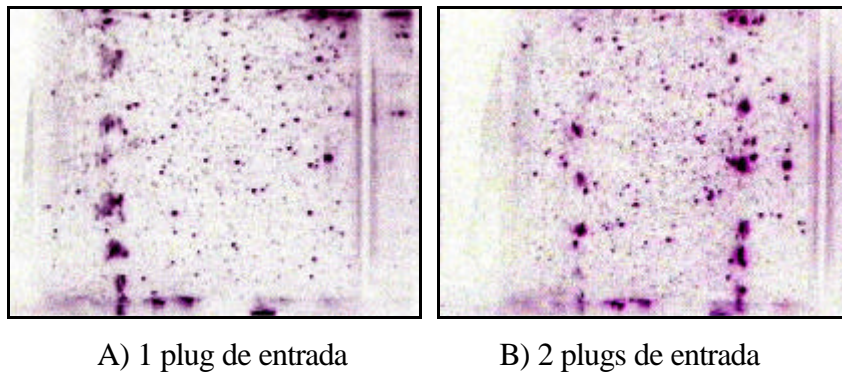


Figura 5.10. Amostras dos negativos imagens do plano do modelo da panela

A figura 5.10 mostra negativos de amostra das imagens, processadas para se obter os resultados deste item. Os borrões visualizados nestas imagens são originados pelas bolhas e a região onde ocorrem deve ser eliminada da análise. São apresentados os negativos das imagens para proporcionar uma melhor visualização no trabalho impresso.

Para este caso, ocorre uma particularidade. Em determinados pontos, na base da panela, é injetado gás (ar), transformando o escoamento em bifásico. São analisadas duas situações: a primeira, com um ponto de injeção de ar, cujo resultado é mostrado na figura 5.11, a segunda,

com dois pontos de injeção, cujo resultado é mostrado na figura 5.12. Os valores qualitativos para os dois casos podem ser vistos, respectivamente, nas tabelas do anexo A 2.3 e A .2.4.

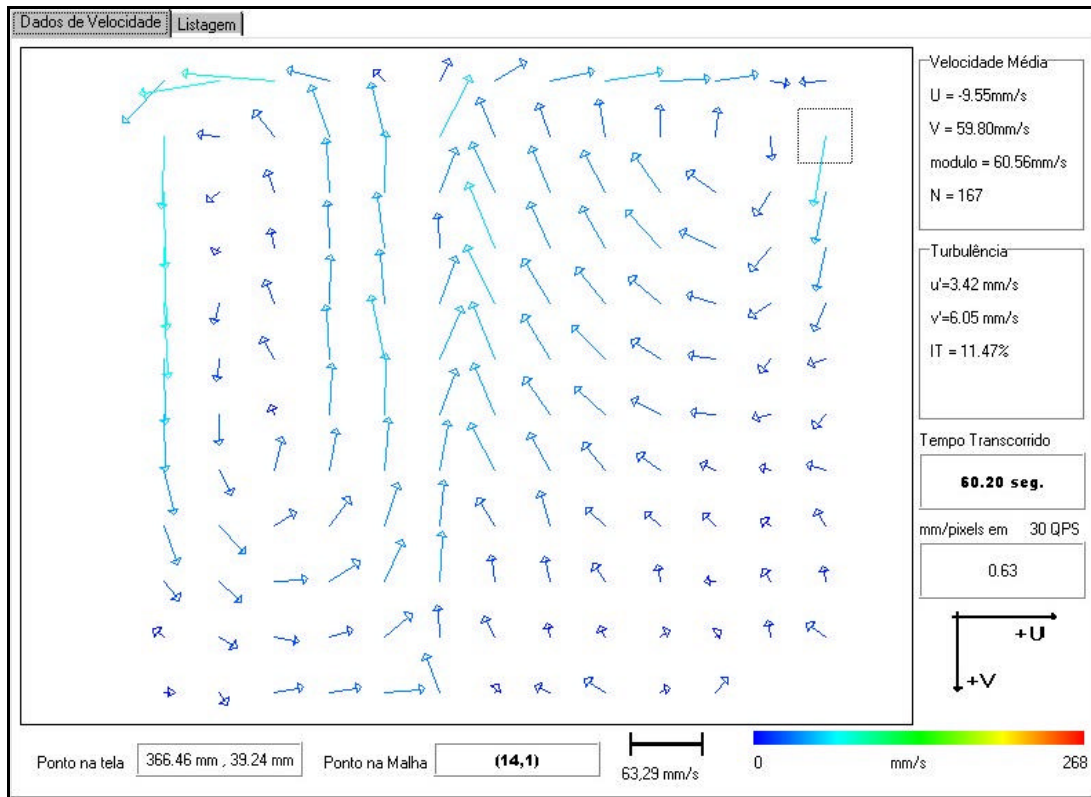


Figura 5.11. Resultados para a panela com um ponto de injeção de ar.

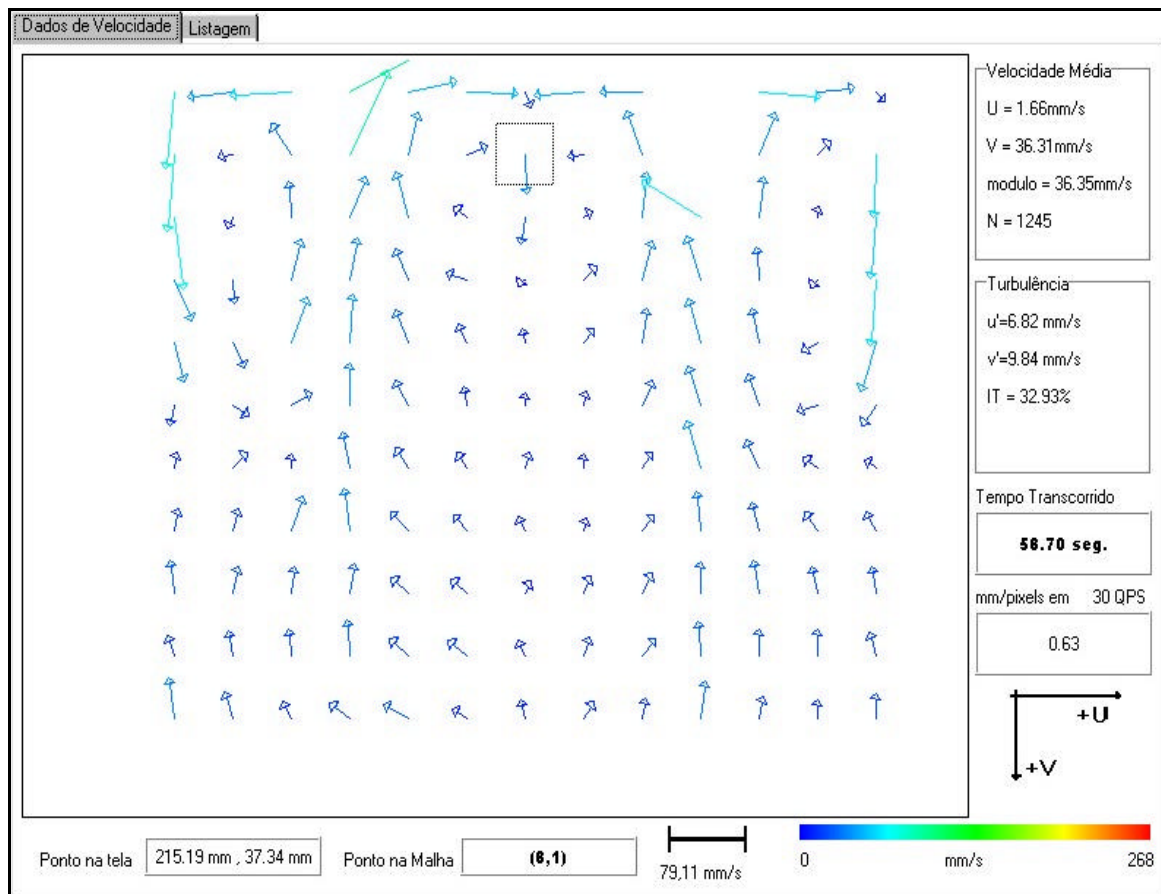


Figura 5.12. Resultados obtidos na panela para dois pontos de entrada de ar

Nas duas situações, a região central, onde aparece uma ascensão dos vetores de velocidade, é a região de entrada das bolhas. Note-se que o programa não é capaz de detectar a velocidade das bolhas, mas somente as velocidades das partículas. As bolhas tornam-se borrões na imagem, impossibilitando as medidas onde existem. Os resultados apresentados correspondem às médias dos pontos apresentados, excluindo-se a velocidade das bolhas.

Neste caso, pode-se notar novamente, que os resultados foram coerentes com resultados esperados, vide referência [Zhu, M.Y,1995] que descreve o comportamento do fluxo dentro do modelo da panela.

Pode-se perceber, ainda, a subida do fluxo próximo a entrada das bolhas e o retorno pelas paredes. No resultado mostrado na figura 5.11, como o ponto de entrada de ar não está localizado no centro, foi possível perceber a não simetria do escoamento em relação ao eixo da panela entre os dois lados. No lado esquerdo, o fluxo retorna diretamente, enquanto no lado direito, foi possível identificar um retorno do fluxo na metade superior direita do modelo, permanecendo no canto inferior direito uma região de velocidade extremamente baixa, para este plano de análise.

No resultado da figura 5.12 pode-se perceber que os dois pontos de entrada de ar uniformizaram o fluxo dentro do modelo da panela .

Estes resultados demonstram que o programa FLOWVIEWER atende as premissas básicas para as quais foi idealizado.

Analogamente aos itens 4.2, no anexo 1, item A.1.3 e A .1.4, são mostrados resultados para diferentes tamanhos de sub-região de cálculo dos vetores de velocidade média.



## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho apresentou a ferramenta computacional denominada de “FLOWVIEWER”, desenvolvida para a medição de campos de velocidade em escoamentos de fluídos, baseada no processamento digital de imagens de partículas, genericamente denominado de PIV. Foram descritos os equipamentos usados na geração de experimentos. A ordem de implementação do sistema foi apresentada desde a captura de imagens até os passos empregados no desenvolvimento e validação do programa. Alguns resultados experimentais aplicados em escoamentos utilizados na simulação física de modelos da indústria siderúrgica foram também apresentados.

O estágio atual de desenvolvimento desta ferramenta computacional permite apresentar as seguintes conclusões:

1 – O processamento digital de imagens de partículas em movimento usando a metodologia de acompanhamento de partícula permite medir campos de velocidade de um escoamento de fluido.

2 – O programa FLOWVIEWER, desenvolvido baseado nesta metodologia, apresentou como limite máximo de confiabilidade em velocidade o valor de 0,5 m/s. Partículas com velocidades superiores a este valor, ou promovem um traço nas imagens, não sendo possível sua perfeita identificação, ou não comparecem na imagem seguinte, não permitindo, desta forma, a aplicação do algoritmo de determinação da velocidade. Esta limitação de velocidade, na verdade, não é devido a uma característica restritiva do programa, e sim, da natureza das imagens capturadas e geradas pela câmara de vídeo. A baixa taxa de aquisição de imagens em quadros por segundo (Q/s) utilizada, é uma característica física das câmaras empregadas. No presente caso, as imagens são adquiridas numa adequada velocidade de obturação (shutter velocity), porém reproduzidas sempre na taxa constante de 30 Q/s. Desta forma, a constante de tempo adotada em todos os casos analisados foi de 0,03s.

Existem, no mercado, câmaras de vídeo com taxa variável de aquisição e reprodução de imagens. Imagens capturadas com estas câmaras permitirão ao programa desenvolvido obter velocidades bem maiores do que 0,5 m/s, sem qualquer alteração nos algoritmos internos. O preço destas câmaras, no entanto, ainda é muito alto.

3 – O programa apresentou comportamento esperado nos testes de validação realizados, seja nos ensaios com escoamentos retilíneos e uniformes, utilizando-se imagens ideais, seja nos escoamentos circulares, simulando um vórtice livre com imagem ideal ou com imagem proveniente de um escoamento real.

Os resultados obtidos com a simulação de escoamentos retilíneos e uniformes mostraram concordância de 100%, ou seja, todos os pontos confirmaram os valores numéricos esperados. Vale ressaltar ainda que, nestas situações o programa usou somente duas imagens de partículas e, mesmo assim, produziu ótimos resultados. Pode-se dizer que, quanto mais simples e regular for um escoamento, menor deverá ser o número de imagens a serem utilizadas no processamento.

Já os resultados de validação obtidos com um escoamento não uniforme, ou seja, com velocidades variadas em pontos diferentes do campo em estudo, apresentaram alguns pontos de desvio dos valores esperados dependendo da sub-região analisada. Isto pode ser explicado devido ao fato de que a região de busca, definida no programa, tem geometria retangular ( $X \times Y$ ) e a geometria esperada para um vórtice livre, dada a sua simetria circular, deveria ser um setor circular. Assim, existem sub-regiões de processamento, dependendo da imagem em estudo, em que o número de partículas necessárias para o cálculo da velocidade não é suficiente e não permitem obter um valor médio de velocidade próximo do esperado. Isto pode ser comprovado porque, quando se altera a dimensão das sub-regiões de processamento, os resultados se alteram e, dependendo da situação, os valores numéricos encontrados melhoram.

4. – O programa se mostrou sensível ao número de imagens a serem processadas. Pode ser comprovado que, quanto mais complexo for o escoamento, maior deve ser o número de imagens para a obtenção de um resultado mais confiável. Escoamentos complexos, processados com um número de imagens superior a 1000 (mil) apresentaram ótimos resultados. Deve ser notado, porém, que existe um compromisso entre o número de imagens a ser processado, a densidade de partículas disseminadas no escoamento e a dimensão da sub-região de processamento.

5 – O programa também se mostrou sensível à dimensão das sub-regiões de processamento. No entanto, não foi ainda possível explorar ao máximo esta correlação, pois esta depende de diversos fatores tais como: densidade e dimensão das partículas disseminadas no escoamento, tipo de escoamento mais ou menos complexo, número de imagens processadas,

velocidade de obturação e de reprodução das imagens, etc. Isto se constitui, na verdade, em sugestão para futuros trabalhos.

6 – A avaliação de incerteza dos resultados obtidos através do programa foi feita com base em outros trabalhos já realizados. O máximo valor encontrado para a incerteza combinada foi de  $\pm 17\%$ .

Embora esta análise não esteja ainda completa, ela se constitui numa importante informação para a qualificação e confiabilidade dos resultados obtidos. A completa avaliação de incerteza seguindo a orientação de organismo internacional (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement da ISO) requererá um laborioso estudo posterior.

A seguir, são apresentadas algumas recomendações básicas para orientar o usuário do programa na produção e captura das imagens das partículas, bem como na análise dos resultados:

1 – O algoritmo de análise de imagens pode falhar na identificação do centro geométrico de uma partícula quando ela aparece muito distorcida. Isto implica que o usuário tenha cuidado especial durante o período de aquisição das imagens. Deve, para garantir nitidez de imagem com boa iluminação, evitar distorções e reflexões espúrias sobre as partículas. A escolha de uma adequada velocidade de obturação é importante para que a imagem da partícula seja menos distorcida possível.

2 – A concentração de partículas deve ser relativamente baixa quando comparada com a metodologia adotada em outros processamentos de PIV (correlações cruzadas, por exemplo). A taxa de concentração de partículas desejável, para o correto uso do o programa, é de 0,1 partícula/pixel de imagem. Isto se deve a definição da região de busca estabelecida no programa, que é de 10 pixels. Este valor, no entanto, poderá ser alterado em função das características dimensionais das partículas usadas. Quanto menor for a dimensão das partículas, menor poderá ser a região de busca. Não deve ser esquecido que, numa mesma região de busca, só pode ser encontrada uma única partícula.

Muitas melhorias podem ser feitas para que o FLOWVIEWER se torne uma ferramenta mais robusta e mais confiável na medição de amplos campos de velocidade. Estas melhorias se constituem em recomendações para futuros trabalhos. Além das sugestões apresentadas acima, pode-se relacionar as seguintes:

1 – Exclusão de brilhos excessivos de uma imagem capturada de forma automática. Isto pode ser implementado no programa utilizando-se filtros adequados.

2 – Desenvolvimento de algoritmos especiais para a seleção e eliminação de vetores espúrios de velocidade.

3 – Desenvolvimento de algoritmos para o traçado de linhas de corrente, iso-velocidades, vorticidade e outros parâmetros de interesse para uma análise mais completa de um escoamento.

É importante, também, ressaltar a necessidade de se fazer um estudo comparativo entre o programa FLOWVIEWER desenvolvido sob a metodologia de acompanhamento de partícula com outros programas que usam a metodologia de correlações cruzadas e autocorrelação de imagens. Importantes questões levantadas ainda não foram totalmente respondidas. Isto, no entanto, se constitui numa pesquisa extensa e fugiu do escopo do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adrian, R. J., 1991, **“Particle Image Velocimetry”**, TSI Short Course Test Brussels.
2. Almeida, J. A., 1997, **“Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas”**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
3. Bonna, V. J., Braga, M. C. F., Cunha, C. M. P. and Azevedo, L. F. A., 1990, **“Search Algorithms for Particle Tracking Velocimetry Systems”**, III Encit – Itapema, SC, pp 449 – 452.
4. Brücker CH., 1996, **“3 –D Scanning – Particle – Image Velocimetry ( 3 – D SPIV)”**, Lecture Series 1996 – 03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
5. Carosone, F. and Cenedese, A., 1996, **“Image Analysis for Velocity Evaluation and Neural Networks”**, Lecture Series 1996 –03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
6. Castleman, K. R., 1996, **“Digital Image Processing”**, Prentice Hall.
7. Gonzalez, C. R. and Woods, R. E., 1992, **“Digital Image Processing”**, Addison – Wesley Publishing Company.
8. Gouesbet G., 1996. **“Particle Image Velocimetry - Light Scattering by Small Particles”**, Lecture Series 1996 –03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
9. Kompenhans, J., Raffel M. and Willert, C, 1996, **“PIV Applied to Aerodynamic Investigations in Wind Tunnels”**, Lecture Series 1996 – 03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
10. Lourenço, L.M., 1996, **“Particle Image Velocimetry”**, Lecture Series 1996 – 03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.

11. Maas, H. G., 1992, **“Complexity Analysis for the Establishment of Image Correspondence of Dense Spatial Target Fields”**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXIX, Part B5, pp 102-107
12. Martins, F. P. R., 1995, **“Identificação de Escoamentos e Processamento de Imagens”**, 2º Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, pp. 371 – 381.
13. Parker, J. R., 1997, **“Algorithms for Image Processing and Computer Vision”**, Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc.
14. Raffel, M., Kompenhans, J., 1996, **“Theoretical and Experimental Aspects of PIV Recording Utilizing Photographic Film and Mechanical Image Shifting”**, Lecture Series 1996 – 03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
15. Raffel, M. and Kompenhans, J., 1996, **“Particle Image Velocimetry – Post Processing: Data Validation”**, Lecture Series 1996 –03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
16. Royer, H. and Stanislas, M., 1996, **“Stereoscopic and Holographic Approaches to Get the Third Velocity Component in PIV”**, Lecture Series 1996 – 03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
17. Sholl, M. and Savas, Ö., 1997, **“A Fast Lagrangian PIV Method for Study of General High-gradient Flows”**, 35<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Paper No. 97-0493.
18. Udea, D. D., Bryanston-Cross, P. J., Driver C. and Calvert G., 1997, **“The Application of PIV (Particle Image Velocimetry) and Flow Visualisation to the Coolant Flow Through an Automotive Engine”**, University of Warwick Optical Engineering Laboratory, Rove Research Paper.
19. Vogt, A., Kompenhans, J., 1996, **“Particle Image Velocimetry – Processing Techniques: Optical Correlators”**, Lecture Series 1996 –03, von Karman Institute for Fluid Dynamics.
20. Wernet, M. P., 1993, **“Fuzzy Logic Particle Tracking Velocimetry”**, SPIE Conference on Optical Diagnostics in Fluid and Thermal Flow, San Diego (NASA TM 106194).

21. Westerweel, J., 1993, **“Digital Particle Image Velocimetry – Theory and Application”**, University Press (Delft), PhD Thesis.
22. Ferreira, V. C. S. Gutkoski, L. Wollmann, A. M. Silva, L. G. François, M. B. G. e Vilela, A. C. F., 1997, **“Processamento de Imagens de Partículas como Método para a Determinação de Linhas de Fluxo de Distribuidores de Lingotamento Contínuo”**, 2<sup>o</sup> Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais - São Paulo,
23. Ferreira, V. C. S., Gutkoski L. e Van der Laan, F., 1997, **“Medição de Campos de Velocidades em Amplos Escoamentos com o Emprego da Técnica de Processamento de Imagens”**, Trabalho 276, COBEM/97, Ilha Solteira, SP.
24. Zhu, M. Y., Ionomoto, T., Sawada, I. and Hsiao T. C., 1995, **“Fluid Flow and Mixing Phenomena in the Ladle Stirred by Argon Through Multi-Tuyere”**, ISIJ International, Vol. 35, No. 5, pp 472-479.
25. Gonçalves, L. S., 1997, **“Modelamento Físico no Distribuidor de Lingotamento Contínuo”**, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS.
26. Fox, & McDonald, 1981, **“Introdução a Mecânica dos Fluidos”**, Ed. Guanabara. Dois.
27. Streeter, V. L., 1974, **“Mecânica dos Fluidos”**, Ed McGraw-Hill

## Anexo I

### A1.1. Resultados com inibidor de turbulência

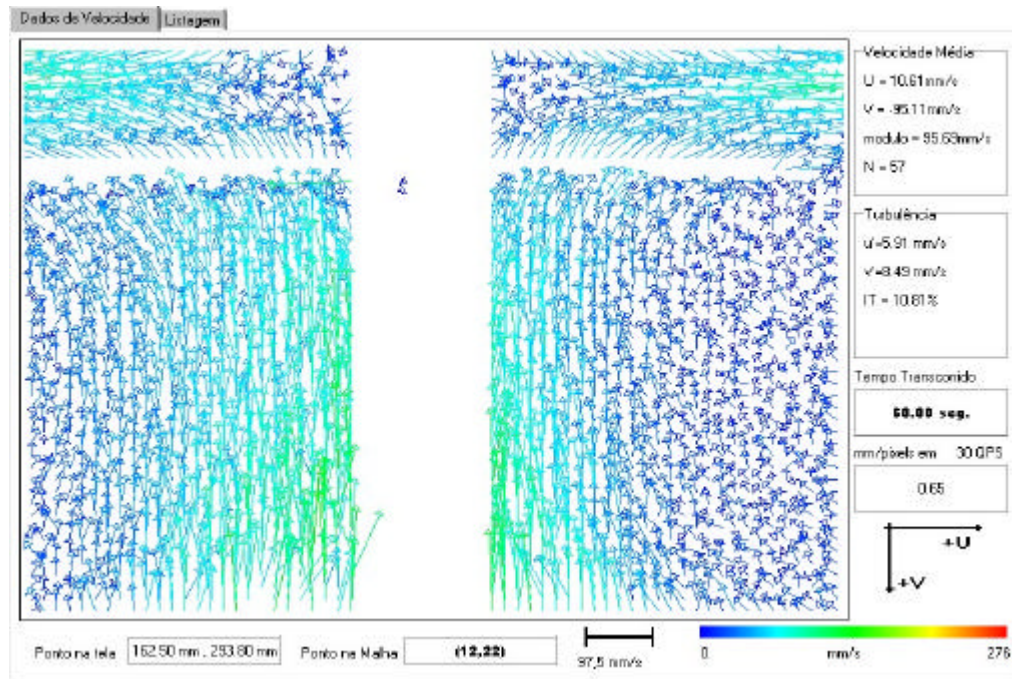


Figura A1.1. Resultado para o caso do inibidor de turbulência, com sub-região de 10x10 pixels

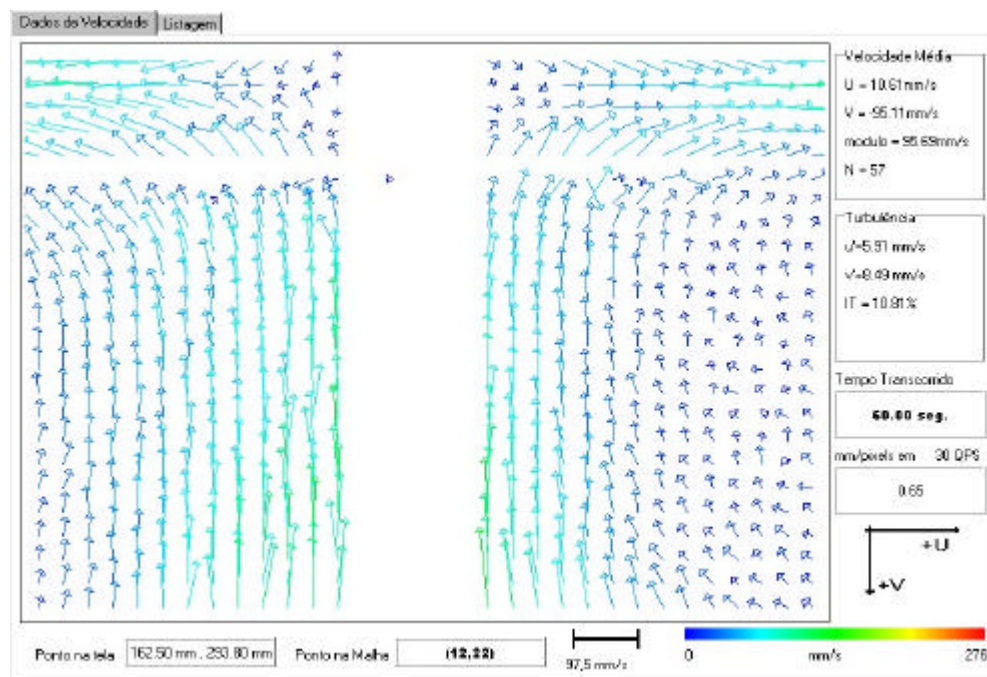


Figura A1.2. Inibidor de turbulência com sub-região de 20x20 pixels



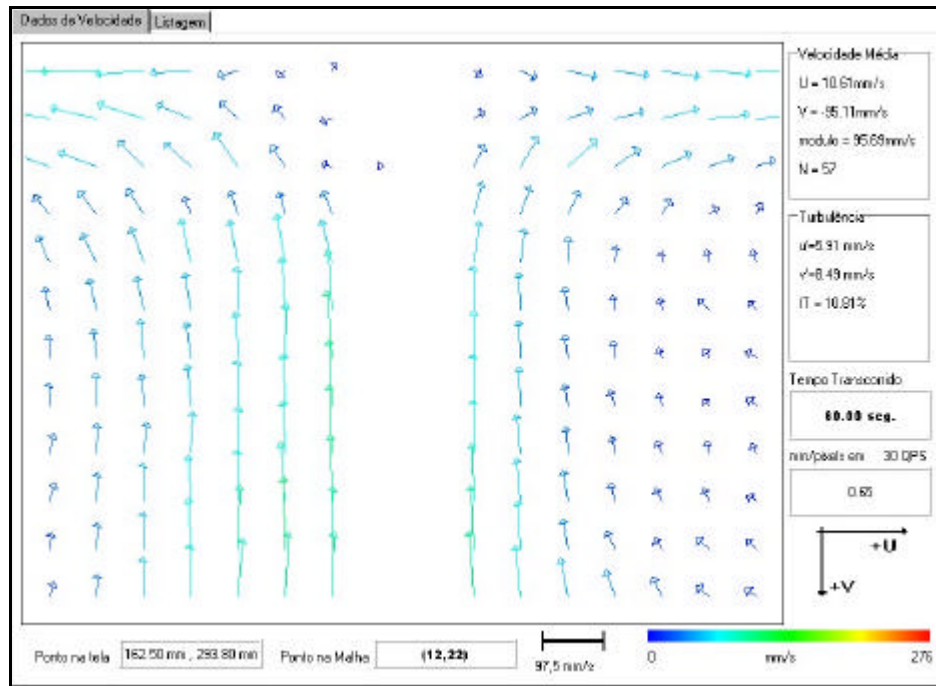


Figura A1.3. Inibidor de turbulência com sub-região de 40x40 pixels

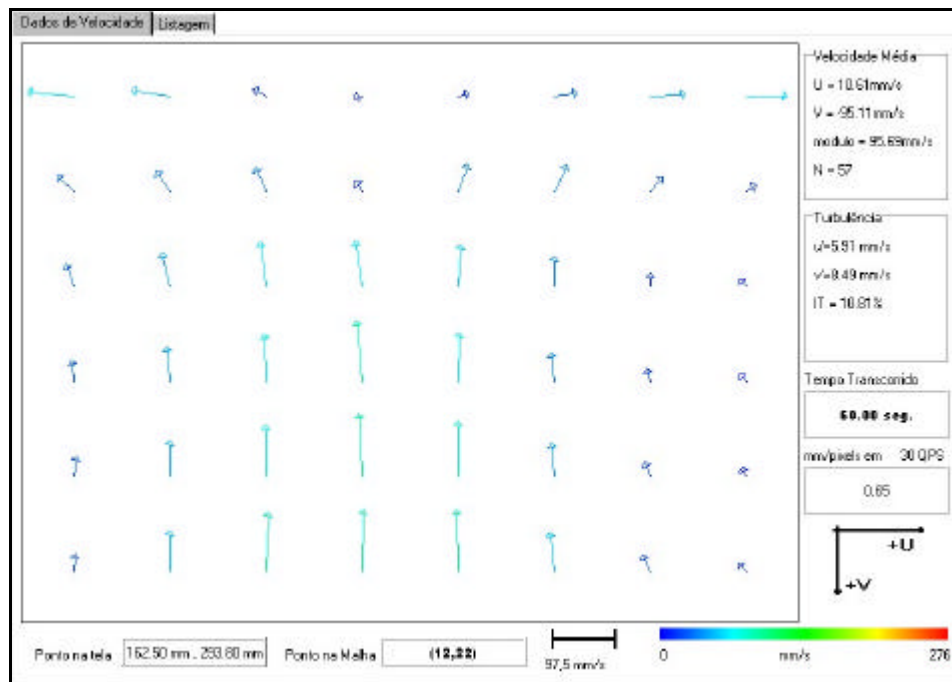


Figura A1.4. Inibidor de turbulência com sub-região de 80x80 pixels

## A1.2. Resultados da entrada do distribuidor com barreira

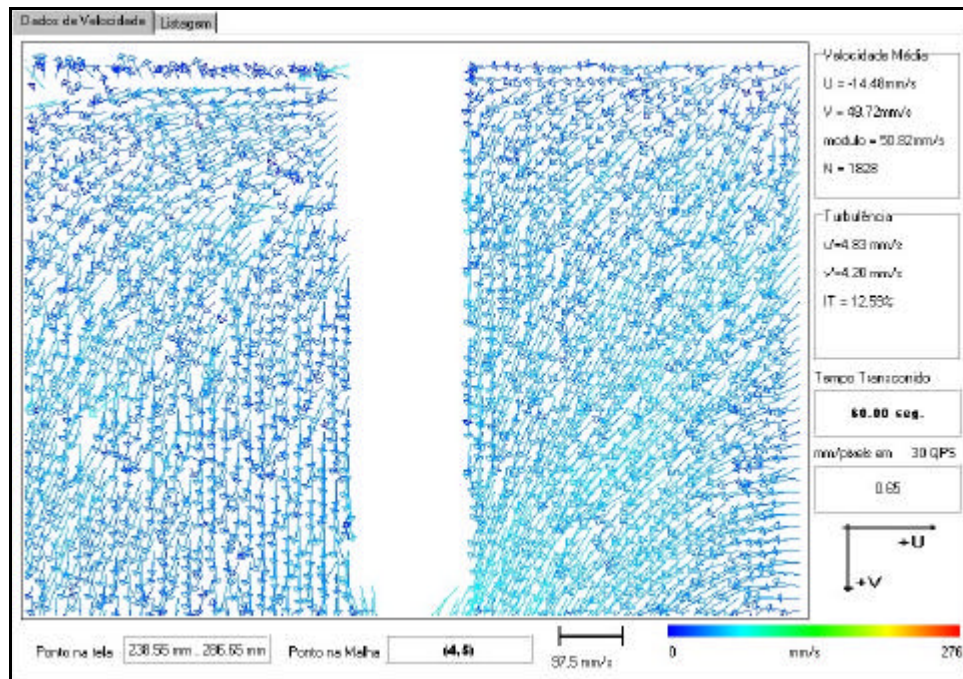


Figura A1.5. Entrada do distribuidor com barreira com sub-região de 10x10 pixels

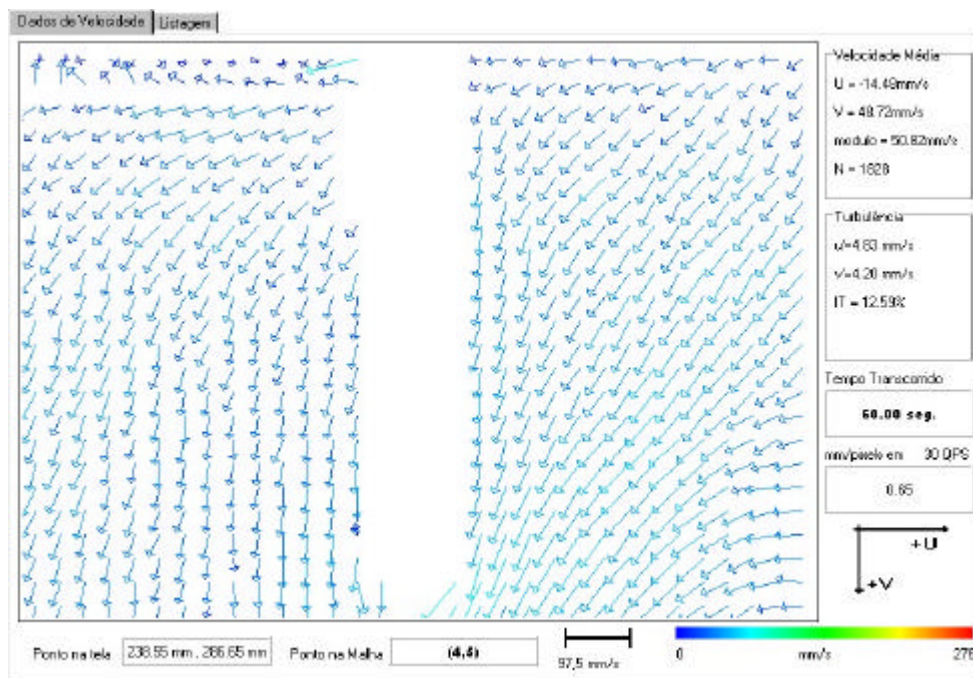


Figura A1.6. Entrada do distribuidor com barreira com sub-região de 20x20 pixels

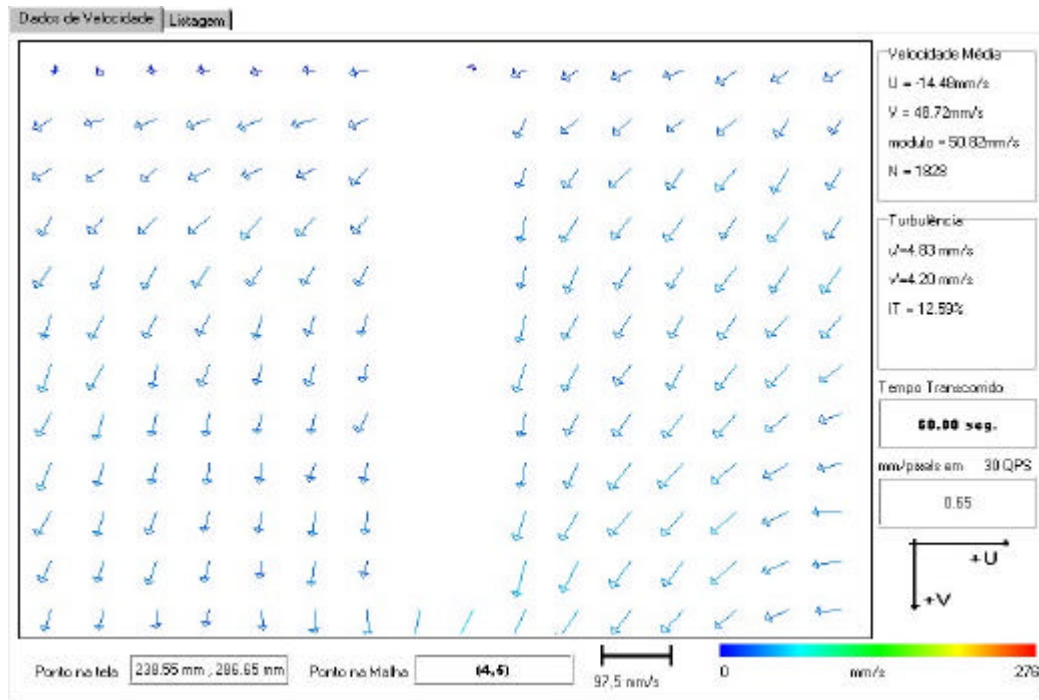


Figura A1.7. Entrada do distribuidor com barreira com sub-região de 40x40 pixels

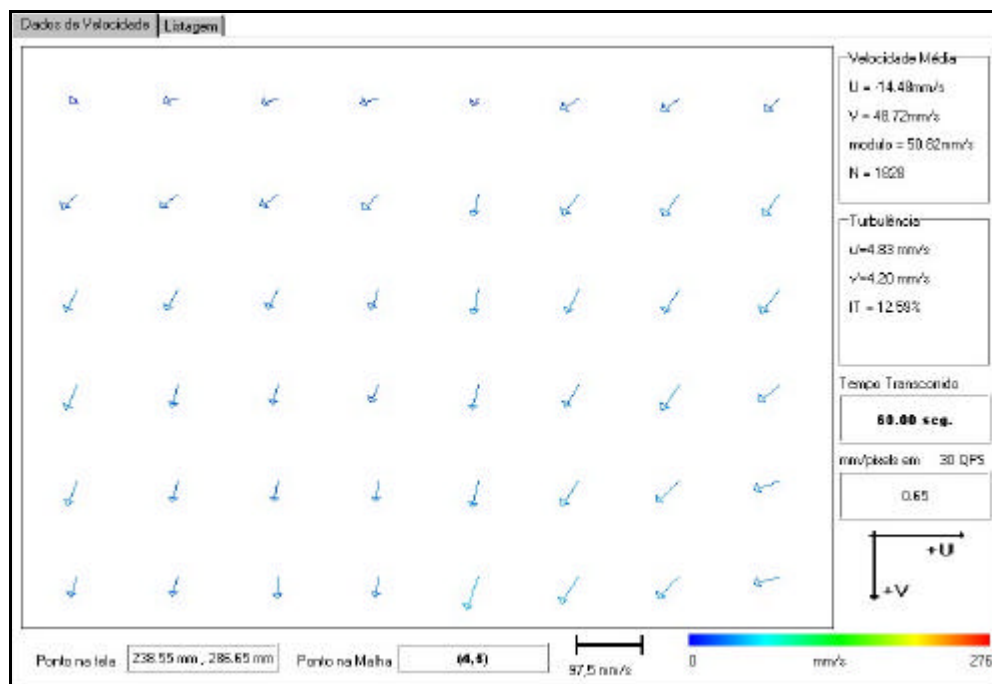


Figura A1.8. Entrada do distribuidor com barreira com sub-região de 80x80 pixels

### A1.3. Resultados com o modelo da panela

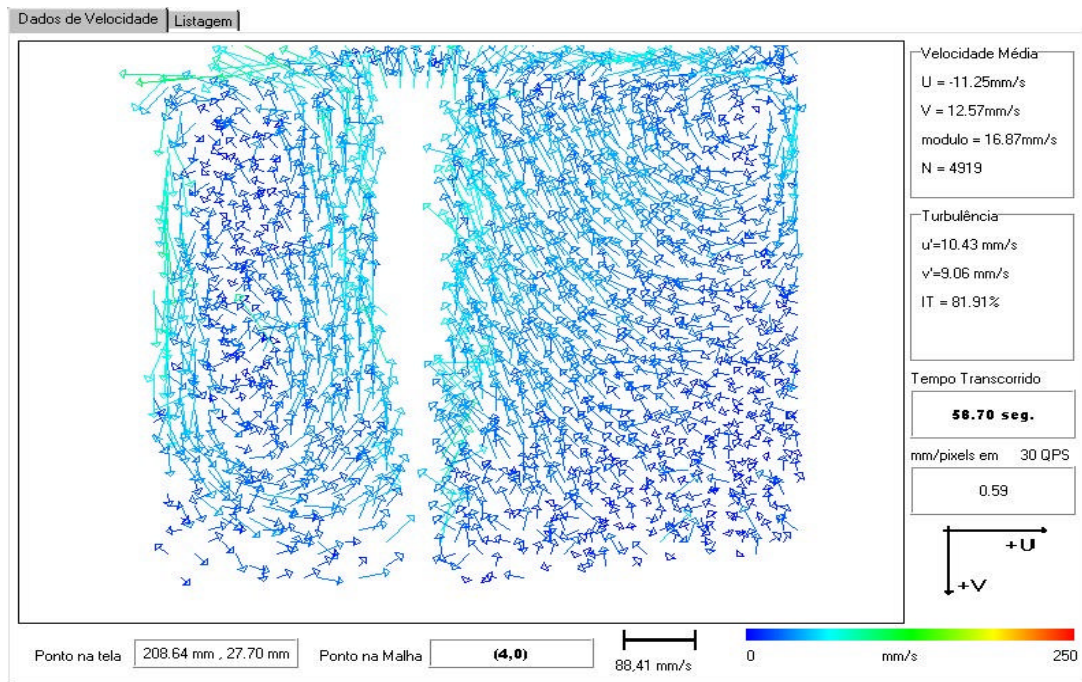


Figura A1.9. Modelo da panela com 1 plug com sub-região de 10x10 pixels

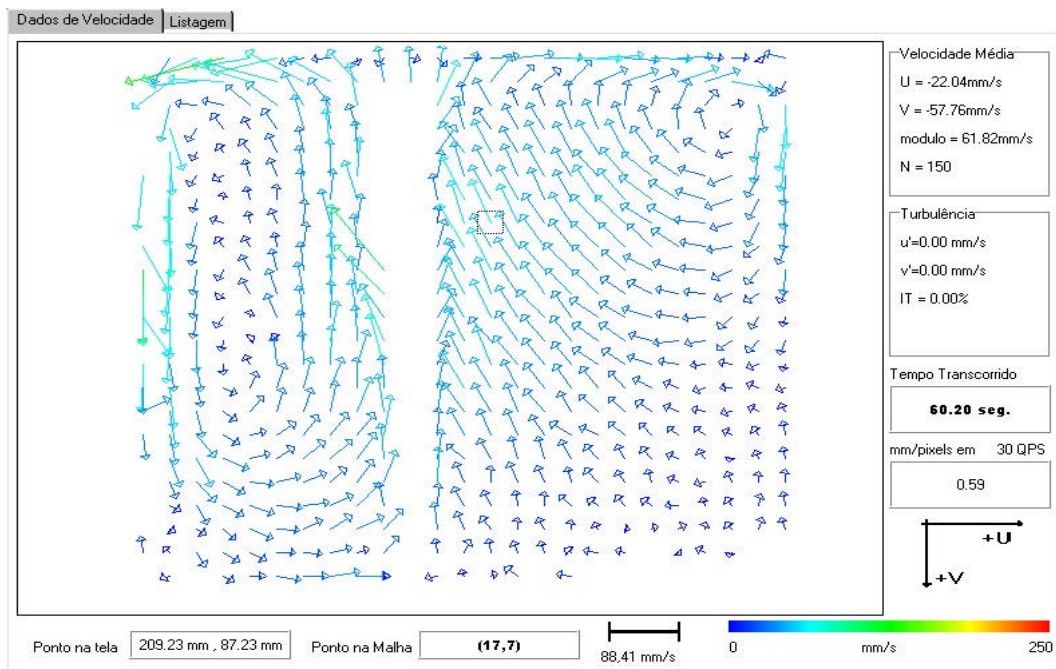


Figura A1.10. Modelo da panela com 1 plug com sub-região de 20x20 pixels

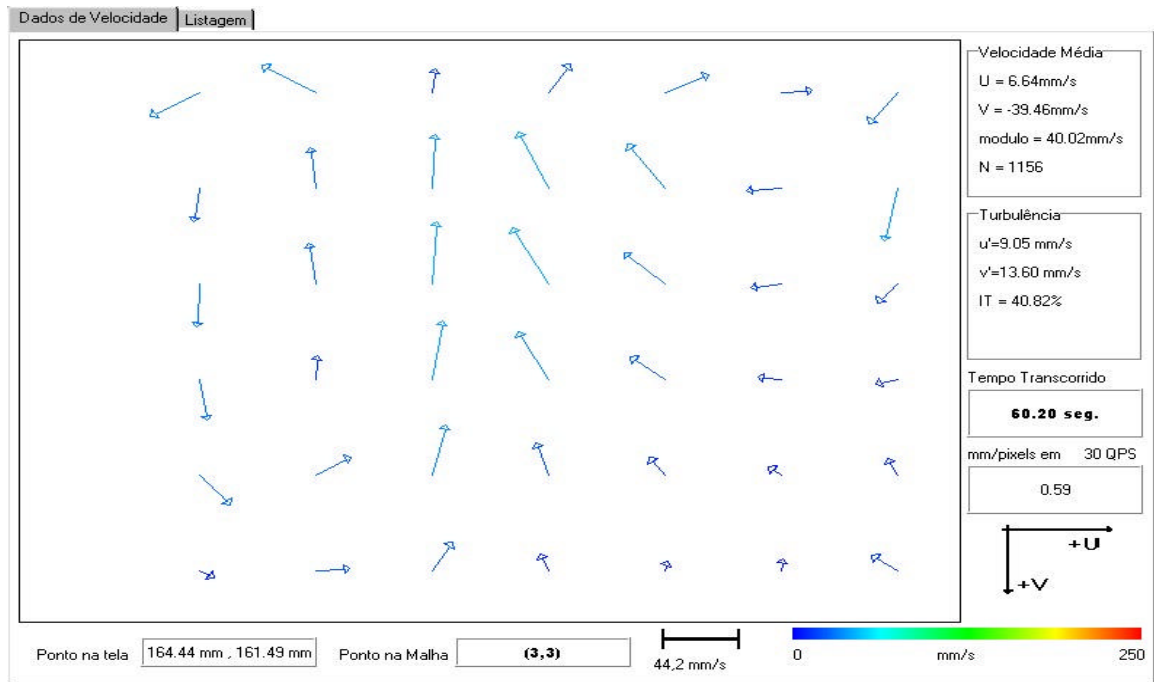


Figura A1.11. Modelo da panela com 1 plug com sub-região de 80x80 pixels

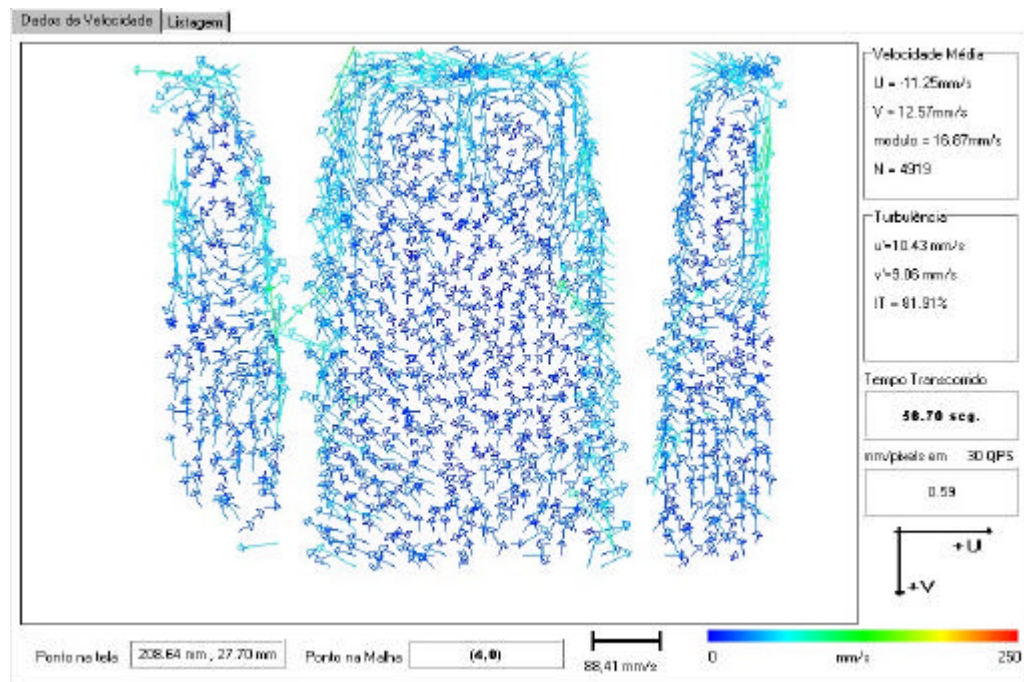


Figura A1.12. Modelo da panela com 2 plugs com sub-região de 10x10 pixels

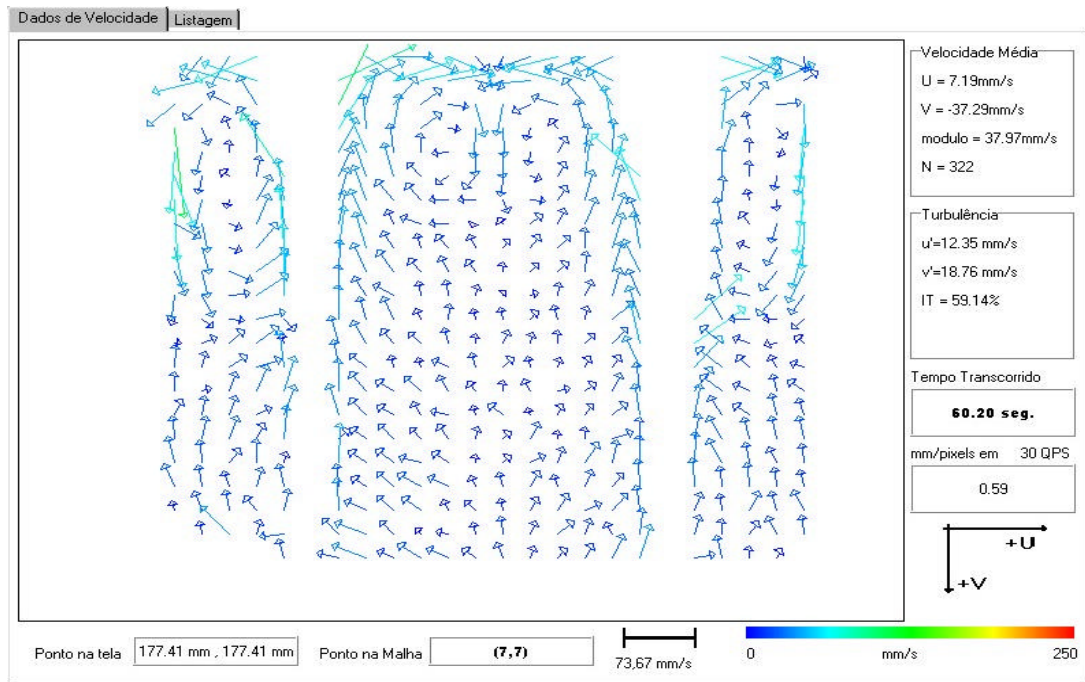


Figura A1.13. Modelo da panela com 2 plugs com sub-região de 20x20 pixels

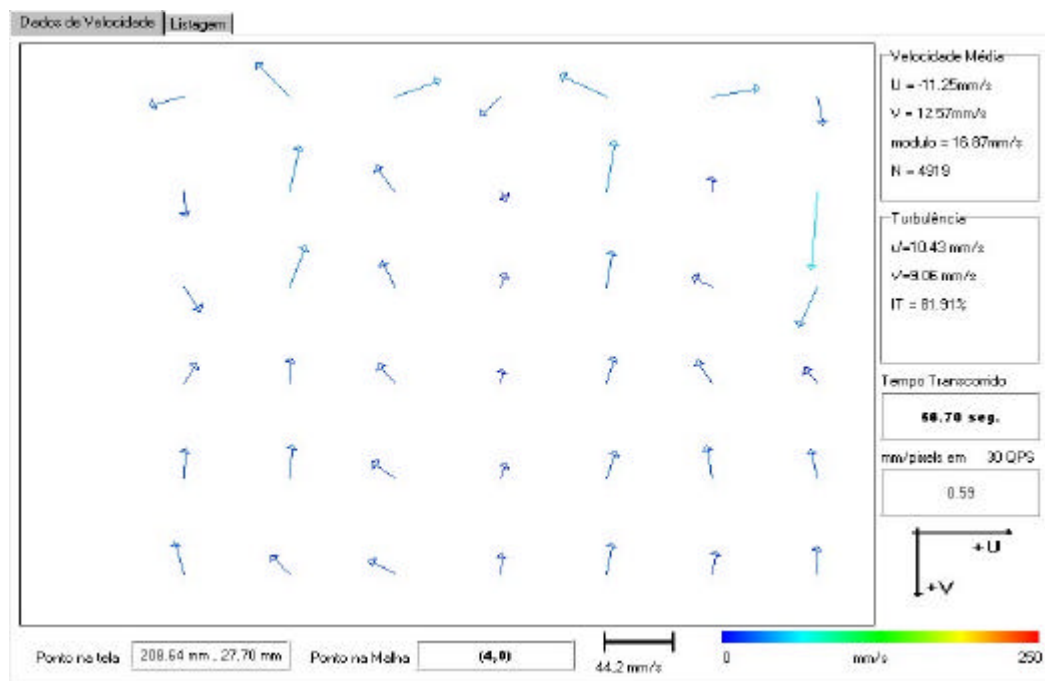


Figura A1.14. Modelo da panela com 2 plugs com sub-região de 80x80 pixels

## Anexo II

### A2. Tabelas dos resultados

As tabelas de resultados, são as transcrições dos valores, encontrados pelo programa FLOWVIEWER, para as telas apresentadas no capítulo 4, de resultados e análise.

Os valores de cabeçalho identificam as seguintes variáveis:

X = Coordenada sub-região a qual pertencem as medidas.

Y = Coordenada da sub-região a qual pertencem as medidas

U = Médias das velocidades na direção U, para a sub-região (X,Y).[mm/s]

V = Médias das velocidades na direção V, para a sub-região(X,Y).[mm/s]

N = Número de vetores de velocidade válidos na sub-região (X,Y).

MODULO = Valor do módulo do vetor velocidade média da sub-região (X,Y).[mm/s]

Tabela A2.1 Resultados para tubo com inibidor de turbulência, relativa a figura 4.6

X	Y	U	V	N	MODULO
0	0	-87,58	5,31	393	87,74
0	1	-68,47	-11,22	761	69,38
0	2	-56,62	-18,66	280	59,62
0	3	-17,58	-22,86	1740	28,84
0	4	-14,12	-33,93	1243	36,75
0	5	-5,24	-28,19	1347	28,67
0	6	1,12	-27,76	1147	27,79
0	7	1,61	-27,79	1270	27,84
0	8	7,76	-23,31	1171	24,57
0	9	8,34	-20,10	1034	21,76
0	10	4,31	-18,97	927	19,46
0	11	6,16	-15,29	500	16,48
1	0	-83,66	3,79	613	83,75

1	1	-66,44	-15,47	847	68,22
1	2	-53,45	-18,96	255	56,72
1	3	-22,13	-29,76	1463	37,09
1	4	-18,69	-38,69	1318	42,97
1	5	-8,75	-41,75	1213	42,66
1	6	-2,34	-38,50	1259	38,58
1	7	1,63	-43,54	1137	43,58
1	8	3,06	-39,57	999	39,68
1	9	2,41	-37,94	848	38,02
1	10	2,18	-34,16	797	34,22
1	11	3,45	-28,33	583	28,54
2	0	-71,57	6,78	682	71,89
2	1	-66,55	-20,05	778	69,50
2	2	-33,62	-33,55	551	47,50
2	3	-21,32	-31,36	1458	37,92
2	4	-16,57	-47,02	1206	49,86
2	5	-9,01	-45,61	1024	46,49
2	6	-2,56	-52,97	966	53,03
2	7	-0,54	-41,61	1122	41,61
2	8	6,36	-42,14	1080	42,62
2	9	1,21	-54,49	885	54,50
2	10	0,09	-51,17	641	51,17
2	11	1,35	-55,80	419	55,82
3	0	-57,10	4,11	712	57,25
3	1	-48,51	-18,81	740	52,03
3	2	-36,01	-32,76	750	48,68
3	3	-6,02	-20,32	1957	21,19
3	4	-12,82	-62,37	992	63,68
3	5	-6,93	-51,12	1004	51,59
3	6	-4,86	-49,88	1011	50,11
3	7	-2,19	-57,91	1023	57,95
3	8	3,96	-58,64	837	58,77
3	9	-1,34	-65,64	653	65,65



3	10	-0,10	-72,28	597	72,28
3	11	0,95	-77,68	369	77,69
4	0	-25,23	8,04	803	26,48
4	1	-21,76	-19,99	1070	29,55
4	2	-31,85	-45,13	843	55,24
4	3	-9,39	-30,05	1606	31,48
4	4	-10,20	-59,76	990	60,63
4	5	0,18	-61,67	860	61,67
4	6	-0,48	-65,72	775	65,72
4	7	0,46	-64,53	766	64,53
4	8	3,14	-67,75	807	67,83
4	9	1,32	-75,97	664	75,99
4	10	5,78	-95,18	462	95,35
4	11	9,44	-87,67	254	88,18
5	0	-5,00	6,24	597	7,99
5	1	-10,89	-13,60	1282	17,42
5	2	-16,59	-24,74	837	29,79
5	3	-6,18	-28,55	1849	29,21
5	4	-10,23	-68,53	902	69,29
5	5	-2,48	-76,16	817	76,20
5	6	2,51	-79,27	582	79,31
5	7	-0,79	-76,01	668	76,02
5	8	-0,76	-77,83	589	77,84
5	9	-5,62	-87,75	444	87,93
5	10	-0,17	-108,15	337	108,15
5	11	7,06	-95,65	232	95,91
6	0	4,17	-3,92	159	5,73
6	1	-9,99	4,94	580	11,14
6	2	-8,49	-0,72	409	8,52
6	3	-11,19	-30,77	474	32,74
6	4	-13,86	-58,55	408	60,17
6	5	-4,69	-89,27	308	89,39
6	6	-6,15	-99,82	244	100,01

6	7	-3,25	-98,87	270	98,93
6	8	-3,12	-102,14	231	102,19
6	9	-1,18	-98,59	214	98,60
6	10	2,81	-92,20	125	92,24
6	11	4,88	-95,61	124	95,74
7	2	0,39	0,00	503	0,39
7	3	0,00	0,00	150	0,00
9	0	9,42	6,32	1256	11,35
9	1	14,15	-7,01	1954	15,79
9	2	17,16	-25,72	699	30,92
9	3	15,17	-44,36	1251	46,88
9	4	10,45	-56,87	1506	57,82
9	5	1,43	-63,91	1305	63,93
9	6	2,03	-67,23	1325	67,26
9	7	1,94	-74,92	1084	74,95
9	8	1,26	-78,58	977	78,59
9	9	-1,06	-84,99	717	85,00
9	10	-2,54	-94,39	545	94,42
9	11	-5,84	-99,05	377	99,22
10	0	22,63	11,14	1304	25,22
10	1	23,22	-10,10	2193	25,32
10	2	25,65	-39,63	748	47,20
10	3	15,05	-38,17	1758	41,03
10	4	5,86	-46,25	1870	46,62
10	5	-1,07	-51,77	1835	51,78
10	6	-1,08	-50,78	2038	50,79
10	7	-1,71	-54,35	1740	54,38
10	8	-4,48	-56,24	1633	56,42
10	9	-5,15	-61,67	1321	61,89
10	10	-2,17	-69,68	954	69,71
10	11	-6,66	-74,88	568	75,17
11	0	43,58	11,18	1439	44,99
11	1	36,87	-10,93	2113	38,45

11	2	43,03	-35,79	735	55,97
11	3	16,14	-31,17	1949	35,10
11	4	2,47	-32,93	2177	33,02
11	5	-3,00	-28,91	2181	29,07
11	6	-2,45	-27,85	2841	27,96
11	7	-2,47	-27,29	2797	27,41
11	8	-0,32	-34,29	2411	34,29
11	9	-4,07	-41,51	1903	41,71
11	10	-4,53	-40,08	1660	40,34
11	11	-9,62	-53,40	1009	54,26
12	0	50,93	9,74	1340	51,85
12	1	44,57	-8,26	2123	45,32
12	2	36,66	-21,63	925	42,56
12	3	15,62	-19,10	2351	24,67
12	4	3,03	-18,96	2647	19,20
12	5	-0,47	-14,69	3007	14,70
12	6	-0,57	-18,74	3529	18,75
12	7	-5,49	-16,77	3531	17,64
12	8	-3,51	-17,92	3107	18,27
12	9	-4,87	-20,13	2740	20,71
12	10	-9,12	-20,04	2072	22,01
12	11	-11,31	-34,24	1364	36,06
13	0	57,04	10,66	1070	58,03
13	1	55,98	-13,32	1774	57,55
13	2	43,54	-15,62	1092	46,25
13	3	12,48	-17,21	2182	21,26
13	4	0,76	-9,13	2644	9,16
13	5	-0,39	-9,80	3521	9,80
13	6	-1,95	-7,65	3894	7,89
13	7	-2,51	-10,44	4120	10,74
13	8	-4,45	-9,82	3793	10,78
13	9	-6,11	-13,37	3027	14,70
13	10	-6,22	-8,53	2456	10,55

13	11	-9,82	-21,84	1476	23,94
14	0	65,90	6,05	767	66,18
14	1	60,95	-5,65	1504	61,21
14	2	35,97	-11,47	1241	37,75
14	3	10,47	-4,82	2480	11,53
14	4	-0,43	-9,96	2953	9,97
14	5	-9,92	-10,19	3026	14,23
14	6	-3,33	-4,58	4020	5,66
14	7	-3,13	-2,81	4215	4,21
14	8	-0,31	-10,67	3461	10,67
14	9	-4,78	-12,74	3380	13,61
14	10	-12,46	-10,93	2146	16,57
14	11	-13,33	-9,79	1538	16,53
15	0	83,43	0,91	474	83,44
15	1	58,33	-2,18	1146	58,37
15	2	26,38	-6,23	1383	27,11
15	3	5,98	-8,46	2288	10,36
15	4	-2,24	-10,13	2788	10,38
15	5	-5,97	-6,46	3147	8,79
15	6	-9,66	-4,54	4195	10,68
15	7	-6,76	-5,21	4065	8,53
15	8	-3,36	-7,25	3739	7,99
15	9	-6,49	-3,80	3171	7,52
15	10	-9,19	-9,09	2282	12,92
15	11	-9,43	-6,06	1497	11,21

Tabela A2.2. Resultados para Entrada do distribuidor Relativa a figura 4.8

X	Y	U	V	N	MODULO
0	0	7,05	0,73	2160	7,09
0	1	-15,75	12,77	614	20,28

0	2	-17,70	14,18	693	22,68
0	3	-11,54	23,45	375	26,14
0	4	-16,63	27,37	374	32,03
0	5	-8,32	32,55	396	33,60
0	6	-11,17	37,77	445	39,39
0	7	-15,05	30,82	508	34,30
0	8	-13,00	38,48	414	40,62
0	9	-15,85	32,27	614	35,95
0	10	-10,92	28,97	550	30,96
0	11	-7,15	28,35	379	29,24
1	0	-2,59	2,63	1893	3,69
1	1	-18,25	7,23	814	19,64
1	2	-17,74	17,41	664	24,86
1	3	-15,14	21,12	554	25,98
1	4	-10,08	30,34	385	31,97
1	5	-14,74	33,05	410	36,19
1	6	-15,65	34,01	547	37,44
1	7	-9,18	36,97	499	38,09
1	8	-7,66	31,83	593	32,74
1	9	-7,67	33,84	567	34,70
1	10	-6,14	28,79	848	29,44
1	11	-5,50	26,41	649	26,98
2	0	-5,67	1,19	1692	5,79
2	1	-22,97	11,39	786	25,64
2	2	-15,28	16,55	734	22,52
2	3	-19,29	21,79	561	29,11
2	4	-13,92	30,99	465	33,97
2	5	-12,79	30,76	724	33,31
2	6	-2,08	31,60	590	31,67
2	7	-5,76	29,88	545	30,43
2	8	-5,27	27,64	611	28,14
2	9	-8,09	30,35	699	31,41
2	10	-9,42	31,30	747	32,69

2	11	0,06	23,93	669	23,93
3	0	-8,13	1,74	1370	8,31
3	1	-25,26	9,97	741	27,16
3	2	-21,43	14,67	969	25,97
3	3	-21,73	23,08	419	31,71
3	4	-16,16	28,87	491	33,09
3	5	-10,49	26,21	703	28,23
3	6	-7,90	29,04	797	30,10
3	7	-2,27	30,03	678	30,11
3	8	-1,16	28,58	670	28,60
3	9	-4,12	27,30	928	27,60
3	10	-5,43	28,21	1023	28,73
3	11	-3,66	20,36	880	20,69
4	0	-7,64	2,24	1088	7,96
4	1	-26,16	12,23	957	28,88
4	2	-19,75	11,21	769	22,71
4	3	-22,45	28,82	337	36,53
4	4	-14,78	25,86	632	29,78
4	5	-6,22	31,66	749	32,26
4	6	-5,01	25,91	965	26,39
4	7	-4,39	26,67	791	27,03
4	8	-0,53	27,19	916	27,19
4	9	-3,32	27,90	1051	28,10
4	10	-1,06	22,68	846	22,71
4	11	3,58	26,70	720	26,94
5	0	-9,05	1,43	1189	9,16
5	1	-24,76	9,17	934	26,40
5	2	-17,29	10,84	725	20,41
5	3	-19,30	24,51	389	31,20
5	4	-12,56	24,85	736	27,84
5	5	-7,55	25,79	775	26,87
5	6	-7,55	28,73	837	29,70
5	7	-3,87	25,77	771	26,06

5	8	-4,46	23,99	856	24,40
5	9	-1,85	33,53	887	33,58
5	10	-1,96	34,80	984	34,85
5	11	1,19	31,96	931	31,98
6	0	-17,09	4,27	680	17,62
6	1	-18,99	10,01	534	21,46
6	2	-16,40	20,10	327	25,94
6	3	-15,16	20,60	355	25,58
6	4	-9,92	26,55	523	28,34
6	5	-5,86	25,49	579	26,16
6	6	-4,00	22,59	732	22,94
6	7	-10,47	23,97	646	26,16
6	8	-2,13	26,37	778	26,45
6	9	-1,37	30,79	995	30,82
6	10	-1,97	21,30	890	21,39
6	11	2,21	35,30	759	35,37
7	11	-5,98	41,44	88	41,87
8	0	0,00	-0,01	1707	0,01
8	11	-23,80	58,21	68	62,89
9	0	-10,86	7,17	560	13,02
9	1	-8,63	24,32	825	25,81
9	2	-6,02	25,76	664	26,45
9	3	-4,23	34,89	798	35,15
9	4	-4,76	30,36	885	30,73
9	5	-6,03	38,64	695	39,10
9	6	-10,81	37,21	893	38,75
9	7	-4,53	33,05	1291	33,36
9	8	-4,66	34,75	1221	35,06
9	9	-10,67	40,73	1192	42,11
9	10	-10,02	51,38	940	52,35
9	11	-18,81	44,87	820	48,66
10	0	-14,06	9,93	660	17,21
10	1	-18,50	17,90	818	25,74

10	2	-15,26	25,52	910	29,73
10	3	-17,83	33,71	889	38,14
10	4	-12,52	35,67	891	37,81
10	5	-15,96	32,63	1123	36,32
10	6	-16,10	35,31	1094	38,81
10	7	-11,91	28,33	1347	30,73
10	8	-13,25	33,61	1595	36,13
10	9	-20,60	39,16	1325	44,25
10	10	-19,16	44,10	1277	48,08
10	11	-23,59	41,11	1015	47,40
11	0	-17,57	10,99	749	20,73
11	1	-19,48	20,00	902	27,92
11	2	-23,82	26,89	786	35,92
11	3	-19,99	29,00	881	35,22
11	4	-16,17	29,76	901	33,87
11	5	-16,45	29,93	1079	34,15
11	6	-16,58	27,10	1378	31,77
11	7	-17,99	30,43	1369	35,35
11	8	-24,62	35,41	1292	43,12
11	9	-24,56	31,92	1309	40,28
11	10	-23,38	36,57	1196	43,41
11	11	-21,40	32,46	984	38,88
12	0	-19,70	8,22	882	21,35
12	1	-15,84	16,58	1043	22,93
12	2	-16,55	27,40	819	32,01
12	3	-19,83	31,36	875	37,10
12	4	-17,51	31,08	992	35,67
12	5	-15,31	30,71	1153	34,32
12	6	-17,28	33,99	1420	38,13
12	7	-21,92	31,64	1243	38,49
12	8	-28,98	34,50	1321	45,05
12	9	-24,41	31,49	1391	39,84
12	10	-23,04	34,23	1393	41,26



12	11	-25,04	30,67	1140	39,59
13	0	-21,00	18,23	704	27,80
13	1	-19,68	20,13	861	28,16
13	2	-21,91	30,61	793	37,65
13	3	-15,63	27,43	770	31,57
13	4	-21,74	33,80	810	40,19
13	5	-18,57	31,78	1278	36,81
13	6	-22,07	34,49	1054	40,94
13	7	-23,77	32,95	1196	40,63
13	8	-28,44	27,70	1361	39,70
13	9	-29,61	29,59	1338	41,86
13	10	-30,52	31,37	1362	43,77
13	11	-25,19	24,23	1093	34,95
14	0	-16,83	13,95	717	21,86
14	1	-13,45	22,44	802	26,16
14	2	-19,16	34,08	737	39,09
14	3	-23,03	33,58	669	40,72
14	4	-20,64	36,43	903	41,87
14	5	-23,60	28,17	1008	36,75
14	6	-24,85	29,37	1002	38,47
14	7	-25,63	24,78	1253	35,65
14	8	-27,59	20,61	1417	34,44
14	9	-29,82	16,39	1260	34,03
14	10	-31,20	15,71	1302	34,93
14	11	-26,18	13,50	1235	29,45
15	0	-15,98	12,28	670	20,15
15	1	-10,61	18,96	798	21,73
15	2	-14,17	29,05	670	32,32
15	3	-16,38	28,08	743	32,51
15	4	-23,05	35,73	835	42,52
15	5	-21,82	29,61	1061	36,78
15	6	-24,11	24,24	1172	34,19
15	7	-24,16	10,89	1427	26,50

15	8	-27,21	9,34	1388	28,77
15	9	-35,08	1,44	1449	35,11
15	10	-33,35	7,75	1245	34,24
15	11	-29,82	2,72	860	29,94

Tabela A2.3. Resultados do modelo da panela, relativa a figura 5.11

X	Y	U	V	N	MODULO
2	0	-17,14	29,57	40	34,18
2	1	4,73	55,27	58	55,47
2	2	-1,14	67,71	60	67,72
2	3	0,00	74,43	79	74,43
2	4	-1,79	63,50	115	63,53
2	5	-2,47	63,20	118	63,24
2	6	2,47	46,13	139	46,19
2	7	11,58	28,86	117	31,10
2	8	11,34	33,49	65	35,36
2	9	0,00	5,71	15	5,71
2	10	3,12	0,00	22	3,12
2	11	-1,56	3,12	11	3,48
3	0	-58,63	11,93	69	59,83
3	1	-13,28	1,42	133	13,35
3	2	-9,34	3,19	156	9,87
3	3	-4,90	8,06	168	9,43
3	4	-5,36	20,67	243	21,35
3	5	-1,30	27,62	211	27,65
3	6	3,63	31,20	217	31,42
3	7	12,32	29,97	167	32,41
3	8	25,98	26,73	161	37,27
3	9	20,27	25,03	126	32,21
3	10	5,62	7,31	61	9,22

4	0	-71,49	-0,36	94	71,49
4	1	-15,79	-18,87	139	24,60
4	2	-9,36	-12,51	185	15,62
4	3	-4,77	-8,48	194	9,73
4	4	-6,19	-10,59	191	12,27
4	5	-6,72	-12,64	194	14,31
4	6	-0,34	-3,29	1017	3,30
4	7	11,98	-14,98	206	19,18
4	8	18,31	-5,22	161	19,04
4	9	27,61	4,85	113	28,03
4	10	20,93	7,79	77	22,33
4	11	9,64	5,36	16	11,03
5	0	-34,04	-10,77	207	35,70
5	1	-10,80	-39,69	127	41,13
5	2	-1,79	-39,81	211	39,85
5	3	-4,27	-45,97	245	46,17
5	4	-0,82	-38,55	209	38,56
5	5	-3,22	-41,10	181	41,23
5	6	3,08	-44,51	228	44,62
5	7	14,75	-32,66	179	35,83
5	8	28,16	-17,03	151	32,90
5	9	32,38	-1,59	108	32,42
5	10	21,49	-12,80	71	25,01
6	0	-6,84	-5,38	484	8,70
6	1	-8,95	-61,33	90	61,98
6	2	-7,09	-40,39	87	41,01
6	3	-5,14	-38,57	80	38,91
6	4	-4,14	-42,71	116	42,91
6	5	-11,26	-39,76	169	41,33
6	6	2,88	-43,88	143	43,97
6	7	3,36	-36,20	143	36,36
6	8	16,79	-27,39	194	32,13
6	9	19,11	-23,39	96	30,20

6	10	24,64	-13,66	64	28,18
6	11	18,86	3,43	10	19,17
7	0	10,61	-12,03	614	16,04
7	1	27,17	-44,96	53	52,53
7	2	12,43	-38,74	131	40,68
7	3	-5,01	-18,11	106	18,79
7	4	22,11	-32,48	76	39,29
7	5	21,62	-42,93	111	48,07
7	6	23,69	-41,77	110	48,02
7	7	5,99	-32,60	163	33,15
7	8	3,63	-37,58	156	37,76
7	9	-3,98	-37,58	99	37,79
7	10	5,71	-26,58	69	27,19
8	0	24,80	-14,77	405	28,87
8	1	-9,84	-30,41	411	31,96
8	2	-14,60	-34,97	324	37,90
8	3	-21,51	-51,94	334	56,22
8	4	-14,72	-43,01	332	45,46
8	5	-17,28	-53,81	374	56,52
8	6	-8,80	-38,98	376	39,96
8	7	-10,03	-41,45	287	42,65
8	8	-7,03	-23,69	283	24,71
8	9	0,36	-19,54	193	19,54
8	10	2,21	-16,97	101	17,12
9	0	33,03	-6,81	491	33,72
9	1	-9,92	-28,56	356	30,23
9	2	-16,20	-38,23	365	41,52
9	3	-16,83	-37,55	383	41,15
9	4	-22,84	-37,36	469	43,79
9	5	-17,38	-41,52	358	45,01
9	6	-14,31	-36,87	405	39,55
9	7	-10,97	-35,58	425	37,23
9	8	-3,20	-28,23	337	28,41

9	9	4,36	-19,40	228	19,88
9	10	3,13	-14,69	126	15,02
9	11	-2,86	0,00	6	2,86
10	0	52,73	-6,90	581	53,18
10	1	-4,55	-30,81	399	31,14
10	2	-20,89	-35,53	371	41,22
10	3	-27,14	-31,30	379	41,43
10	4	-30,33	-23,54	477	38,40
10	5	-25,60	-27,01	464	37,21
10	6	-16,69	-27,84	338	32,46
10	7	-9,56	-25,26	357	27,01
10	8	-10,20	-17,14	321	19,95
10	9	-6,60	-12,65	317	14,27
10	10	-4,41	-4,71	171	6,45
10	11	-10,29	-1,71	10	10,43
11	0	43,40	-0,17	715	43,40
11	1	0,41	-26,70	497	26,70
11	2	-20,73	-32,66	368	38,68
11	3	-33,01	-27,78	377	43,15
11	4	-33,51	-12,82	440	35,87
11	5	-29,31	-9,26	496	30,74
11	6	-21,52	-14,81	470	26,12
11	7	-11,75	-14,74	464	18,85
11	8	-7,94	-11,09	436	13,64
11	9	-4,20	-9,57	265	10,46
11	10	-2,75	1,05	131	2,94
12	0	33,01	-4,05	897	33,25
12	1	7,46	-26,58	503	27,61
12	2	-23,02	-19,25	537	30,01
12	3	-33,16	-7,79	471	34,06
12	4	-28,42	2,49	503	28,53
12	5	-23,41	7,32	550	24,53
12	6	-18,58	1,69	547	18,66

12	7	-10,86	-1,10	450	10,91
12	8	-11,87	-2,43	325	12,11
12	9	-7,36	3,26	226	8,05
12	10	-3,43	5,81	115	6,75
13	0	16,14	3,63	1090	16,54
13	1	3,60	23,44	414	23,71
13	2	-13,62	31,75	487	34,55
13	3	-18,53	24,80	544	30,96
13	4	-15,27	23,54	541	28,06
13	5	-11,25	23,07	535	25,67
13	6	-9,64	14,01	427	17,00
13	7	-7,13	2,65	433	7,60
13	8	-4,15	0,79	392	4,23
13	9	-1,58	-5,33	315	5,56
13	10	-0,57	-4,90	91	4,93
14	0	-18,17	4,00	167	18,61
14	1	-0,45	68,12	76	68,12
14	2	-2,22	75,43	85	75,46
14	3	-2,17	36,22	142	36,28
14	4	-3,19	28,70	129	28,88
14	5	-4,57	20,86	120	21,35
14	6	-2,89	24,08	89	24,25
14	7	-4,52	10,74	91	11,65
14	8	-0,59	-7,98	58	8,00
14	9	1,56	3,12	11	3,48
14	10	-4,03	-4,03	17	5,70

Tabela A2.4. Resultados do modelo da panela com dois plugs – relativa a figura 5.12

X	Y	U	V	N	MODULO
2	1	-5,00	66,43	24	66,62

2	2	9,58	61,51	68	62,25
2	3	16,43	34,05	72	37,80
2	4	9,86	32,77	113	34,22
2	5	-1,73	15,02	89	15,12
2	6	2,69	-7,64	83	8,10
2	7	4,02	-13,66	64	14,24
2	8	-2,61	-23,11	46	23,25
2	9	-3,92	-12,73	35	13,32
3	0	-38,43	5,52	236	38,82
3	1	-7,52	2,15	415	7,82
3	2	-2,22	6,67	594	7,03
3	3	2,30	17,87	664	18,01
3	4	10,42	18,82	653	21,52
3	5	11,96	7,99	579	14,39
3	6	11,07	-8,85	401	14,17
3	7	5,39	-13,50	315	14,53
3	8	5,19	-18,06	261	18,79
3	9	-2,83	-15,82	194	16,07
3	10	-5,06	-17,92	44	18,62
4	0	-54,00	3,18	140	54,09
4	1	-15,21	-22,18	177	26,89
4	2	-0,53	-26,31	389	26,31
4	3	9,25	-30,25	404	31,64
4	4	15,57	-35,66	413	38,91
4	5	16,35	-7,91	561	18,16
4	6	1,41	-6,52	1922	6,67
4	7	11,15	-25,44	343	27,77
4	8	3,69	-18,30	311	18,67
4	9	-0,95	-17,48	252	17,51
4	10	-5,14	-9,31	70	10,63
5	0	75,92	-39,18	14	85,43
5	1	35,79	-70,38	57	78,95
5	2	14,42	-30,68	195	33,90

5	3	7,60	-32,82	352	33,69
5	4	4,03	-37,68	379	37,89
5	5	1,04	-32,82	362	32,83
5	6	-4,81	-26,01	371	26,45
5	7	-3,70	-31,53	324	31,75
5	8	5,02	-20,73	239	21,33
5	9	-0,62	-26,27	139	26,28
5	10	-14,23	-8,73	53	16,70
6	0	43,88	-8,18	593	44,64
6	1	8,67	-32,84	842	33,97
6	2	-9,18	-34,89	1042	36,08
6	3	-9,57	-22,25	1071	24,22
6	4	-9,94	-23,51	1056	25,52
6	5	-9,58	-16,64	1013	19,20
6	6	-7,72	-12,54	1066	14,73
6	7	-11,57	-11,45	892	16,28
6	8	-11,37	-9,95	858	15,11
6	9	-12,10	-10,14	717	15,78
6	10	-17,94	-9,86	259	20,47
7	0	45,77	2,11	918	45,82
7	1	15,96	-4,52	1186	16,59
7	2	-6,44	-4,39	1389	7,80
7	3	-12,93	-4,11	1428	13,57
7	4	-5,66	-10,39	1363	11,83
7	5	-0,48	-10,35	1174	10,36
7	6	-5,68	-7,66	1054	9,53
7	7	-8,54	-9,32	944	12,63
7	8	-9,83	-7,48	846	12,35
7	9	-12,78	-9,16	653	15,73
7	10	-8,52	-4,45	304	9,61
8	0	4,98	10,80	1214	11,90
8	1	1,50	32,78	1245	32,82
8	2	-1,86	21,26	1299	21,34



8	3	-1,80	2,67	1190	3,22
8	4	-0,21	-6,80	1140	6,80
8	5	0,58	-5,37	1410	5,41
8	6	3,28	-8,01	1170	8,66
8	7	-2,91	-6,01	1235	6,68
8	8	3,00	-4,42	908	5,34
8	9	-3,27	-7,49	540	8,17
8	10	-1,99	-10,22	302	10,41
9	0	-42,04	3,46	1154	42,18
9	1	-9,99	1,55	1306	10,11
9	2	5,30	-2,13	1322	5,71
9	3	8,90	-7,23	1371	11,47
9	4	7,93	-7,50	1334	10,92
9	5	2,52	-6,67	1808	7,13
9	6	0,83	-6,73	1552	6,78
9	7	2,42	-4,42	1252	5,04
9	8	5,66	-8,61	914	10,31
9	9	4,95	-10,84	509	11,92
9	10	7,82	-8,95	228	11,88
10	0	-35,07	0,47	1889	35,07
10	1	-12,73	-32,96	1360	35,34
10	2	5,23	-35,32	1238	35,71
10	3	9,96	-29,81	1183	31,43
10	4	5,68	-25,08	1494	25,72
10	5	9,17	-16,04	1690	18,47
10	6	8,27	-8,94	1554	12,18
10	7	9,06	-9,54	1466	13,16
10	8	8,33	-12,24	1027	14,80
10	9	10,61	-10,83	625	15,17
10	10	2,88	-11,78	262	12,12
11	2	-50,42	-29,24	17	58,29
11	3	-10,82	-33,19	187	34,90
11	4	-9,25	-33,93	478	35,17

11	5	-8,84	-29,49	568	30,78
11	6	-10,26	-36,34	518	37,76
11	7	-2,25	-29,05	465	29,14
11	8	0,88	-22,44	466	22,46
11	9	-1,32	-25,51	428	25,55
11	10	5,50	-27,39	184	27,94
12	0	56,65	4,95	565	56,86
12	1	15,25	-31,98	335	35,43
12	2	5,44	-30,74	397	31,22
12	3	-0,64	-23,94	512	23,95
12	4	-4,89	-25,36	726	25,83
12	5	-7,20	-22,03	943	23,18
12	6	-8,59	-18,86	788	20,73
12	7	-4,50	-19,00	922	19,53
12	8	-4,20	-23,58	919	23,95
12	9	0,70	-18,49	636	18,50
12	10	3,95	-13,94	343	14,49
13	0	32,00	-1,83	2178	32,05
13	1	9,82	-7,23	1006	12,19
13	2	1,17	-2,94	1080	3,16
13	3	-2,47	3,84	1195	4,57
13	4	-9,24	7,11	1406	11,66
13	5	-13,22	4,39	1372	13,93
13	6	-7,27	-4,83	1273	8,73
13	7	-7,18	-11,17	1251	13,28
13	8	-3,50	-17,52	959	17,87
13	9	0,92	-17,94	843	17,96
13	10	0,88	-10,84	332	10,88
14	0	5,78	6,49	932	8,69
14	1	-1,24	53,92	317	53,93
14	2	-3,53	51,75	485	51,87
14	3	-3,27	55,99	477	56,09
14	4	-11,60	40,14	489	41,78

14	5	-9,57	15,09	600	17,87
14	6	-5,56	-2,98	592	6,31
14	7	-6,22	-11,30	543	12,90
14	8	-2,00	-18,28	541	18,39
14	9	-3,85	-14,61	325	15,11
14	10	0,45	-15,79	76	15,80