



**RODRIGO REIS SOARES**

***BIOSPECKLE PIV (PARTICLE IMAGE  
VELOCIMETRY) PARA ANALISAR  
ESCOAMENTO DE FLUÍDOS***

**LAVRAS - MG  
2011**

**RODRIGO REIS SOARES**

***BIOSPECKLE PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY) PARA  
ANALISAR ESCOAMENTO DE FLUÍDOS***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Roberto Alves Braga Junior

Coorientadores

Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega

Dr. Graham William Horgan

**LAVRAS - MG  
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Soares, Rodrigo Reis.

Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) para analisar escoamento de fluidos / Rodrigo Reis Soares. – Lavras : UFLA, 2011.

74 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Roberto Alves Braga Júnior.

Bibliografia.

1. Speckle laser dinâmico. 2. Escoamento. 3. Wavelets. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 621.3662

**RODRIGO REIS SOARES**

***BIOSPECKLE PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY) PARA  
ANALISAR ESCOAMENTO DE FLUÍDOS***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA, em 07 de outubro de 2011

Dr. Roberto Alves Braga Junior

Dr. Hector Jorge Rabal

Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega

Dr. Alexander Mattioli Pasqual

---

Dr. Roberto Alves Braga Junior  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2011**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia e o Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas pela oportunidade de realização do curso.

Ào CNPQ, FAPEMIG e FINEP pelo apoio financeiro, através do Edital Universal 10.

À Capes pela bolsa de estudos.

Ao Professor Roberto Alves Braga Júnior, pela orientação, ensinamentos, confiança e incentivo.

À Professora Juliana Vilela Lourençoni Botega pela co-orientação, pela participação na banca examinadora, pelas sugestões, pelo companherismo e fundamentais contribuições.

Aos demais membros da banca examinadora, professores Hector Jorge Rabal e Alexander Mattioli Pasqual pela presença e sugestões que enriqueceram este trabalho.

Ao Professor Tadayuki Yanagi Junior pelo apoio e incentivo.

Aos colegas do CEDIA, em especial Henrique Coelho Barbosa pela parceria no projeto.

À minha família pelo constante apoio nas horas mais difíceis.

À Adriana pela companhia e incentivo.

Aos funcionários do DEG, pelo apoio, em especial Greice e “Seu” Antônio.

Enfim, obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um protocolo alternativo para a adoção da velocimetria por imagem de partículas (Particle Image Velocimetry - PIV) como técnica de monitoramento do escoamento, sem o uso de partículas externas semeadas como alvos na correlação cruzada das imagens de um escoamento. O padrão do *speckle laser* dinâmico com seus grãos variando no tempo foi a base da aplicação PIV, nesse caso com uma etapa de pré-processamento relacionada à estratégia de frequência. A fim de evitar o efeito de fervilhamento do fenômeno biospeckle, que também é usado para descrever a dinâmica do *speckle laser*, as imagens coletadas no tempo foram manipuladas no domínio da frequência isolando a expressão translacional dentro do sinal. Assim como o isolamento da informação translacional, a hipótese de os grãos nos padrões *speckle* serem usados para implementar PIV foi testada com um padrão de *speckle* simulado em uma translação pura, com um escoamento real de água em um tubo translúcido iluminado por um feixe de *laser*, e com um microescoamento em uma folha recém retirada da planta como uma reação das condições internas de quebra de pressão. Os resultados confirmaram a hipótese de uso da BioSpeckle Laser (BSL) associada à técnica de PIV e apresentaram um protocolo para lidar com o efeito do fervilhamento que se sobrepõe à translação dos grãos nos padrões *speckle*.

Palavras-chave: Speckle laser dinâmico. PIV. Wavelets. Escoamento.

## **ABSTRACT**

This work presents an alternative protocol for the adoption of the Particle Image Velocimetry (PIV) as a technique for monitoring the flow without the external addition of seed particles used as targets in cross-correlation of images of a flow. The dynamic laser speckle patterns with its grains varying in time formed the basis for the PIV application. In this case, with a pre-processing step related to the frequency approach. In order to avoid the boiling effect of the biospeckle phenomenon, which is also used to describe the dynamic laser speckle, the images collected in time were manipulated in the frequency domain by isolating the expression inside the translational signal. The hypothesis of using grains in speckle patterns to implement PIV, as well as the isolation of translational information was tested with a simulated speckle pattern on a pure translation, an actual flow of water in a translucent tube illuminated by a laser beam, and a microflow in a torn leaf in response to internal conditions of a broken pressure. The results confirmed the hypothesis that considers the use of BioSpeckle Laser (BSL) associated with the PIV technique and showed a protocol for dealing with the boiling effect that undermines translation information in speckle patterns.

Keywords: Dynamic speckle laser. PIV. Wavelets. Flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Capa e alguns desenhos de uma cópia de Del Moto e della Misura Dell' acqua (NICHOLL, 2005).....	13
Figura 2 Ludwig Prandtl (RAFFEL et al., 1998) .....	14
Figura 3 Simulação do experimento de Prandtl (RAFFEL et al., 1998) .....	15
Figura 4 Laser Doppler Velocimetry (LDV) .....	16
Figura 5 Técnica PTV (RODRIGUES, 2003).....	16
Figura 6 Padrão do speckle laser (BRAGA JÚNIOR, 2003) .....	19
Figura 7 a-PIV clássico (DOMINGOS; HACAMO; ALMEIDA, 1991); b-pico de correlação (MIRANDA, 2004); c-vetor de velocidade.....	23
Figura 8 Partículas (RODRIGUES, 2003) .....	24
Figura 9 Concentração de partículas no escoamento: a-baixa concentração, b-concentração normal, c-alta concentração (RAFFEL et al., 1998).....	25
Figura 10 Janela de interrogação.....	25
Figura 11 Janela de interrogação.....	26



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 Fujii.....	20
Equação 2 Correlação Cruzada .....	26

## SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS .....	8
	LISTA DE EQUAÇÕES.....	9
1	INTRODUÇÃO .....	11
2	REFERENCIAL TEORICO .....	13
2.1	Evolução na avaliação experimental do escoamento .....	13
2.2	<i>Speckle Laser</i> Dinâmico.....	18
2.3	Métodos de Análise do <i>Speckle</i> dinâmico .....	19
2.4	Velocimetria por Imagem de Partículas (Particle Image Velocimetry – PIV) .....	20
2.4.1	Partículas.....	23
2.4.2	Janelas de Interrogação .....	25
2.5	Correlação Cruzada .....	26
3	CONCLUSÃO.....	26
	REFERÊNCIAS .....	27
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO.....	29
	APÊNDICE A.....	49
	APÊNDICE B.....	51
	APÊNDICE C .....	73

## INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento em todas as suas formas foi e continua sendo um desafio para pesquisadores de todo o mundo. O estudo deste fenômeno é importante e envolve diversas áreas, entre as quais, por exemplo, a aviação, com o estudo da aerodinâmica e o corpo humano, com o estudo do fluxo sanguíneo. Em seu afã de compreender este fenômeno, tais áreas buscam diferentes formas de estudá-lo experimentalmente, através do tempo. Uma das principais restrições para esse conhecimento é não interferência no escoamento no momento da análise. O fenômeno do escoamento sofre algum grau de interferências de grande parte das técnicas experimentais que usam desde os tubos de Pitot para medir o escoamento de ar, até a técnica da Particle Image Velocimetry (PIV), que envolve a adição de partículas no escoamento. Entretanto, áreas como a medicina, a veterinária e a biologia necessitam de técnicas que não interfiram no objeto estudado. Não só porque lidam com seres vivos, mas também porque buscam uma medição menos intrusiva possível.

Os desenvolvimentos do *laser* e das técnicas de análise de imagens possibilitaram um avanço no estudo do escoamento, como a técnica do PIV.

Igualmente, o desenvolvimento do estudo do speckle *laser* e os fenômenos a ele relacionados deram ao *laser* uma importância singular na análise de materiais biológicos ou não, principalmente pela sua não interferência no objeto estudado. A capacidade do speckle *laser* dinâmico de monitorar as mudanças de posição dos dispersores de luz permite, por exemplo, a identificação da presença de escoamento em um tecido animal iluminado, em particular do fluxo sanguíneo. Apesar desta habilidade, a determinação da direção do escoamento não é conseguida pelas técnicas tradicionais de análise do speckle *laser* dinâmico, que não conseguem separar a dispersão da luz gerada pela translação da outra dispersão, promovida pelos inúmeros movimentos dos

dispersores no interior do escoamento observado.

A separação das componentes constituintes dos diversos sinais que compõem a história dinâmica dos padrões de interferência provenientes da iluminação de um material por uma fonte coerente tem sido realizada por meio de filtragens dos sinais antes de sua análise pelas técnicas do *speckle laser* dinâmico. A partir desta abordagem, surge a hipótese da filtragem dos sinais de um escoamento iluminado pelo *laser* com a expectativa de separar a translação relacionada ao escoamento do fluido das outras atividades geradoras do *speckle* dinâmico.

Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é apresentar uma metodologia para o emprego da técnica do *speckle laser* dinâmico associada à técnica do PIV como instrumento de estudo do escoamento em suas diversas formas. Os testes em dados simulados e reais (escoamento de água e microescoamento de seiva em uma folha de café) são usados como validação da metodologia proposta.

#### **Objetivos:**

Desta forma, o presente trabalho utiliza a técnica PIV para a medição do escoamento em um fluido associado ao fenômeno do *speckle laser* dinâmico como fonte geradora das imagens de monitoramento deste movimento.

Especificamente, o trabalho visa utilizar o *speckle laser* dinâmico produzido pela iluminação de um escoamento em material biológico e não biológico e tratar este padrão de *speckle* como as partículas semeadas da técnica PIV tradicional.

O estudo ocorreu em três fases:

- a) simulação, onde o escoamento do *speckle* será simulado;
- b) experimentação, com a análise de um escoamento real;
- c) experimentação, com a análise de um escoamento biológico.

## 1 REFERENCIAL TEORICO

### 2.1 Evolução na avaliação experimental do escoamento

O fenômeno que representa o escoamento de fluidos e partículas é um dos assuntos que tem ocupado a mente de muitos cientistas por vários séculos, sendo, até hoje, um dos mais complexos assuntos da engenharia. Um exemplo da importância e da longa história do seu estudo vem da Itália, por volta do ano de 1492, quando a América estava sendo descoberta, precisamente na província de Milão que sofria, àquela época, com inúmeras inundações, como vemos hoje nas nossas grandes cidades.

Nesta região, um homem ficava dias às margens dos canais, “semeando” a água com pedras de diferentes formas e tamanhos e observando o que acontecia durante seu escoamento. Seu nome era Leonardo da Vinci e sobre suas observações ele escreveu um tratado chamado *Del Moto e della Misura Dell' acqua* (Figura 1), em que detalhava o escoamento da água e seus parâmetros físicos (NICHOLL, 2005).



Figura 1 Capa e alguns desenhos de uma cópia de Del Moto e della Misura Dell' acqua

Fonte: Nicholl (2005, p. 326).

Ele projetou um sistema de canais e eclusas, dando início à obra que acabou com as enchentes na província. Uma obra que, em seu todo, levou mais de 200 anos (1515 a 1777) para ficar pronta e que está em funcionamento até hoje, o que demonstra toda a importância do estudo do escoamento e suas aplicações. Além disso, é um exemplo da utilização de partículas, neste caso, pedras, para se estudar o movimento dos fluidos e determinar suas propriedades.

As técnicas de medição do escoamento têm origem entre os anos de 1732 e 1797, com John Bernoulli, Henrique Pitot e Giovanni Batista Venturi, entre outros (RAFFEL et al., 1998).

Mais tarde, por volta de 1904, Ludwig Prandtl, um dos pais da aerodinâmica, construiu um equipamento (Figura 2) onde um escoamento de água era gerado e Prandtl semeava o escoamento com partículas de mica. Neste equipamento, ele colocava alguns perfis, de asas, por exemplo, e estudava o que acontecia no escoamento por meio das partículas de mica (RAFFEL et al., 1998).



Figura 2 Ludwig Prandtl

Fonte: Raffel et al. (1998, p. 2).

Com os experimentos de Prandtl, uma descrição qualitativa do escoamento era facilmente originada. Porém, uma descrição quantitativa, utilizando a técnica de semear partículas no escoamento, ainda não era possível (Figura 3).

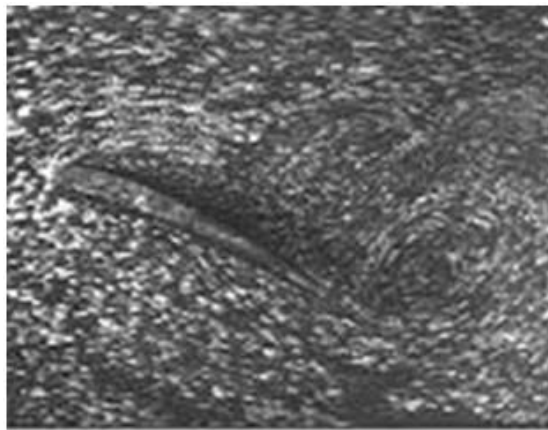


Figura 3 Simulação do experimento de Prandtl

Fonte: Raffel et al. (1998, p. 2).

Em 1964, Yeh e Cummins utilizaram técnica do *Laser Doppler Velocimetry (LDV)* ou *Laser Doppler Anemometry (LDA)*, que consistia em um feixe simples dividido em outros dois de igual intensidade, os quais eram focados em um mesmo ponto no campo do escoamento. Uma interferência padrão era formada no ponto onde os feixes se cruzavam, definindo uma região cujo volume é conhecido (Figura 4). Partículas em movimento pelo volume espalham a luz que é coletada por um fotodetector. A frequência resultante da saída do fotodetector está diretamente relacionada à velocidade da partícula. Foi uma das primeiras utilizações do *laser* para a medição de propriedades do escoamento, particularmente a velocidade (RAFFEL et al., 1998).

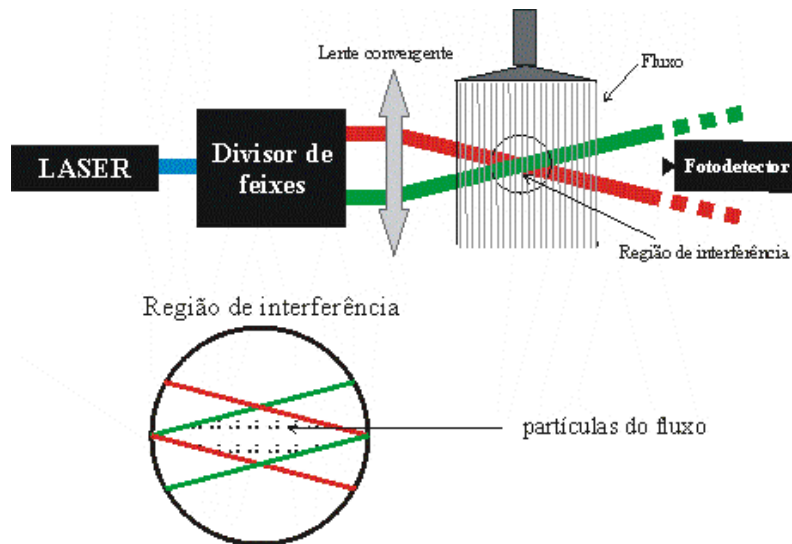


Figura 4 Laser Doppler Velocimetry (LDV)

Em 1982, Van Dyke utilizou outra técnica conhecida como *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) ou Rastro (Figura 5), que consistia em uma maior exposição da imagem, gerando a captura do rastro das partículas semeadas. O tamanho do rastro, o tempo de abertura da câmera e a resolução da imagem forneciam os dados para o cálculo da Velocidade (RAFFEL et al., 1998).

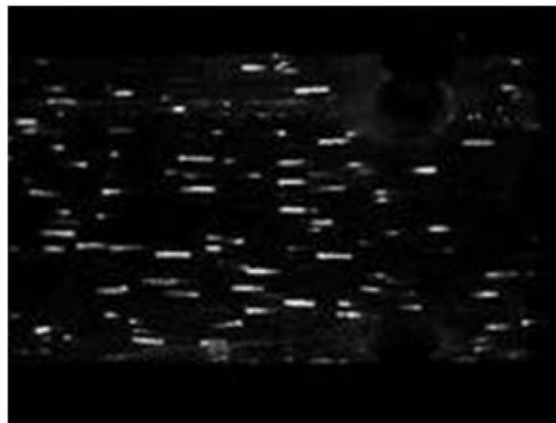


Figura 5 Técnica PTV

Fonte: Rodrigues (2003, p. 41)



Segundo Rodrigues (2003), Adrian e Yao utilizaram em 1985 as técnicas de *Particle Image Velocimetry (PIV)* e *Laser Speckle Velocimetry (LSV)* e assentaram as bases do espalhamento de vários tipos de partículas em dois modos de velocimetria por *laser* pulsado: imagem de partícula (PIV) e *speckle* (LSV – no caso com grande concentração de partículas semeadas no escoamento). À época, a técnica LSV foi deixada de lado pela grande exigência de processamento, extrapolava os equipamentos disponíveis.

A técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry - PIV*) avançou bastante e hoje é utilizada em diversos campos como, por exemplo, na aeronáutica. A técnica é de grande interesse de entidades como a NASA, principalmente por ser uma técnica de medição de escoamento de baixa interferência (KROTHAPALLI, 1991).

A técnica PIV utiliza pequenas partículas que são adicionadas a um escoamento e seus movimentos são medidos pela comparação de duas imagens capturadas com um curto período de uma região do escoamento, por meio de correlação cruzada. A segunda imagem é parecida com a primeira, mas, com o deslocamento das partículas introduzidas e conhecendo o período entre o deslocamento das duas imagens, pode-se calcular a velocidade das partículas envolvidas (MIRANDA, 2004).

O termo *speckle* presente na denominação técnica conhecida como *Laser Speckle Velocimetry* está relacionado ao fenômeno causado pela presença de inúmeras partículas no caminho do *laser*, partículas estas participantes do escoamento em estudo. Este termo, portanto, não guarda relação com o mesmo termo usado para definir o fenômeno conhecido pela iluminação de um objeto por uma luz altamente coerente, como é o caso do *laser*. Ao iluminar um anteparo, o *speckle* proveniente do padrão de interferência gerado pelo *laser* apresenta-se como uma ferramenta para a análise da atividade biológica ou não

biológica com grande sensibilidade (RABAL; BRAGA, 2008). Em muitas aplicações, o *speckle* dinâmico, como é conhecido este fenômeno proveniente do monitoramento da mudança no tempo do padrão do *speckle*, permite também a identificação da atividade relacionada a algum tipo de escoamento (BRIERS, 1975; RAJAN et al., 2006; SEROV; LASSER, 2005), mas não com o mesmo objetivo apresentado pelas técnicas do LSV e PIV, pois, no caso do *speckle* dinâmico, é possível apenas observar a presença do escoamento, mas não a sua direção.

## **2.2 *Speckle Laser Dinâmico***

O surgimento do *laser* levou ao desenvolvimento de inúmeras aplicações em diversas áreas do conhecimento, como é o caso do *speckle*, padrão de interferência gerado por uma iluminação coerente (Figura 6).

Anteriormente, considerado apenas ruído, o granulado luminoso conhecido como *speckle* mostrou-se portador de inúmeras informações sobre o objeto iluminado. O *speckle* reflete o comportamento dos elementos da superfície do objeto em movimento. O *speckle* resultante também representa tal deslocamento, criando o *speckle laser* dinâmico.

As mudanças do *speckle* analisadas no tempo trazem informações sobre o nível da atividade no objeto e a aparência de fervilhamento é a característica observada. Em materiais biológicos, o *speckle* dinâmico é também conhecido como *biospeckle*, sendo que as diversas técnicas para o processamento podem ser divididas em técnicas gráficas e numéricas, bem como no domínio do tempo e da frequência (RABAL; BRAGA, 2008).

Como exemplo, destacamos a identificação do fluxo sanguíneo inicialmente estudado por Briers (1975), a apresentação de áreas de atividades em raízes (BRAGA JÚNIOR et al., 2009), ou até mesmo a quantificação do

movimento de massa em análise de sêmen animal (CARVALHO et al., 2009). Abordagens que permitam associar as metodologias de análise do *biospeckle* às análises de escoamento podem ser relevantes no estudo do fluxo sanguíneo, da atividade nas raízes e do movimento dos espermatozóides.

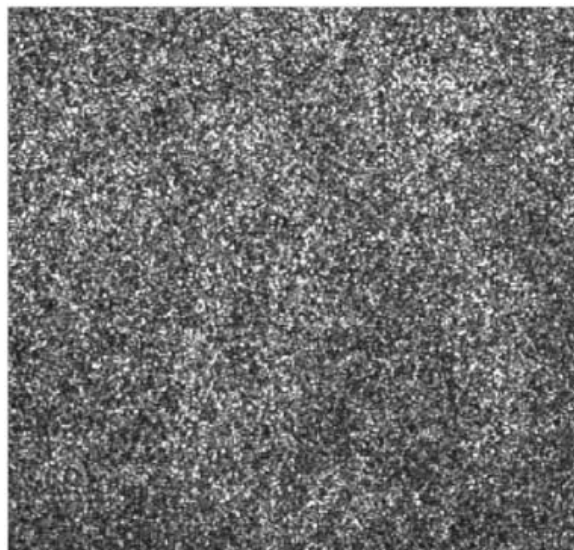


Figura 6 Padrão do speckle laser

Fonte: Braga Júnior (2003).

### **2.3 Métodos de Análise do *Speckle* dinâmico**

São vários os métodos de análise do *speckle* dinâmico, entre eles destacam-se o Momento de Inércia (ARIZAGA et al., 1999), o Método do Contraste (BRIERS, 1975) e o da Autocorrelação (XU; JOENATHAN; KHORANA, 1995), como ferramentas que apresentam resultados numéricos. Entre os métodos que apresentam resultados visuais ou gráficos, destacam-se os de Fujii (FUJII; ASAKVRAT; NOHIRA, 1985), Diferenças Generalizadas (ARIZAGA et al., 2002) e LASCA (BRIERS; WEBSTER, 1996).

Neste estudo, utilizou-se o Método de Fujii, classificado como uma abordagem gráfica de sinais do *biospeckle* e baseado no cálculo das diferenças (FUJII; ASAKVRAT; NOHIRA, 1985) entre os pixels das imagens gravadas ao longo do tempo. Neste método, calcula-se a soma das diferenças de intensidade luminosa (expressos pelos níveis de cinza) entre uma imagem e sua imagem subsequente, dividindo o somatório pela soma dessas duas imagens, o que significa um processo de ponderação. O resultado é uma nova imagem mostrando os pixels que estão experimentando mudanças significantes na intensidade.

O procedimento para a construção do mapa Fujii é descrito pela equação 1.

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^N \left| \frac{I_k(x, y) - I_{k+1}(x, y)}{I_k(x, y) + I_{k+1}(x, y)} \right| \quad (1)$$

Onde  $I(x, y)$  é a matriz que representa a escala de cinza resultante da soma das diferenças das imagens  $I_k$  e suas subseqüentes  $I_{k+1}$  para completar o número  $N$  de imagens coletadas.

#### **2.4 Velocimetria por Imagem de Partículas (Particle Image Velocimetry – PIV)**

A Velocimetria por Imagem de Partículas (*Particle Image Velocimetry - PIV*) é uma técnica de medição para determinar a velocidade de um escoamento. É utilizada em diversos campos, tais como aerodinâmica, hidráulica, vulcanologia, sustentação e resistência, túnel de vento, entre outros (RAFFEL et al., 1998).

A técnica PIV tem hoje muitas variações da aplicação e, entre elas,

destacam-se:

*DIGITAL PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – DPIV*: consiste na análise posterior de imagens digitais capturadas do escoamento. Após o tratamento adequado da imagem, aplica-se a técnica PIV para a obtenção dos dados necessários (GUTKOSKI, 2001).

*HOLOGRAFIC PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – HPIV*: consiste em um arranjo composto por dois feixes de luz coerente (laser), separados, sendo que um deles ilumina as partículas em movimento e o outro não, iluminando 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 (GUTKOSKI, 2001).

*PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY 3D – PIV3D*: consiste na utilização da técnica PIV, porém com a adição de uma segunda câmera que, em efeito estereoscópico, permite a captura de imagem em 3D para análise. Apesar da maior complexidade, a técnica permite a observação de dados de forma espacial, o que não ocorre no PIV tradicional (GUTKOSKI, 2001).

Tanto o HPIV quanto o PIV3D são formas de obtenção do terceiro componente da velocidade, porém as duas técnicas ainda apresentam limitações em relação à precisão dos resultados (GUTKOSKI, 2001).

Esse trabalho interessa-se pelo PIV tradicional, chamado de PIV clássico (Figura 7), que consiste na análise de um escoamento, gasoso ou líquido, em que pequenas partículas traçadoras a ele são adicionadas. Um feixe de *laser* é jogado sobre o escoamento e a luz dispersada é capturada por uma câmera CCD. Os movimentos são medidos pela comparação de duas imagens capturadas em um curto período de uma região do escoamento (janela de interrogação), utilizando correlação cruzada. A segunda imagem é parecida com a primeira. Com o deslocamento das partículas introduzidas e o período entre as duas imagens,

podemos calcular a velocidade das partículas envolvidas (RAFFEL et al., 1998).

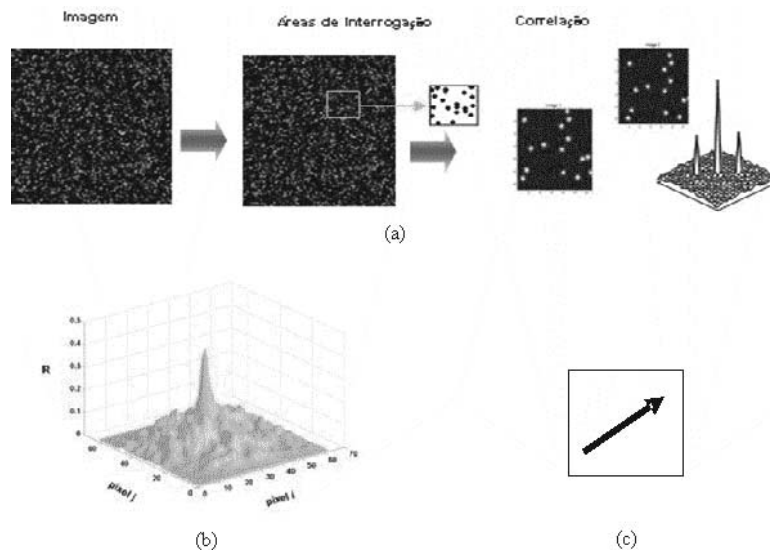


Figura 7 a-PIV clássico (DOMINGOS; HACAMO; ALMEIDA, 1991); b-pico de correlação (MIRANDA, 2004); c-vetor de velocidade.

### 2.4.1 Partículas

Para a utilização da técnica PIV, a sementeira de partículas no escoamento é necessária para que sigam o seu movimento e permitam a interferência com o *laser* para a captura das imagens. Alguns cuidados básicos devem ser tomados em relação às partículas: elas não devem interferir decisivamente no escoamento e devem refletir a luz do *laser* de forma satisfatória para sua posterior análise. Se as partículas forem pequenas demais, poderão seguir o escoamento, mas não refletirão o *laser* de forma satisfatória devido ao comprimento de onda da luz, ou por serem leves demais e não seguirem o escoamento corretamente. Se, ao contrário, as partículas forem muito grandes, a possibilidade de não seguirem o escoamento, ou seguir mais

lentamente e interferir no escoamento também é grande. Portanto, a escolha da partícula ideal para análise de cada escoamento vai depender das características do material do fluido e também do material e da forma da própria partícula (RAFFEL et al., 1998; RODRIGUES, 2003).

Encontra-se na Figura 8 imagens de algumas partículas.

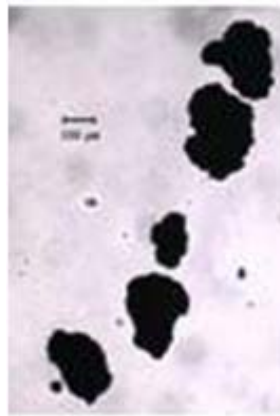


Figura 8 Partículas

Fonte: Rodrigues (2003, p. 116).

A distribuição das partículas no escoamento deve ser homogênea e a densidade de partículas deve ser considerada, bem como o objetivo da medição. A Figura 9 apresenta um exemplo de distribuição de partículas (RAFFEL et al., 1998).

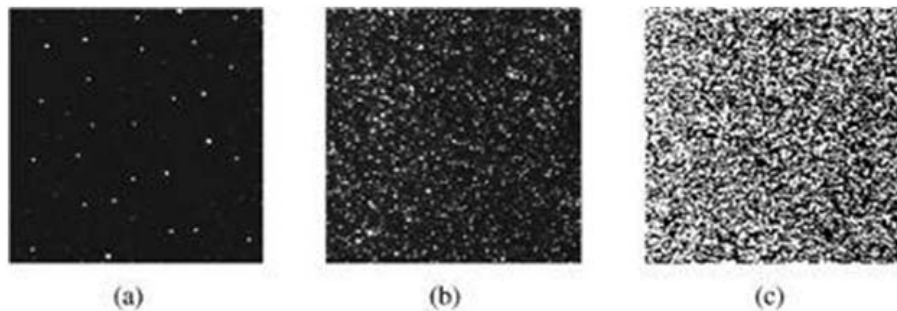


Figura 9 Concentração de partículas no escoamento: a-baixa concentração, b-concentração normal, c-alta concentração.

Fonte: Raffel et al. (1998, p. 7).

#### 2.4.2 Janelas de Interrogação

As chamadas janelas de interrogação (Figura 10) são as áreas da imagem que serão utilizadas para a medição do deslocamento das partículas e elas devem ser pequenas o bastante para que o gradiente de velocidade não tenha influência significativa nos resultados, pois o vetor velocidade será definido nos pequenos quadrados (janelas). Normalmente, as janelas variam de 16x16 pixels até 64x64 pixels, ou de acordo com o problema (DOMINGOS; HACAMO; ALMEIDA, 1991).

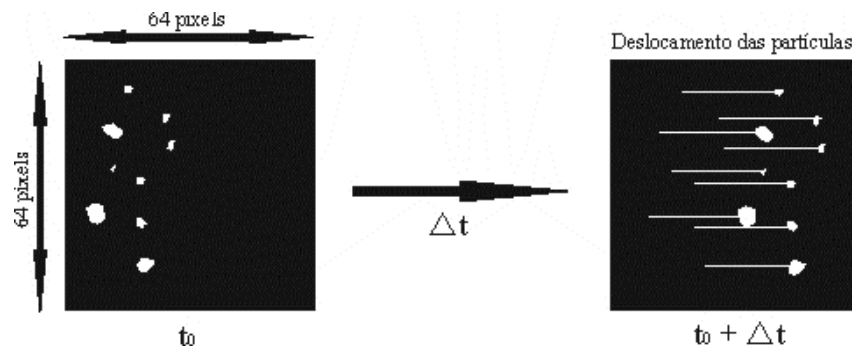


Figura 10 Janela de interrogação.



## 2.5 Correlação Cruzada

A operação de correlação cruzada é dada por:

$$C(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i + x, j + y) \quad (2)$$

onde  $C(x, y)$  é a correlação no pixel  $(x, y)$ ,  $I(i, j)$  é a intensidade luminosa do pixel de coordenada  $(i, j)$ , os índices 1 e 2 indicam a imagem analisada. A correlação cruzada em uma janela da imagem com um tamanho de  $(x_n, y_n)$ , conhecida como janela de interrogação, mais a região vizinha  $(x_n/2, y_n/2)$ , representada por  $M$  e  $N$ , nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente (Figura 11). Portanto, no exemplo, a correlação ocorre a partir de  $M$ , variando de  $-M$  ( $x_1 - x_n/2$ ) até  $M$  ( $x_n + x_n/2$ ) e  $N$  varia de  $-N$  ( $y_1 - y_n/2$ ) até  $N$  ( $y_n + y_n/2$ ).

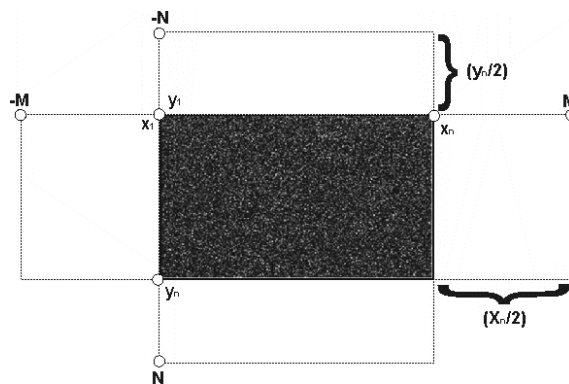


Figura 11 Janela de interrogação.

## 2 CONCLUSÃO

O *Biospeckle* PIV pode ser considerado uma ferramenta confiável para medir o escoamento em uma situação controlada associada ao uso de filtragem como uma alternativa aos métodos tradicionais que exigem a semente de partículas no escoamento. A translação pura de um padrão de *speckle* foi o ensaio ideal, sem qualquer demanda de abordagem e filtragem de frequência. O BSL PIV foi testado com sucesso em um escoamento real de água e nutrientes em uma veia de folha com a adoção do isolamento em frequência do comportamento de translação dentro da dinâmica dos padrões de *speckle*. O gráfico dos ângulos dos vetores de velocidade apresentou-se como uma ferramenta viável de estudo do escoamento.

## REFERÊNCIAS

- ARIZAGA, R. et al. Activity image in dynamical speckle. In: IBEROAMERICAN OPTICS MEETING, 3.; LATIN AMERICAN MEETING ON OPTICS, LASERS, AND THEIR APPLICATIONS, 6., 1998, Cartagena de Indias. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, c1999. v. 3572, p. 310-314.
- ARIZAGA, R. et al. Display of local activity using dynamical speckle patterns. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 41, n. 2, p. 287-294, 2002.
- BRAGA JÚNIOR, R. A. Assessment of seed viability by laser speckle techniques. **Biosystems Engineering**, London, v. 86, n. 3, p. 287-294, 2003.
- BRAGA JÚNIOR, R. A. et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues. **European Biophysics Journal with Biophysics Letters**, Berlim, v. 38, n. 5, p. 679-686, 2009.
- BRIERS, J. D. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimens. **Optics Communications**, Amsterdam, v. 13, p. 324-326, Mar. 1975.
- BRIERS, J. D.; WEBSTER, S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non scanning full field technique for monitoring capillary blood flow. **Journal of Biomedical Optics**, Bellingham, v. 4, n. 1, p. 174-179, 1996.
- CARVALHO, P. H. A. et al. Motility parameters assessment of bovine frozen semen by biospeckle laser (BSL) system. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 102, n. 1, p. 31-35, 2009.
- DOMINGOS, B.; HACAMO, I.; ALMEIDA, S. **Métodos de medição de velocidades**. Instituto Superior Técnico, 1991. Disponível em: <<http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/01slides/3.pps>>. Acesso em: 22 nov. 2009.
- FUJII, H.; ASAKVRAT, T.; NOHIRA, K. Blood flow observed by time-varying laser speckle. **Optics Letters**, New York, v. 10, n. 3, p. 104-106, Mar. 1985.
- GUTKOSKI, L. L. **Ferramenta computacional para a medição de campos de velocidades utilizando processamento digital de imagens**. 2001. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

KROTHAPALLI, A. The development of laser speckle velocimetry for the study of vortical flows. **NASA STIRecon Technical Report N**, v. 91, p. 16289, July 1991. Disponível em: <<http://www.mendeley.com/research/development-laser-speckle-velocimetry-study-vortical-flows/>>. Acesso em: 22 nov. 2009.

MIRANDA, M. A. C. **Utilização da velocimetria por imagem de partículas na visualização e caracterização de escoamento bifásico**. 2004. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NICHOLL, C. **Leonardo da Vinci: the flights of the minds**. Londres: Penguin Books, 2005. 622 p.

RABAL, H.; BRAGA, R. A. **Dynamic laser speckle and applications**. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2008.

RAFFEL, M. et al. **Particle image velocimetry: a practice guide**. Berlim: Springer Verlag, 1998.

RAJAN, V. et al. Speckles in laser doppler perfusion imaging. **Optics Letters**, New York, v. 31, n. 4, p. 468, 2006.

RODRIGUES, R. E. S. **Arrastamento de partículas submetidas a variações de velocidade**. 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SEROV, A.; LASSER, T. High-speed laser doppler perfusion imaging using an integrating CMOS image sensor. **Optics Express**, Washington, v. 13, n. 17, p. 6416-6428, 2005.

XU, Z. J.; JOENATHAN, C.; KHORANA, B. M. Temporal and spatial properties of the time-varying speckles of botanical specimens. **Optical Engineering**, Washington, v. 34, n. 5, p. 1487-1502, 1995.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO**

Artigo formatado de acordo com o periódico Flow Measurement and Instrumentation

***BIOSPECKLE PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY) FOR ANALYSING FLUID FLOW***

R. R. Soares, H. C. Barbosa, R. A. Braga\*, J. V. L. Botega, G. W. Horgan

Federal University of Lavras, CP 3037 • CEP 37200-000 • Lavras MG

\* *Correspondence author*

*Tel.:* +55 35 3829 1672; *fax:* +55 35 3829 1481

*E-mail address:* robbraga@gmail.com (R. A. Braga)

**Abstract**

This work presents an alternative protocol for the adoption of the particle image velocimetry (PIV) technique in flow monitoring without the use of external particles seeded as targets in the cross-correlation of the flow images. The dynamic laser speckle patterns with grains varying in time formed the basis for the PIV application. In this case, with a pre-processing step related to the frequency approach. In order to avoid the boiling effect of the biospeckle phenomenon, which is also used to describe the dynamic laser speckle, the images collected in time were manipulated in the frequency domain by isolating the expression inside the translational signal. The hypothesis of using grains in speckle patterns to implement PIV, as well as the isolation of translational information was tested with a simulated speckle pattern on a pure translation, a real flow of water in a translucent tube illuminated by a beam of laser, and a microflow in a torn leaf in response to internal conditions of a broken pressure. The results confirmed the hypothesis that considers the use of BioSpeckle Laser (BSL) associated with the PIV technique and showed a protocol for dealing with the boiling effect that undermines translation information in speckle patterns.

**Keywords:** dynamic speckle laser, PIV, wavelets, flow

**1. Introduction**

The quest for understanding the phenomenon of the flow of fluids or any

other material still is of interest for many researchers. At the end of the 15th century, Leonardo da Vinci, while looking for a solution to the flooding that ravaged the province of Milan in Italy, stayed for days on the banks of canals, "seeding" the water with stones of different shapes and sizes and observing what happened to the flow of water [1]. Recently, studies of flow have been carried out have generated innumerable new applications, which increasingly require the development of new measurement and techniques evaluation.

In the past three decades, optical technologies have been the adopted to analyze the flow using lasers. Among the techniques developed, it can be cited the Laser Doppler Velocimetry (LDV), the Particle Image Velocimetry (PIV) and its various derivatives such as Laser Speckle Velocimetry (LSV), Holographic Particle Image Velocimetry (HPIV) Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) and Particle Image Velocimetry 3D (PIV3D), and others [2]. In the case of LSV, we can consider speckle as a kind of seeding of a large amount of small particles in the flow [2].

The Dynamic Speckle Laser or Biospeckle Laser (BSL) was developed later on, becoming one of the most promising analytical techniques of biological and nonbiological phenomena. This technique is contactless, which avoids any interference or addition of particles for it is based on the illumination of an object by a low power laser. Thus, patterns generated by the interaction of light scattering with the laser beam are the main data to be analysed. [3]. Several BSL applications in agriculture include seed analysis [4-7]; fungi analysis [8], humidity monitoring of coffee leaves [9], observation of root growth [10], and evaluation of animal semen [11]. In medicine, we find applications in the study of the brain, skin and blood flow [3,12-13], for the cases based on LASCA approach. In nonbiological phenomena, we can mention the study of the ink drying process [14].

The Biospeckle Laser technique consists in monitoring the changes of interference patterns generated by the illumination of the object to be studied by a coherent light such as a laser beam [5]. These changes occur for the scattering of laser light into and out of cells [15].

The techniques for processing data from dynamic speckle laser can be divided into numerical and graphical approaches, as well as in time and

frequency domains [15]. Some applications related to the flow of material, such as blood flow originally studied by Briers [3] using LASCA or the mass movement in animal semen analysis [11] using BSL are not able to identify the direction of the flow, but only its presence.

The challenge would be treating the speckle pattern as a collection of particles, although the effect of speckle boiling has more than translational contributions. Then, the question becomes to separate the movement of dispersion characteristic of dynamic laser speckle from the movement of translation with the same interference pattern characteristic of a PIV technique. For this purpose, the use of a wavelet transform combined with the use of a space-spectral speckle matrix (3S Matrix) were crucial since the main hypothesis assumes that it is possible to separate contributions of biospeckle formation such as translational behaviors in different frequencies.

This study illustrates an association of classical PIV and the dynamic laser speckle by proposing the Biospeckle Laser PIV as a sensitive method to measure flow through the dynamic evolution of the speckle patterns, needing not to add any particles.

## 2. Theory

### 2.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

The classical technique used in PIV is based on the analysis of two sequential images, where there are external particles seeded in the flow to be monitored by a camera that captures a sequence of images representing the flow. The use of a cross-correlation equation provides a comparison of two consecutive images addressing the displacement of the particles within them. [20]. The operation of cross correlation is given by:

$$C(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i+x, j+y) \quad (1)$$

where  $C(x, y)$  is the correlation in the pixel  $(x, y)$ ,  $I(i, j)$  is the luminous intensity at the pixel coordinates  $(i, j)$  and indices 1 and 2 indicate the



images analysed. The cross-correlation occurs in a window of the image with a size  $(x_n, y_n)$ , which is known as interrogation window, plus a neighbourhood of  $(x_n/2, y_n/2)$ , which is represented by  $M$  and  $N$ , in  $x$  and  $y$  axes respectively as presented by Figure 1. Therefore, the cross-correlation occurs, for instance, from  $-M$  ( $x_1 - x_n/2$ ) to  $M$  ( $x_n + x_n/2$ ) [21].

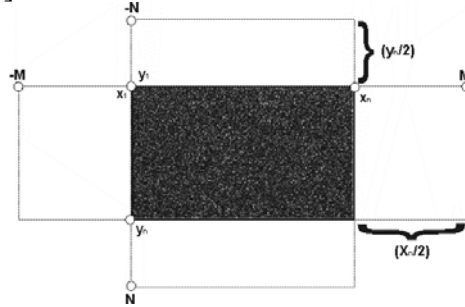


Fig. 1 Interrogation window of the speckle pattern with its neighbourhood adopted in the cross-correlation

## 2.2 Frequency Analysis

The frequency analysis can be implemented in cases where it is necessary to open a signal with the possibility to provide a correlation between the time with the frequency composition. The decomposition of a signal was conducted by the Wavelets transform summarized in the Equation 2, where  $CWT(t, j)$  is a function of time ( $t$ ) and scale ( $j$ ), from the signal in time  $f(t)$  [16].

$$CWT(t, j) = f(t) * W(j, t) \quad (2)$$

After the decomposition of each pixel from the speckle pattern in time, the reconstruction of the collection of images was carried out to each scale, related to the frequencies, by means of the Equation 3 [16]. The number of frequency ranges varied in accordance to the number of images assembled and to the time rate of images acquiring.

$$f(t) = K \sum_j \Re\{W(j)\} \quad (3)$$

Where the scale (j) represents a range of frequencies and K represents a constant.

If the reconstruction of the signal is carried out in order to generate many outputs, spectral bands, the analysis of the best frequency band demands the ability to compare the new results, which are presented by maps of activity, processed using some of the BSL techniques. One alternative to get a summary of those results is the Space-Spectral Speckle matrix, the 3S Matrix that is constructed with a same line of the area under analysis from all the images representing the maps of activity in different spectral bands [18].

### 2.3 Fujii Method

Fujii's method can be classified as a graphical approach of biospeckle signals and it is based on the calculation of differences [19] between the pixels of images recorded over time. In this method, we calculate a sum of intensity differences between an image and its subsequent image dividing by the sum of those two images, which means a weighing process. The result is a new image showing the pixels that are experiencing changes in intensity.

The procedure for the construction of the map Fujii is described by

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^N \left| \frac{I_k(x, y) - I_{k+1}(x, y)}{I_k(x, y) + I_{k+1}(x, y)} \right|$$

Where  $I(x, y)$  is the matrix that represents the grayscale result of the sum of the differences of the  $I_k$  images and their subsequent  $I_{k+1}$  to complete the N number of images collected.

## 3 Materials and Methods

The PIV evaluation of biospeckle signals formed was tested using three situations: i) the simulation of a biospeckle pattern with a pure

translation; ii) the flow of water in a translucent tube; iii) and the assumed transient flow in the main vein of a coffee tree leaf immediately after cut.

A three-step procedure was followed for the analysis with and without the frequency approach (Figure 2). The first step is the PIV analysis of prime biospeckle patterns; the second step means the pre-processing of images in the event of a failure to identify the the flow in the first step. Finally, the third step is the PIV analysis of the prime image now filtered and separated in spectral bands.

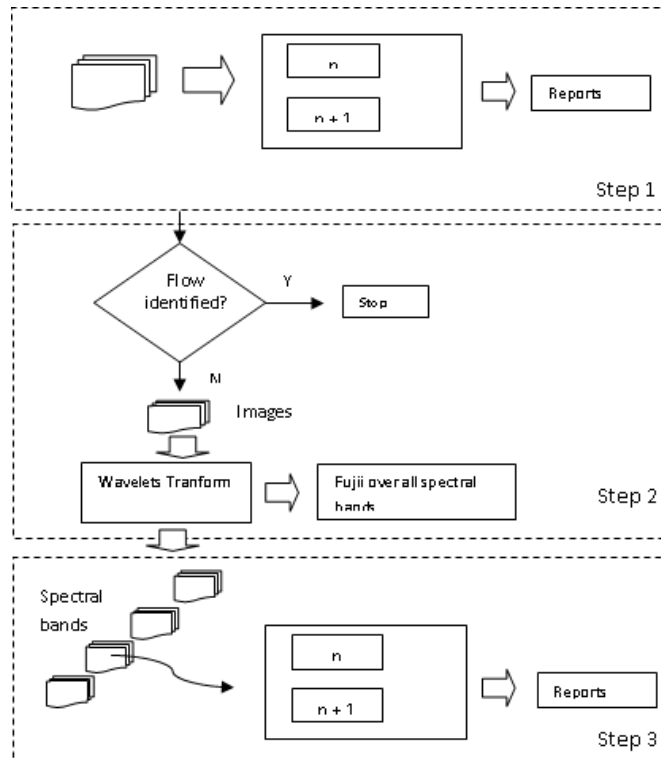


Fig. 2 Flowchart of the Biospeckle PIV

Some reports of the PIV results were generated in order to obtain information beyond that provided by the classic matrix of vectors. A graph with the velocity vectors aligned in a same reference point was generated and a Gaussian kernel smoother [24] was used to smooth the grid of estimated velocities.

### 3.1 Simulation of pure translational speckle

Such mathematical simulation generates a flow of speckle in uniform motion from right to left [19]. The speckle grains did not undergo changes in direction or form during the translation and they moved horizontally  $10\ \mu\text{m}$  per frame. The simulation was of 10 frames with a horizontal shift. A single speckle pattern of  $256 \times 256$  pixels can be seen in Figure 3, and the PIV technique was conducted over each consecutive pair of images.

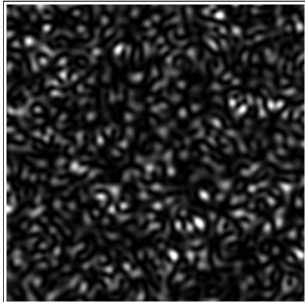


Figure 3 - Simulated Speckle image

### 3.2 Real Water Flow

The flow consisted of water injected into a transparent tube with a diameter of 5 mm by a syringe and illuminated by a HeNe laser of 632nm wavelength, as illustrated in Figure 4.

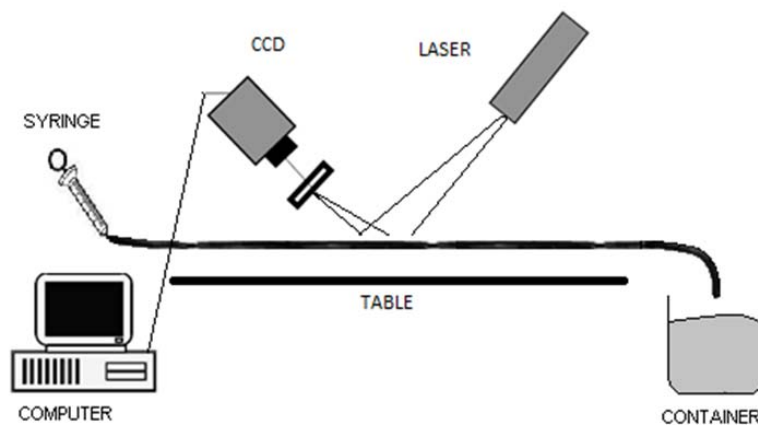


Figure 4 – Lighting scheme of a translucent tube with water flow propelled by a syringe

For image acquisition, we used a CCD camera with a resolution 640 x 486 pixels and the acquisition carried out with images in 8 bits BMP format at intervals of 0.01 s.

After the image acquisition, the Step 1 was tested, and then the Steps 2 and 3 were implemented if any flow was observed. The Wavelets Transform was based on the Morlet Mother, providing a decomposition of a collection of 128 images in 24 spectral bands. The Fujii technique was implemented in the decomposed data, and the result presented in all the 24 spectral bands. The evaluation of the spectral bands in a region of interest was performed using the 3S Matrix [18] (Step 2). The process of applying the PIV technique was the same carried out in Step 1, and it was implemented in all 128 consecutive pairs of filtered images (Step 3).

### 3.3 Biological flow in leaves

The third assay was conducted in a torn coffee leaf immediately after its extraction from the coffee tree plant in order to see the transient process of the internal flow. The image acquisition was performed by a minimicroscope (Dino-Lite®), and the leaf illuminated by a solid state laser of 632 nm. The 128 images were gathered in a time rate of 15 frames per second and analysed by the same protocol presented in Fig. 2.

## 4 Results and Discussion

### 4.1 Simulation

Two consecutive frames of the simulated speckle patterns are presented in Fig. 5. While the vectors over the modified figure, resulting from cross-correlation, is presented in Fig. 6 using an interrogation window of 32x32 pixels. Despite a clear identification of the simulated images with the actual speckle pattern, the timeline of the simulated images only presents pure translation of the grains, which can be considered as an ideal condition to calculate PIV. Pure translation of a speckle pattern means that the grains do not change in size, shape and intensity but only their position in the frame.

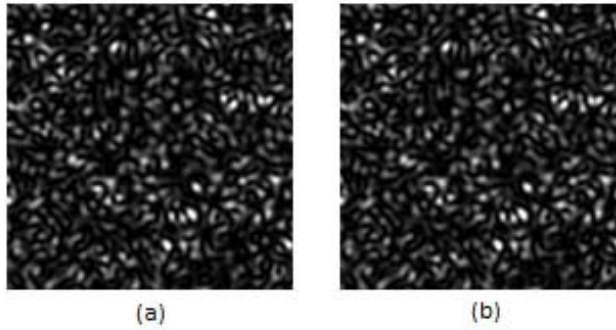


Figure 5 – Simulated speckle image of (a) Frame 001 (b) Frame 002

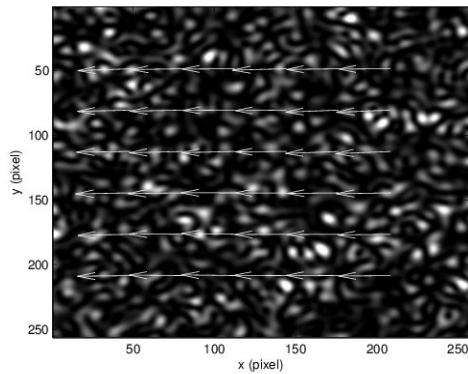


Figure 6 – Velocity vectors for the pure translation of simulated speckle.

In this work, we present an alternative to evaluate the uniformity of the vector's directions, seen in Fig. 7. The angle diagram presents all vectors aligned and overlapping, which was expected for the pure translation simulated.

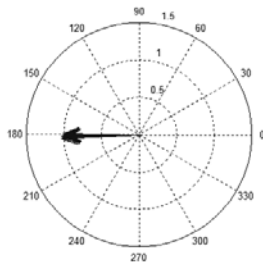


Figure 7 – Angles of velocity vectors related to the pure translation of simulated speckle.

The successful outcome provided by PIV on the pure translation speckle stopped the procedure in Step 1 (Fig. 2).

#### 4.2 Flow of Water

The water flow through a translucent tube illuminated according to the experimental configuration of Fig. 3 was first evaluated using the PIV method applied directly in the speckle patterns without any processing (Step 1). The result, not shown here, presented any correlation between the frames, consecutive or not, which was expected since it was not a pure translation speckle pattern expressed in the signal. The boiling effect of the speckle grains (varying in size, shape and intensity of the grains) undermined the correlation in time between the grains. Then, the search for an isolated translation was carried out through filtering by means of Wavelets Transform, decomposing the signal, and then applying the Fujii method. In the results presented in Fig. 8, the 24 frequency bands show the tube, the background and a shadow inside the tube (due to the circularity of the wall and the positions of the light and the camera). The time rate of frame grabbing was of 0.01 s, and the highest observable frequency was of 50 Hz. In fact, we tested different rates of time, but we are discussing only the one with the best results. In the area without the interference of the shadow, the activity of the flow can be observed by the light gray representing high activity (red in a pseudo-color image) and dark gray, related to low activity (blue in color). Therefore, in these set of images presented, one can see the activities in the frequency bands, for instance, in ranges 6 to 8, the high activity was observed throughout the half pipe without the shadow, which could mean turbulence flow. However, in ranges 13 to 17, the highest activity can be observed in the middle of the tube, which means near the shadow and probably the expression of this activity is the closest to the behaviour of the flow, without turbulence. This was our target in the next step, in other words, we isolated the band with the hypothetical translation.

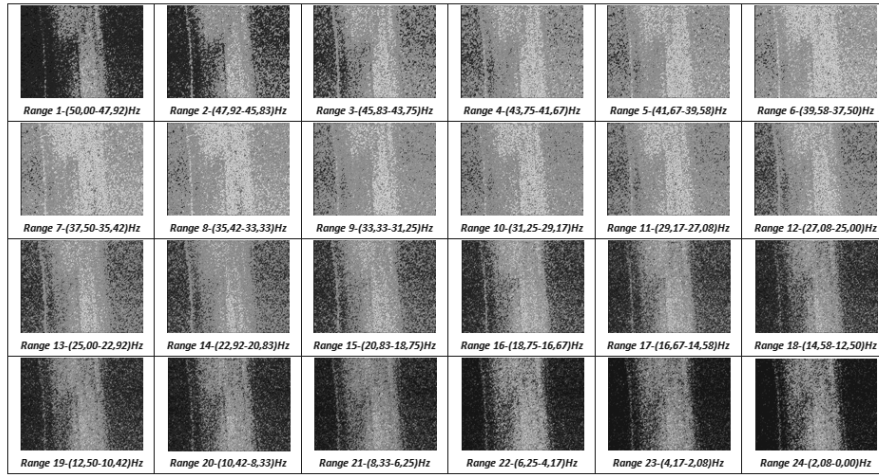


Figure 8 – Ranges (Wavelets)

The clear observation of the frequencies side by side in a line of the pipe can be seen by the Spectral Space Matrix Speckle (3S Matrix), presented in Fig 9. A row in the centre of the 24 images was extracted and used to create a summary with the rows side by side.

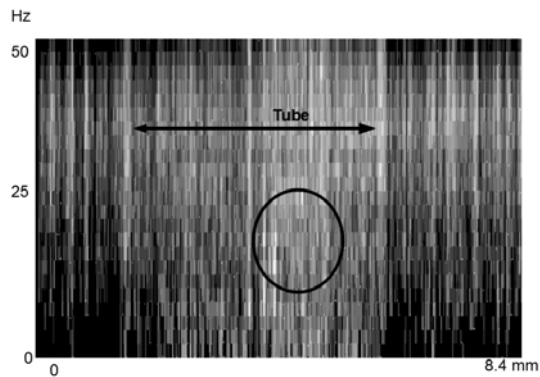


Figure 9– Matrix 3S - Range 13 highlighted

The PIV method [25] was applied to the images using interrogation windows of 64x64 pixels and using cross-correlation between a pair of consecutive images. The ranges 13 to 17 that best represented our hypothesis of a translation overcoming regarding the random boiling were evaluated and in the 13<sup>th</sup> range. Then, we could generate the vectors representing which illustrates the translation occurring in a non-



turbulence flow. The PIV method was also applied throughout all ranges (not shown here), but without the success observed in range 13. In Fig 10, it is possible to see the displacement/velocity vectors, which are distributed over the entire image, not only inside the tube. That phenomenon was expected since the tube is translucent and the white background received the projection of the speckle from the tube, which was the same behavior to the shadow.

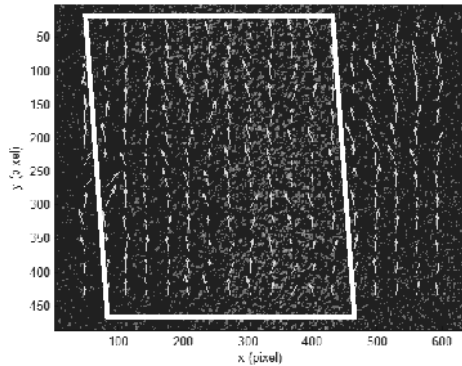


Figure 10 – Velocity vector of water flow in a tube

The vectors aligned are presented in Fig. 11, where it is possible to see the variation of the angles that are mostly restricted to a range of  $60^\circ$  ( $\pm 30^\circ$  around the main direction).

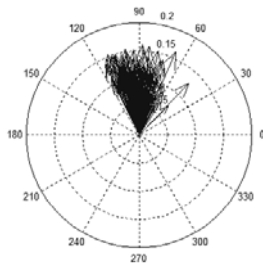
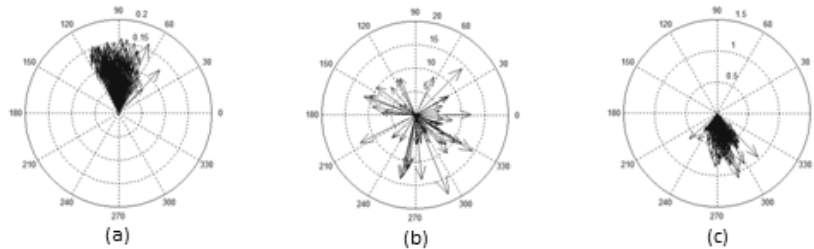


Figure 11 – Angles of velocity vectors for the water flow in a tube.

An interesting phenomenon happened in the analysis of the 13<sup>th</sup> frequency band, when the PIV was applied to non-consecutive pairs. The maximum orientation of the vectors could be observed every time the pairs of images were consecutive (Figure 12a). However, if the cross-correlation was done in non-consecutive frames, the vectors tended to have a

resultant equal to zero (Fig 12b), and then a reversal of direction of the vectors occurred, with an orientation opposite to the flow (Fig 12c). This periodicity represents the behaviour of non-consecutive pairs of images of the 13<sup>th</sup> band and it is a stroboscopic phenomenon that may be useful in calibrating the speeds measured in accordance with the rate of time.



*Fig. 12 Graphs of angles (a) for the actual direction with maximum value of velocity (b) for the void values in the inflection and (c) of the reversal of directions*

Figure 13 shows the result of a kernel smoothing of absolute velocity values of the PIV vector map, with brighter shades showing higher velocities. The average of these images presents that the flow is highly expressed in the tube with the outside activity related to the dispersion of light on a white background.

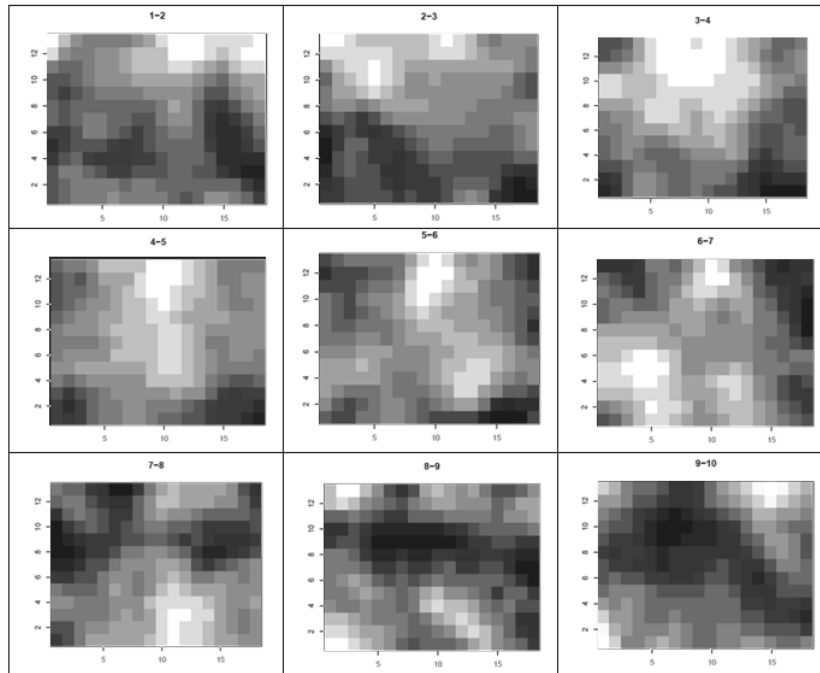


Fig. 13 Kernel smoothing for velocity absolute values

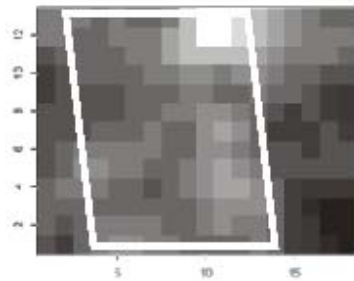


Fig 14 Average of kernel smoothing over the ninth PIV vector in the 13<sup>th</sup> frequency band

### 4.3 Biological Flow

At this point, the proposed protocol to evaluate the flow from biospeckle signal using PIV met its main challenge, since the flow observed was an extremely small one (actually a micro-flow), as a result of a transient process right after pulling out the leaf from the tree. During the stabilization, the expected flow should go in the direction of the petiole. It was only after the three steps of the protocol were applied that the results appeared, with the PIV been applied in the range 9 (32 to 34 Hz), where there is the highest activity observed in the main vein (Fig. 15). The time

rate for acquiring was of 0.01 s, so the highest frequency observed was 50Hz.

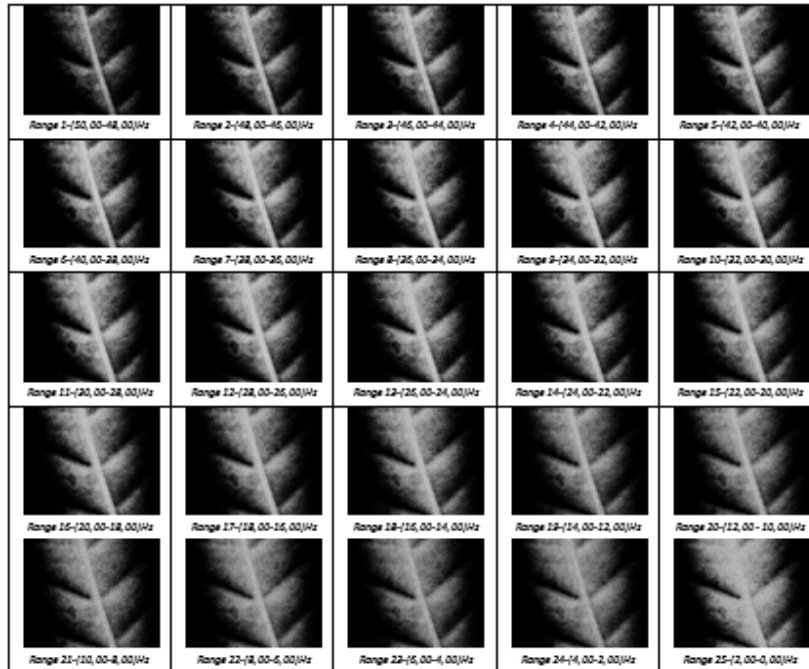


Figure 15 – Frequency ranges of a leaf after it was torn from a coffee tree; illuminated by laser and processed by Fujii

The portion of the image used to implement the PIV is presented in Fig. 16, with a cropped area of 450x420 pixels.

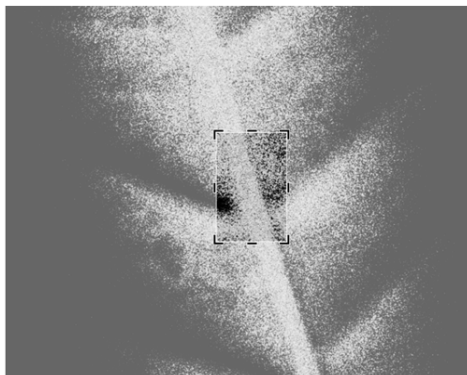


Figure 16 – Fujii cut in the range 9 with highlighted area of interest

The PIV procedure was applied using interrogation windows of 64x64 pixels, carrying out the cross-correlation for pairs of images in the range 9. In this analysis, we can observe the direction of a flow that is expected to be related to the adjustment of fluid during the stabilization process after tearing (Fig. 17). Despite an expected faint flow, the proposed protocol was able to seize that movement. In Fig. 18, the graphs of the angles of the vectors show this tendency.

The potential application of this protocol in blood flow still represents a challenge for the adoption of a longer time monitoring since the kinking in human and animal bodies creates a hazard situation to adopt a longer time monitoring than LASCA does, and therefore the use of frequency approach. However, this is a feasible proposition for vegetables, allowing new achievements.

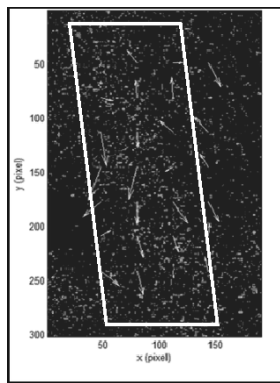


Figure 17 – Biological flow results and delimited area representing the main vein

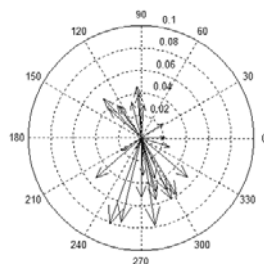


Figure 18 – Angles of the velocity vectors in a vein of a coffee leaf just after its tearing with the resultant vector indicating to the expected direction

## 5 Conclusions

The Biospeckle PIV can be considered a reliable tool to measure the flow in some controlled situations associated with the use of the filtering process as an alternative to the traditional methods, which demand the seeding of external particles in the flow. The ideal assay was the pure translation of a speckle pattern, with any demand of frequency approach. The BSL PIV was only possible in actual flow of water and fluids in a leaf vein with the adoption of the frequency isolation of the translational behavior within the dynamic speckle patterns. The angles of the velocity vectors proved a feasible tool in summarizing the flow.

## 6 Vitae

Rodrigo Reis Soares, MSc in

Msc in Systems Engineering at the Federal University of Lavras (UFLA, 2010); BCompSc in Computer Science from Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Brazil (2008). From 1998 to 2007, worked as an entrepreneur in mobile computing, in a shop, and at the business school, as an instructor. At UFLA, he worked as a substitute teacher in the Department of Computer Science. He currently coordinates the courses at Aptech Brazil.

Henrique Coelho Barbosa

Scholars for Scientific Initiation (CI) at the National Council of Scientific and Technological Development (CNPq)

Roberto Alves Braga Junior

Ph.D. in Agricultural Engineering at the State University of Campinas, Brazil (2000), Msc in Electrical Engineering at the Federal University of Minas Gerais Brazil (1994), and B.Eng. in Electrical Engineering at the Federal University of Minas Gerais Brazil (1991). Developed post-doctoral stages at BioMathematics Statistics Scotland Aberdeen - Rowett Institute Aberdeen University in 2005 and in 2008. Associate professor at the Federal University of Lavras, Brazil since 1996. Research lines: laser, biospeckle, instrumentation and systems engineering analysis of image. Grant from CNPq to work with Technological Development 2006-2010. Grant from CNPq for Research Productivity 2010-2012.

Graham William Horgan

Principal Consultant for Human Health & Nutrition Biomathematics & Statistics Scotland BioSS Office Rowett Research Institute, Bucksburn ABERDEEN, AB21 9SB, Scotland, UK. Graduated in Theoretical Physics - Trinity College, Dublin (1982), PhD in Statistics - Trinity College, Dublin (1990).

Juliana Vilela Lourençoni Botega

Ph.D. in Agricultural Engineering from Universidade Federal de Lavras (2009), Msc in Agricultural Engineering from Universidade Federal de Lavras (2005), and B.Eng. in Electrical Engineering from Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Brazil (1998). Tenured Teacher at the Federal Centre of Technological Education of Minas Gerais, CEFET-MG) - Campus IX

## 7 Acknowledgements

Partially financed by CAPES, CNPq, FAPEMIG and FINEP.

## 8 References

- [1] NICHOLL, C. Leonardo da Vinci: The Flights of the minds. Penguin, 2005, 622p.
- [2] ADRIAN, R. J. Experiments in Fluids, 2005 39: 159-169.
- [3] J.D. Briers, Opt. Commun. 13 (1975) 324.
- [4] C.M.B. Nobre, R.A. Braga Jr., A.G. Costa, R.R. Cardoso, W.S. da Silva, T. Sáfadi, Opt. Commun. 282 (2009) 2236.
- [5] A. Dai Pra, I. Passoni, H.J. Rabal, Signal Process. 89 (2009) 266.
- [6] R.A. Braga Jr., G.F. Rabelo, L.R. Granato, E.F. Santos, J.C. Machado, R. Arizaga, H.J.Rabal, M. Trivi, Biosyst. Eng. 86 (2005) 465.
- [7] R.A. Braga Jr., I.M. Dal Fabbro, F.M. Borem, G.F. Rabelo, R. Arizaga, H.J. Rabal, M.Trivi, Biosyst. Eng. 86 (2003) 287.
- [8] G.F. Rabelo, R.A. Braga, Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient 09 (2005) 570.
- [9] J.L. Botega, R.A. Braga, Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient 13 (2009) 483.
- [10] R.A. Braga, L. Dupuy, Eur. Biophys. J. 38 (2009) 679.
- [11] P.H. Carvalho, J.B. Barreto, R.A. Braga Jr., G.F. Rabelo, Biosyst. Eng. 102 (2009) 31.
- [12] P. Li, S. Ni, L. Zhang, S. Zeng, Q. Luo, Opt. Lett. 31 (2006) 1824.
- [13] H. Fujii, T. Asakura, Opt. Lett. 10 (1985) 104.
- [14] J.I. Amalvy, C.A. Lasquibar, R. Arizaga, H. Rabal, M. Trivi, Prog. Org. Coat. 42 (2001).
- [15] R.A. Braga, G.F. Rabelo, J. B. Barreto, F.M. Borem, J. Pereira, M. Muramatsu, I.M.D. Fabbro, in: H.J. Rabal, R.A. Braga (Eds.), Dynamic Laser Speckle and

Applications, CRC, 2008, p. 181.

[16] Torrence, C.; Compo, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol 79, no. 1, p.61-78, January 1998.

[17] Lima, P.C. Wavelets: an introduction. Belo Horizonte, 2003. Available in: <[HTTP://www.mat.ufmg.br/~lima/artigod/rmu33.pdf](http://www.mat.ufmg.br/~lima/artigod/rmu33.pdf)>.

[18] MARQUES, J. K., BRAGA, R. A. Speckle 2010: Optical Metrology. DOI 10.1117/12.12.870002.

[19] FUJII, H.; ASAKVRAT, T.; NOHIRA, K. Blood flow observed by time-varying laser speckle. Optics letters, New York, v.10, no.3, p.104-106, Mar. 1985.

[20] Wi-Han Kim, Chan-Il Kim, Sang-Won Lee, Soo-Hee Lim, Cheol-Woo Park†, Ho Lee, Min-Kyu Park. Journal of the Optical Society of Korea Vol. 14, No. 1, March 2010, pp. 42-48.

[21] ADRIAN, R. J. applied Optics, 1984 Vol. 23, no. 11: 1690-1691.

[22] E.A. Nadaraya, "On estimating regression", Theory of Probability and its Applications, vol. 10, pp. 186-190, 1964.

[23] SENDRA, G. H., Análisis de actividad en patrones de speckle dinámico. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Eletrônica. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

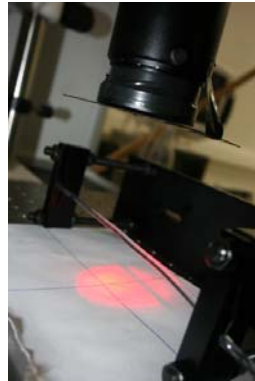
[24] Nobuhito Mori and Kuang-An Chang (2003) Introduction to MPIV, user reference manual, 14p.

[25] MORI, N., CHANG, K.A. (2003). "MPIV toolbox for Matlab", <http://www.oceanwave.jp/software/mpiv/>

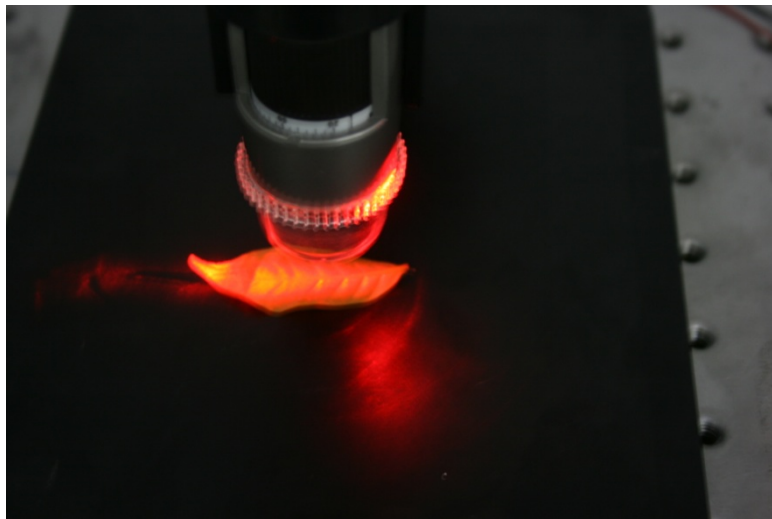
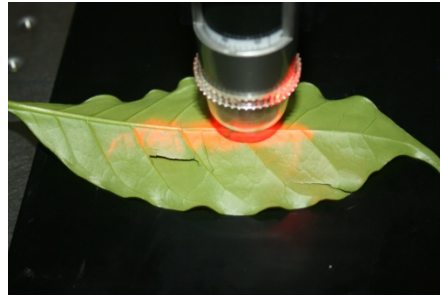
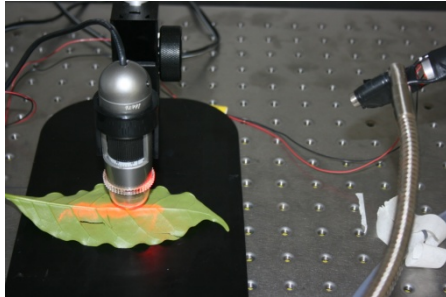


## APÊNDICE A

### 1. Fotos Setup do Escoamento Real



## 2. Fotos Setup do Escoamento Biológico



## APÊNDICE B

### Algoritmos utilizados

#### 1. mpiv.m

```
function [xi,yi,iu,iv, modulo]=mpiv( imr1, imr2, nx_window, ny_window, overlap_x,
overlap_y, iu_max, iv_max, dt, piv_type, i_recur, i_plot)
%=====
%
% version 0.961
%
% mpiv / Matlab PIV
%
% Description:
%
% `mpiv' is the Particle Image Velocimetry (PIV) program for Matlab. This program
require Matlab and Image Processing Toolbox is also require for coordinate transform, if
it needs.
%
% Procedure:
%
% - Preprocess
% - PIV (select one of the follows)
%   The velocity vectors are calculated by MQD algorithm.
%   The velocity vectors are calculated by correlation algorithm.
%   The velocity vectors are calculated by hierarchical algorithm
%   The sub pixel peak search is also available.
%
%   (Postprocess is available, and recommended, using a separate program. See user
manual for the details)
%
% Variables:
%
% Input:
%
% imr1 and 2 image files (double precision)
% nx_window  subwindow size in x
%           (should be larger than 20, typical 32 or 64)
% ny_window  subwindow size in y
% overlap_x  overlap ratio of adjacent subwindows in x
%           (typically 0.0 or 0.5)
% overlap_y  overlap ratio of adjacent subwindow in y
% iu_max    maximum displacement in x (unit: pixel)
% iv_max    maximum displacement in y (unit: pixel)
```

```

%      -> iu_max and iv_max set limit for search area
% dt    = time separation between im1 and im2 (in second)
% piv_type = 'mqd': MQD algorithm
%         = 'cor': Correlation algorithm
%         = other: do nothing
% i_recur = n: number of recursive and check
%         = 0: piv without double check
%         = 1: piv with double check
%         > 1: recursive
% i_plot  = 1 plot during piv process for checking
%         other -> no plotting
%
% Output:
%
% xi, yi  location of velocity vector
% iu, iv  velocity vector
% D       maximum value of MQD or correlation,
%         only used for 'mqc'
%
% Input variables in 'piv_mqr.m':
% i_interp = 1: linear interpolation
%          = 2: cubic spline
%          = 0: do nothing
% i_filter = 1: std filter
%          = 2: median filter
%          = 0: do nothing
%
% Note:
% imr1, imr2, iu and iv are two dimensional matrices in
% x and y direction, respectively [not y and x].
%
%=====
%
% Example for running the mpiv program(s):
%
% > im1 = imread('image1.bmp');
% > im2 = imread('image2.bmp');
%
% > [xi,yi,iu,iv]=mpiv(im1,im2, 32,32, 0.5,0.5, 20,20,1, 'cor', 2, 1);
% or by
% > [xi,yi,iu,iv] = mpiv(im1,im2, 64,64, 0.5,0.5, 20,20, 1, 'mqd', 2, 1);
%
% To get rid of stray vectors and fill the 'holes':
% > [iu_f,iv_f,iu_i, iv_i] = mpiv_filter(iu,iv, 2, 2.0, 3, 1);
%
% To smooth out unrealistic changes in vectors:

```

```

% (strongly recommended if you use 50% overlap ratio)
% > [iu_s, iv_s] = mpiv_smooth(iu_i, iv_i, 1);
%
% To calculate and plot vorticity:
% > [vor] = mpiv_vor(iu_s, iv_s, 1);
%
%=====
%
% Terms:
%
%   Distributed under the terms of the terms of the BSD License
%
% Copyright:
%
%   Nobuhito Mori
%   Disaster Prevention Research Institute
%   Kyoto University, JAPAN
%   mori@oceanwave.jp
%
%=====
%
% Update:
% 0.97 2009/07/01 BSD License applied
% 0.961 2004/12/03 new sub function nanmean2.m has been inserted.
% 0.96 2003/10/08 mpiv_gui.m has been added.
% 0.95 2003/ 7/02 piv_mqd.m(1.00) and piv_mqr.m(0.53)
%       piv_mrs.m has been inserted.
%       def.of MMR have been changed.
% 0.93 2003/ 6/26 piv_cor.m(0.73) and piv_crs.m(0.49)
%       vector_filter_median.m(0.60)
%       vector_filter_vecstd.m(0.60)
%       have been modified.
%       func_histfilter.m has been inserted.
% 0.91 2003/ 6/23 piv_cor.m(0.70) and piv_crs.m(0.46)
%       have been modified.
% 0.90 2003/ 6/20 piv_cor.m and piv_crs.m have been modified.
% 0.82 2003/ 6/16 piv_crs.m and kriging have been modified.
% 0.80 2003/ 6/12 Totally refined
% 0.70 2003/ 6/11 piv_crr.m has been inserted
% 0.65 2003/ 6/11 piv_cor.m has been modified, 0.60
% 0.60 2003/ 6/10 piv_*.m has been modified
% 0.54 2003/ 6/10 piv_cor.m has been improved by KAC
%       piv_cor.m - version 0.50
% 0.53 2003/ 6/10 Comments in the code have been refined.
% 0.52 2003/04/07 peak search routines in piv_mqr and piv_mqd
%       have been modified

```

```

% 0.51 2003/ 4/03 bug fixed in piv_mqr.m.
% 0.50 2003/ 4/01 piv_mqr.m has been inserted
% 0.32 2003/ 3/27 piv_mqd_c.m has been inserted
% 0.30 2002/12/04 piv_cor.m has been inserted
% 0.26 2002/10/21 piv_mqd.m has been modified
% 0.20 2002/09/20 change image input
% 0.15 2002/09/12 add vector interpolation routine
% 0.10 2002/09/12 add check error vector routine
% 0.01 2002/09/11 First version
%
%=====
%
% --- initialization
%
t = cputime;
D = [];
%
% --- preprocessing
%
% transpose of the matrix im#(iy,ix) -> im#(ix,iy)
im1 = double( imr1' );
im2 = double( imr2' );
% Convert to double precision/ A precisão dupla fornece uma relativa
% precisão de cerca de 16 dígitos decimais e intervalo de magnitude de
% 10^-308 a 10^+308.

% check image sizes
nx = size(im1,1);
ny = size(im1,2);
nx2 = size(im2,1);
ny2 = size(im2,2);

if ( nx ~= nx2 ) | ( ny ~= ny2 )
    error('Error: image sizes are different!!!');
end

nx_window = round(nx_window);% Round to nearest integer
ny_window = round(ny_window);

if overlap_x > 0.9 | overlap_y > 0.9
    error('Error: the overlap ratio is too large!!!')
end

disp('Preprocessing finished');

%

```

```

% --- select one of the piv methods for velocity determination
%
if ( piv_type == 'mqd' ) | ( piv_type == 'MQD' )

    if (abs(i_recur) == 0) | (abs(i_recur) == 1)

        [xi, yi, iu, iv] = piv_mqd( im1, im2, nx_window, ny_window, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_recur );

        elseif abs(i_recur) <= 5

            [xi, yi, iu, iv] = piv_mqr( im1, im2, nx_window, ny_window, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_recur );

            elseif abs(i_recur) > 5

                error('Error: i_recur is too large !!!');

            end

        elseif ( piv_type == 'mqc' ) | ( piv_type == 'MQC' )

            [xi, yi, iu, iv, D] = piv_mqd( im1, im2, nx_window, ny_window, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_recur );

        elseif ( piv_type == 'cor' ) | ( piv_type == 'COR' )

            if (abs(i_recur) == 0) | (abs(i_recur) == 1)

                [xi, yi, iu, iv] = piv_cor( im1, im2, nx_window, ny_window, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_recur );

                elseif abs(i_recur) <= 5

                    [xi, yi, iu, iv] = piv_crr( im1, im2, nx_window, ny_window, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_recur );

                    elseif abs(i_recur) > 5

                        error('Error: i_recur is too large !!!');

                    end

            else

                error('Error: invalid piv_type !!! piv_type is case sensitive');

```

```

end
%
% --- dimension for velocity
%
iu = iu/dt;
iv = iv/dt;
%
% --- plot image and velocity
%
% _____ Modificado por Rodrigo Reis Soares _____
modulo = zeros(size(iu));
for mo_u=1:size(iu,1)
    for mo_v=1:size(iu,2)
        modulo(mo_u,mo_v)=sqrt((iu(mo_u,mo_v)^2)+(iv(mo_u,mo_v)^2));
    end
end
v_max = max(max(modulo));
v_min = min(min(modulo));
v_pass = (v_max - v_min)/5;

linha = ['r' 'g' 'b' 'c' 'm' 'y' 'k' '-r' '-g' '-b' '-c' '-m' '-y' '-k' '--r' '--g' '--b' '--c' '--m' '--y' '--k' ':r'
':g' ':b' ':c' ':m' ':y' ':k' '-.r' '-.g' '-.b' '-.c' '-.m' '-.y' '-.k'];

if i_plot == 1

figure(1);
compass(iu, -iv)
title('Angulos de Todos os Vetores');

figure(2);
compass(iu, -iv)
item=1;
item2=mo_u;
cor=1;
item= item+mo_u;
item2= item2+mo_u;
cor=cor+1;
hold on

    while item2<=mo_u*mo_v
        compass(iu(item:item2)', -iv(item:item2)', linha(cor));
        item= item+mo_u;
        item2= item2+mo_u;
    % linha_leg = [linha_leg ' Linha '+num2str(cor)]
        cor=cor+1;
    end

```



```

title('Angulos dos Vetores por Linha');
%legend(linha_leg);
hold off

figure(3);
x = 1:nx;
y = 1:ny;
[XV YV] = meshgrid(xi, yi);
% change image pixel value for plot
image_max = max(max(im1));
im = 75*im1/image_max;
% transpose of the matrix for plotting: (x,y)->(y,x)
image( x, y, im' );
colormap();
hold on
% transpose of the matrix: (x,y)->(y,x)
quiver( XV, YV, iu', iv', 'y' );
title('Vetores de Velocidade e Imagem Original');
hold off
xlabel('x (pixel)')
ylabel('y (pixel)')

figure(4);
x = 1:nx;
y = 1:ny;
[XV YV] = meshgrid(xi, yi);
% change image pixel value for plot
image_max = max(max(im1));
im = 75*im1/image_max;
% transpose of the matrix for plotting: (x,y)->(y,x)
image( x, y, im' );
colormap(white);
hold on
% transpose of the matrix: (x,y)->(y,x)
quiver( XV, YV, iu', iv', 'r' );
title('Vetores de Velocidade');
hold off
xlabel('x (pixel)')
ylabel('y (pixel)')

figure(5);
x = 1:nx;
y = 1:ny;
[XV YV] = meshgrid(xi, yi);
% change image pixel value for plot
image_max = max(max(im1));

```

```

im = 75*im1/image_max;
% transpose of the matrix for plotting: (x,y)->(y,x)
image( x, y, im' );
colormap(white);
hold on
quiver( XV(1,1), YV(1,1), 0.001, 0.001, 'r');
quiver( XV(1,1), YV(1,1), 0.001, 0.001, 'g');
quiver( XV(1,1), YV(1,1), 0.001, 0.001, 'b');
quiver( XV(1,1), YV(1,1), 0.001, 0.001, 'c');
quiver( XV(1,1), YV(1,1), 0.001, 0.001, 'm');

for mo_u=1:size(iu,2)
  for mo_v=1:size(iu,1)
    if ((modulo(mo_v,mo_u)'>=v_min && modulo(mo_v,mo_u)'<= v_min+v_pass))
      cor =1;
    else if ((modulo(mo_v,mo_u)'>v_min+v_pass && modulo(mo_v,mo_u)'<=
v_min+2*v_pass))
      cor =2;
    else if((modulo(mo_v,mo_u)'>v_min+2*v_pass && modulo(mo_v,mo_u)'<=
v_min+3*v_pass))
      cor=3;
    else if ((modulo(mo_v,mo_u)'>v_min+3*v_pass && modulo(mo_v,mo_u)'<=
v_min+4*v_pass))
      cor =4;
    else
      cor=5;
    end
  end
end
end
end
escala=((nx_window/4)/v_max);
quiver( XV(mo_u,mo_v), YV(mo_u,mo_v),
iu(mo_v,mo_u)*escala,iv(mo_v,mo_u)*escala, linha(cor));
end
end

legend([num2str(v_min, '%10.2f) '->' num2str(v_min+v_pass, '%10.2f) ' pixels/s']...
,[num2str(v_min+v_pass+0.01, '%10.2f) '->' num2str(v_min+2*v_pass, '%10.2f) '
pixels/s']...
,[num2str(v_min+2*v_pass+0.01, '%10.2f) '->' num2str(v_min+3*v_pass,
'%10.2f) ' pixels/s']...
,[num2str(v_min+3*v_pass+0.01, '%10.2f) '->' num2str(v_min+4*v_pass,
'%10.2f) ' pixels/s']...
,[num2str(v_min+4*v_pass+0.01, '%10.2f) '->' num2str(v_max, '%10.2f) '
pixels/s']...
,0);

```

```

    title('Vetores de Velocidade por Valores');
    hold off
    xlabel('x (pixel)');
    ylabel('y (pixel)');

end

%
% --- output mean displacement, maximum displacement, elapstime,
%     and number of valid vectors
%

iu_tmp = reshape(iu, 1, size(iu,1)*size(iu,2));
tmp = find(~isnan(iu_tmp));
iu_tmp = iu_tmp(tmp);
iv_tmp = reshape(iv, 1, size(iv,1)*size(iv,2));
tmp = find(~isnan(iv_tmp));
iv_tmp = iv_tmp(tmp);
elapstime = cputime - t;
% _____ Fim - Modificado por Rodrigo Reis Soares _____

disp(' ')
disp('=====')
c_tmp = strcat( '> Mean displacement in x and y (pixel) = ', ...
               num2str(nanmean2(abs(iu_tmp)), '%8.4f'), ', ', ...
               num2str(nanmean2(abs(iv_tmp)), '%8.4f') );
disp( c_tmp )
c_tmp = strcat( '> Maximum displacement in x and y (pixel) = ', ...
               num2str(max(max(abs(iu_tmp))), '%8.4f'), ', ', ...
               num2str(max(max(abs(iv_tmp))), '%8.4f') );
disp( c_tmp )
c_tmp = strcat( '> Number of valid vectors versus total vectors = ', ...
               num2str(length(tmp), '%8.0f'), ', ', ...
               num2str(size(iv,1)*size(iv,2), '%8.0f') );
disp( c_tmp )
c_tmp = strcat( '> Elapsed time (second) =', num2str(elapstime, '%15.7e') );
disp( c_tmp )
disp('=====')

```

## 2. piv\_cor.m

```

function [xi, yi, iu, iv] = piv_cor( im1, im2, nx_pixel, ny_pixel, overlap_x, overlap_y,
iu_max, iv_max, i_mode )

```

```

%=====
%
% version 0.74
%
% piv_cor.m
%
% Description:
%
% Calculate velocity by PIV method with correlation function.
% This program is called by 'mpiv.m' and 'piv_crr.m'
%
% - Correlation algorism
% - search close to image edge
% - Gaussian subpixel fit
%
% Requires
% - func_findpeak2.m
% - func_pivwindowsize.m
%
% Variables:
%
% Input:
% imr1 and 2 image files (double precision)
% nx_pixel subwindow size in x
% (should be larger than 20, typical 32 or 64)
% ny_pixel subwindow size in y
% (should be larger than 20, typical 32 or 64)
% overlap_x overlap ratio of adjacent subwindows in x
% (typically 0.0 or 0.5)
% overlap_y overlap ratio of adjacent subwindow in y
% iu_max maximum displacement in x (unit: pixel)
% iv_max maximum displacement in y (unit: pixel)
% -> iu_max and iv_max give search area
% i_mode = 0: no double check
% = 1: with double check
%
% Output:
% xi, yi location of velocity vector
% iu, iv velocity vector
%
%=====
%
% Terms:
%
% Distributed under the terms of the terms of the BSD License
%

```

```

% Copyright:
%
%   Nobuhito Mori
%   Disaster Prevention Research Institute
%   Kyoto University, JAPAN
%   mori@oceanwave.jp
%
%=====
%
% Update:
% 0.75 2009/07/01 BSD License applied
% 0.74 2003/07/01 func_findpeak2.m and def. of SNR have been changed.
% 0.73 2003/06/26 input parameter i_opt has been replaced by i_mode
% 0.72 2003/06/23 PPR has been added.
% 0.70 2003/06/23 double check option i_mode has been added.
% 0.66 2003/06/23 xcorr2_fast has been inserted
% 0.65 2003/06/20 normxcorr2 has been replaced by xcorr2
% 0.62 2003/06/12 Minor modification
% 0.60 2003/06/11 Moving window has been eliminated
% 0.51 2003/06/11 Code has been refined
% 0.50 2003/06/10 Simplified version (corr2) has been updated by KAC
%       Comments has been refined by KAC
% 0.10 2003/04/02 initial setup has been modified
% 0.01 2002/12/04 First version
%
%=====
%
% <===== Input for professional use <=====
%   can be replaced with other appropriate values

% i_plot = 1 ; test plot
%   = other; no plot
i_plot = 0;

% set filter to eliminate stray vectors: 1-std, 2-median
i_filter = 2;

% Set threshold value (times of standard deviation)
% Vectors will be eliminated if exceeded
vec_std = 1.5;

% set interpolation of missing vector : 1-linear, 2-spline, 3-kriging
i_interp = 1;
% original = 3 RODRIGO

% SNR: signal to noise ratio to find peak

```

```

r_SNR = 3.00;

% r_peak: ratio of 1st peak and 2nd peak
r_PPR = 1.10;

% set area of search
p_search = 1/3;      % percentage of subwindow

% =====> End of input for professional use      =====>
%
% --- check options for subpixel fit
%
% disp('> PIV using correlation algorithm with Gaussian subpixel fit')
%
% --- initialization
%
nx = size(im1,1);
ny = size(im1,2);

% maximum space lag in correlation function
lx_pixel = ceil(p_search*nx_pixel);
ly_pixel = ceil(p_search*ny_pixel);
% ceil(A) rounds the elements of A to the nearest integers greater than or
% equal to A. For complex A, the imaginary and real parts are rounded
% independently.

% to obtain the center locations of all the subwindows
% (dx_center and dy_center)
[ xi, yi, nx_start, ny_start, nx_overlap, ny_overlap, dx_center, dy_center ] ...
    = func_pivwindowsize( 'cor', ...
        nx, ny, nx_pixel, ny_pixel, overlap_x, overlap_y );

% total number of vectors

mx = max(size(xi));
my = max(size(yi));

c_tmp = strcat( 'Total number of vectors = ', ...
    int2str(mx), ' x ', int2str(my) );
%disp( c_tmp );
%RODRIGO
%
% --- main routine
%
for iy = 1: my

```

```

    c_proc = strcat( 'process accomplished : ', num2str( 100*(iy-1)/(my-1),' %03.0f' ),
'/100' );
%disp( c_proc )
%RODRIGO
for ix = 1: mx

    % create target window from 1st image
    % area of target subwindow
    ix1 = xi(ix) - dx_center;
    ix2 = ix1 + nx_pixel - 1;
    iy1 = yi(iy) - dy_center;
    iy2 = iy1 + ny_pixel - 1;

    % center of target window
    ix_center = ( ix1 - 1 + dx_center );
    iy_center = ( iy1 - 1 + dy_center );

    % set target window
    f1 = im1( ix1:ix2, iy1:iy2 );
    f2 = im2( ix1:ix2, iy1:iy2 );

    % calculate spatical cross-correlation, normal method
    % Cn = normxcorr2(f1,f2);
    try
        C = func_xcorr2_fast(f1,f2);
    catch
        C = xcorr2(f1,f2);

    %surf(C)
    %RODRIGO
    end

%
% --- peak finding
%

    CC = C(nx_pixel-lx_pixel+1:nx_pixel+lx_pixel+1, ...
        ny_pixel-ly_pixel+1:ny_pixel+ly_pixel+1);

    [ ip_x, ip_y, SNR, MMR, PPR ] = func_findpeak2( CC, 1 );

    ix_peak = - ( ip_x - lx_pixel );
    iy_peak = - ( ip_y - ly_pixel );

    if i_plot == 1
        %figure(2);clf;

```

```

%surf( Cn );
figure(1);clf;
colormap(jet)
surf( C );
%contour( CC', 25 );
hold on
plot( ip_x, ip_y, 'bo', ...
      'MarkerSize', 8, ...
      'MarkerFaceColor', 'b', ...
      'MarkerEdgeColor', 'k' );
hold off
disp( '>> push key' )
pause
end

%
% --- eliminate too large displacement
%

if (iu_max == 0) & (iv_max == 0)
    u_max_dipl = p_search*nx_pixel;
    v_max_dipl = p_search*ny_pixel;
else
    u_max_dipl = iu_max;
    v_max_dipl = iv_max;
end

if ( abs(ix_peak) > u_max_dipl ) | ( abs(iy_peak) > v_max_dipl )
    ix_peak = NaN;
    iy_peak = NaN;
end

%
% --- eliminate small correlation by SNR and PPR filter
%
if SNR < r_SNR | PPR < r_PPR
    ix_peak = NaN;
    iy_peak = NaN;
end

is_x(ix,iy) = ix_peak;
is_y(ix,iy) = iy_peak;

%
% --- end of main loop

```



```

%
    end
end
%
% --- post process or second velocity field estimation with same window size
%
if i_mode == 1

% disp('> ');
% disp('> Double checking velocity vector for same window size');
    n_scale = 1;
    [xi,yi,iu,iv] = piv_crs( im1, im2, xi, yi, is_x, is_y, nx_pixel, ny_pixel, n_scale,
overlap_x, overlap_y, iu_max, iv_max, i_filter, vec_std, i_interp, 1, 1 );
else

    iu = is_x;
    iv = is_y;

end

```

### 3. func\_pivwindowsize.m

```

function [ xi,yi, nx_start,ny_start, nx_overlap,ny_overlap, dxc,dyc ] = piv_windowsize(
nx,ny, nx_pixel,ny_pixel, overlap_x,overlap_y );
%=====
%
% version 0.10
%
%   piv_windowsize.m
%
% Description:
%
%   Determine piv vector location
%   + Specific
%
% Variables:
%
%   Input;
%
%   Output;
%
%=====
%
% Terms:
%
%   Distributed under the terms of the terms of the BSD License

```

```

%
% Copyright:
%
%   Nobuhito Mori
%   Disaster Prevention Research Institute
%   Kyoto University, JAPAN
%   mori@oceanwave.jp
%
%=====
%
% Update:
%   0.11  2009/07/01 BSD License applied
%   0.10  2002/04/02 first version
%
%=====

% center location of window
if rem(nx_pixel,2) == 0
    dxc = nx_pixel/2 + 0.5;
else
    dxc = ceil(nx_pixel/2);
end
if rem(ny_pixel,2) == 0
    dyc = ny_pixel/2 + 0.5;
else
    dyc = ceil(ny_pixel/2);
end

% overlap pixel size
nx_overlap = floor( nx_pixel*overlap_x );
ny_overlap = floor( ny_pixel*overlap_y );

% start pixel point
nx_start = nx_pixel/4;
ny_start = ny_pixel/4;

% number of vector
mx = floor( ((nx-2*nx_start)-(nx_pixel-nx_overlap))/(nx_pixel-nx_overlap) );
my = floor( ((ny-2*ny_start)-(ny_pixel-ny_overlap))/(ny_pixel-ny_overlap) );

% set vector location
for ix = 1: mx
    % origin of x location of target window
    ix1 = nx_start + (nx_pixel - nx_overlap)*(ix-1) + 1;
    % center of target window
    xi(ix) = ( ix1 - 1 + dxc );
end

```

```

end
for iy = 1: my
    % origin of y location of target window
    iy1 = ny_start + (ny_pixel - ny_overlap)*(iy-1) + 1;
    % center of target window
    yi(iy) = (iy1 - 1 + dyc );
end

% check xi and yi
if xi(mx) >= nx - 1 - ceil(nx_pixel/2);
    xi = xi(1:mx-1);
elseif xi(mx) + ceil(nx_pixel/2) <= nx;
end
if yi(my) >= ny - 1 - ceil(ny_pixel/2);
    yi = yi(1:my-1);
end

```

#### 4. func\_finpeak2.m

```

function [ ip_x, ip_y, SNR, MMR, PPR ] = func_findpeak2( f, i_opt );
%=====
%
% version 0.55
%
% func_findpeak2.m
%
% Description:
%
% To find the location of the peak of a 2D array
% - with optional Gaussian subpixel fit
%
% Variables:
%
% Input;
% f 2d array (double precision)
% i_opt = 1: normal algorism
%       = 2: subpixel fit
%
% Output;
% ip_x, ip_y location of peak
% SNR signal to noise ratio
%       (ratio of peak value to mean value of f)
% MMR max to mean ratio
% PPR 1st peak to 2nd peak ratio
%
%=====

```

```

%
% Terms:
%
%   Distributed under the terms of the terms of the BSD License
%
% Copyright:
%
%   Nobuhito Mori
%   Disaster Prevention Research Institutue
%   Kyoto University, JAPAN
%   mori@oceanwave.jp
%
%=====
%
% Update:
% 0.56 2009/07/01 BSD License applied
% 0.55 2006/12/08 Fixed minor bug for iopt=1
% 0.50 2006/09/12 NM Depress waring errors of Log(0)
% 0.40 2003/07/01 Definition of MMR has been inserted.
% 0.30 2003/07/01 Definition of SNR has been modified
% 0.20 2003/06/11 Definition of SNR has been modified
% 0.10 2002/12/04 first version
%
%=====

% i_plot = 1  -> plot during piv process with pause for check
%           = other -> void
i_plot = 0;
%
% --- initialization
%
nx = size(f,1);
ny = size(f,2);
n = nx*ny;

n0 = size(f(~isnan(f)),1);
%
% --- remove abnormal conditions
%
if ( n0 == 0 ) | ( n==0 ) | ( max(max(f))==0 )
    ip_x = NaN;
    ip_y = NaN;
    SNR = NaN;
    MMR = NaN;
    PPR = NaN;
return

```

```

end
%
% --- peak search 1: normal
%
ip_x = -1;
ip_y = -1;

f_max = f(1,1);
for iy=1:ny
    g = f(:,iy);
    [g_max ig] = max( g );
    if g_max >= f_max
        f_max = g_max;
        ip_x = ig;
    end
end

f_max = f(1,1);
for ix=1:nx
    g = f(ix,:);
    [g_max ig] = max( g );
    if g_max >= f_max
        f_max = g_max;
        ip_y = ig;
    end
end

% for second peak search
h = f(ip_x,ip_y);
ip_x0 = ip_x;
ip_y0 = ip_y;

%
% --- peak search 2: subpixel search using Gaussian
%

if abs(i_opt) == 2

    if ( ip_x == -1 ) | ( ip_y == -1 )
        ip_x = NaN;
        ip_y = NaN;
        return
    end

% calculate x-subpixel peak
g = f(:,ip_y);

```

```

[h ih] = max( g );
g = g/h;
if ih == 1
    ix_subpeak = 1;
elseif ih == nx
    ix_subpeak = nx;
else
    % v0.50
    if g(ih+1)~=0 & g(ih)~=0 & g(ih-1)~=0
        ix_subpeak = ih - 0.5*( log(g(ih+1)) - log(g(ih-1)) ) / ...
            ( log(g(ih+1)) -2*log(g(ih)) + log(g(ih-1)) );
    else
        ix_subpeak = NaN;
    end
end

% calculate y-subpixel peak
g = f(ip_x,:);
[h ih] = max( g );
g = g/h;
if ih == 1
    iy_subpeak = 1;
elseif ih == ny
    iy_subpeak = ny;
else
    % v0.50
    if g(ih+1)~=0 & g(ih)~=0 & g(ih-1)~=0
        iy_subpeak = ih - 0.5*( log(g(ih+1)) - log(g(ih-1)) ) / ...
            ( log(g(ih+1)) -2*log(g(ih)) + log(g(ih-1)) );
    else
        iy_subpeak = NaN;
    end
end

ip_x0 = ip_x;
ip_y0 = ip_y;
ip_x = ix_subpeak;
ip_y = iy_subpeak;

end

%
% --- find second peak
%

% maximum value of 1st peak

```

```

C1=h;
g =f;
% Search for 2nd peak (outside dia_peak from the 1st peak)
dia_peak = round(sqrt(3*nx)/2.5);
%dia_peak = 5;

lx1 = ip_x0 - dia_peak;
lx2 = ip_x0 + dia_peak;
ly1 = ip_y0 - dia_peak;
ly2 = ip_y0 + dia_peak;
if lx1 < 1
    lx1 = 1;
elseif lx2 > nx
    lx2 = nx;
end
if ly1 < 1
    ly1 = 1;
elseif ly2 > ny
    ly2 = ny;
end
g(lx1:lx2,ly1:ly2) = 0;
C2 = max(max(g));
%
% --- post process
%
% Signal-to-Noise Ratio
if i_opt > 1
    g = f;
else
    g = f(find(f));
end
if max(size(g)) > 2
    f_max = max(max(g));
    f_std = std2(g);
    f_mean = mean2(g);
    f_amean = mean2(abs(g));
else
    f_max = NaN;
    f_std = NaN;
    f_mean = NaN;
    f_amean = NaN;
end

MMR = f_max/f_amean;
SNR = (f_max-f_mean)/f_std;

```

```
% Peak-to-Peak Ratio
if C2~=0
    PPR = C1/C2;
else
    PPR = Inf;
end
%
% --- check plot
%
if i_plot == 1

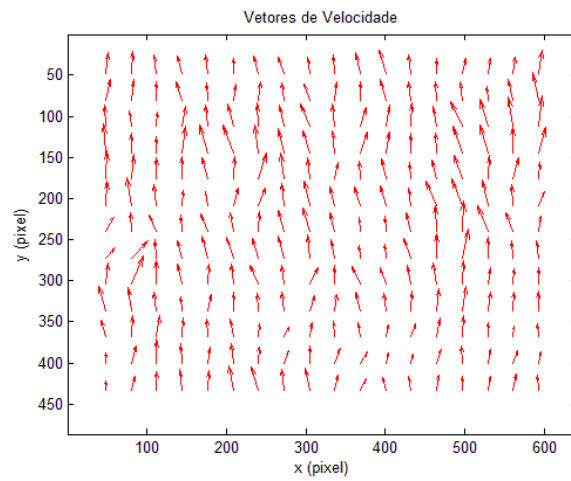
    contour( f, 25 );
% surf( double(f), 25 );
    hold on
    plot( ip_x, ip_y, 'bo', ...
          'MarkerSize', 8, ...
          'MarkerFaceColor', 'b', ...
          'MarkerEdgeColor', 'k' );
    if abs(i_opt) == 2
        plot( ip_x0, ip_y0, 'ro', ...
              'MarkerSize', 8, ...
              'MarkerFaceColor', 'r', ...
              'MarkerEdgeColor', 'k' );
%     plot( ip2_x, ip2_y, 'go', ...
%           'MarkerSize', 8, ...
%           'MarkerFaceColor', 'g', ...
%           'MarkerEdgeColor', 'k' );
    end
    hold off
    pause %RODRIGO
end
```



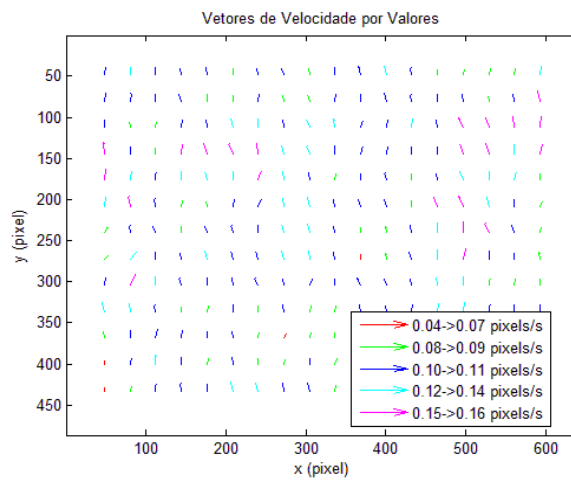
## APÊNDICE C

### Outros tipos de gráficos gerados pelo MPIV

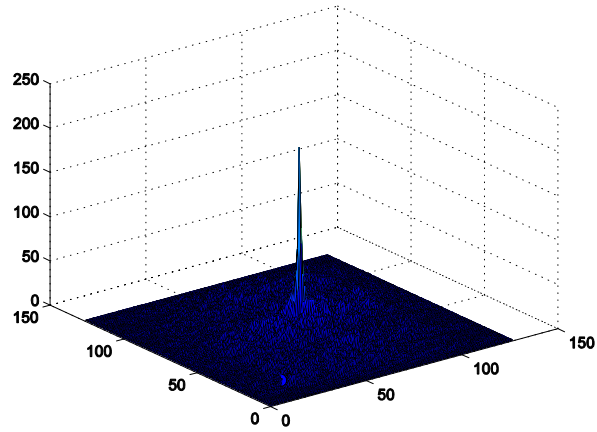
#### 1. Apenas vetores de velocidades escoamento real



#### 2. Vetores por valor de velocidades escoamento real



### 3. Picos de correlação 3D



### 4. Picos de correlação 2D

