

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Jéssika de Oliveira Alves

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE  
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE ESCOAMENTO BASEADO  
EM VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)

São Carlos – Novembro de 2013

Jéssika de Oliveira Alves

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE  
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE ESCOAMENTO BASEADO  
EM VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS (PIV)

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo como  
parte dos requisitos para graduação  
em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Gherhardt Ribatski

São Carlos – Novembro de 2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A474d

Alves, Jéssika de Oliveira

Desenvolvimento de um programa de processamento e  
análise de escoamento baseado em velocimetria por  
imagem de partículas (PIV) / Jéssika de Oliveira  
Alves; orientador Prof. Gherhardt Ribatski. São  
Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2013.

1. Velocimetria,. 2. Processamento de imagens. 3.  
Correlação cruzada. 4. PIV. I. Título.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidata: Jéssika de Oliveira Alves

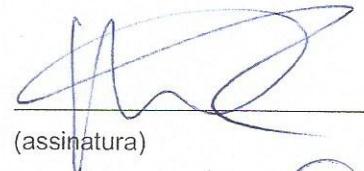
Título: Desenvolvimento de um programa de processamento e análise de escoamento baseado em Velocimetria por imagem de partículas (PIV)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecatrônica.

### BANCA EXAMINADORA

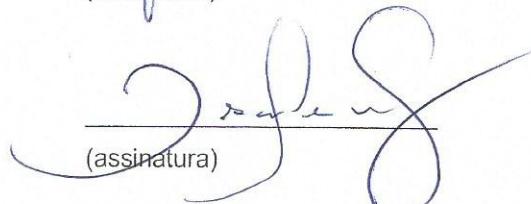
Prof. Dr. Gherhardt Ribatski (orientador)

Nota atribuída: 9,0 (NOVE)

  
(assinatura)

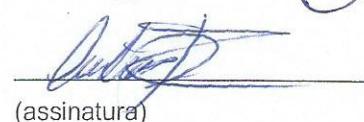
Prof. Dr. Oscar Maurício Hernandez Rodriguez

Nota atribuída: 8,0 (oito)

  
(assinatura)

Dr. Cristiano Bigonha Tibiriçá

Nota atribuída: 10,0 (DEZ)

  
(assinatura)

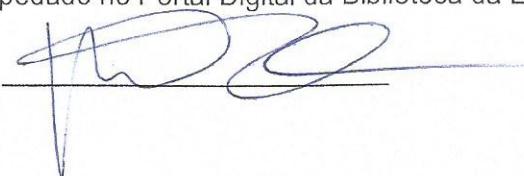
Média: 9,0 (NOVE)

Resultado: A PROVADO

Data: 09/12/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM  NÃO  Visto do orientador



## Agradecimentos

A Deus, por ter sempre iluminado e guiado meus caminhos, por ter me inspirado a nunca desistir dos meus sonhos, por ter me auxiliado a alcançar sucesso nas minhas realizações e principalmente por ter me proporcionado as experiências que fizeram de mim quem eu sou hoje.

Ao meu pai Odair Alves Teixeira e à minha mãe Luciana Mumic de Oliveira Alves, pelo apoio incondicional dedicado ao longo de toda a vida, e principalmente nas escolhas mais importantes e momentos mais difíceis.

Aos meus familiares, pelas orações e desejos de que eu obtivesse êxito em todas as tarefas que me propus cumprir.

Aos meus amigos, pelo suporte e companhia, e em especial ao amigo Guilherme Arroyo Trídico, pelas palavras de motivação e incentivo concedidas no momento em que se fizeram mais necessárias, sem as quais o presente trabalho não teria sido realizado com tanta dedicação.

Ao meu gestor Bruno Pereira de Abreu, pelas horas de estágio cedidas para a execução e consolidação deste trabalho, e principalmente pelos conselhos e orientações, que me proporcionaram a determinação que eu precisava encontrar.

Ao mestrando Francisco Antonio Loyola Lavin, pelo auxílio com a compreensão do processo de análise da técnica e por ter concedido a utilização das imagens dos experimentos de  $\mu$ -PIV realizados em seu trabalho de qualificação.

Ao professor Gherhardt Ribatski, pela orientação no trabalho de Iniciação Científica desenvolvido durante dois anos da Graduação, pela orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso e por ter me transmitido os conceitos de empenho e excelência no desenvolvimento dos trabalhos, o que incorporei como metas a serem atingidas em todas as minhas realizações.

## **Resumo**

A compreensão dos mecanismos que regem o escoamento de fluidos é busca constante de pesquisadores, que procuram aperfeiçoar sistemas das mais diversas áreas de aplicação. A técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (*Particle Image Velocimetry - PIV*), por ser uma ferramenta de medição quantitativa de campos de velocidade de escoamentos, apresenta grande relevância na investigação do comportamento de fluidos. O presente trabalho contemplou uma revisão bibliográfica acerca desta técnica, o desenvolvimento de um programa dedicado ao processamento e à análise de imagens de PIV e a aplicação deste programa a imagens de experimentos de  $\mu$ -PIV (PIV para microcanais). O programa implementado na plataforma de programação gráfica do Labview realiza o tratamento das imagens experimentais, seguido pela definição das regiões de análise, e finalmente a análise em si, que fornece os vetores de deslocamento do fluido. Os resultados obtidos foram coerentes com o escoamento do fluido durante os experimentos, e o programa obteve sucesso nas análises. Assim, foi constatado que o produto deste trabalho atendeu aos requisitos e pode ser utilizado na obtenção do campo de velocidades do escoamento através da técnica do PIV.

Palavras-chave: velocimetria, processamento de imagens, correlação cruzada, PIV.

## **Abstract**

Understanding the mechanisms that govern the fluid flow is constant quest for researchers who seek to improve systems from different application areas. The Particle Image Velocimetry – PIV technique, for being a tool for quantitative measurement of flow velocity field, it is highly relevant in the investigation of fluids behavior. The present work included a review of literature concerning this technique, the development of software dedicated to the processing and analysis of PIV images and the application of this program to images of  $\mu$ -PIV experiments (PIV in micro channels). The software implemented in Labview graphical programming platform performs the treatment of experimental images followed by the definition of analysis regions, and finally the analysis itself, which provides the fluid displacement vectors. The results obtained were consistent with the flow developed by the fluid during the experiments, and the software was successful in most part of analysis. Thus, it was found that the product of this study met the requirements well and can be used in obtaining the results of the PIV technique.

Keywords: velocimetry, image processing, cross correlation, PIV.

## **Lista de Figuras**

FIGURA 1 – ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE PIV, ADAPTADO DE [2] .....	3
FIGURA 2 – ESQUEMA DO ARRANJO EXPERIMENTAL USADO PARA GERAR A FOLHA DE LUZ, ADAPTADO DE [2].....	4
FIGURA 3 – QUADROS DE REGISTRO DE IMAGEM E PULSOS DE ILUMINAÇÃO, ADAPTADO DE [3] .....	7
FIGURA 4 – ANÁLISE DAS IMAGENS ATRAVÉS DE CORRELAÇÃO CRUZADA, ADAPTADO DE [5] .....	11
FIGURA 5 – ALGA FLUTUANDO NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA ATUA COMO MARCADOR PARA VELOCIMETRIA [6].....	12
FIGURA 6 – ANÁLISE DE UMA MALHA DE REGIÕES DE INTERROGAÇÃO, ADAPTADO DE [6] ...	16
FIGURA 7 – MEDIÇÃO REALIZADA ATRAVÉS DO PIV [26] .....	21
FIGURA 8 – VISUALIZAÇÃO DO FLUXO NA RAIZ DA AORTA. (A) VÁLVULA DE TECIDO SUÍNO ST VINCENT; (B) VÁLVULA DE DISCO BASCULANTE BJÖRK-SHILEY E (C) VÁLVULA DE ESFERA EM GAIOLA STARR EDWARDS [31] .....	23
FIGURA 9 – CAMPO DE VETORES DE VELOCIDADE DO PIV. (A) VÁLVULA DE TECIDO SUÍNO ST VINCENT; (B) VÁLVULA DE DISCO BASCULANTE BJÖRK-SHILEY; (C) VÁLVULA DE DISCO BASCULANTE ST VINCENT E .....	23
FIGURA 10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO APARATO EXPERIMENTAL E LEGENDA DOS COMPONENTES [32].....	25
FIGURA 11 – CONJUNTO DE PLACAS DA SEÇÃO DE TESTE [32].....	26
FIGURA 12 – DETALHE DAS PLACAS DA SEÇÃO DE TESTE [32].....	26
FIGURA 13 – CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	28
FIGURA 14 – SEÇÃO DE TESTE UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS .....	28
FIGURA 15 – PAR DE IMAGENS DO EXPERIMENTO DE $\mu$ -PIV .....	29
FIGURA 16 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA LÓGICA DO PROGRAMA .....	31

FIGURA 17 – VISUALIZAÇÃO DAS IMAGENS ORIGINAL E TRATADA .....	34
FIGURA 18 – ILUSTRAÇÃO DA CONVERSÃO DE IMAGEM PARA MATRIZ .....	36
FIGURA 19 – PROCESSO DE DEFINIÇÃO DA MALHA DE REGIÕES DE INTERROGAÇÃO .....	37
FIGURA 20 – IMAGENS ELABORADAS PARA VALIDAR E IDENTIFICAR O FUNCIONAMENTO DA CORRELAÇÃO 2D .....	39
FIGURA 21 – PAINEL FRONTAL INDICANDO OS DESLOCAMENTOS EM PIXELS OBTIDOS PELA CORRELAÇÃO .....	40
FIGURA 22 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE E MAPA DE CONTORNO DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA AS IMAGENS DE VALIDAÇÃO .....	41
FIGURA 23 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE E MAPA DE CONTORNO DA CORRELAÇÃO CRUZADA PARA UMA REGIÃO DE INTERROGAÇÃO DE IMAGENS DO PIV .....	43
FIGURA 24 – CAMPOS DE VETORES DOS DESLOCAMENTOS DAS REGIÕES DE INTERROGAÇÃO PARA DIFERENTES PARES DE IMAGENS DO $\mu$ -PIV .....	45
FIGURA 24 (CONTINUAÇÃO) – CAMPOS DE VETORES DOS DESLOCAMENTOS DAS REGIÕES DE INTERROGAÇÃO PARA DIFERENTES PARES DE IMAGENS DO $\mu$ -PIV .....	46
FIGURA 24 (CONTINUAÇÃO) – CAMPOS DE VETORES DOS DESLOCAMENTOS DAS REGIÕES DE INTERROGAÇÃO PARA DIFERENTES PARES DE IMAGENS DO $\mu$ -PIV .....	47

## **Lista de Símbolos**

$V$ : velocidade da região de interrogação [m/s];

$d_p$ : distância percorrida pelas partículas na região de interrogação analisada [pixels];

$R$ : relação de conversão [m/pixels];

$fps$ : frequência de aquisição da câmera [ $s^{-1}$ ]

$\alpha$ : variável de incremento utilizada na função da correlação cruzada [ ];

$\beta$ : variável de incremento utilizada na função da correlação cruzada [ ];

$\otimes$ : símbolo matemático que denota correlação.

# **Sumário**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULA.....</b>	<b>3</b>
2.1. MODOS DE OPERAÇÃO .....	5
2.2. ILUMINAÇÃO .....	6
2.3. REGISTRO DE IMAGENS.....	9
2.4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE.....	9
<b>3. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO.....</b>	<b>12</b>
<b>4. APLICAÇÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>5. EXPERIMENTOS.....</b>	<b>24</b>
5.1. APARATO EXPERIMENTAL .....	24
5.2. OBTENÇÃO DAS IMAGENS.....	28
<b>6. PROCESSAMENTO E ANÁLISE .....</b>	<b>30</b>
6.1. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA .....	30
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO A – PAINEL FRONTAL DO PROGRAMA.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO B – DIAGRAMA DE BLOCOS DE COMANDO DO PROGRAMA.....</b>	<b>54</b>



## 1. Introdução

A compreensão do escoamento dos fluidos e os respectivos mecanismos de transferência de quantidade de movimento atraem a curiosidade e o interesse do homem desde os primórdios da história, de forma a entender os fenômenos envolvidos e devido à sua importância em diversos setores industriais e aplicações.

Essa busca ainda é objeto de interesse de muitos pesquisadores, que atualmente desejam não somente compreender o fenômeno, mas desvendar os mecanismos físicos envolvidos e modelar os escoamentos a fim de desenvolver e aperfeiçoar sistemas das mais diversas áreas de aplicação.

Exemplo da procura para entender os princípios que regem os fluídos é Leonardo da Vinci. No final do século XV, em busca de uma solução para explicar a enchente que devastou a província de Milão, na Itália, ficou por dias nas margens dos canais, acrescentando à água pedras de diferentes formas e tamanhos e observando o que estava acontecendo em seu fluxo [1].

Desde então, diversas observações de eventos naturais contribuíram para a evolução do estudo de escoamentos. Surgiram teorias e métodos de análise, entretanto, com o advento de novas aplicações, fizeram-se necessárias novas técnicas de avaliação e medição.

As técnicas ópticas para medição de escoamento têm sido desenvolvidas ao longo das últimas três décadas em uma poderosa alternativa aos métodos convencionais de medição. Os significativos avanços alcançados no campo da tecnologia de processamento de imagem levaram à extração de informações quantitativas com alta resolução espacial e boa precisão.

A aplicação dessas técnicas ganhou impulso com o desenvolvimento do LSV (*Laser Speckle Velocimetry*) e do PIV (*Particle Image Velocimetry*). Devido a algumas limitações do LSV, o PIV passou a ser visto como uma técnica promissora e uma das

ferramentas mais poderosas para a medição quantitativa de campos de velocidade de escoamentos, sendo por esta importância o objeto de estudo deste trabalho.

## 2. Velocimetria por Imagem de Partícula

A técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (*Particle Image Velocimetry - PIV*) está inserida no contexto de técnicas ópticas aplicadas a investigação de escoamentos. Como vantagem se destacam os fatos de ser uma técnica de medição não-intrusiva e levantar o campo de velocidades do escoamento, ou seja, apresenta a capacidade de medir a velocidade em diversos pontos simultaneamente, e não em apenas um ponto.

A técnica de PIV consiste basicamente em inserir partículas no fluido de testes e, assumindo que o movimento das partículas representa o deslocamento do fluido, obtém-se imagens do escoamento com intervalo de tempo entre elas definido. A partir das imagens, é possível analisar o deslocamento das partículas de uma imagem para outra, e assim, conhecendo-se o tempo que as partículas levaram para se deslocar (tempo entre as imagens), obtém-se os vetores de velocidade.

Um sistema básico necessário para a realização das medições encontra-se ilustrado na Fig. 1 e é composto por sistemas de iluminação das partículas no campo do escoamento, captura de imagens, e processamento e análise, capaz de tratar as imagens, identificar as partículas e analisar seus deslocamentos entre as imagens.

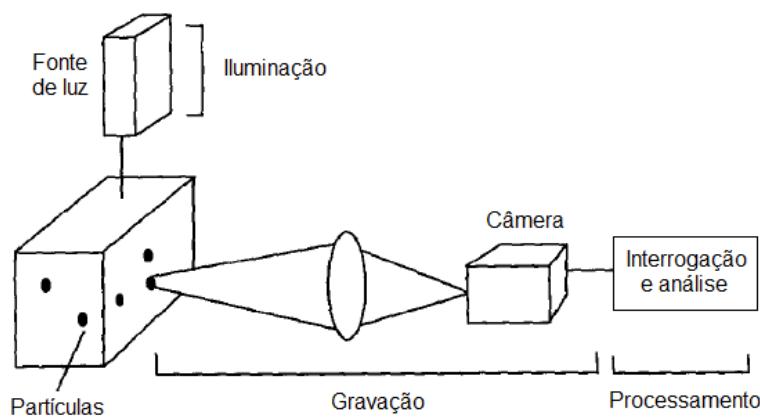


Figura 1 – Elementos de um sistema de PIV, adaptado de [2]

A luz de laser é frequentemente utilizada como fonte de iluminação, uma vez que pode ser facilmente manipulada por dispositivos óticos necessários para iluminar as partículas em uma folha fina do escoamento.

A Fig. 2 ilustra um arranjo experimental típico para a geração de uma folha de luz segundo Kurada *et al.* [2]. A folha de luz é formada passando um feixe de laser pulsado através de uma lente cilíndrica, que espalha o feixe de saída em uma direção. Então, uma segunda lente, geralmente esférica, é usada para controlar o desvio da folha de luz e reduzir a sua espessura. O eixo da câmera deve ser perpendicular ao plano iluminado, de modo que o plano de foco da lente fotográfica coincida com a parcela iluminada do fluido.

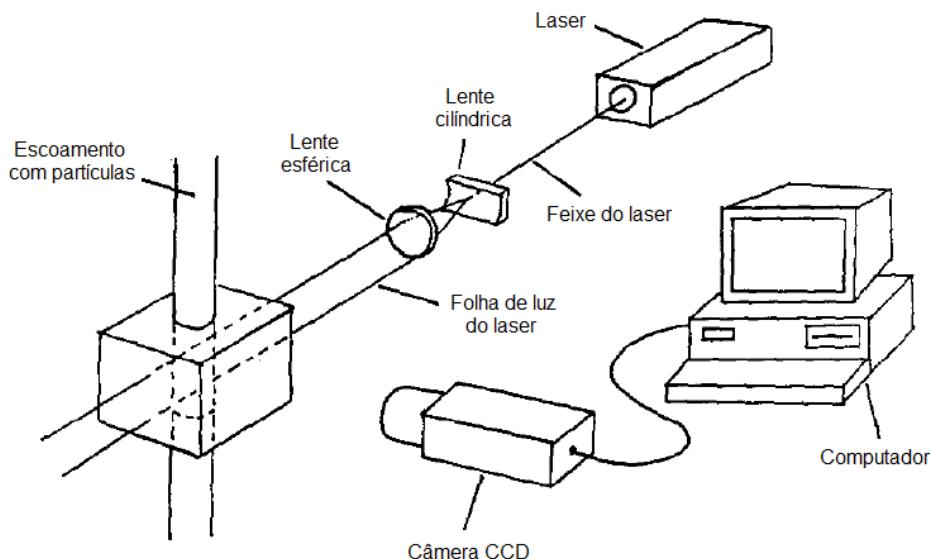


Figura 2 – Esquema do arranjo experimental usado para gerar a folha de luz, adaptado de [2]

A luz difundida pelas partículas do plano iluminado é registrada pela câmera, de maneira que sucessivos momentos são gravados em uma fotografia de múltipla exposição ou, no caso das câmeras digitais, uma imagem é gravada para cada momento e posteriormente armazenada na memória do computador.

A análise do campo das imagens gravadas é um dos passos mais importantes em todo o processo, pois juntamente com a aquisição de imagem, determina a precisão, confiabilidade e resolução espacial das medições, além de ser também a parte mais

demorada do processo. A análise de imagem será abordada detalhadamente nos próximos itens.

## 2.1. Modos de Operação

Segundo Adrian [3], de um modo geral, o sistema e os procedimentos utilizados para aplicação da velocimetria são semelhantes para cada uma das técnicas que utilizam partículas como marcadores do escoamento do fluido. Entretanto, é conveniente entender os diferentes modos de operação da técnica. As diferenças entre o PIV (*Particle Image Velocimetry*) e o LSV (*Laser Speckle Velocimetry*) estão relacionadas principalmente com os efeitos do valor médio de concentração de partículas dispersas por unidade de volume.

### **Modo *Laser Speckle***

O *laser speckle* é um fenômeno no qual ocorre a dispersão da luz do laser, que ao incidir em uma superfície rugosa, ou no caso, o fluido não homogêneo (com partículas dispersoras), gera uma distribuição randômica de intensidade da luz, provocando na superfície uma aparência granulada.

No modo *laser speckle*, a concentração de partículas dispersas no fluido é tão elevada de forma que as partículas se sobrepõem no plano da imagem, formando um padrão de granulação. Assim, a velocidade pode ser medida através da identificação do deslocamento do padrão de granulação, e esse modo é chamado de *Laser Speckle Velocimetry* (LSV).

### **Modo de rastreamento de partícula**

Neste modo a concentração de partículas é reduzida o suficiente para tornar improvável a obtenção de imagens de partículas sobrepostas. Com a baixa concentração de dispersores, são obtidas imagens com partículas escassas,

permitindo a viabilidade de rastrear as partículas individualmente na medição dos deslocamentos. Esta técnica é também referenciada na literatura como *Particle Tracking Velocimetry* (PTV).

### **Modo PIV de alta densidade de imagem**

Este modo se verifica quando a concentração de partículas é intermediária entre as concentrações dos modos LSV e PTV. As concentrações são elevadas o suficiente para garantir que as regiões de análise do campo da imagem contenham muitas partículas, entretanto são inferiores ao modo LSV, evitando a sobreposição e a formação do padrão granulado.

Apesar deste modo tornar a identificação do deslocamento das partículas um procedimento complexo e demorado, permite aumentar a resolução e precisão do método por promover a obtenção de mais vetores de velocidade no campo do escoamento.

## **2.2. Iluminação**

Vários códigos de pulsos de iluminação podem ser empregados no PIV, segundo Adrian [3], como ilustra a Fig. 3. Nela a intensidade de iluminação é ilustrada como uma função do tempo, e os padrões resultantes de imagem a partir de uma única partícula são apresentados nos quadros. No caso de captura de imagem única, as imagens de vários pulsos são sobrepostas em um registro que pode consistir de um filme ou de uma imagem eletrônica. O registro de múltiplas imagens pode ser obtido através de filme cinematográfico ou sequências de quadros de vídeos.

A principal função do código de pulso consiste em gerar imagens em dois tempos precisamente determinados, separadas por  $\Delta t$ , a partir do qual  $\Delta x$  pode ser medido. O propósito do registro de múltiplas imagens é para proporcionar um histórico de tempo sequencial da velocidade ou para facilitar a análise de imagem.

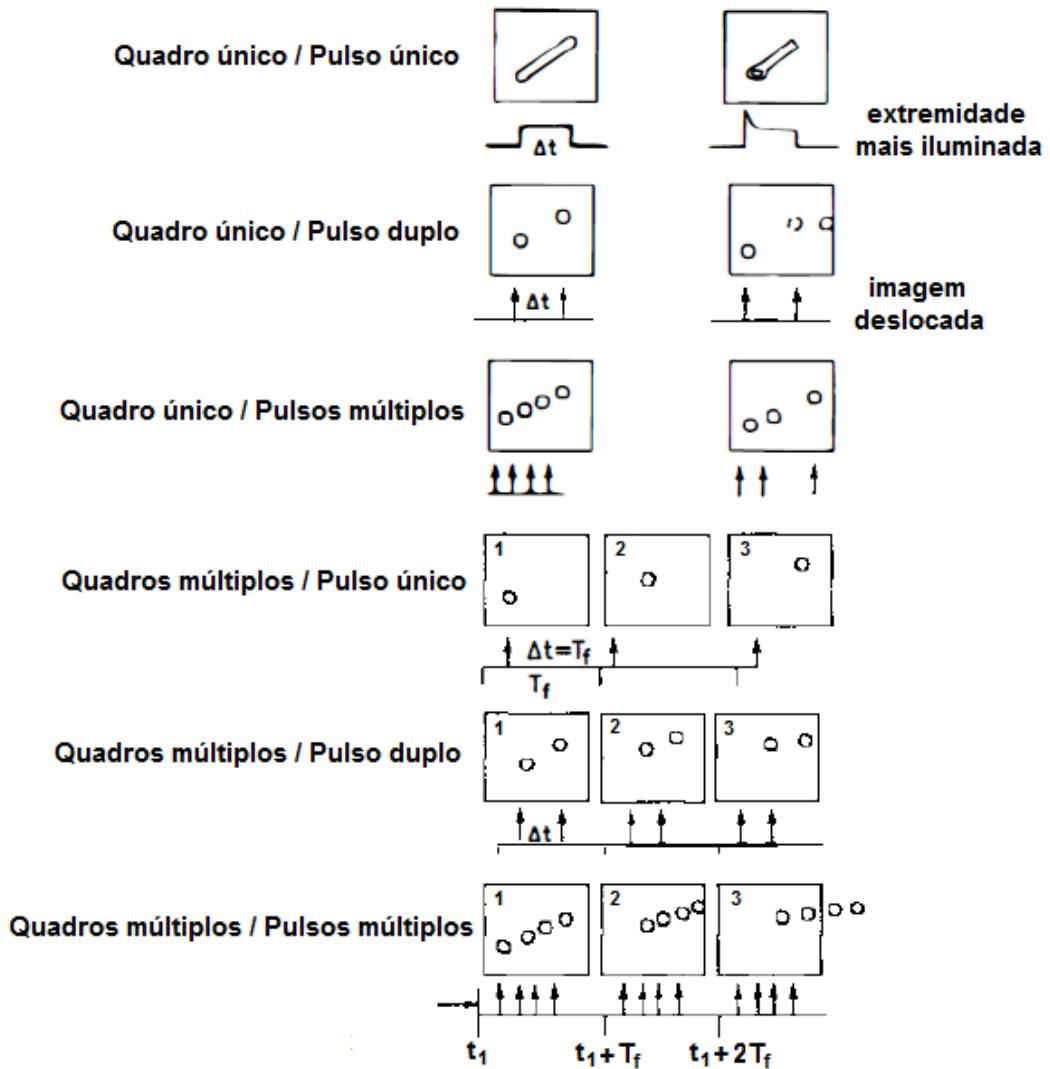


Figura 3 – Quadros de registro de imagem e pulsos de iluminação, adaptado de [3]

O tempo de separação entre imagens,  $\Delta t$ , é uma variável importante de ajuste em um sistema PIV, pois determina as velocidades máximas e mínimas que podem ser medidas. A duração dos pulsos de luz,  $\delta t$ , determina o período em que uma imagem é congelada durante a exposição de pulso e consequentemente a definição da imagem.

Fontes de luz constante, como as lâmpadas comuns ou lasers CW podem ser moduladas para formar os pulsos, mas isto provoca perdas de energia elevadas. Desta forma, torna-se mais eficiente utilizar fontes pulsadas como lâmpadas de flash ou lasers pulsados.

Lâmpadas de flash de Xenon podem emitir centenas de joules em pulsos com duração de até 1  $\mu$ s, mas apenas uma fração reduzida dessa energia pode ser utilizada para formar uma folha de luz fina e de alta qualidade devido a limites inerentes ao processo de colimar os raios de luz provenientes de uma fonte estendida.

Lasers pulsados emitem energia em feixes colimados que podem ser eficientemente transformados em folhas de luz. Lasers pulsados de vapor de metal produzem pulsos verdes de 10 ns repetidamente em frequências livres na faixa de 5 a 20 kHz e energias da ordem de 10 mJ. O tempo entre os pulsos pode ser estendido através da substituição da frequência livre de funcionamento por uma sequência de pulsos adequada para um breve período.

Lasers pulsados de rubi produzem pulsos fluorescentes de 3 a 5 ms de duração e comprimento de luz de 699,3 nm, que podem ser alterados para produzir pulsos de 25 ns com energias da ordem de 1 a 10 J. Os pulsos duplos podem ser separados por  $\Delta t$ 's entre 1  $\mu$ s e 1 ms. Porém, o tempo para recarregar o banco de capacitores utilizados na transformação dos pulsos é longo, de modo que os lasers de rubi normalmente não disparam pulsos duplos com frequência superior a 1 pulso/minuto.

Lasers Nd:Yag podem disparar pulsos de 10 ns de duração e 532 nm de comprimento de onda, de maneira repetitiva a taxas de até 50 Hz. Dois lasers podem ser combinados para produzir sequências periódicas de pulsos duplos, adequadas para a aquisição de múltiplas imagens em frequências de 10 a 50 Hz.

A energia de pulso inferior do laser Nd:Yag em relação ao laser de rubi é largamente compensada pelo comprimento de onda inferior, o que proporciona melhor dispersão e folhas de luz menos espessas. Assim, eles compõem os sistemas provavelmente mais versáteis considerando as fontes luminosas disponíveis.

## 2.3. Registro de imagens

As imagens das partículas podem ser capturadas através de filmes fotográficos, câmeras fotográficas digitais ou câmeras de vídeo de alta velocidade. Como será abordado na seção de desenvolvimento histórico da técnica, há alguns anos havia preferência pelo filme fotográfico porque apresentava resolução superior quando comparado às câmeras digitais ou de vídeo. Por outro lado, as câmaras de vídeo forneciam acesso imediato à informação e apresentavam elevada regularidade na localização das partículas.

Com os avanços tecnológicos, atualmente é possível encontrar câmeras digitais e câmeras de vídeo de alta resolução, e inclusive linhas especiais desenvolvidas para pesquisa aplicada. Alguns exemplos são: i) a câmera digital LaVision, que possui modelos com dispositivo de carga acoplado (CCD – charged couple device) e configuração para captura de duas imagens sequenciais para aplicação em PIV; e ii) a câmera de alta velocidade IDT, que também possui modelos próprios para PIV. Ambas são utilizadas por Shedd [4] em sua pesquisa.

É importante ressaltar que ao utilizar a iluminação por laser pulsado, é necessário que haja emissão do feixe de luz do laser para cada momento de aquisição das imagens, assim, o laser deve ser sincronizado com a captura de imagens pela câmera.

## 2.4. Processamento e análise

Após a aquisição das imagens do escoamento contendo partículas, é necessário primeiramente, efetuar procedimentos de tratamento de imagens para reconhecer as partículas e, posteriormente, mapear seus deslocamentos a fim de obter os vetores de velocidade do fluido.

Uma imagem digital possui diversos componentes individuais, que são denominados por elementos de imagem ou pixels. O valor numérico de cada pixel

representa a sua intensidade de cor em uma escala de tons de cinza. Assim, o conjunto de pixels da imagem forma uma matriz numérica.

Durante o processo de reconhecimento das partículas, cada imagem é melhorada através de algoritmos que realizam transformações na matriz numérica. Geralmente são empregadas rotinas de intensificação do contraste e diminuição de ruídos, a fim de evitar que imperfeições da imagem sejam erroneamente consideradas partículas.

As partículas geralmente apresentam-se como pontos luminosos em meio a um fundo escuro da imagem, assim, após o tratamento inicial, é aplicada uma rotina que detecta essa diferença de tonalidade: a binarização. O processo consiste em tornar todos os pixels com intensidade de cor superior à média com valor 1 (representando a cor branca) e todos os pixels de intensidade inferior à média com valor 0 (representando a cor preta).

Posteriormente, os pares de imagens capturadas com um tempo de separação  $\Delta t$  são submetidos a um algoritmo de correlação cruzada bidimensional. Para tal, as imagens são divididas em uma malha de regiões de interrogação, ou regiões de análise. O algoritmo realiza a correlação cruzada dentro de cada região entre a primeira e a segunda imagem.

A função da correlação cruzada bidimensional retorna um pico para determinada região de análise, e esse pico corresponde ao deslocamento médio  $\Delta x$  das partículas da primeira para a segunda imagem naquela região. Ao dividir o valor do deslocamento pelo tempo  $\Delta t$  entre as imagens, é obtido um valor médio de velocidade para as partículas da região analisada. A Fig. 4 ilustra o processo.

Depois que o programa calcula os valores médios de velocidade para cada região de análise, é possível aplicar o processo novamente definindo regiões menores e utilizando os vetores já encontrados como valores iniciais, a fim de melhorar a precisão do método e a resolução dos vetores.

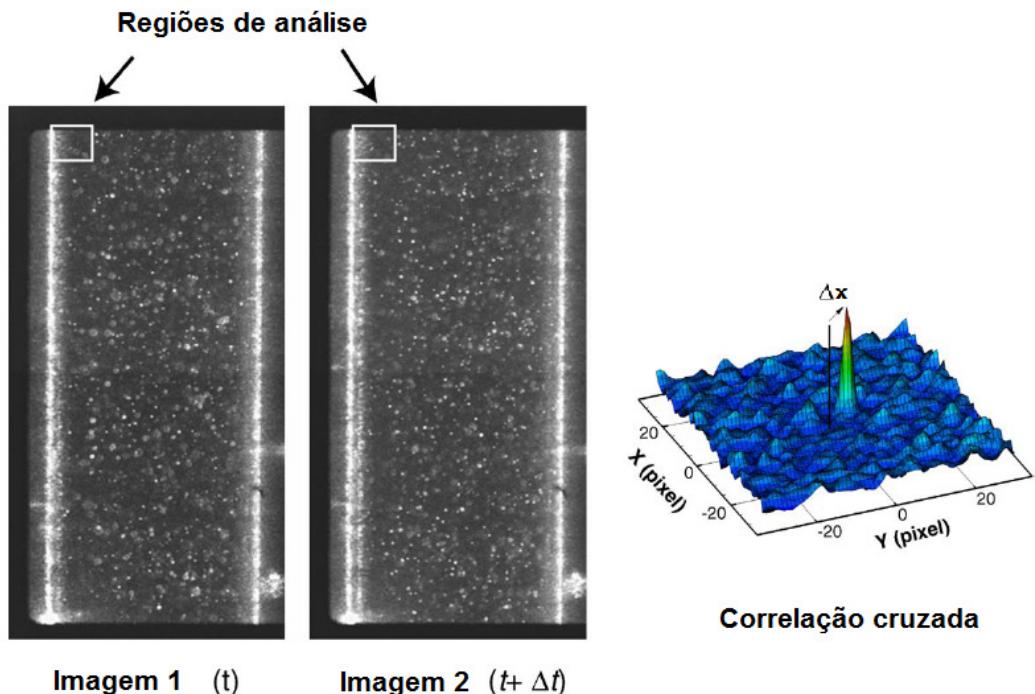


Figura 4 – Análise das imagens através de correlação cruzada, adaptado de [5]

### 3. Desenvolvimento histórico

Segundo Adrian [6], a forma mais rudimentar do PIV ocorreu quando pela primeira vez uma pessoa que conhecia o conceito de velocidade observou detritos se movendo na superfície de um escoamento.

Por exemplo, a Fig. 5 ilustra algas flutuando sobre a água, que ao movimentar-se cria padrões na superfície. Um observador atento poderia verificar o potencial de visualização e até medição da velocidade de superfície através do deslocamento das partículas de alga, que constitui o princípio básico do PIV. Entretanto, o conceito do PIV é mais complexo do que esse simples exemplo. A técnica atualmente consiste na medição quantitativa e precisa de vetores da velocidade do fluido em diversos pontos do escoamento simultaneamente.

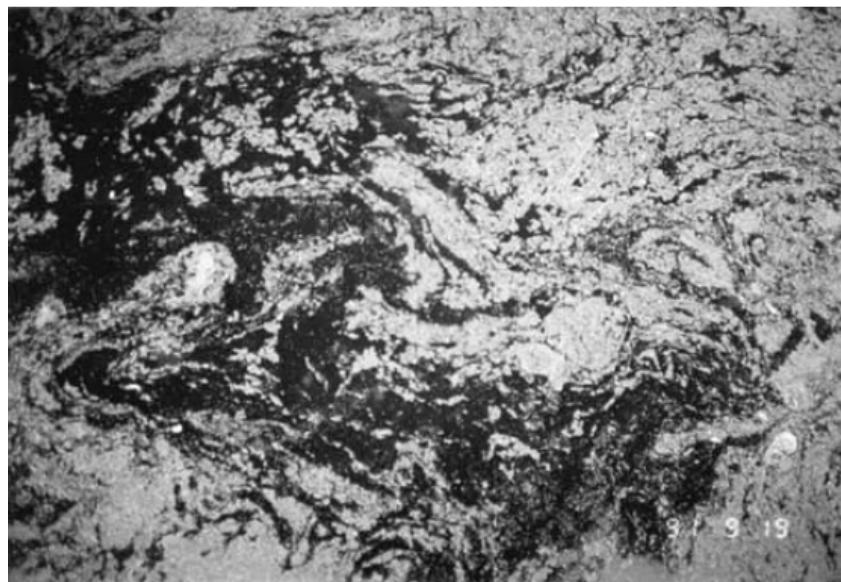


Figura 5 – Alga flutuando na superfície da água atua como marcador para velocimetria [6]

Os primeiros investigadores a efetuar esse tipo de medição utilizaram na verdade o método de *laser speckle*, originalmente desenvolvido para aplicações em mecânica dos sólidos, e mostraram que poderia ser aplicado na medição de campos de velocidade de fluidos.

Em 1977, três grupos de pesquisa distintos, Barker e Fourney [7], Dudderar e Simpkins [8], e Grousson e Mallick [9], demonstraram independentemente a viabilidade de aplicar o fenômeno do *laser speckle* ao escoamento de fluidos através da medição do perfil parabólico do escoamento laminar no interior de um tubo. Os principais elementos de seus experimentos foram o uso de fotografias de exposição dupla e iluminação com folha de laser planar.

Em 1983, Meynart [10] demonstrou que medições práticas poderiam ser realizadas em escoamentos laminar e turbulento de líquidos e gases, despertando grande interesse da comunidade de mecânica dos fluidos.

Apesar de Meynart ter denominado seu trabalho de *laser speckle velocimetry* (LSV), as imagens de seus artigos constantemente continham partículas individuais ao invés de granulações (*speckles*).

O primeiro reconhecimento explícito da importância de imagens de partícula foi feito em dois artigos contemporâneos, de Pickering e Halliwell [11] e Adrian [12]. Adrian argumentou que a iluminação de partículas em escoamentos de fluidos por uma folha de luz raramente criaria um padrão de granulação no plano de imagem. Em vez disso, o plano conteria imagens de partículas individuais. O nome *particle image velocimetry* (PIV) foi proposto para distinguir esse modo de operação do modo de *laser speckle*.

Foi definido um critério simples através do qual é possível prever a ocorrência de um modo ou do outro usando um número adimensional denominado *source density*, ou ainda, densidade de partículas. Esse número é igual ao número médio de partículas em um volume de resolução, e o número de imagens sobrepostas no plano da imagem pode ser expresso em termos desse adimensional.

Para fluidos, a concentração admissível de dispersores é normalmente insuficiente para produzir densidades de partículas elevadas o suficiente para gerar padrões granulados, que são formados por meio de imagens que se sobrepõem. As concentrações mais elevadas de partículas não são viáveis ou não são desejáveis

dinamicamente. Assim, é mais provável a obtenção de imagens das partículas ao invés de padrões granulados.

O PIV despertou o interesse de muitos pesquisadores por oferecer um meio novo e altamente promissor de estudar a estrutura do escoamento turbulento. Esse objetivo influenciou fortemente as escolhas tomadas durante o desenvolvimento do método.

A turbulência é um fenômeno que ocorre sobre larga faixa de escalas físicas e apresenta um comportamento aleatório, o que aumenta a dificuldade de determinar a direção do escoamento. Assim, a técnica de medição precisa ser adequada a diferentes escalas e capaz de caracterizar o escoamento em todas as direções.

Como a turbulência muitas vezes ocorre em elevados números de Reynolds, geralmente o fluido escoa a altas velocidades, assim, as acelerações são elevadas e as partículas devem ser suficientemente pequenas para seguir o fluxo na presença das acelerações locais e aleatórias. A seção transversal de espalhamento de luz de tais partículas exige o uso de alta intensidade de iluminação, que juntamente com as exposições de curto tempo necessárias para capturar as imagens das partículas finas sem desfoco, levam à utilização dos lasers pulsados.

Embora tais recursos fossem necessários para o estudo do escoamento turbulento, as competências proporcionadas durante seu desenvolvimento foram úteis em uma ampla gama de problemas de escoamentos de fluidos. Consequentemente, o padrão do sistema básico de PIV agora consiste de um laser pulsado com uma folha de luz iluminando partículas de poucos mícrons de diâmetro em gases e de algumas dezenas de mícrons em líquidos.

A energia necessária para iluminar as partículas finas e produzir imagens com exposição e clareza suficientes foi uma questão importante no desenvolvimento do PIV. Para a técnica de velocimetria de laser Doppler, havia um bom entendimento da dispersão da luz e dos tamanhos de partícula necessários para acompanhar os escoamentos turbulentos. Segundo Adrian [6], a partir desta experiência prévia, foi possível calcular a exposição que resultaria na obtenção de imagens adequadas. Em

particular, foi possível comprovar que o laser pulsado proporcionaria energia suficiente para obter boas imagens fotográficas de partículas com apenas alguns micrões para escoamento de ar e partículas de 10-30  $\mu\text{m}$  para o escoamento de água.

Posteriormente, um grande passo para a prática do PIV foi utilizar lasers de pulso duplo. Eles produziram excelentes imagens de dupla exposição das partículas, quando eram utilizados filmes de alta resolução (300 linhas/mm).

O primeiro uso de lasers Nd:Yag ocorreu em 1986 (Kompenhans e Reichmuth [13]). Posteriormente, lasers Nd:Yag se tornaram disponíveis como produtos compactos incluindo dispositivo de refrigeração, e então passaram a ser um dos principais componentes do PIV.

A ideia de utilizar auto-correlação de imagens de dupla exposição contendo múltiplas partículas em regiões de interrogação reduzidas, em vez de medir o espaçamento e orientação das franjas de Young que se formam através da iluminação de tais regiões, foi proposta em 1983 (Sutton *et al.* [14]; Adrian e Yao [15]).

Neste método, a imagem total é dividida em uma malha de regiões de interrogação, e as partículas em cada região são analisadas a fim de obter o deslocamento médio das partículas em cada cela de interrogação, que consiste na interseção da área da região de interrogação e a espessura da folha de luz. O procedimento da auto-correlação pode ser observado na Fig. 6.

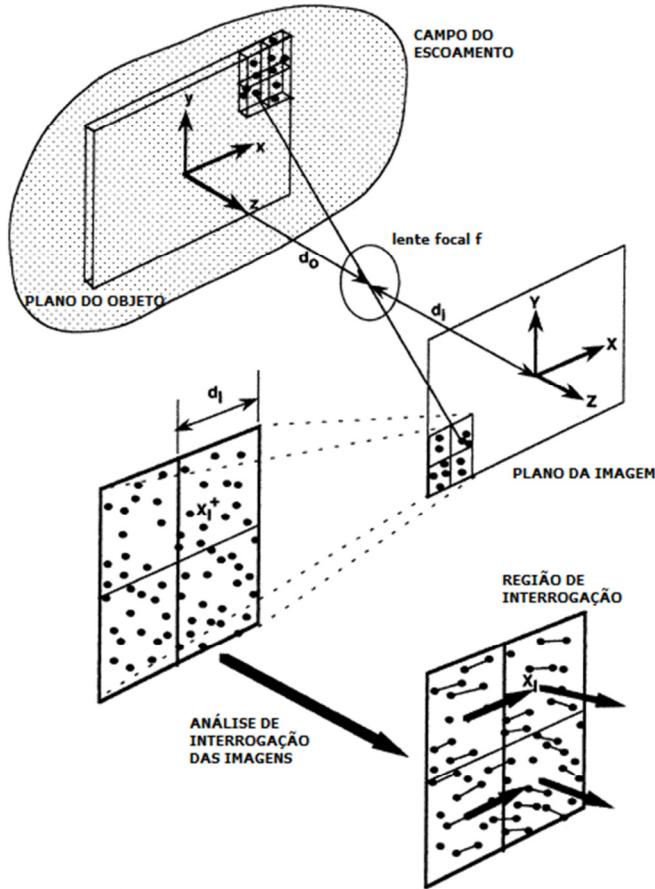


Figura 6 – Análise de uma malha de regiões de interrogação, adaptado de [6]

Análises do método da auto-correlação levaram à definição de um número adimensional denominado *image density*. Esse número é igual ao número médio de dispersores em uma cela de interrogação. Este adimensional se mostrou importante na descrição das características dos sistemas de PIV e na otimização do seu projeto. O limite mais baixo do número *image density* corresponde ao rastreamento de partículas, pois neste limite é improvável encontrar mais de um par de partículas por região. Já para valores superiores do número *image density*, ocorre a correlação de múltiplas partículas.

Durante a primeira década de desenvolvimento do PIV, devido à reduzida capacidade computacional da época, colocava-se como desafio o processo de interrogação das imagens. Em 1985, o computador geralmente utilizado em laboratórios possuía 128KB de memória RAM e disco rígido de 30MB. Assim, havia

grande dificuldade computacional em executar os programas, devido principalmente a pouca memória disponível.

Com esses recursos era praticamente impossível realizar transformadas de Fourier bidimensionais ou análises através de correlações bidimensionais. Assim, havia interesse considerável em métodos não estatísticos, como o rastreamento de partículas individualmente.

O rastreamento de partículas implicou em operar com baixos valores de *image density*, para que a probabilidade de encontrar mais de um par de partículas por região de interrogação fosse minimizada ao máximo. Então, usando o princípio de que as imagens de partículas próximas corresponderiam à mesma partícula, era possível efetuar medições bem sucedidas. A dificuldade deste método era que com valores de *image density* reduzidos, acompanhados de reduzidas concentrações de partícula, o número de vetores por unidade de área não era elevado o suficiente para resolver os campos de escoamentos turbulentos.

A fim de melhorar a resolução espacial, vários pesquisadores procuraram otimizar o método da baixa *image density* utilizando janelas de interrogação de tamanho, forma e deslocamentos variáveis. Isto levou à implementação de métodos adaptáveis de definição das janelas. Atualmente, métodos de janela ajustável são utilizados como meio para otimizar imagens de frame duplo com exposição única obtidas com câmeras digitais.

Na época em que Meynart realizou seu trabalho, a faixa de velocidade dinâmica da técnica, definida como a máxima velocidade mensurável dividida pela mínima velocidade mensurável, estava entre 5 e 10. Essa faixa dinâmica era reduzida, pois correspondia ao máximo deslocamento das imagens dividido pelo mínimo deslocamento que podiam ser medidos. Nas imagens de exposição dupla usadas na época, o deslocamento que ocorria entre a sobreposição das imagens era reduzido, não possibilitando o aumento da resolução da faixa dinâmica.

A ideia de aplicar um deslocamento espacial artificial na segunda imagem foi desenvolvida para melhorar a faixa de velocidade dinâmica e proporcionar meios de determinar a direção do deslocamento de partículas nas imagens de dupla exposição (Adrian [16]).

Neste método, as imagens eram registradas de maneira que a segunda imagem, ao ser registrada em sobreposição, era deslocada precisamente em uma direção conhecida e então a direção do fluido poderia ser determinada sem ambiguidade. Além disso, a probabilidade da mesma partícula ser sobreposta era zero, o que resolveu o problema da faixa dinâmica limitada. Ao eliminar a sobreposição das imagens de partículas em pequenos deslocamentos, a faixa dinâmica aumentou para valores entre 100 e 200, o que é elevado o bastante para permitir boas medições.

Uma das mudanças mais importantes na técnica do PIV foi a alteração de gravação fotográfica para gravação de vídeos. Esta mudança influenciou profundamente a utilização e a popularidade do PIV. Muitos pesquisadores já estavam utilizando câmeras digitais ao invés de filmes, então, no início dos anos 90, vários investigadores, notavelmente Willert e Gharib [17] e Westerweel [18], publicaram resultados indicando que a baixa resolução das câmeras digitais não era um impedimento para sua utilização, e que PIV digital poderia ser preciso o suficiente para fornecer resultados úteis.

Os filmes fotográficos possuíam resolução elevada, 100 linhas/mm para o T-Max e 300 linhas/mm para o Technical Pan para filmes de 25x35mm ou ainda 100x125mm. Em comparação, a resolução de câmeras digitais era tipicamente 500x500 pixels. No entanto, as câmeras digitais possuíam elevada regularidade na localização dos pixels enquanto nos filmes encontravam-se locais aleatórios de grãos. Além disso, a resolução das câmeras digitais se elevou rapidamente para 1000x1000 pixels, e as câmeras atuais de 11 megapixels são essencialmente equivalentes aos filmes de 35 mm com resolução de 100 linhas/mm.

Assim, no início dos anos 90 ficou claro que as imagens digitais se tornariam o padrão para a técnica do PIV. O trabalho de Nishino *et al.* [19] influenciou muito essa tendência de utilização das imagens digitais. Os autores apresentaram as melhores estatísticas de turbulência do PIV na época e alcançaram médias estáveis através da aquisição de 19200 imagens de vídeo. Isto foi muito além do que poderia ser realizado com filmes fotográficos.

O número máximo de fotografias do PIV gravadas pelos pesquisadores mais determinados raramente ultrapassou 1000 imagens. O PIV digital se tornou necessários para a obtenção de precisas estatísticas de turbulência. Assim, em meados dos anos 90, o uso do PIV digital foi crescendo, e nos dias de hoje é utilizado quase que exclusivamente.

Outro impacto notável na técnica do PIV surgiu com o advento das câmeras de transferência que poderiam segurar duas imagens gravadas em rápida sucessão através da transferência da primeira imagem gravada pixel a pixel para um chip interno de armazenamento, e posteriormente gravar a segunda imagem. Isso ocorreu graças a Lourenco *et al.* [20], que convenceu a Kodak a fabricar essas câmeras para o mercado de pesquisa do PIV.

Com o surgimento dessas câmeras, ocorreram três importantes melhorias. Primeiro, sabia-se teoricamente que a correlação cruzada de imagens gravadas separadamente da primeira e da segunda exposição era superior à auto-correlação de imagens de exposição dupla (Keane e Adrian [21]). Entretanto, a correlação cruzada não poderia ser implementada convenientemente até que as novas câmeras estivessem disponíveis.

A segunda melhoria foi que com a utilização das novas câmeras, eliminou-se a necessidade de deslocamento da segunda imagem, pois a direção do escoamento era determinada automaticamente através da ordem das exposições.

Em terceiro, e ainda mais importante, pequenos deslocamentos da sobreposição de imagem foram completamente eliminados, e então passou a ser possível alcançar

largas faixas dinâmicas. Portanto, a introdução das câmeras mencionadas foi um dos avanços mais importantes para a técnica de PIV.

Ao longo dos anos, surgiram avanços também no processo de interrogação das imagens. Okamoto *et al.* [22] desenvolveram um método de interrogação que consiste numa correlação sem a malha com as regiões de interrogação. O método utiliza a ideia de escolher cada partícula juntamente com um grupo de 5-10 partículas ao redor e utilizar como um padrão característico. O padrão da partícula com o grupo ao redor é correlacionado da primeira exposição com a segunda.

Outro método desenvolvido é o da correlação hierárquica, em que os resultados da correlação de grandes regiões de interrogação são utilizados para guiar a correlação de regiões menores, e assim por diante, até que regiões de tamanho reduzido sejam analisadas (Hart [23]).

Ocorreram também avanços no quesito de escala com a adaptação do método do PIV para escoamentos em microescala por Santiago *et al.* [24], que introduziram o micro-PIV. Em sua pesquisa, reduziram o volume de medição da ordem de milímetros para mícrons, o que foi possível ao custo de reduzir também o campo de visão de maneira correspondente. Esse avanço proporcionou uma ferramenta poderosa na área de microfluídica.

## 4. Aplicações

Nesta seção serão descritas algumas aplicações da técnica do PIV. São apontadas pesquisas realizadas na área de mecânica dos fluidos e ainda trabalhos recentes de outras áreas para ilustrar as diversas possibilidades do método.

Desde o início do desenvolvimento da técnica, houve muito interesse na aplicação para o estudo de escoamentos turbulentos, pois devido à complexidade de sua estrutura, havia dificuldades na investigação do seu comportamento.

Segundo Buchhave [25], o grupo de pesquisa da Universidade de Illinois, sob a direção de Adrian, realizou algumas das medidas mais detalhadas de escoamentos turbulentos utilizando PIV. Um exemplo é a imagem da Fig. 7, que apresenta 20.800 vetores resultantes de uma medição de PIV em um canal de água [26].

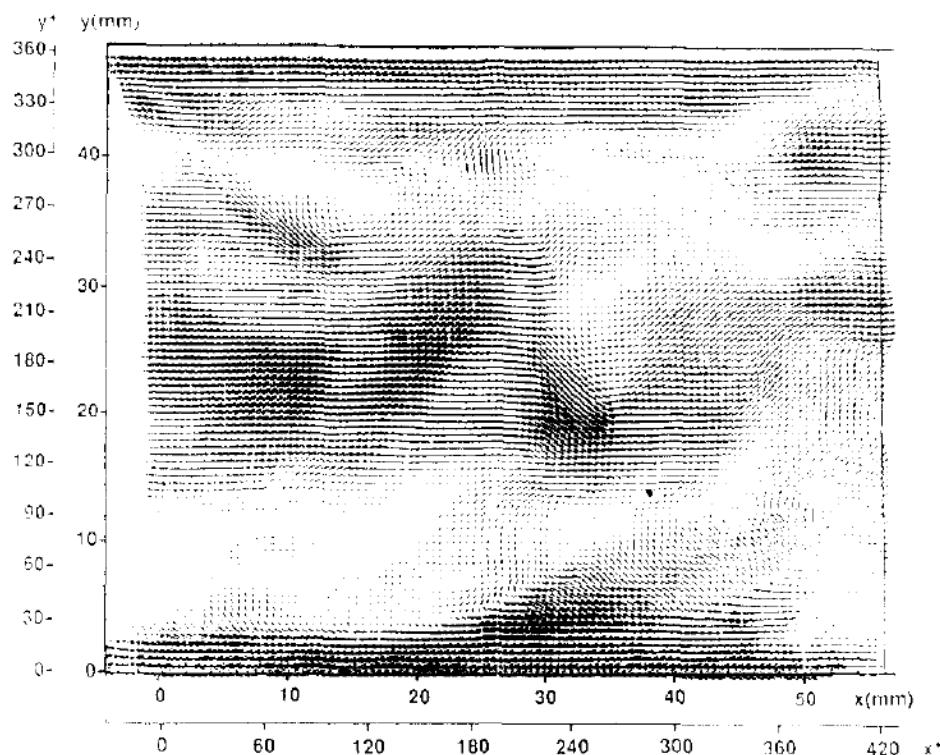


Figura 7 – Medição realizada através do PIV [26]

Além das aplicações em escoamentos turbulentos, segundo Adrian [3], o PIV é útil no estudo de escoamentos com geometrias complexas. Adrian exemplifica indicando o

estudo de Paone *et al.* [27], que efetuaram medições dos campos de velocidade nas passagens de um rotor de bomba centrífuga.

Outra aplicação no estudo de fluidos é a velocimetria por imagem de partícula para filme delgado (*Thin Film Particle Image Velocimetry* – TF-PIV), desenvolvida por Shedd [28], que consiste em aplicar um sistema típico de micro-PIV em um escoamento macroscópico. Através da variação da distância da câmera à parede do tubo, o perfil de velocidades ao longo do filme é obtido.

Existem também estudos envolvendo o PIV em aerodinâmica, como a pesquisa de Willert *et al.* [29]. A técnica foi aplicada para realizar medições de vórtices de esteira de um modelo de avião e estudar a aerodinâmica do rotor de helicóptero. A pesquisa gerou informações detalhadas sobre a estrutura de camada limite turbulenta.

Atualmente, a coletânea de aplicações do PIV é abrangente e a tendência é que o método continue sendo adaptado para as diversas áreas da pesquisa científica. A seguir são apresentados estudos realizados nas áreas de biomecânica e fisiologia humana a fim de ilustrar como esta importante ferramenta ultrapassou fronteiras do conhecimento em sua evolução.

Chung e Kim [30], a fim de compreender os aspectos fisiológicos e patológicos da respiração nasal, pesquisaram as propriedades de fluxo de ar na cavidade nasal utilizando o PIV, aplicado em um modelo transparente da cavidade, reproduzido com precisão. Estudaram ainda as mudanças do fluxo de ar relacionadas a condições patológicas (diferenças dos cornetas nasais e desvio de septo).

Lim *et al.* [31] utilizaram o método do PIV para avaliar o desempenho de quatro válvulas cardíacas protéticas, uma bioprótese de tecido suíno, uma válvula de esfera em gaiola, e duas válvulas de disco basculante com diferentes ângulos de abertura. Técnicas de visualização do escoamento combinadas com vetores de velocidade do PIV e medições de pressão foram usadas obter uma visão global do fluxo nas próteses valvares em condições estáveis. A Fig. 8 apresenta imagens do fluxo obtidas durante o estudo e a Fig. 9 ilustra resultados do PIV.

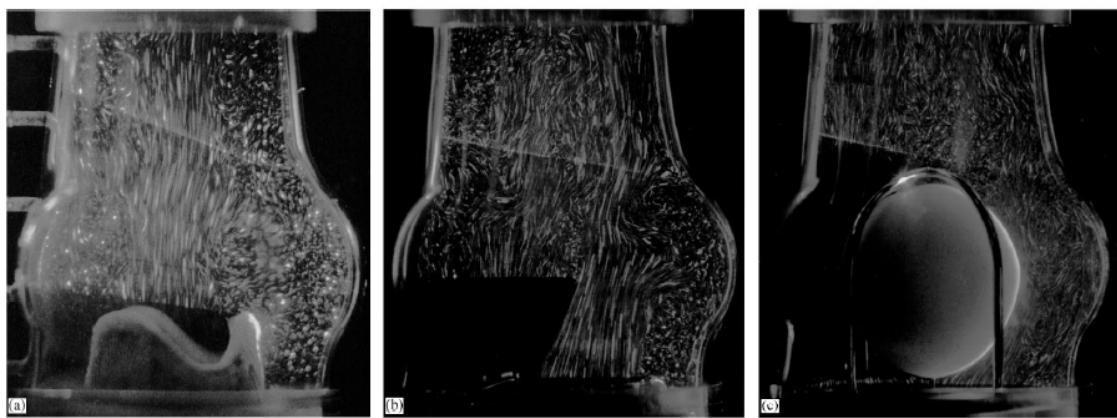


Figura 8 – Visualização do fluxo na raiz da aorta. (a) Válvula de tecido suíno St Vincent; (b) Válvula de disco basculante Björk-Shiley e (c) Válvula de esfera em gaiola Starr Edwards [31]

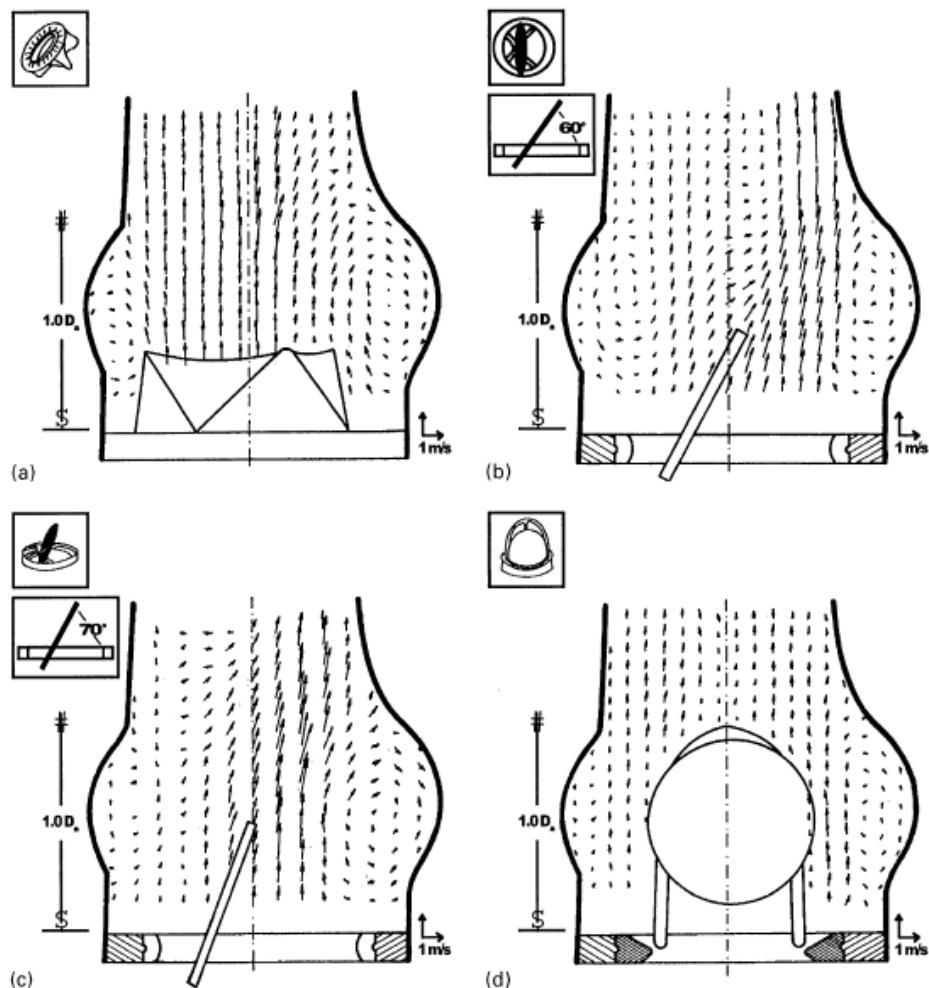


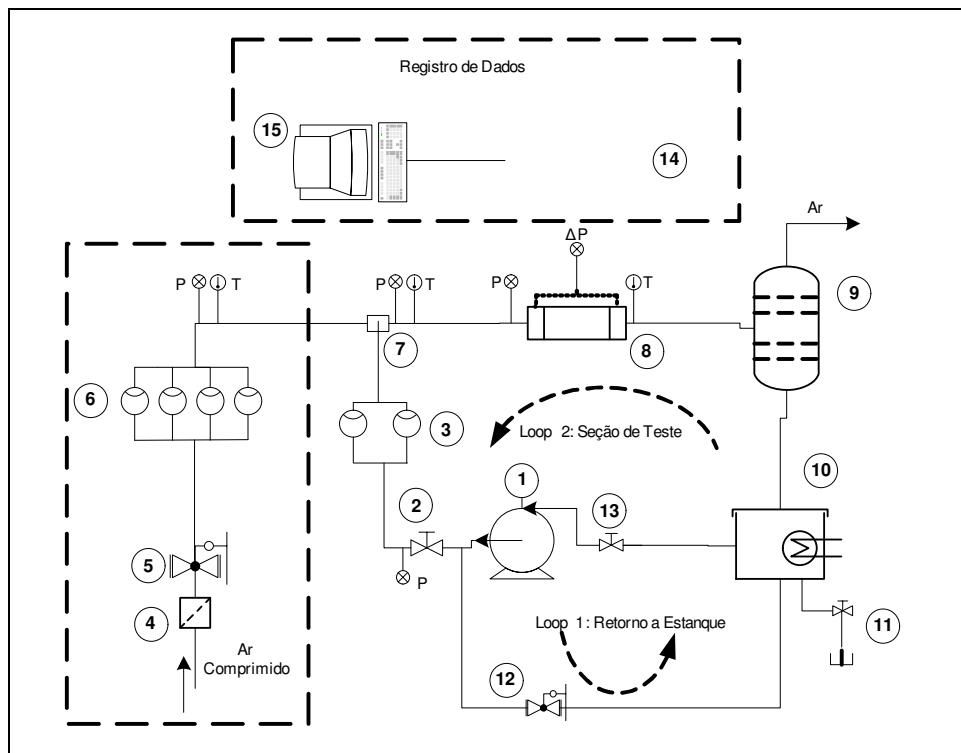
Figura 9 – Campo de vetores de velocidade do PIV. (a) Válvula de tecido suíno St Vincent; (b) Válvula de disco basculante Björk-Shiley; (c) Válvula de disco basculante St Vincent e (d) Válvula de esfera em gaiola Starr Edwards [31]

## **5. Experimentos**

Nesta seção será descrita a metodologia e os procedimentos empregados na preparação do aparato experimental e da seção de testes, que possibilitaram a aquisição das imagens do escoamento contendo partículas. O aparato experimental foi construído para a pesquisa do mestrando Francisco Antonio Loyola Lavin, e constam aqui os aspectos mais relevantes para a compreensão do processo de aquisição. As imagens utilizadas para o desenvolvimento do programa, e que constam ainda nos resultados deste trabalho, foram obtidas pelo mestrando Francisco e apresentadas em seu exame de qualificação [32].

### **5.1. Aparato experimental**

O aparato experimental que está em desenvolvimento para a realização dos experimentos de  $\mu$ -PIV (PIV aplicado a microcanais) em escoamento bifásico no Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (Letef) foi projetado pelo mestrando Francisco em conjunto com o Prof. Timothy Shedd. Consiste basicamente de um circuito fechado de água, que é composto pelo circuito principal da seção de teste e por um circuito de recirculação, e por um circuito de ar comprimido, que é misturado à água a fim de formar a mistura bifásica. A Fig. 10 apresenta um diagrama esquemático do aparato experimental.



- |                                 |  |                                  |
|---------------------------------|--|----------------------------------|
| <b>1. Bomba Centrífuga</b>      | <b>6. Rotâmetro (Ar)</b>   | <b>11. Válvula de drenagem</b>   |
| <b>2. Válvula de fechamento</b> | <b>7. Misturador T</b>   | <b>12. Válvula de alívio</b>     |
| <b>3. Rotâmetro (Água)</b>      | <b>8. Seção de teste variável<br/>(Diâmetro hidráulico 1, 3, e 6 mm)</b> | <b>13. Válvula de fechamento</b> |
| <b>4. Filtro de ar</b>          | <b>9. Separador de água - ar</b>   | <b>14. Câmera</b>                |
| <b>5. Válvula reguladora</b>    | <b>10. Reservatório</b>  | <b>15. Computador</b>            |

Figura 10 – Diagrama esquemático do aparato experimental e legenda dos componentes [32]

O circuito de ar comprimido é alimentado pela rede pneumática do laboratório. Ao ingressar o circuito, o ar passa por um filtro e uma válvula reguladora, e então tem sua vazão medida e controlada por um conjunto de quatro rotâmetros em paralelo. Posteriormente, encontra o misturador T para formar o escoamento bifásico.

No circuito de água, existe o ciclo de recirculação, através do qual a água retorna para o reservatório com a abertura da válvula de alívio, o que ocorre a fim de controlar a pressão da bomba no fornecimento para o circuito de teste. Neste, a água bombeada passa por uma válvula de fechamento e encontra o conjunto de dois rotâmetros em paralelo, fluindo para o misturador T.

A mistura bifásica escoa para a seção de teste, que é constituída por placas translúcidas de diferentes espessuras, como ilustra a Fig. 11, permitindo assim a visualização e a filmagem do escoamento.

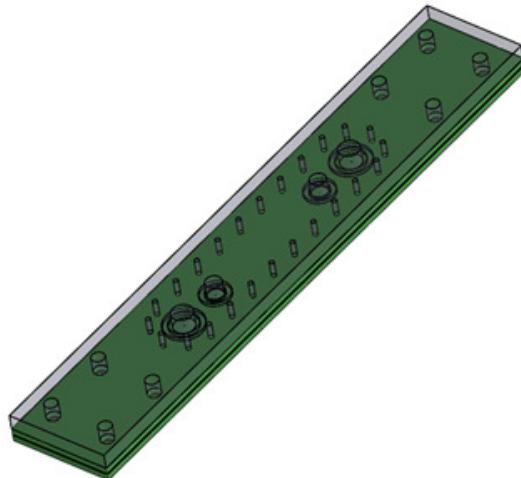


Figura 11 – Conjunto de placas da seção de teste [32]

Na Fig. 12, é possível observar que o conjunto é formado por quatro placas, sendo elas os suportes: inferior, de teste, intermediário e superior.

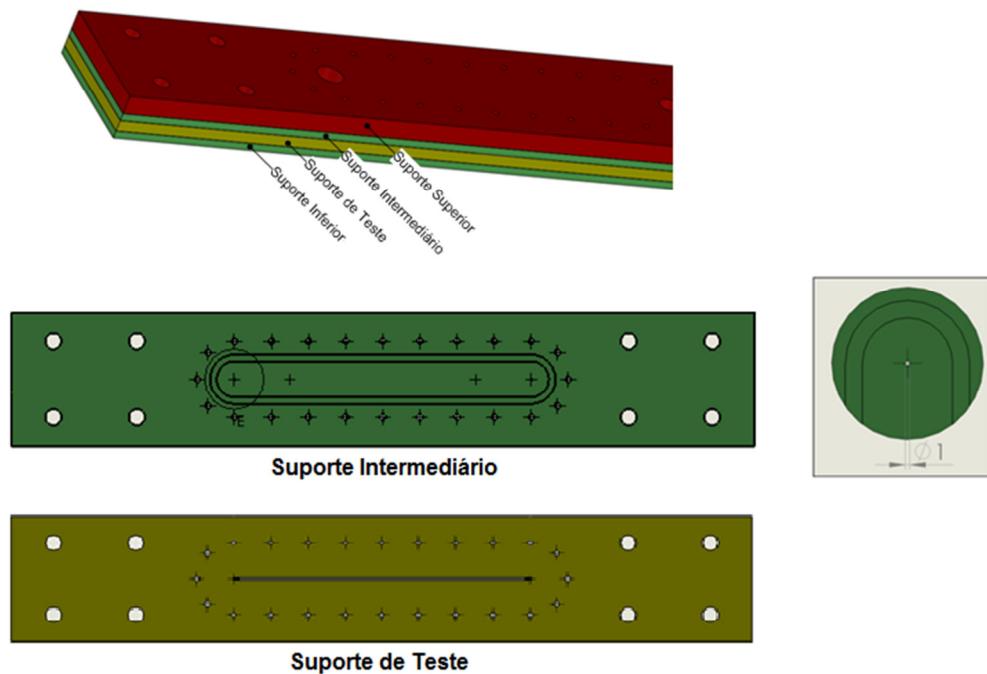


Figura 12 – Detalhe das placas da seção de teste [32]

O suporte inferior é a base dos outros e constitui o lado inferior do canal de teste, que foi aberto no suporte de teste. O suporte intermediário constitui o lado superior do canal de teste, e apresenta dois pequenos orifícios na posição correspondente às extremidades do canal, exercendo a função de entrada e saída do fluxo no canal. O suporte superior é responsável pela interface entre os orifícios do canal de teste e as conexões de entrada e saída da mistura ar-água. Todas as placas apresentam furos passantes para a fixação do conjunto ao aparato experimental.

Após passar pela seção de teste, a mistura ar-água escoa para o separador, no qual as fases gasosa e líquida são separadas pelo efeito das forças centrífuga e gravitacional. O ar retorna à atmosfera e a água flui para o reservatório, no qual ela é recolhida e resfriada através de uma serpentina.

A água dos circuitos conterá partículas fluorescentes de  $1\mu m$  de diâmetro, que atuarão como traçadores do escoamento a fim de obter as imagens do  $\mu$ -PIV e efetuar a análise gerando os vetores de velocidade. As partículas são micro esferas de poliestireno do laboratório Thermo Scientific.

Para a iluminação da seção de teste, é utilizado um conjunto de LED de alta potência acoplado a um colimador. O LED fornece o feixe de luz de comprimento de onda predominante de 532 nm (verde), e o colimador é compatível apresentando também comprimento de onda nominal de 532 nm. Essa escolha se deve ao fato das partículas terem facilidade de absorver a luz verde proveniente do laser para então emitir luz vermelha que será capturada pela câmera. Um controlador de alta potência é empregado para fornecer os pulsos do laser com frequências de 1 a 100 kHz de acordo com a necessidade.

A aquisição das imagens do escoamento é realizada através de uma câmera de alta velocidade da marca Optronics, modelo CamRecord 600 ilustrada na Fig. 13. A taxa máxima de captura pode chegar a 100.000 imagens por segundo, para a menor resolução da câmera.



Figura 13 – Câmera de alta velocidade

## 5.2. Obtenção das imagens

As imagens das partículas utilizadas durante o desenvolvimento do programa baseado em Labview foram obtidas pelo mestrando Francisco em sua qualificação [32]. Ele utilizou a seção de teste já fabricada, ilustrada na Fig. 14, e apesar do aparato experimental não estar completamente montado ainda, ele conseguiu realizar testes experimentais através de um arranjo com uma seringa. Ela foi empregada na inserção e no deslocamento do líquido contendo partículas através do orifício de entrada e ao longo do canal da seção de teste.

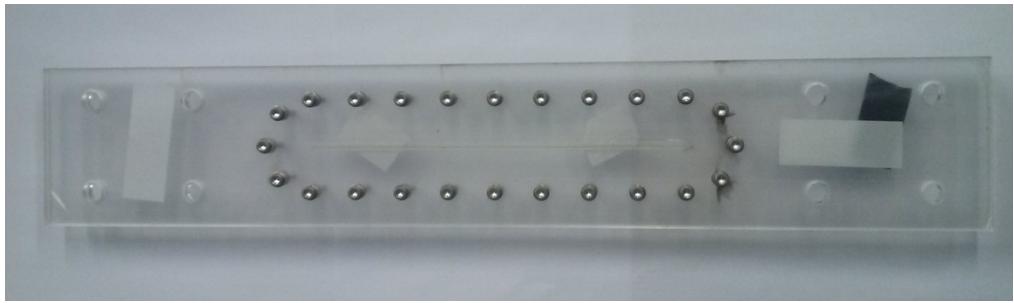


Figura 14 – Seção de teste utilizada nos experimentos

A iluminação foi ajustada de forma a permitir a identificação das partículas nas filmagens experimentais realizadas com a câmera de alta velocidade. Após o procedimento de filmagem, cada vídeo é separado em um conjunto de imagens (frames), que contêm a captura do posicionamento das partículas em um determinado momento. Conhecendo a taxa de aquisição (em número de imagens por segundo),

sabe-se também o intervalo de tempo entre um par de imagens, o que possibilita a construção dos vetores de velocidade após a identificação dos vetores de deslocamento.

Na Fig. 15 é apresentado um par de imagens resultante dos experimentos. É possível observar no vídeo o deslocamento das partículas de cima para baixo entre as imagens consecutivas, o que representa o deslocamento do fluido nessa direção. Infelizmente é difícil visualizar esse deslocamento na observação do par de imagens pelo fato dele ser muito pequeno.

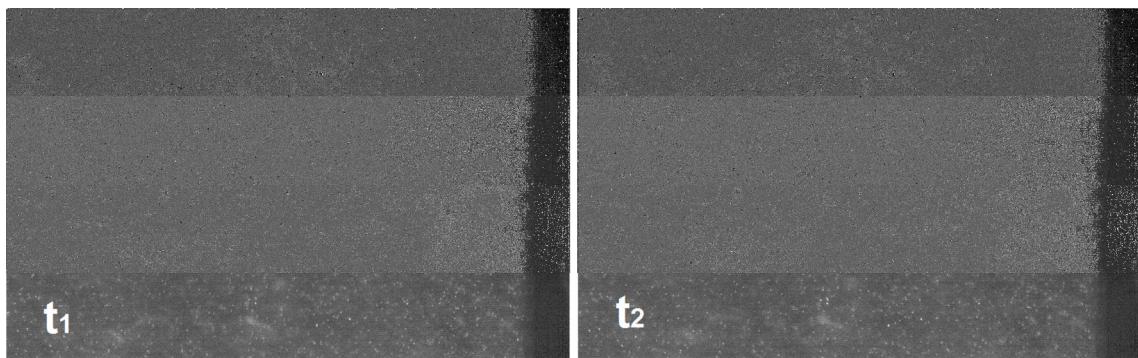


Figura 15 – Par de imagens do experimento de  $\mu$ -PIV

## 6. Processamento e Análise

Com as imagens dos testes experimentais obtidas, foi realizado o desenvolvimento do programa baseado em Labview [33], um ambiente de programação gráfica da National Instruments, a fim de poder tratar as imagens ressaltando as partículas capturadas e, posteriormente, comparar os pares de imagens tratadas para averiguar o deslocamento das partículas de uma imagem para a seguinte.

Esta seção descreve detalhadamente o desenvolvimento do programa considerando todas as etapas necessárias para atingir o resultado esperado do campo de vetores do PIV.

### 6.1. Desenvolvimento do programa

O Labview, por ser uma plataforma de programação gráfica, apresenta diversos blocos de comando que são utilizados para construir os programas, conhecidos como instrumentos virtuais (IV's). Cada programa ou IV é composto pelo painel frontal, que representa a interface com o usuário, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa.

A programação é feita seguindo o modelo de fluxo de dados, assim, o programa poderá conter elementos de entrada e saída de dados, além das funções ou blocos de comando que são desempenhadas durante a sua execução. Essas funções são interligadas através de linhas, que são o que define o fluxo dos dados.

O programa desenvolvido neste trabalho apresenta como elemento de entrada as imagens do PIV obtidas durante os testes experimentais efetuados pelo mestrando Francisco, e como elemento de saída um arquivo contendo os valores de deslocamento nas direções x e y para cada região de interrogação definida.

A Fig. 16 apresenta um diagrama simplificado das etapas executadas pelo programa. A partir desse esquema, é possível identificar o processo de aquisição das

imagens como elemento de entrada de dado e a construção do arquivo de vetores resultantes como saída de dado, como mencionado anteriormente.

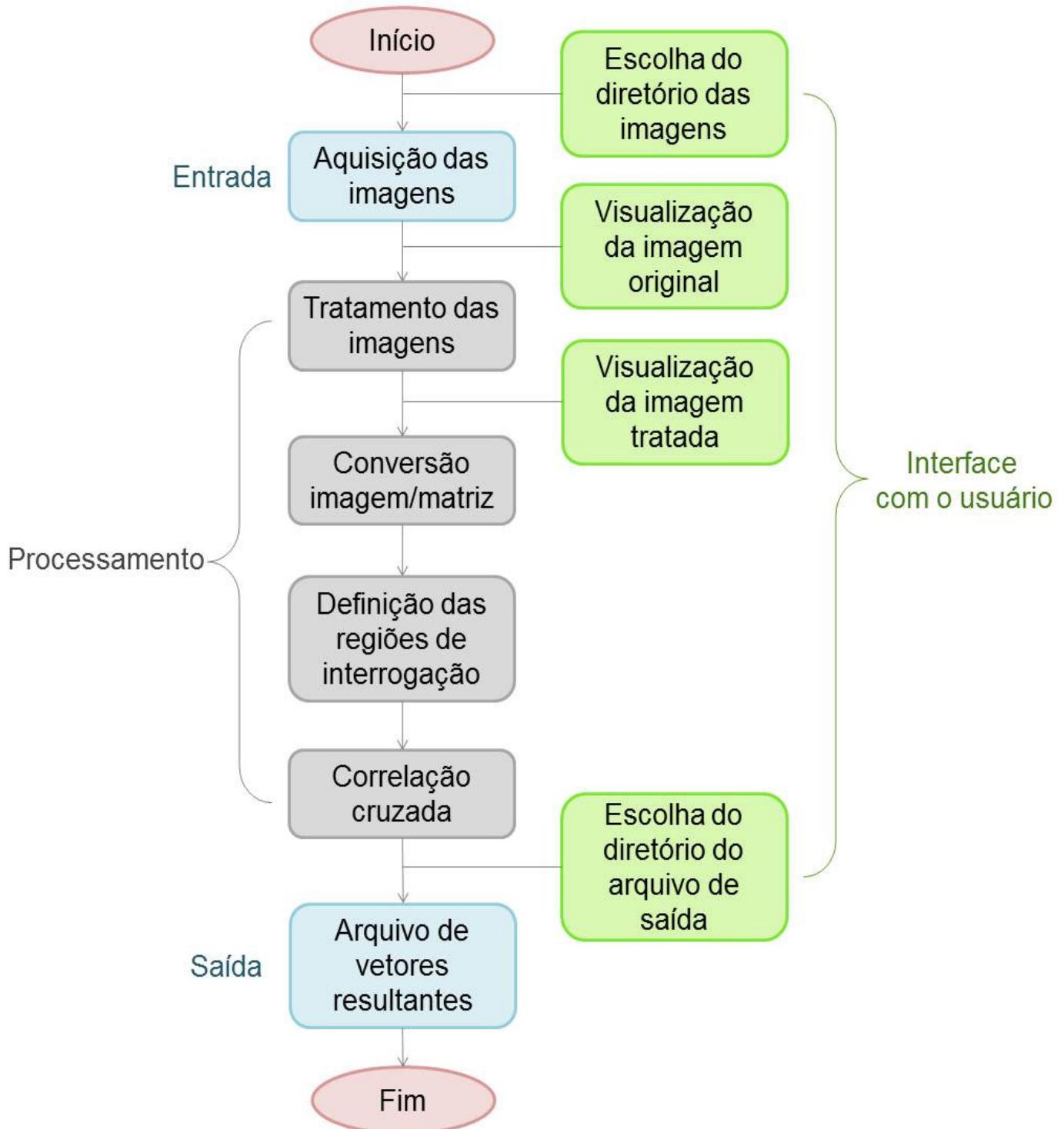


Figura 16 – Diagrama simplificado da lógica do programa

Os dados de entrada só podem ser obtidos pelo programa quando o usuário define o diretório, pois o programa precisa ter o parâmetro de onde buscar as imagens. Essa definição é feita no painel frontal, assim, essa é uma tarefa que necessita da interface com o usuário.

Posteriormente, os dados seguem o fluxo encontrando as tarefas de processamento, que atuarão de maneira a executar algum tipo de modificação nesses dados a fim de obter os vetores desejados. São elas: o tratamento das imagens, a conversão de imagem para matriz de números, a definição das regiões de interrogação e a aplicação da correlação cruzada.

Durante a execução da tarefa de tratamento das imagens, ocorre a exibição da imagem original e da imagem tratada no painel frontal do programa, para que o usuário possa visualizá-las e observar as diferenças existentes. O usuário pode ainda decidir por alterar alguns parâmetros disponíveis para que o tratamento seja mais adequado às suas preferências.

Com a organização dos vetores resultantes em forma de arquivo, o programa necessita que o usuário forneça a orientação do diretório onde o arquivo deve ser salvo. Assim que essa etapa ocorre, a execução do programa é finalizada.

O programa completo pode ser visualizado nos anexos A e B, que contêm respectivamente o painel frontal e o diagrama de blocos de comando. A seguir, as etapas de processamento serão descritas detalhadamente para possibilitar a compreensão do funcionamento do programa. Além disso, a descrição de cada etapa ilustra sequencialmente as fases de desenvolvimento do programa ao longo deste trabalho.

### **Tratamento das imagens**

Durante o desenvolvimento do programa, foi empregado o NI-Vision [34], um módulo do Labview que disponibiliza diversos blocos de comandos e ferramentas

dedicadas à aquisição e ao tratamento de imagens, o que permitiu realizar melhorias nas imagens do PIV a fim de viabilizar a análise.

Inicialmente, com a aquisição das imagens pelo programa, elas ingressam em um “loop for”, uma estrutura de controle comum em diversos códigos de programação. No Labview existe um bloco de comando para executar essa função, que consiste em realizar alguns comandos escolhidos em um número determinado de iterações.

Nesse caso, o número de iterações do loop é o número de imagens contidas na pasta indicada, pois são todas aquelas que o programa deve tratar. Em cada iteração, o programa lê o arquivo da imagem e armazena em uma memória interna temporária. Posteriormente, executa as funções de tratamento propriamente ditas. A imagem original é exibida em um quadro de visualização no painel frontal, assim como a imagem tratada, para que o usuário compare as modificações executadas.

O tratamento da imagem consiste em aplicar uma ferramenta de ajuste de tons. Essa ferramenta apresenta três parâmetros que podem ser modificados pelo usuário de maneira que seja obtida a melhoria desejada na qualidade da imagem; são eles: brilho, contraste e gama.

O brilho trabalha com os valores absolutos dos tons de claro e escuro, então ao aumentar o brilho da imagem, ela será clareada como um todo, por outro lado, ao diminuir, todos os tons serão escurecidos.

O contraste envolve a distinção entre as áreas mais claras e mais escuras da imagem, e atua tornando mais evidentes os objetos ou detalhes contidos na imagem. Assim, aumentar o contraste fará com que a diferença entre os tons claros e escuros aumente, ou seja, áreas claras ficarão ainda mais claras e áreas escuras ainda mais escuras. De maneira contrária, diminuir o contraste reduzirá a diferença, aproximando os tons claros e escuros.

O ajuste do parâmetro gama é de compreensão um pouco mais complexa, pois envolve a diferença com que o olho humano consegue perceber a luz comparada à forma com que os dispositivos de captura o fazem. O gama procura traduzir a

sensitividade digital para a sensitividade do olho. De maneira geral, ajusta os tons intermediários mantendo o preto e o branco, o que equivale a uma otimização do brilho e do contraste nesses tons intermediários [35].

A Fig. 17 ilustra os quadros de visualização exibidos no painel frontal. É possível perceber que há grande diferença entre a imagem original e a imagem tratada, pois o ajuste de tons consegue modificar a imagem de forma a ressaltar os pontos luminosos, que são as partículas, em meio ao fundo escuro, que é o fluido base.

Na figura observa-se ainda uma caixa com os parâmetros de controle: brilho, contraste e gama. É através desses botões de controle que o usuário pode escolher os valores que melhor atendem às suas necessidades.

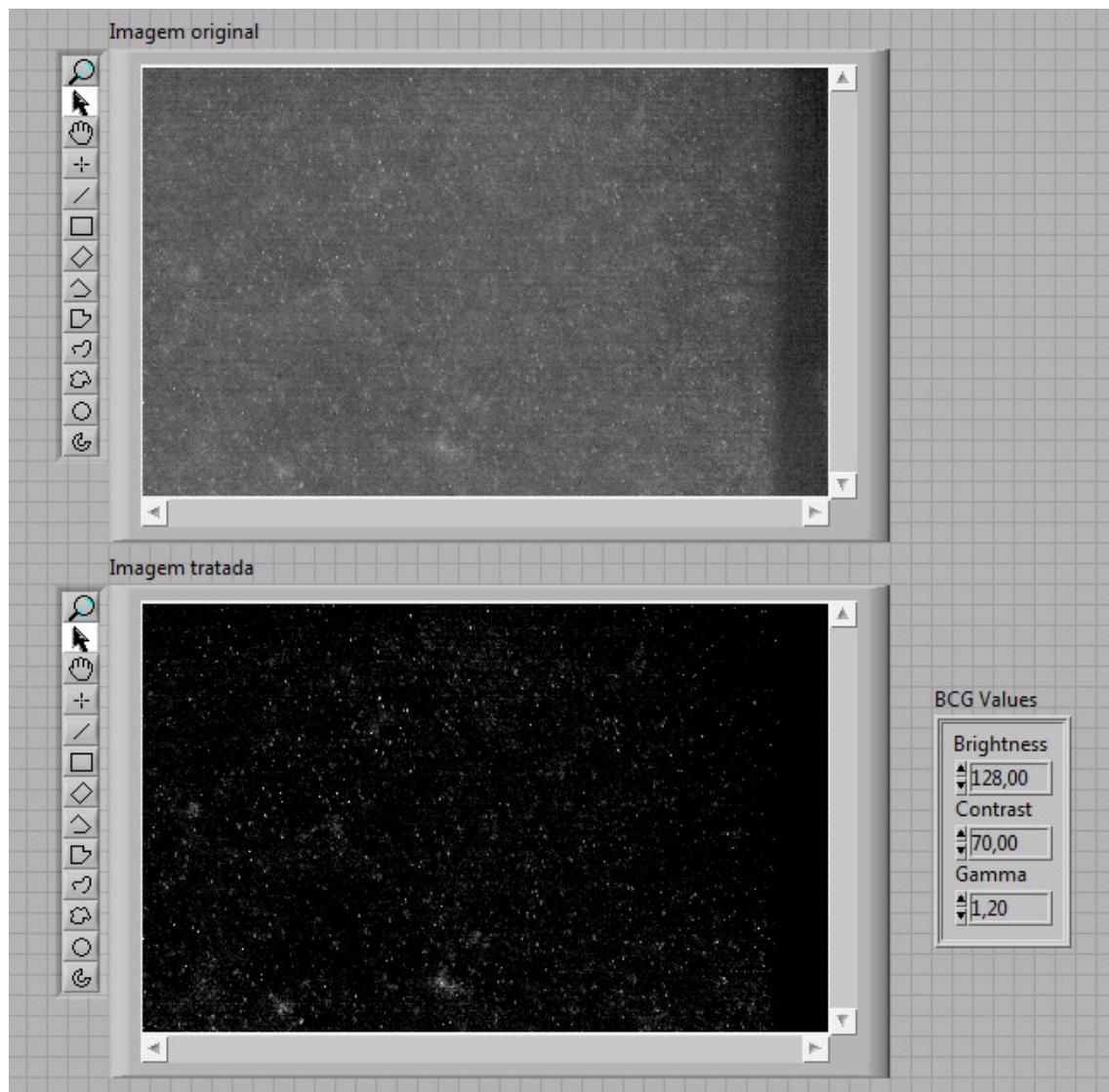


Figura 17 – Visualização das imagens original e tratada

Após o tratamento, as imagens seguem para a etapa seguinte, em que são convertidas para matrizes, como descreve o próximo tópico.

### **Conversão de imagem para matriz**

Uma imagem é composta por vários pixels, sendo cada pixel um “elemento de imagem”, que contém uma determinada cor. Dessa forma, uma imagem tem linhas e colunas de pixels e pode ser representada como uma matriz de números, em que cada número é associado a uma cor específica. No caso das imagens em tons de cinza, geralmente a escala de intensidade varia de 0 a 255, onde o valor 0 representa a cor preta e o valor 255 representa a cor branca.

O módulo NI-Vision do Labview apresenta um comando que atua transformando um dado armazenado na memória em formato de imagem em um dado no formato de matriz de números. É necessário realizar essa transformação para facilitar a manipulação dos dados nas etapas posteriores.

A conversão de imagem para matriz de números é exemplificada na Fig. 18, em que foi elaborada uma imagem de 20 x 20 pixels com faixas em diferentes tons de cinza (incluindo preto e branco), para demonstrar a alteração dos números da matriz de 20 linhas por 20 colunas de acordo com a mudança das faixas de cores.

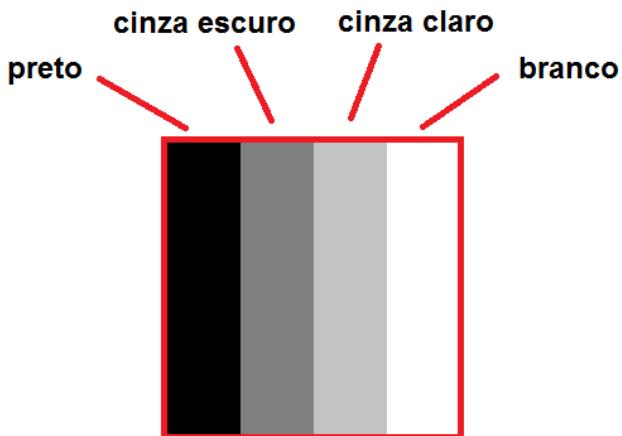


Figura 18 – Ilustração da conversão de imagem para matriz

## **Definição das regiões de interrogação**

Os dados das imagens transformados nas matrizes numéricas encerram o primeiro “loop for”, e as memórias internas alocadas para armazenar temporariamente os arquivos de imagem são liberadas. Os dados ingressam um novo “loop for”, que separa duas matrizes consecutivas para realizar a definição das janelas e posteriormente a correlação cruzada.

As duas matrizes ingressam então em outros dois “loops for”, que funcionam de forma a separar a quantidade de pixels na direção x e na direção y que formarão a janela (região de interrogação). A cada iteração dos loops a janela é deslocada para o

próximo quadro, até que seja percorrida toda a extensão da matriz, tanto na horizontal quanto na vertical.

Durante o desenvolvimento deste programa optou-se por utilizar regiões de interrogação que não se sobrepõem, a fim de facilitar a análise inicial e validar primeiramente o método utilizado. Além disso, o processo de análise das regiões de interrogação é realizado apenas uma vez, ou seja, não há diminuição das regiões após a análise para efetuar novamente o processo e obter resultados mais precisos. Essas são melhorias que podem ser implementadas posteriormente.

A definição das janelas que é realizada nas matrizes numéricas pode ser melhor compreendida na Fig. 19, que ilustra como as regiões ficam dispostas em cada imagem que será analisada. Como as imagens obtidas são de  $800 \times 500$  pixels, foram definidas janelas de  $50 \times 50$  pixels (no caso,  $50 \times 50$  números) para análise.

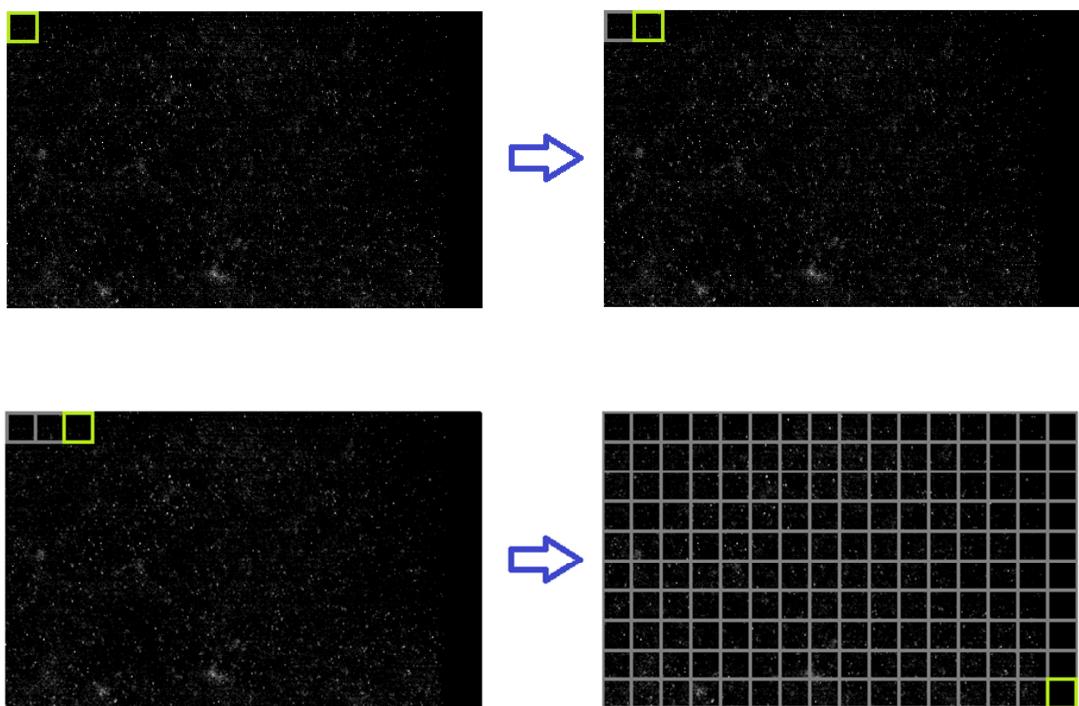


Figura 19 – Processo de definição da malha de regiões de interrogação

As janelas são definidas percorrendo inicialmente toda a primeira linha, depois seguem para a segunda e assim por diante, até que a última janela seja alcançada.

Esse procedimento é realizado nas duas matrizes consecutivas simultaneamente, pois dentro do loop já é executada a correlação cruzada entre cada par de janelas, como será descrito a seguir.

### **Aplicação da correlação cruzada**

A correlação cruzada é uma função capaz de medir a similaridade entre dois sinais, e no caso deste trabalho, é utilizada para comparar o deslocamento realizado pelas partículas dentro da região de interrogação. O Labview oferece uma ferramenta que aplica essa função a dois sinais numéricos de entrada, o que é inclusive a principal razão pela qual as imagens são convertidas para matrizes.

A correlação pode ser unidimensional (1D), quando é aplicada a um sinal simples, por exemplo um vetor numérico, ou bidimensional (2D), quando é aplicada a um sinal de duas dimensões, como as matrizes numéricas das imagens. A correlação cruzada unidimensional é dada pela integral do produto das duas funções 1D a serem comparadas, de acordo com a equação (1).

$$f(x) \otimes g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha) g(x + \alpha) d\alpha \quad (1)$$

onde o símbolo  $\otimes$  denota “correlação”.

Para entender essa função, basta visualizar a correlação como uma varredura de uma função passando sobre a outra, e possuirá uma somatória de multiplicações máxima quando as duas funções estiverem exatamente sobrepostas. Dessa forma, se o máximo da correlação cruzada ocorrer em  $x = 0$ , então não há deslocamento entre as funções, e caso isso não ocorra, o deslocamento entre as funções será dado pelo  $x$  do ponto máximo.

A correlação cruzada bidimensional funciona através do mesmo princípio da unidimensional, com a diferença que ela apresenta duas integrais do produto das funções bidimensionais, segundo a equação (2).

$$f(x, y) \otimes g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) g(x + \alpha, y + \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

Ela também deve ser interpretada como uma varredura de uma função sobre a outra, com a diferença que essa varredura é executada nas dimensões x e y, e não em apenas uma dimensão. É possível interpretar o processo fazendo uma analogia com as imagens, pois o que ocorre seria basicamente o deslocamento de uma imagem sobre a outra a fim de encontrar o ponto de maior coincidência.

A função da correlação bidimensional originará uma superfície, e assim como na correlação unidimensional, se o ponto máximo da função (pico da superfície) ocorrer em  $x = 0$  e  $y = 0$ , não há deslocamento entre as funções bidimensionais. Caso contrário, o deslocamento será dado pelos valores  $x$  e  $y$  do ponto máximo.

A fim de validar a ferramenta de correlação cruzada do Labview e identificar o seu modo de funcionamento, foram elaboradas duas imagens simples com deslocamento em pixels conhecido entre elas, tanto na direção x quanto na direção y. Essas imagens podem ser visualizadas a seguir na Fig. 20. O deslocamento em x é de 10 pixels para a direita e o deslocamento em y de 30 pixels para baixo.

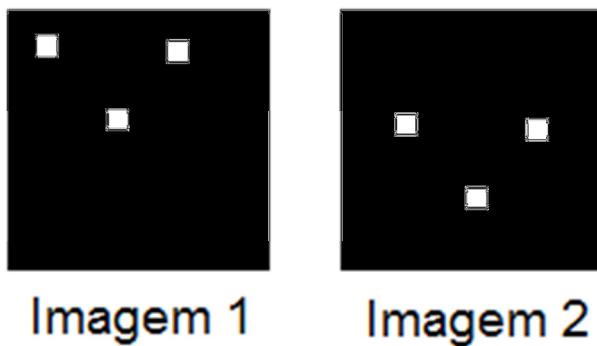


Figura 20 – Imagens elaboradas para validar e identificar o funcionamento da correlação 2D

Percebe-se que as imagens apresentam um fundo preto bem definido e três pequenos quadrados brancos, que se distinguem com clareza do fundo. Essa escolha foi proposital, pois quanto melhor a qualidade dos objetos contidos na imagem, maior será a precisão com que a correlação encontrará o deslocamento entre as imagens.

Isso ressalta a necessidade de conseguir capturar imagens do PIV com boa qualidade, e ainda a importância do tratamento das imagens antes da análise. Essas imagens elaboradas são as mais adequadas para efeito de validação da ferramenta pelo fato de não apresentarem os ruídos pertinentes às imagens de ensaios experimentais, que poderiam ocasionar a obtenção de valores diferentes dos reais.

A função de saída da correlação cruzada é a superfície formada pela somatória do produto das funções bidimensionais. O programa utiliza então um bloco de comando que detecta o ponto máximo dessa superfície e reconhece os deslocamentos ocorridos nas direções x e y, que são os resultados que buscamos.

No caso das imagens desenvolvidas para validação, o programa reconheceu as distâncias exatas em pixels, como indica a Fig. 21, que contém o resultado da correlação no painel frontal. Observa-se que foram obtidos os valores de  $x = 10$  e  $y = -30$  pixels, indicando o sentido do deslocamento através do sinal de menos.

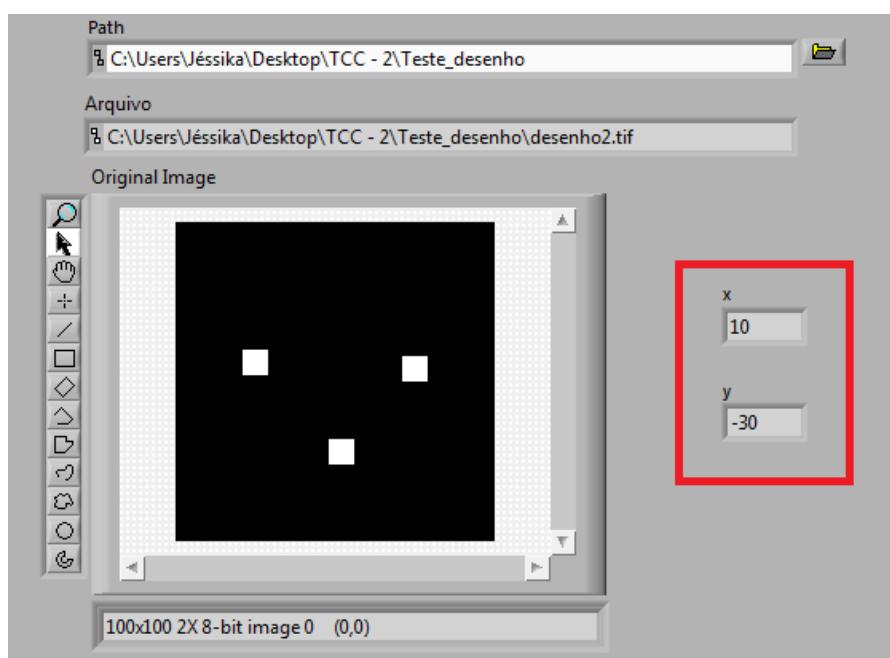


Figura 21 – Painel frontal indicando os deslocamentos em pixels obtidos pela correlação

O programa permite ainda exportar um arquivo com a função resultante da correlação, que no caso é uma matriz de valores que formam a superfície mencionada. Esse arquivo pode ser utilizado no Matlab para gerar um gráfico da superfície a fim de visualizar espacialmente os deslocamentos do pico.

A Fig. 22 ilustra o gráfico da superfície obtida pela correlação e o seu mapa de contorno. Através desses gráficos é possível visualizar o tipo de informação que a correlação gera e identificar claramente o pico da superfície, que é ressaltado em cores quentes (de amarelo a vermelho) em ambos os gráficos.

Percebe-se que o ponto máximo do pico ocorre em  $x = 10$  e  $y = 30$ , o que acontece porque pela maneira como a correlação é executada, ela considera o eixo y positivo no sentido para baixo, entretanto, a convenção de sinais mais utilizada é que o eixo x seja positivo no sentido para a direita e o eixo y no sentido para cima, assim, essa inversão do eixo y foi corrigida nos resultados finais do programa no Labview.

Vale ressaltar que essa constatação de comportamento dos eixos só foi possível graças a essa etapa de validação da ferramenta.

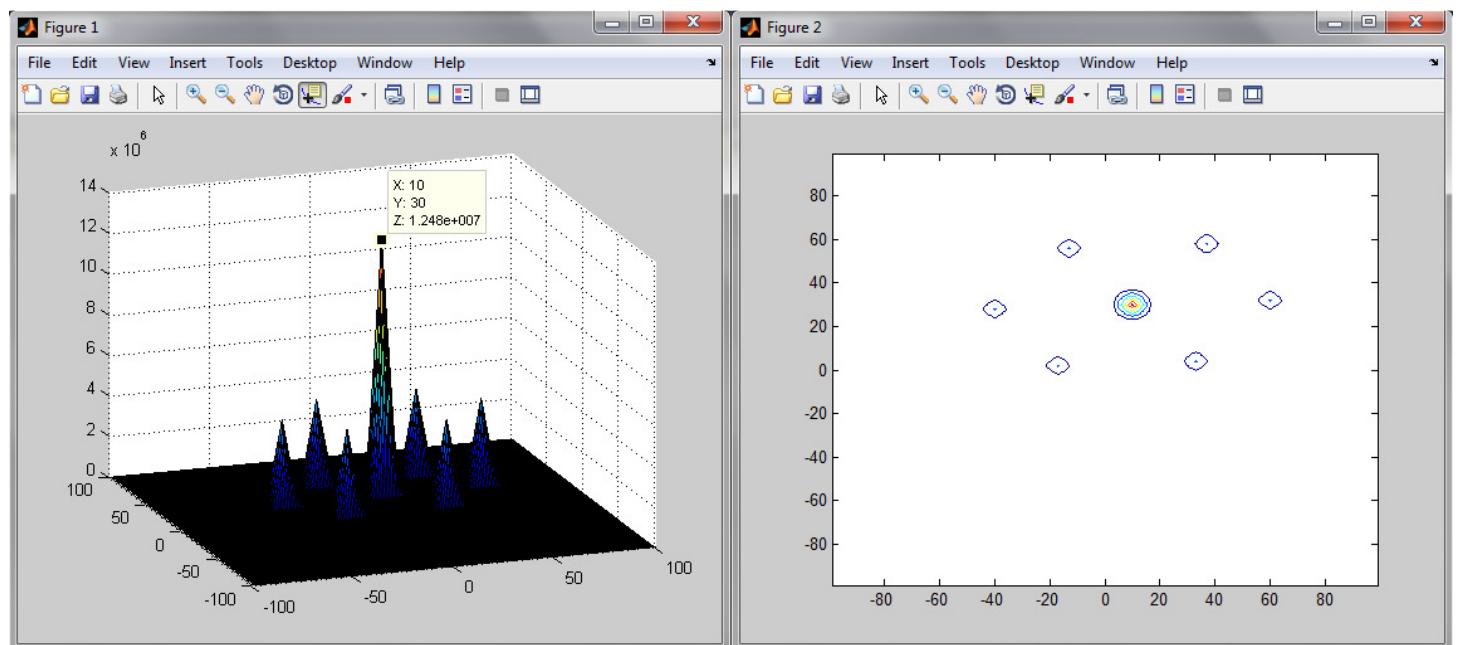


Figura 22 – Gráfico de superfície e mapa de contorno da correlação cruzada para as imagens de validação

A rotina utilizada no Matlab para gerar os gráficos consiste em carregar o arquivo que contém os dados da correlação, extraído do programa em Labview, criar vetores de x e y consistentes com a matriz da correlação, ou seja, que contenham as mesmas dimensões, e através dos comandos “surf” e “contour” gerar respectivamente o gráfico da superfície e o mapa de contorno.

Após o processo de validação da correlação cruzada, a ferramenta foi aplicada à rotina desenvolvida para definir as regiões de interrogação, de forma que a correlação é realizada em cada região definida para os pares de matrizes (correspondentes aos pares de imagens).

Assim, cada região gera uma superfície e consequentemente os valores de deslocamento em x e y do pico. Isso permite que os deslocamentos da imagem como um todo sejam mapeados através das várias janelas onde a rotina é executada.

A seguir, a Fig. 23 ilustra os gráficos de superfície e mapa de contorno para uma região de interrogação definida em imagens do PIV. Ao comparar com os gráficos gerados pelas imagens da validação, percebe-se que os das imagens reais do PIV apresentam mais variações na superfície, e dependendo do caso, podem apresentar variações que dificultam o reconhecimento do pico, o que se deve ao fato das imagens apresentarem ruídos e distúrbios que muitas vezes não podem ser corrigidos, mesmo executando a etapa de tratamento das imagens.

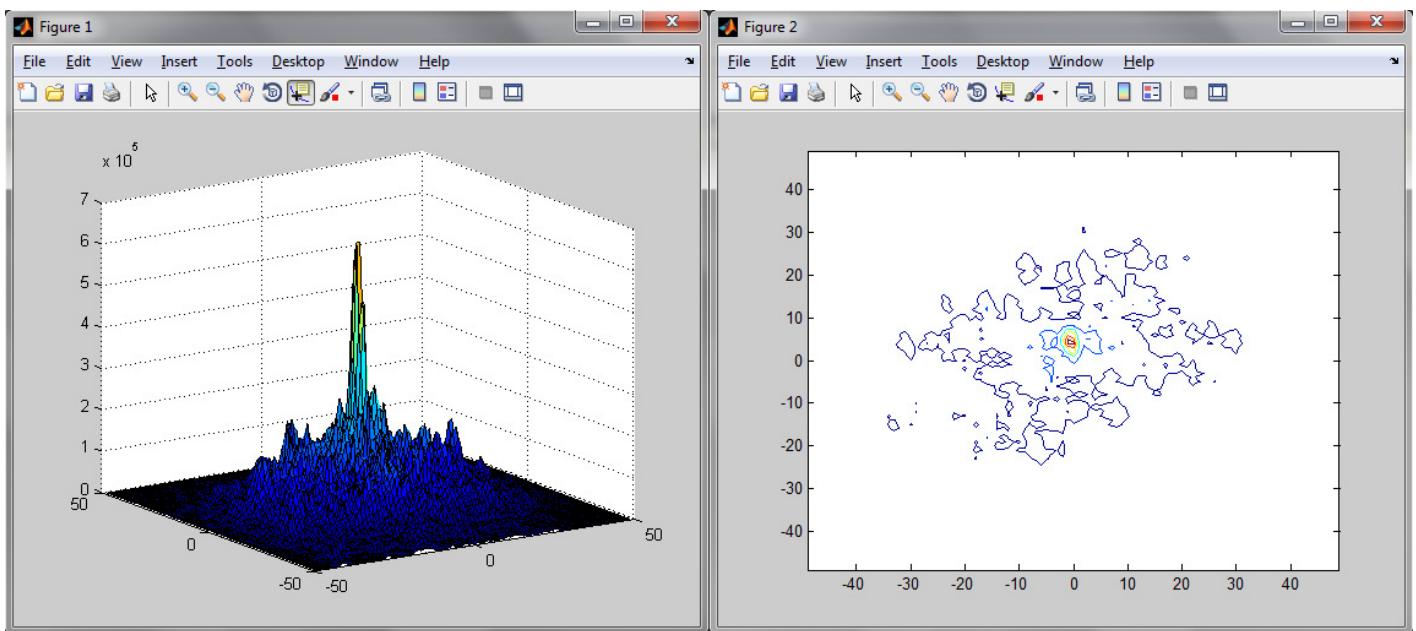


Figura 23 – Gráfico de superfície e mapa de contorno da correlação cruzada para uma região de interrogação de imagens do PIV

Quando o programa finaliza a execução da correlação para todas as regiões, ele organiza os dados em um arquivo de saída, que será salvo de acordo com a orientação de diretório que o usuário fornece. Assim, o usuário tem os dados de deslocamento em x e y para cada região da imagem, e pode então compor o campo de vetores.

Neste trabalho, foi utilizado o Matlab para obter o campo de vetores resultantes do PIV. Para tal, foi desenvolvida uma rotina que carrega o arquivo contendo os valores de deslocamento em x e y das regiões analisadas nas imagens (fornecido pelo Labview), e carrega ainda um arquivo que contém as posições centrais de cada região de interrogação. Este último arquivo foi elaborado para fazer com que os vetores sejam plotados exatamente no centro de cada região.

A função do Matlab responsável por traçar os vetores é a função “quiver”. Ela desenha as flechas do tamanho determinado pelo arquivo de deslocamentos. Algumas imagens de campo de vetores geradas pela rotina podem ser vistas na seção seguinte, em que são apresentados os resultados obtidos.

## 7. Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos através da aplicação do programa em Labview às imagens do  $\mu$ -PIV obtidas pelo mestrando Francisco em seu trabalho de qualificação [32]. Os resultados foram submetidos à rotina do Matlab que traça os vetores a fim de permitir a visualização do campo de vetores em um espaço correspondente ao da imagem. Dessa forma, é possível acompanhar o sentido que o escoamento percorreu a cada par de imagens.

Os resultados a seguir representam as distâncias em pixels percorridas pelas partículas em meio ao escoamento. A técnica do PIV gera o campo de velocidade do escoamento, que é obtido através da divisão dos deslocamentos das partículas pelo intervalo de tempo existente entre o par de imagens analisado. O intervalo de tempo entre as imagens é o inverso da frequência de aquisição da câmera de alta velocidade, então, a velocidade é dada pela equação (3).

$$V = d_p \cdot R \cdot fps \quad (3)$$

onde:  $V$  é a velocidade da região de interrogação em m/s,  $d_p$  é a distância em pixels percorrida pelas partículas na região analisada,  $R$  é a relação de conversão entre o valor em metros que é representado por um pixel e  $fps$  é a frequência de aquisição da câmera em imagens por segundo.

A obtenção dos valores de velocidade das regiões de interrogação altera apenas o módulo dos vetores, pois a direção e o sentido já são definidos pelos deslocamentos obtidos pela correlação cruzada, como ilustram os resultados a seguir.

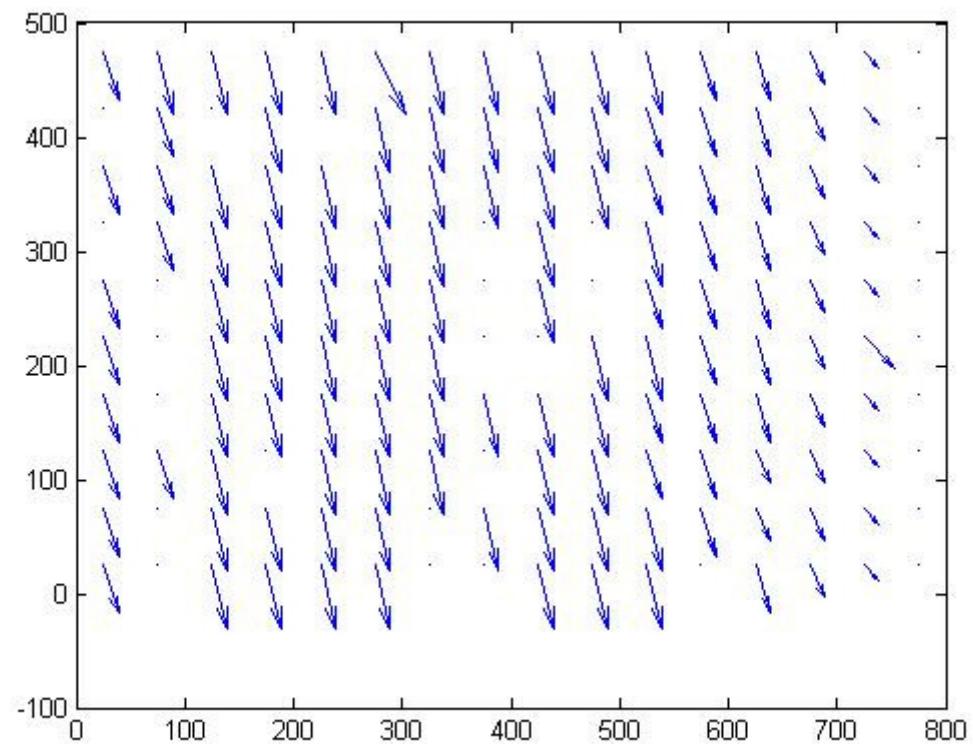
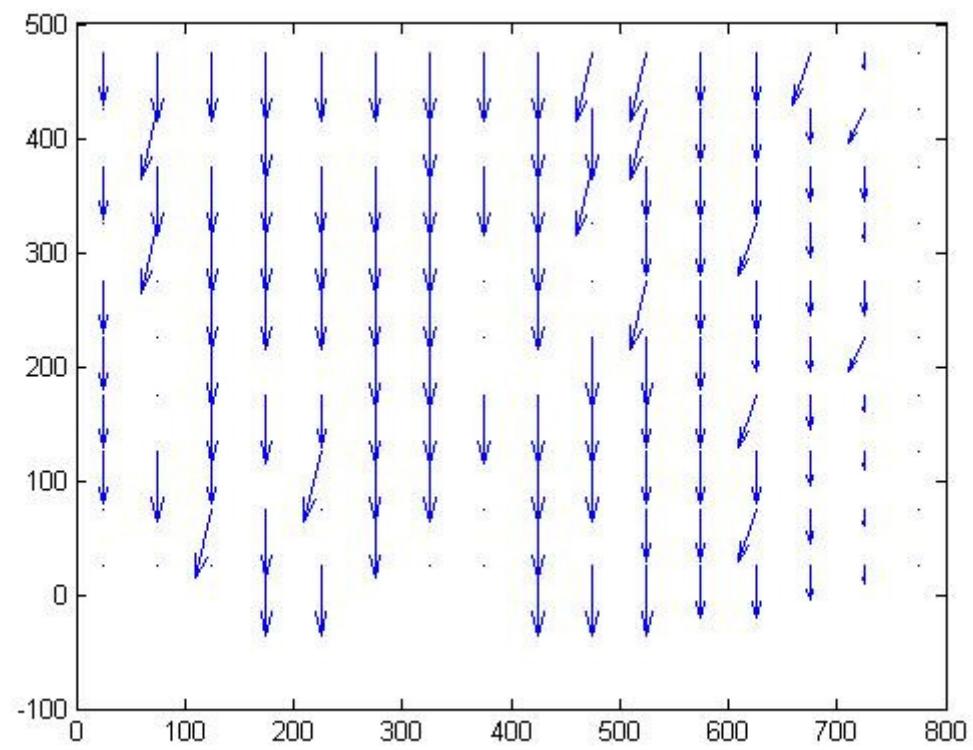


Figura 24 – Campos de vetores dos deslocamentos das regiões de interrogação para diferentes pares de imagens do  $\mu$ -PIV

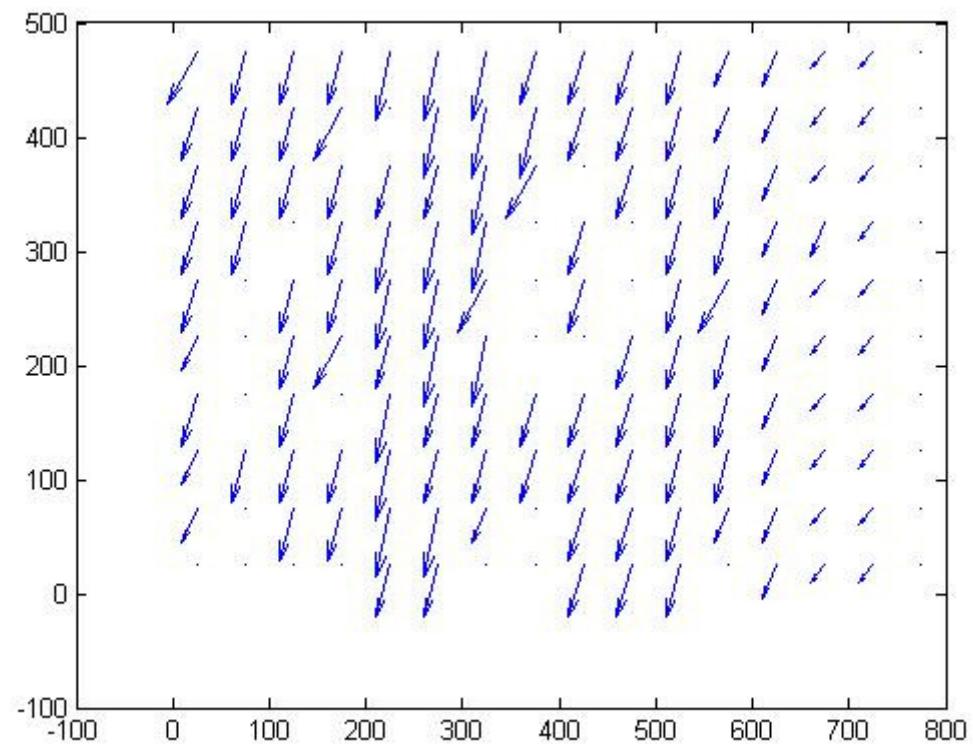
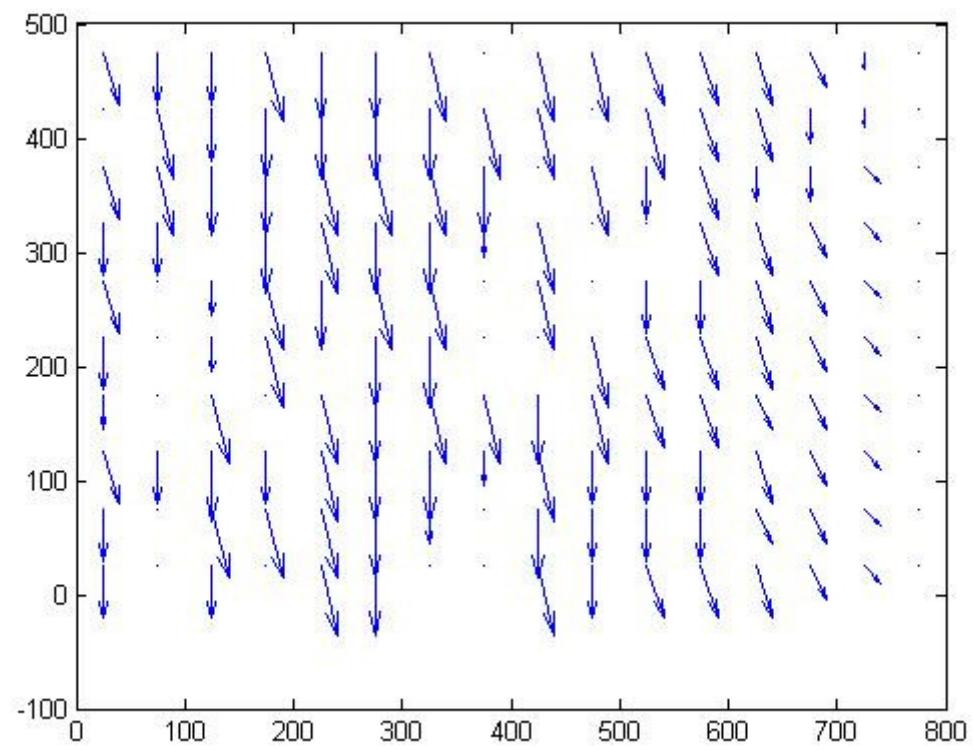


Figura 25 (continuação) – Campos de vetores dos deslocamentos das regiões de interrogação para diferentes pares de imagens do  $\mu$ -PIV

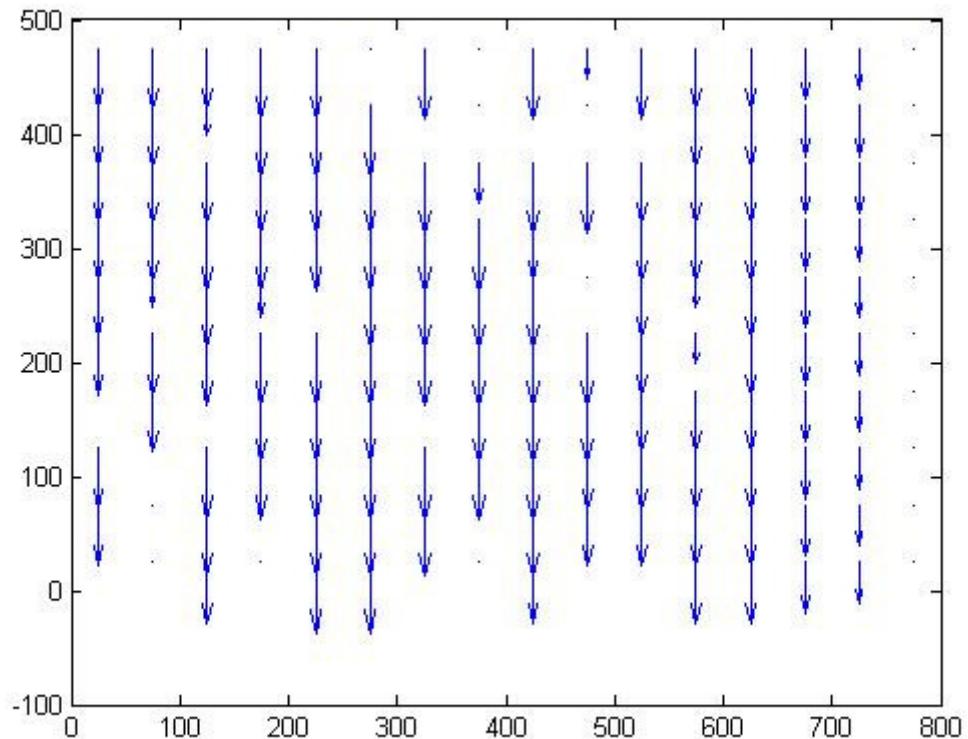
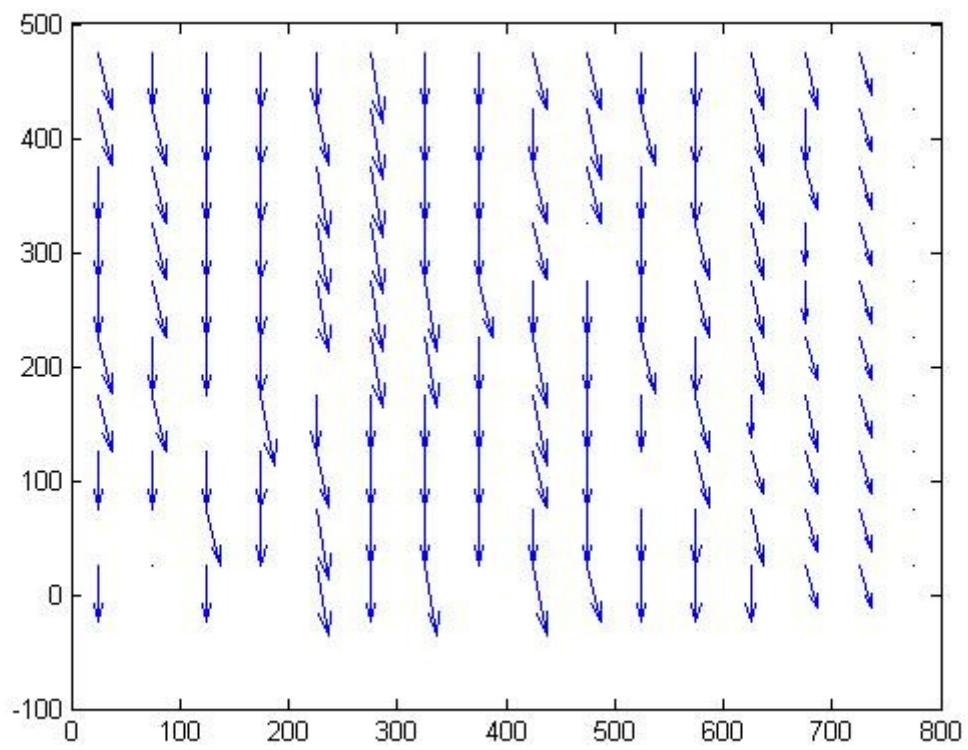


Figura 26 (continuação) – Campos de vetores dos deslocamentos das regiões de interrogação para diferentes pares de imagens do  $\mu$ -PIV

Os resultados contidos na Fig. 24 são os campos de vetores de deslocamento para seis diferentes pares de imagens do mesmo escoamento. Percebe-se com clareza que o sentido do escoamento ocorre majoritariamente de cima para baixo, entretanto, existem algumas tendências laterais, reflexo das variações que aconteceram nos experimentos. Essas variações podem ser observadas e identificadas nas filmagens.

Os resultados são coerentes com o escoamento desenvolvido pelo fluido durante os experimentos e principalmente com os princípios de mecânica dos fluidos, pois ao observar a lateral direita, onde está localizada uma das paredes do tubo retangular, percebe-se que o programa detecta vetores de módulos menores nas regiões próximas à parede, e os módulos aumentam ao se distanciarem da parede. Assim, verifica-se que os resultados respeitam o princípio de que a velocidade do fluido escoando no interior de um tubo é nula na parede do tubo.

É possível identificar que em alguns pontos dos campos de vetores o programa não reconheceu o deslocamento ocorrido nessas regiões. Isto se deve provavelmente ao fato da qualidade da imagem nesses pontos não ser adequada à análise mesmo após o tratamento efetuado. A qualidade insuficiente causa a obtenção de uma superfície de saída da correlação cruzada sem pico bem definido, impedindo a identificação do deslocamento.

Apesar dessa limitação do programa, vale ressaltar que a quantidade de pontos onde o deslocamento não foi identificado é reduzida comparada às regiões em que o programa obteve resultados adequados, assim, pode-se considerar que o programa desenvolvido atende aos requisitos de análise necessários à técnica do PIV.

## 8. Conclusão

Este trabalho consistiu de uma pesquisa acerca da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (*Particle Image Velocimetry - PIV*), abrangendo as etapas de revisão bibliográfica, desenvolvimento do programa de análise e aplicação do programa em imagens de experimentos de  $\mu$ -PIV para obtenção de resultados.

A revisão bibliográfica foi apresentada de forma a explicar primeiramente a técnica, os conceitos envolvidos e os procedimentos utilizados, e posteriormente as etapas de desenvolvimento da técnica ao longo das últimas três décadas, destacando a importância dos avanços tecnológicos, que permitiram melhorias no processamento e análise das imagens. Ao fim da revisão foram apresentadas algumas das possíveis aplicações da técnica em diferentes frentes de pesquisa.

O programa desenvolvido em Labview para a análise do PIV contempla o tratamento das imagens experimentais, a conversão dessas imagens para matrizes, a definição das regiões de interrogação e a aplicação da correlação cruzada a fim de obter os vetores de deslocamento do fluido contendo partículas.

A aplicação do programa nas imagens dos experimentos de  $\mu$ -PIV gerou resultados de campos dos vetores de deslocamento, os quais são facilmente transformados para vetores de velocidade. O programa apresentou resultados satisfatórios nas análises por ter apresentado dados coerentes com o escoamento desenvolvido nos experimentos e com o princípio da velocidade nula na parede do tubo.

Apesar de não ter sido possível reconhecer o deslocamento em algumas regiões, o programa obtém sucesso no reconhecimento da maior parte das análises, o que permite concluir que a ferramenta desenvolvida atende aos requisitos necessários e pode ser utilizada na obtenção dos resultados através da técnica do PIV.

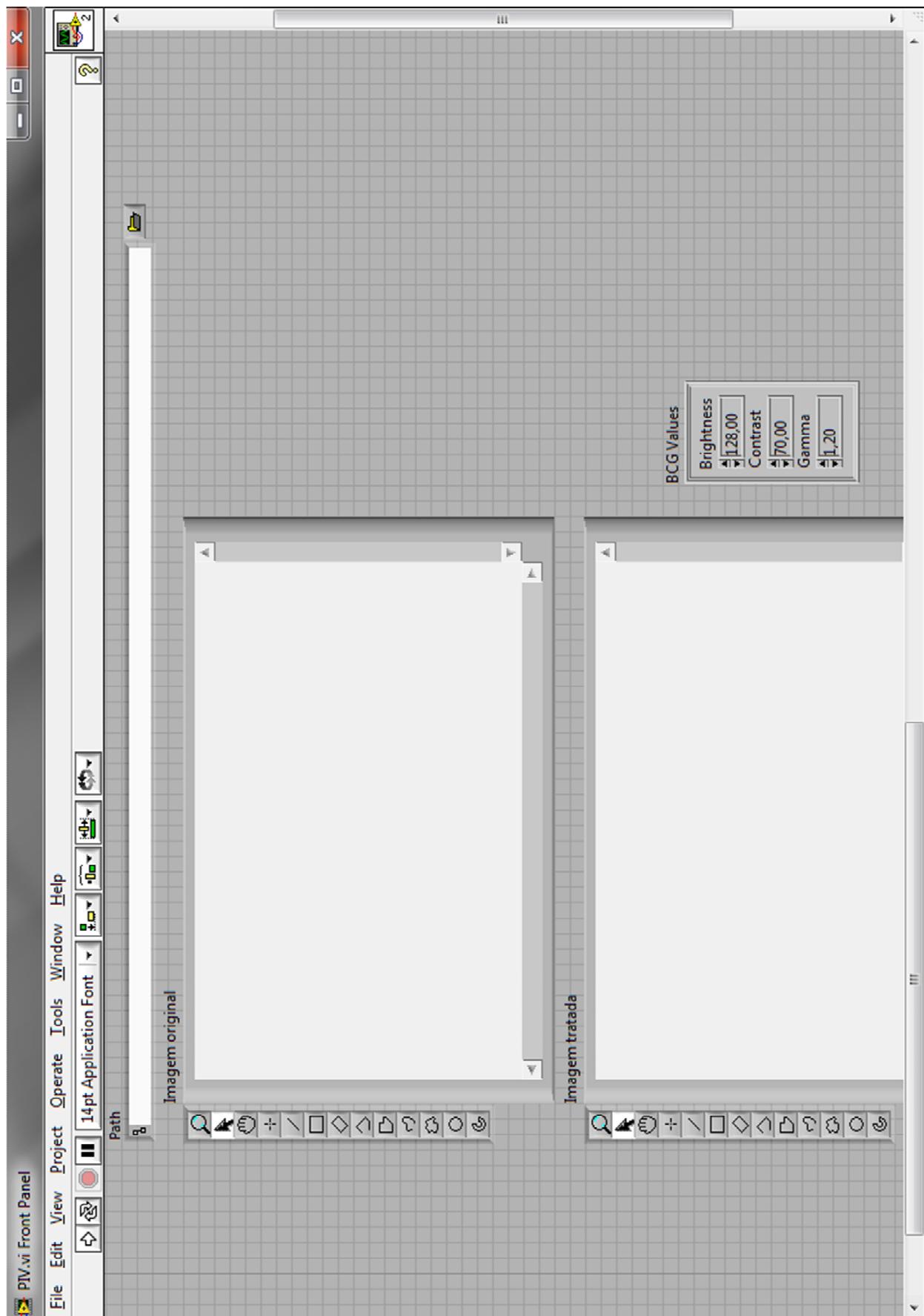
## Referências

1. Nicholl, C., 2005. Leonardo da Vinci: the flights of the minds. London: Penguin.
2. Kurada, S., Rankin, G. W., Sridhar, K., 1993. Particle-imaging techniques for quantitative flow visualization: a review. *Optics & Laser Technology*, v. 25, nº 4, p. 219-233.
3. Adrian, R. J., 1991. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 23, p. 261-304.
4. Shedd, T. A., 2013. Two-phase internal flow: toward a theory of everything. *Heat Transfer Engineering*, v. 34, nº 5-6, p. 420-433.
5. Yoon, S. Y., Ross, J. W., Mench, M. M., Sharp, K. V., 2006. Gas-phase particle image velocimetry (PIV) for application to the design of fuel cell reactant flow channels. *Journal of Power Sources*, v. 160, p. 1017-1025.
6. Adrian, R. J., 2005. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 39, p. 159-169.
7. Barker, D. B., Fournier, M. E., 1977. Measuring fluid velocities with speckle patterns. *Optics Letters*, v. 1, p. 135-137.
8. Dudderar, T. D., Simpkins, P. G., 1977. Laser speckle photography in a fluid medium. *Nature*, v. 270, p. 45-47.
9. Grousson, R., Mallick, S., 1977. Study of flow pattern in a fluid by scattered laser light. *Applied Optics*, v. 16, p. 2334-2336.
10. Meynart, R., 1983. Speckle velocimetry: an application of image analysis techniques to the measurement of instantaneous velocity fields in unsteady flow. In: Proceedings of the international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities (ICIASF'83), Haut-Rhin, France, September 1983. IEEE record, p. 30-36.
11. Pickering, C. J. D., Halliwell, N., 1984. LSP and PIV: photographic film noise. *Applied Optics*, v. 23, p. 2961–2969.
12. Adrian, R. J., 1984. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs. particle image velocimetry. *Applied Optics*, v. 23, p.1690–1691.
13. Kompenhans, J., Reichmuth, J., 1986. Particle imaging velocimetry in a low turbulent wind tunnel and other flow facilities. In: Proceedings of the IEEE Montech conference, Montreal, Canada, October 1986. AGARD conference proceedings no. 399, paper 35.
14. Sutton, M. M., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. H., Macneill, S. R., 1983. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Optical Engineering*, v. 1, p. 113-139.

15. Adrian, R. J., Yao, C. S., 1984. Development of pulsed laser velocimetry (PLV) for measurement of fluid flow. In: Patterson G, Zakin J (ed) Proceedings of the 8th biennial symposium on turbulence, Rolla, Missouri, September 1984, p. 170-186.
16. Adrian, R. J., 1986. An image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed laser velocimetry. *Applied Optics*, v. 23, p. 3855-3858.
17. Willert, C. E., Gharib, M., 1991. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 10, p. 181-193.
18. Westerweel, J., 1993. Analysis of PIV interrogation with low pixel resolution. In: Cha SS, Trolinger JD (eds) *Optical diagnostics in fluid and thermal flow*. SPIE, Bellingham, Washington, p. 624-635.
19. Nishino, K., Kasagi, K., Hirata, M., 1989. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing. *ASME J*, v. 111, p. 384-391.
20. Lourenco, L. M., Gogineni, S. P., Lasalle, R. T., 1994. On-line particle image velocimeter: an integrated approach. *Applied Optics*, v. 33 p. 2465-2470.
21. Keane, R. D., Adrian, R. J., 1992. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 49, p. 191-215.
22. Okamoto, K., Hassan, Y. A., Schmidl, W. D., 1995. New tracking algorithm for particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 19, p. 342-347.
23. Hart, D. P., 2000. PIV error correction. *Experiments in Fluids*, v. 29, p. 13-22.
24. Santiago, J. C., Meinhart, C. D., Wereley, S. T., Beebe, D. J., Adrian, R. J., 1998. A particle image velocimetry system for microfluidics. *Experiments in Fluids*, v. 25, p. 316-319.
25. Buchhave, P., 1992. Particle Image Velocimetry – status and trends. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 5, p. 586-604.
26. Adrian, R. J., Offutt, P. W., Landreth, C. C., Liu, Z., Hanratty, T. J., 1990. Studies of Liquid Turbulence Using Double-Pulsed Particle Correlation, Proc. 5th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 9 – 12, 1990, Lisbon, Portugal, Paper 15.4.
27. Paone, N., Riethmuller, M. L., Van den Braembussche, R. A., 1989. Experimental investigation of the flow in the vaneless diffuser of a centrifugal pump by particle image displacement velocimetry. *Experiments in Fluids*, v. 7, p. 371-378.
28. Shedd, T. A., 2001. Characteristics of the Liquid Film in Horizontal Two-Phase Annular Flow. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
29. Willert, C., Raffel, M., Kompenhans, J., Stasicki, B., Kähler, C., 1996. Recent applications of particle image velocimetry in aerodynamic research. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 7, n° 3/4, p. 247-256.

30. Chung, S.-K., Kim, S. K., 2008. Digital particle image velocimetry studies of nasal airflow. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, v.163, p. 111-120.
31. Lim, W. L., Chew, Y. T., Chew, T. C., Low, H.T., 1998. Steady flow dynamics of prosthetic aortic heart valves: a comparative evaluation with PIV techniques. *Journal of Biomechanics*, v. 31, p. 411-421.
32. Lavin, F. A. L., 2013. Desenvolvimento de um Micro-PIV de custo reduzido e utilização deste dispositivo no estudo de escoamento bifásico no interior de canais retangulares. Qualificação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
33. NATIONAL INSTRUMENTS LabVIEW for Windows, version 8.2.
34. NATIONAL INSTRUMENTS NI Vision Development Module, version 8.5.
35. Color adjustments: brightness, contrast and gamma. Disponível em: <<http://www.orpalis.com/blog/color-adjustments-brightness-contrast-and-gamma/>>. Acesso em 9 de novembro de 2013.

## Anexo A – Painel frontal do programa



## Anexo B – Diagrama de blocos de comando do programa

