

ESTUDO DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DA VELOCIMETRIA POR PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE PARTÍCULA

Sonia M. dos Santos – vnsantos@mikrus.com.br

Jorge A. Almeida – jorge@calvin.ocfis.furg.br

Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Departamento de Física

Cx. P. 474 - 96201-900 - Rio Grande, RS, Brasil

Vilson C. da S. Ferreira – vferreir@vortex.ufrgs.br

Lucas L. Gutkoski – hukax@ct.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Cx. P. 17819 – 90035-972 – Porto Alegre, RS, Brasil

***Resumo.** Este trabalho apresenta o comportamento de partículas sólidas num escoamento multifásico (três fases: água, ar e microalgas) utilizando Velocimetria por Imagem de Partícula. Num tanque circular de acrílico, com circulação de ar, foram colocadas amostras de microalgas, alimento de larvas de camarões reproduzidos em cativeiro, imersas em água do mar. O escoamento é iluminado por um plano de laser e filmado por uma câmara de vídeo CCD. As imagens visualizadas são capturadas e armazenadas num microcomputador, podendo-se gravar o movimento das partículas, para estudo de sua mobilidade. O campo de velocidades das partículas é obtido por dois métodos. O primeiro baseia-se na busca do traçado de partículas individuais, identificando uma partícula em dois instantes subsequentes e em imagens diferentes, para medir seu deslocamento e calcular sua velocidade em função do tempo de separação entre imagens. O segundo método utiliza uma alta concentração de partículas traçadoras distribuídas no escoamento. Obtém-se imagens em dois instantes diferentes, e calcula-se o campo de velocidades através da realização da correlação cruzada das funções correspondentes a cada imagem. O objetivo básico é medir o campo completo de velocidade em regiões bidimensionais, procurando a faixa ideal de concentração de partículas para utilização de cada método.*

***Palavras-chave:** PIV; Velocimetria por acompanhamento de partículas ; Velocimetria de alta densidade*

1. INTRODUÇÃO

Câmaras de vídeo de alta resolução, alta capacidade de armazenamento e processamento digital de imagens a um custo acessível estão tornando viável a transformação da visualização de escoamentos de uma técnica qualitativa para uma técnica quantitativa, com grande acurácia. A maioria dos esforços têm sido concentrados em técnicas óticas que usam planos de luz laser pulsada ou não e equipamentos fotográficos ou eletrônicos para o registro das imagens de partículas traçadoras distribuídas no fluido.

Os principais elementos que compõem esta técnica de medição de velocidade são: o fluido, as partículas, o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens, e o sistema de processamento das imagens, o qual determina o campo de velocidades.

A técnica de velocimetria de luz em sua versão bidimensional pode ser melhor descrita com auxílio da Fig. 1, baseada no trabalho de Adrian (1996).

Na Figura 1, partículas traçadoras contidas no plano de iluminação de espessura ΔZ_0 são focalizadas no plano da imagem, onde se localiza o meio de registro, câmara de vídeo. A lente posicionada a 90° com o escoamento produz uma ampliação $M = \frac{d_i}{d_o}$, tipicamente na faixa $0,1 < M < 10$. As dimensões mais usuais do plano de luz são da ordem 1×100 mm (espessura x altura).

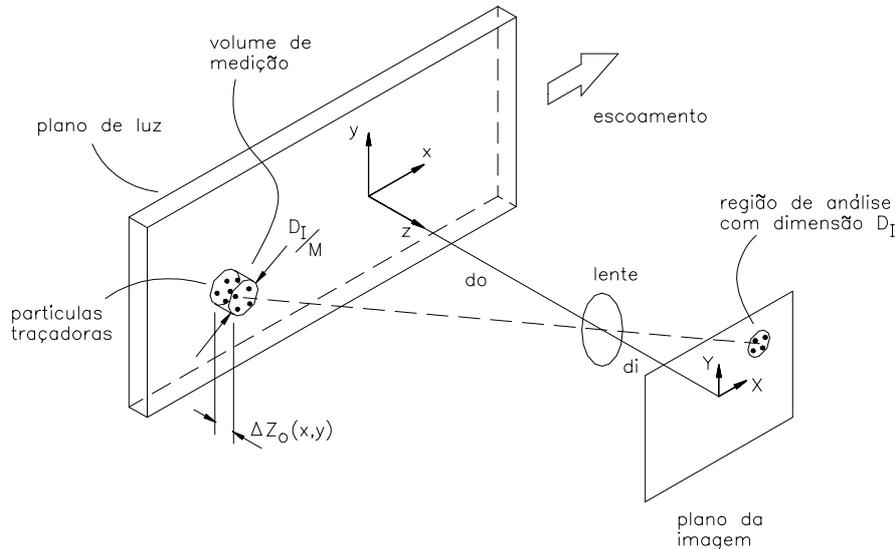


Figura 1- Elementos básicos da técnica de medida de velocidade.

As imagens formadas são transferidas para um computador onde são analisadas para obtenção das informações desejadas.

A automação do processo de análise das imagens proporcionou um salto significativo na resolução espacial que pode ser obtida na medição do campo de velocidade, sendo uma tarefa que consome um tempo considerável de processamento, pois a resolução de uma câmara de vídeo comum é da ordem de 500×500 elementos de imagem, isto é, $2,5 \times 10^5$ pixels.

As características da imagem registrada dependem fortemente da concentração das partículas traçadoras, C (número de partículas por unidade de volume), determinando o tipo de imagem produzida e, conseqüentemente, o método de análise de imagem a ser utilizado.

Adotando-se a nomenclatura proposta por Adrian (1991), podemos classificar os modos de operação dos sistemas de velocimetria de luz em: Velocimetria por *speckles* de laser, Velocimetria por acompanhamento de partículas e Velocimetria de alta densidade de imagem de partículas.

Para elevadas concentrações de partículas, as imagens das partículas se sobrepõem no plano da imagem. Caso a luz espalhada pelas partículas seja coerente, as imagens sobrepostas interferirão formando padrões de interferência aleatórios que se movem com o escoamento. Estes padrões de interferência são conhecidos na literatura como *speckles*.

Quando a concentração das partículas traçadoras situa-se em um valor abaixo daqueles necessários para produzir *speckles*, mas significativamente acima dos valores que permitem o acompanhamento individual de partículas, o sistema de velocimetria por luz opera no modo de alta densidade de partículas, obrigando a uma análise estatística do movimento de grupos de partículas entre duas exposições da fonte de iluminação.

O objetivo básico do presente trabalho é medir o campo completo de velocidades em regiões bidimensionais utilizando os métodos de velocimetria de alta densidade de partículas e

velocimetria por acompanhamento de partículas, descritas por Almeida (1997) e Gutkoski (1999), procurando a faixa ideal de concentração de partículas para utilização de cada método.

As técnicas usadas neste trabalho são o plano de luz laser não pulsado e câmera de vídeo digital para o registro das imagens de partículas traçadoras distribuídas no fluido, que é feito por matrizes de detectores eletrônicos de vídeo, CCD.

O campo de velocidades em estudo é o de microalgas, as partículas traçadoras, imersas em água do mar, colocadas num tanque de cultivo, salientando-se o caráter inovador do uso de microalgas como partículas traçadoras.

Este trabalho é uma contribuição ao projeto “Repopoamento do camarão rosa *Penaeus paulensis* no estuário da Lagoa dos Patos, Rio Grande, RS”, desenvolvido na Estação Marinha de Aquicultura da FURG.

2. AQUISIÇÃO DE IMAGENS EM TANQUE DE CULTIVO

Foi utilizada uma bancada de testes, conforme Fig. 2, composta dos seguintes equipamentos: fonte de Laser de íon de Argônio de 4W; lente cilíndrica de vidro de 0.006 m de diâmetro; tanque de acrílico de 0.30 m diâmetro com 0.32 m de altura e espessura de 0.086 m com 7 entradas para ar de 0.005 m de diâmetro cada, no fundo do tanque, sendo uma entrada central e 6 entradas periféricas igualmente espaçadas; sistema de ar comprimido, câmera de vídeo; gravador vídeo cassette digital e microcomputador Pentium II 200 MHz com placa de aquisição de imagens de 640x480 pixels. A câmara de vídeo é monocromática, CCD, 30 imagens por segundo, equipada com lente de abertura $F=1,2$ e resolução de 768 x 494 pixels.

No tanque circular de acrílico, com circulação de ar, foram colocadas microalgas imersas em água do mar. O feixe de luz produzido pela fonte de laser é transformado em um plano de pequena espessura após passar pela lente cilíndrica. O fluido em movimento é iluminado pelo plano de laser não pulsado incidente num diâmetro do tanque, iluminando as partículas traçadoras. Uma câmera de vídeo CCD, capturando 30 imagens/s, posicionada ortogonalmente ao escoamento registra o movimento das partículas as quais seguem o movimento do fluido. As imagens visualizadas são capturadas e armazenadas no microcomputador. Sucessivas imagens proporcionam a determinação do campo de velocidades das partículas e o traçado de suas trajetórias. O escoamento tem simetria radial podendo ser considerado bidimensional, sendo desprezível a componente da velocidade na direção circunferencial.

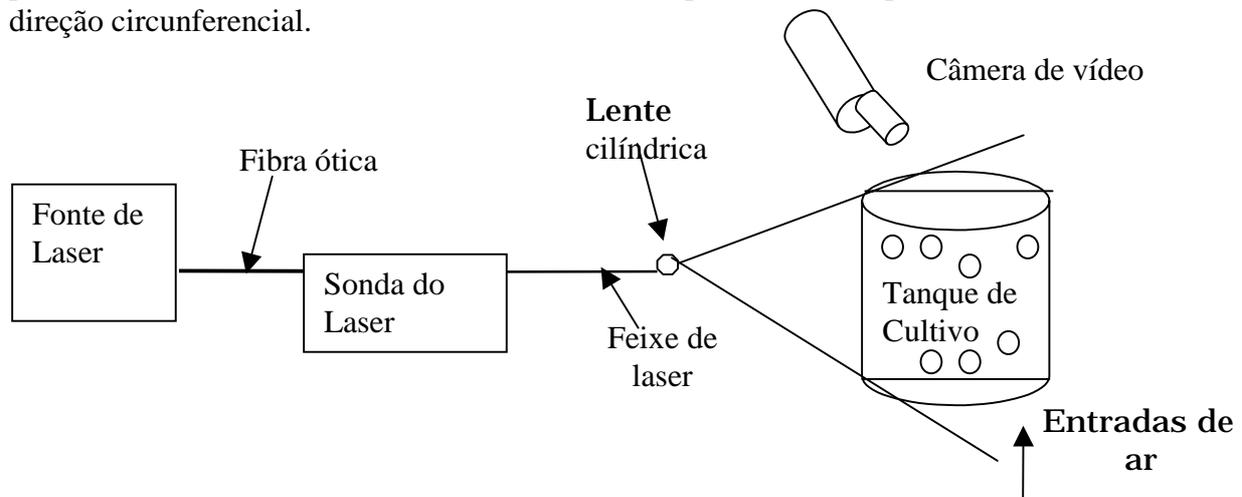


Figura 2 – Aquisição de imagens em tanque de cultivo

3. VELOCIMETRIA DE ALTA DENSIDADE DE PARTÍCULAS: MÉTODO DA CORRELAÇÃO CRUZADA

Para o caso de imagens com alta densidade de partículas, o campo de escoamento pode ser obtido através da utilização do método de correlação espacial das imagens ou do método das franjas de Young, resultado da transformada ótica de Fourier da imagem, descritos por Papoulis (1962) e Adrian (1991).

Para determinar a velocidade através da correlação espacial das imagens, existem duas técnicas que diferem no modo de obtenção das imagens. Um método consiste em obter uma imagem no instante t e outra no instante $t+\Delta t$, isto é, teremos duas imagens do escoamento, e, como cada imagem corresponde a uma função distinta, o campo de velocidade é obtido através da realização da correlação cruzada das funções correspondentes a cada imagem. No outro método a imagem obtida é uma fotografia de dupla exposição, sendo uma exposição realizada no instante t e outra no instante $t+\Delta t$. Deste modo obtemos uma única imagem que contém informações sobre os dois instantes de tempo. Neste caso, o campo de velocidade é obtido através da autocorrelação da função que descreve a imagem nos dois instantes de tempo, segundo Adrian (1991).

O método da correlação cruzada é empregado para determinar a velocidade, quando obtemos imagens sucessivas do escoamento. Estas imagens podem ser obtidas utilizando-se câmeras filmadoras ou câmeras fotográficas com avanço motorizado do filme. Na técnica da correlação cruzada a velocidade máxima que pode ser medida está condicionada ao intervalo de tempo mínimo no qual o sistema adquire duas imagens sucessivas.

A aplicação do algoritmo da correlação cruzada normalizada, bidimensional, permite determinar o módulo, a direção e o sentido da velocidade de acordo com Englart, Sheng e Kirilin (1989) e Wilbert e Gharib (1991). Para tal, são necessárias duas imagens, uma obtida no instante t (Imagem 1) e outra em $t+\Delta t$ (Imagem 2). Uma região contendo o ponto no qual desejamos determinar a velocidade é selecionada na Imagem 1, e então a mesma configuração das partículas é procurada na imagem 2, como mostra a Fig. 3.

A região indicada por $I_1(j,k)$, na Fig. 3, é chamada de região base, e a região indicada por $I_2(j,k)$ está localizada dentro de uma região $I_B(j,k)$ chamada de região de busca. Naturalmente, a região de busca deve ser maior do que a região base, e a escolha do tamanho de cada região depende do escoamento.

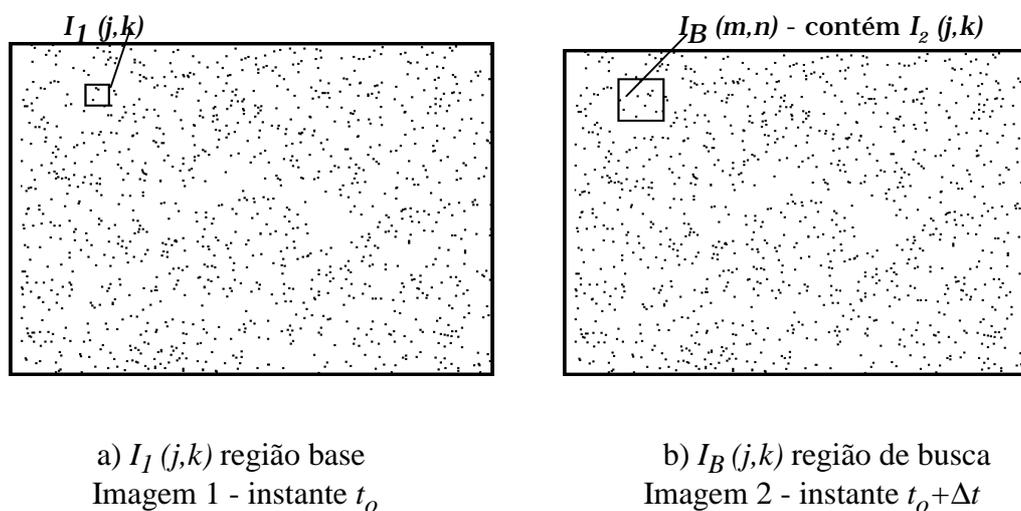


Figura 3 - Imagem das partículas

A correlação espacial das imagens está baseada no fato de que as partículas dentro da região investigada têm a mesma velocidade e mantêm a mesma posição relativa entre si. O intervalo de tempo está limitado ao sistema de aquisição de imagens, o que normalmente impede que este método seja aplicado a grandes velocidades. O deslocamento das partículas também é limitado quando a trajetória é acentuadamente não linear, pois a velocidade é calculada em função das coordenadas espaciais iniciais e finais de cada conjunto de partículas. A existência de gradientes de velocidade acentuados requer que o tamanho da região base e o intervalo de tempo sejam pequenos. O algoritmo utilizado para a correlação cruzada normalizada das imagens, segundo Englart, Sheng e Kirilin (1989) é definido de acordo com a Eq. 1:

$$R(m,n) = \frac{\sum_j \sum_k I_1(j,k) I_2(j-m,k-n)}{\left\{ \left[\sum_j \sum_k I_1^2(j,k) \right] \left[\sum_j \sum_k I_2^2(j-m,k-n) \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

onde $I_1(j,k)$ e $I_2(j,k)$ são duas sub-imagens dentro das imagens 1 e 2 e (j,k) são índices em uma base $J \times K$ pixels que está localizada dentro de uma região de busca com $M \times N$ pixels. A base é obtida de uma região na imagem 1 com coordenadas do ponto central (x_1, y_1) , e contém um padrão distinto de partículas. A região de busca na imagem 2 também tem coordenadas do ponto central (x_2, y_2) . Utilizando o algoritmo de correlação cruzada da Eq. 1, o padrão da imagem 1 é sobreposto em todas as posições possíveis dentro da imagem 2, e o ponto central da base na posição que apresenta o maior coeficiente de correlação R , possui coordenadas $\frac{\sum_j \sum_k I_1(j,k) I_2(j-m,k-n)}{\left[\sum_j \sum_k I_1^2(j,k) \right] \left[\sum_j \sum_k I_2^2(j-m,k-n) \right]^{1/2}}$ que descrevem o deslocamento do padrão, como ilustra a Fig. 4. O vetor velocidade é a linha que une o centro da região de busca ao centro da região base na posição onde ocorre o maior valor do coeficiente de correlação R .

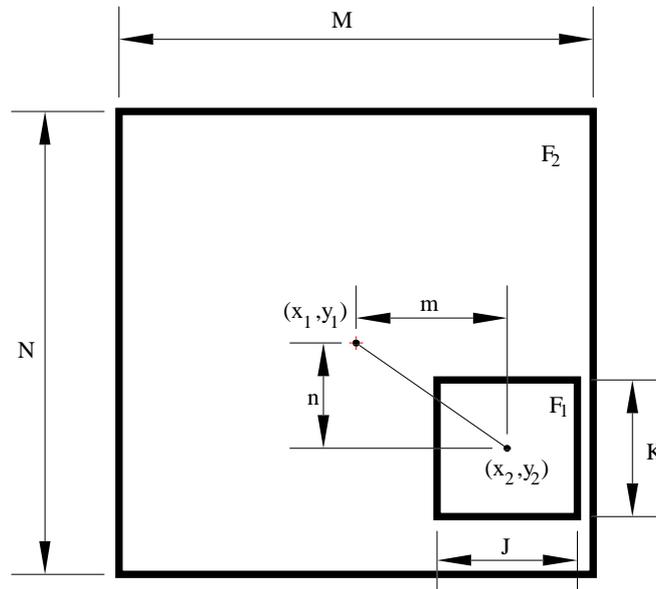


Figura 4 - Região base na posição de maior correlação.

As componentes da velocidade são calculadas com as Eqs. 2 e 3

$$u = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (2)$$

$$v = FS \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad (3)$$

o que nos permite determinar o módulo, a direção e o sentido da velocidade, sendo FS um fator de escala que relaciona a dimensão em pixels na imagem com uma dimensão real no escoamento, em mm, sendo igual nos dois eixos. Devido à curvatura do tanque de cultivo e à mudança de meio ar-acrílico-água, há uma razão de magnificação da imagem de 0,9530, estando incluída também no fator FS uma correção de 1,0493 correspondente ao inverso da magnificação.

Como a função de correlação é normalizada, o coeficiente de correlação R , varia entre 0 e 1 ($0 \leq R \leq 1$). Portanto, quando o padrão da região base for localizado na região de busca o coeficiente de correlação será $R=1$. Entretanto, devido às possíveis deformações que o padrão pode sofrer em razão das características do escoamento, em alguns casos encontraremos valores de $R < 1$. Faz-se portanto necessário estabelecer um valor de R acima do qual a deformação do padrão é aceitável.

A região base deve ter tamanho suficiente para conter um padrão distinto de partículas. Padrões sem partículas ou com uma partícula apenas apresentam boa correlação em posições da região de busca que não correspondem ao deslocamento real, pois a probabilidade de padrões iguais é grande, o que gera resultados errados. Este problema pode ser contornado desprezando-se as regiões base que apresentarem $\sum_j \sum_k I_1(j, k) < NP$, onde NP é o valor

mínimo admitido para o somatório da intensidade dos tons de cinza dos pixels correspondentes às partículas. Como as microalgas são todas aproximadamente do mesmo tamanho, isso equivale ao critério de considerar um número mínimo de partículas.

A existência de bolhas de ar no escoamento produz regiões sem partículas da ordem do diâmetro das entradas de ar, correspondendo a um diâmetro de 6 pixels.

A região de busca deve ser grande o suficiente para conter o padrão da região base. A escolha do tamanho da região de busca deve ser feita em conjunto com a seleção do intervalo de tempo, para que o padrão procurado não fique fora da região de busca e considerando ainda que intervalos de tempo muito grandes podem provocar deformações no padrão.

4. VELOCIMETRIA POR ACOMPANHAMENTO DE PARTÍCULAS

A forma como as velocidades são calculadas dependem da forma como se concentram as partículas. No método de busca do traçado de partículas individuais o ponto em questão é saber como identificar uma partícula em dois instantes subsequentes diferentes e em imagens diferentes para medir seu deslocamento e desta forma calcular sua velocidade baseando-se no tempo de separação entre imagens.

Levando em consideração uma faixa de separação entre as partículas, é possível determinar uma área de busca onde esta partícula provavelmente estará na imagem seguinte. Se pensarmos em termos de pixels, esta área de busca na maioria dos escoamentos analisados permitiram um deslocamento de dez pixels. Isto implica, que se em um determinado instante 1, tivermos uma partícula em um determinado ponto da imagem poderemos buscá-la na imagem subsequente por uma região circunvizinha correspondente ao valor de dez pixels. Caso não se encontre partícula na segunda imagem, ou ainda existir uma outra partícula na mesma área de busca em ambas imagens, nenhum vetor velocidade é criado. Caso todas as condições sejam satisfeitas um vetor velocidade é gerado. A forma de cálculo das componentes u e v do vetor velocidade é dada pelas Eqs. 4 e 5:

$$u = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (4)$$

$$v = \frac{\Delta Y}{\Delta t} \quad (5)$$

onde ΔX é o deslocamento da partícula no eixo horizontal, ΔY é o deslocamento da partícula no eixo vertical e Δt é o intervalo de tempo entre as duas imagens.

A partir destes dados, podem ser feitas médias, calculadas as flutuações das velocidades ou ainda calibrações, que têm a finalidade de transformar a medida em pixels por segundo para uma unidade do sistema métrico.

Para se obter os vetores velocidade foram desenvolvidos algoritmos que constam das seguintes etapas, características de processamento digital de imagens, segundo Gonzalez e Woods (1993), descritas a seguir : 1) tratamento das imagens como matrizes; 2) Separação das partículas iluminadas do fundo pela aplicação de equação de limiar; 3) determinação do centro da partícula e 4) cálculo do vetor velocidade.

O algoritmo trata um conjunto de pixels que formam uma imagem capturada padrão RGB (red,green,blue) 24 bits, como uma matriz bidimensional. As imagens são adquiridas em 24 bits porque a maioria das placas de captura de uso geral fazem desta forma.

Tratando-se de um sistema de determinação de velocidades, em fluido que nos casos aqui tratados é composto por água, existirão pontos de brilho excessivo, que acontecem pela incidência do plano de laser nas paredes dos sistemas onde o escoamento deve ser medido e poderão interferir negativamente nas medidas.

Para resolver este problema é feita uma marcação destes pontos para que depois não sejam incluídos no processamento. Isto não irá causar perda de dados, uma vez que, estes pontos não seriam aproveitados exatamente pelo excesso de brilho que poderia causar confusão na identificação das partículas.

Nas imagens, o fundo é mais escuro. Sendo L o limiar de corte da intensidade dos pixels, é aplicada na imagem uma equação de limiar, de acordo com Eqs. 6 e 7:

$$\text{Se } M(n,m) \leq L \text{ então } M(n,m) = 255; \quad (6)$$

$$\text{Senão } M(n,m) = 0; \quad (7)$$

Desta forma teremos separado a parte mais brilhante de interesse que no caso são as partículas, dando a elas um valor 0 (preto) e ao restante da imagem um valor 255 (branco). Com isso podemos notar que ficamos com uma imagem binária, interpretada como partícula e não partícula. É com este tipo de imagem que os algoritmos trabalham desta etapa em diante.

Para a determinação da velocidade de uma partícula, tomamos como base a posição de seus centros na imagem, sendo obtidos pela média de seus pontos com maior intensidade de cinza, selecionados pela região de corte comandadas pelo limiar.

5. RESULTADOS

Foram testadas amostras de microalgas *Tetraselmis chunii* (15-20 μ m) em 15 concentrações, de 0,040litros a 0,320 litros de 0,020 em 0,020 litros, imersas em 12 litros de água do mar filtrada e esterilizada. Cada mililitro da amostra tem 400000 microalgas. Para cada amostra foram aplicados os métodos de velocimetria por acompanhamento de partículas e velocimetria de alta densidade de partículas por correlação cruzada.

As Figuras 5 e 6 exemplificam a aplicação do método de velocimetria de alta densidade de partículas por correlação cruzada, com um fator de correlação mínimo de 0,9 e para todas as amostras foram testadas áreas de busca de 10x10 a 120x120 pixels de 10 em 10 pixels.

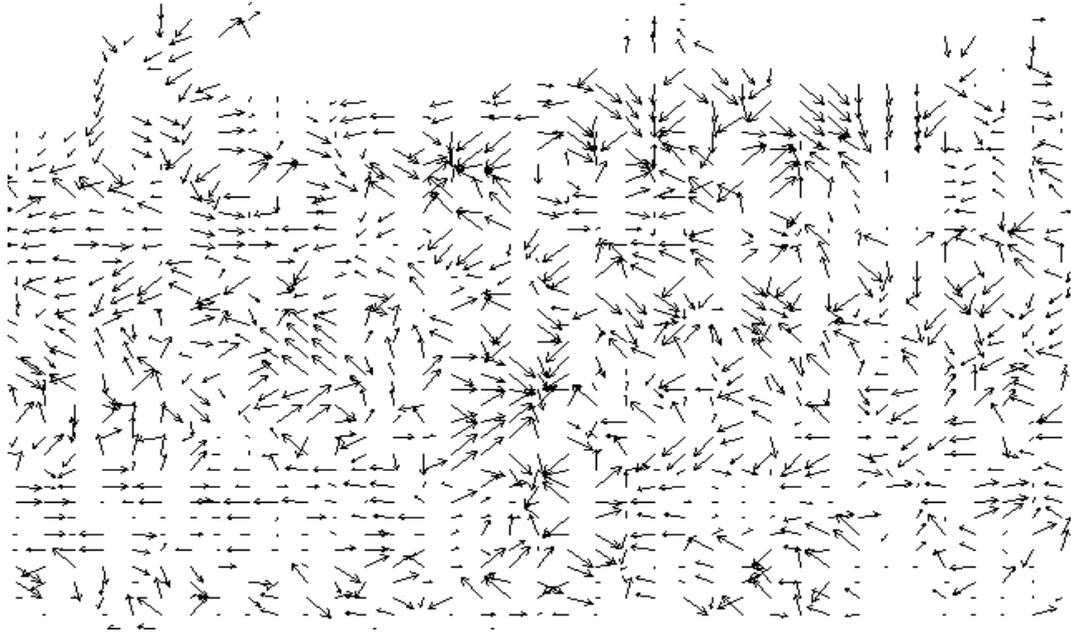


Figura 5 - Velocimetria de alta densidade de partículas - Concentração 0,320 litros de microalgas em 12 litros de água do mar, área de busca 40x40 pixels

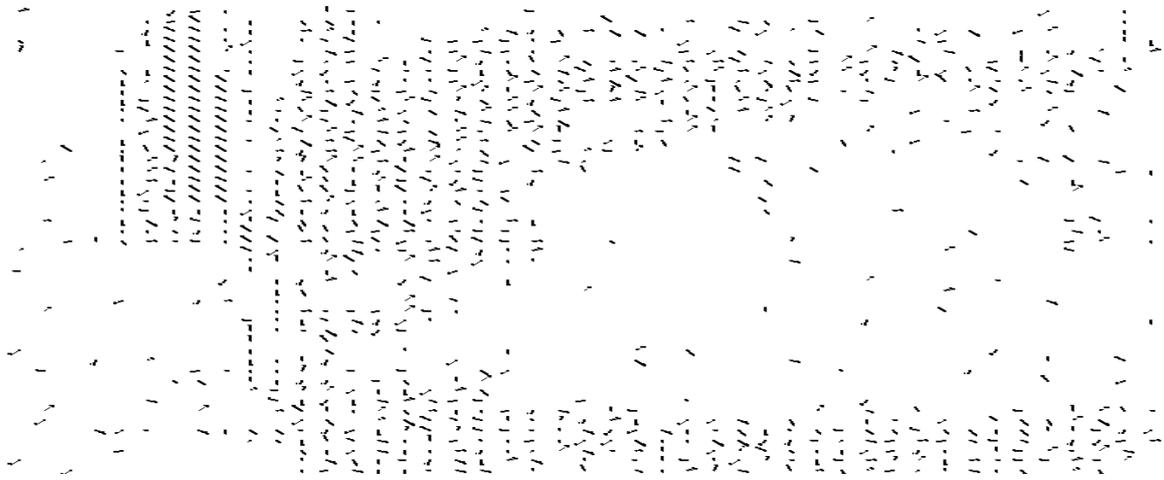


Figura 6 – Velocimetria de alta densidade de partículas - concentração 0,140 litros de microalgas em 12 litros de água do mar, área de busca 40x40 pixels

A Figura 7 exemplifica a aplicação do método de acompanhamento de partículas, sobre imagem capturada do tanque de cultivo com área de busca de 10x10 pixels.

As componentes das velocidades das partículas variaram em módulo de 0 a 175pixels/s, na direção u e de 0 a 127pixels/s na direção v , com fator de escala 0,8 mm/pixel, com flutuações variando de 0 a 116 %. As velocidades variam com a temperatura, a salinidade e o ph da água do mar, e com o *stress* das microalgas no tanque de cultivo, pois são seres vivos. Não há possibilidade de repetição de resultados iguais do campo completo de velocidades devido aos fatores citados. As partículas têm dimensões da ordem de 15-20 μ m. Para o fator de escala utilizado, a partícula pode se deslocar cerca de 50 vezes seu diâmetro sem ser detectada. Para minimizar a incerteza pode-se atuar no fator de escala, tomando-se imagens de meio diâmetro

do tanque, pois existe simetria radial, duplicando a resolução espacial na direção de u. Pode-se ainda permitir que as partículas tenham um deslocamento maior, correlacionando-se quadros separados por maior intervalo de tempo, em vez de correlacionar imagens consecutivas ($\Delta t=1/30$ s) e trabalhar com placas de aquisição de imagens com maior resolução.

Com base nos resultados das 15 amostras testadas, até a concentração de 0,240 litros de microalgas/12 litros de água do mar, o método de velocimetria por acompanhamento de partículas apresentou melhores resultados. Para concentrações superiores não foi possível acompanhar satisfatoriamente as partículas.

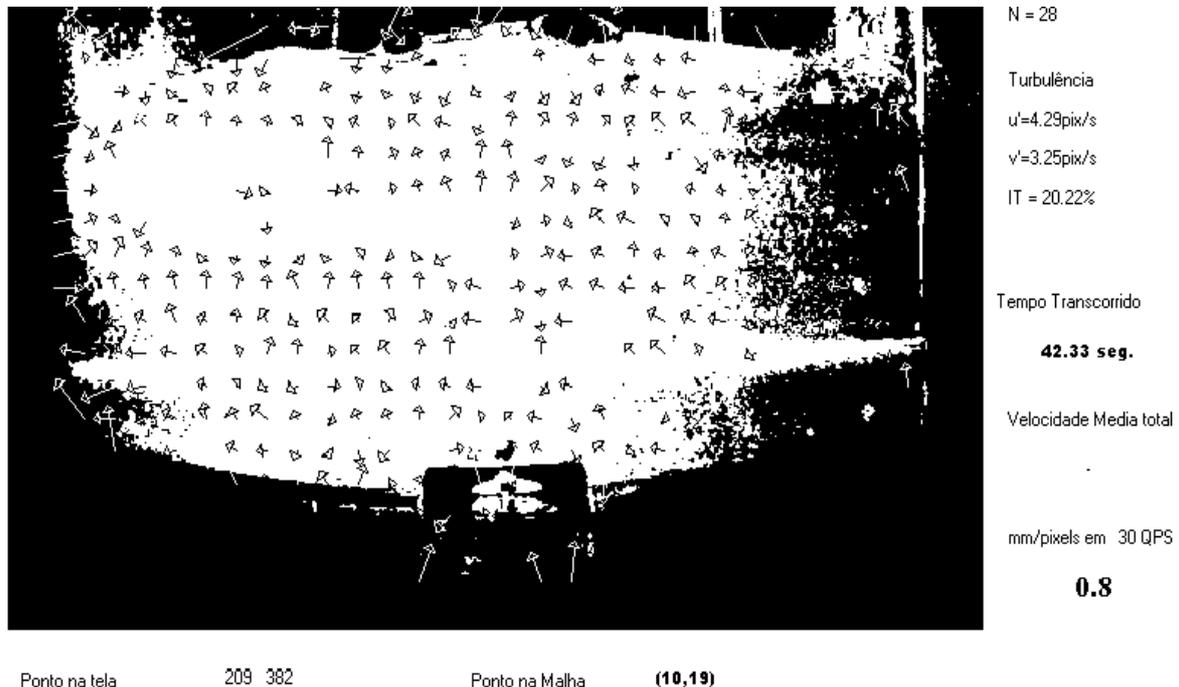


Figura 7 - Velocimetria por acompanhamento de partículas - concentração 0,140 l de microalgas em 12 litros de água do mar, área de busca 10x10 pixels

Neste método, para que se obtenha confiabilidade no resultado do campo de velocidades é preciso que se capture e processe um grande número de imagens, garantindo-se a passagem de uma quantidade determinada mínima de partículas em cada região analisada que contribuirão para o cálculo da velocidade média em cada ponto. Para obter-se o campo de velocidades da Fig.7 foram capturadas e processadas 1939 imagens, correspondendo a 64,63s a uma taxa de 30 imagens/s.

No método de velocimetria de alta densidade de partículas por correlação cruzada, na mesma faixa de concentração, não houve boa correlação conforme pode ser verificado na Fig.6, com grandes áreas sem apresentar vetores velocidade. Neste método, para o problema estudado, a área de busca de 40x40 pixels foi a mais coerente com o módulo do deslocamento das partículas e com o gradiente de velocidade, conforme Fig. 5, para que não se afastasse do padrão. No escoamento há uma pequena rotação das partículas, devendo o padrão ser girado na varredura da imagem, o que será feito posteriormente, pois o método usado é válido para movimentos de translação das partículas.

Para a utilização do método de velocimetria de alta densidade de partículas por correlação cruzada, a escolha das duas imagens a serem correlacionadas está ligada à velocidade das partículas e ao tempo de captura entre as duas imagens, sem afastamento do padrão. No escoamento estudado, as imagens podem estar separadas de até 2,3s, o que corresponde a 70 imagens, aproximadamente.

6. CONCLUSÕES

A concentração de partículas determinou o tipo de imagem produzida e, conseqüentemente, o método de análise de imagem a ser utilizado. O desenvolvimento tecnológico substituindo-se máquinas fotográficas por câmera de vídeo, com baixo intervalo de tempo entre captura de imagens, permitiu o estudo de escoamento com velocidades diferentes, maiores ou menores, sem perder as partículas em imagens subsequentes. A sensibilidade à luz de 0,0003 lux facilitará a utilização de fontes de laser de menor potência, barateando o sistema montado. A rápida aquisição e processamento confiável das imagens permitiu acompanhar o comportamento das microalgas monitorando suas velocidades e trajetórias, objetivo primordial deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Adrian, R. J., 1991, "*Particle - Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*", Annual Review Fluid Mechanics, vol 23 pp.261 – 304
- Adrian, R. J., 1996, "*Laser Velocimetry*", in Fluid Mechanics Measurements, ed. R.J. Goldstein, Taylor and Francis, 2nd edition, pp.175-299.
- Almeida, J.A., 1997, "*Sistemas de velocimetria por imagens de partículas*", Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Englart, S. E., Sheng, Z., and Kirilin, R. L., 1989, "*Crosscorrelation of synthesized digital image pairs for determination of velocity vectors fields associated with fluid flow about a cylinder*", Flow visualization — Winter Annual Meeting of ASME, , pp. 3.
- Gonzalez, R. C., and Wintz, P., 1987, "*Digital Image Processing*", Addison Wesley Pub., New York.
- Gonzalez, R.C. & Woods, R. E., 1993, "*Digital Image Processing*", Addison-Wesley Pub., New York.
- Gutkoski, L.L., 1999, "*FlowViewer - Medida de fluxo através de Imagens*", LTMF, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Papoulis, A. 1962, "*The Fourier Integral and Its Applications*". McGraw-Hill Book Company.
- Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "*Digital particle image velocimetry*", Experiments in Fluids Springer-Verlag, pp. 181-193.

Multi-phase flow study using velocimetry by processing image of particle

SUMMARY. *This work presents the behaviour of solid particles in an multi-phase flow (three phases: water, air and micro-algae) using Velocimetry by Processing Image of Particle. Samples of micro-algae, food of shrimps larvae, were set in a acrylic circular tank filled with sea water, stirred by air flow coming from the bottom. The flow field is illuminated by a laser sheet and filmed by a CCD video camera. The visualised images are captured and stored on the hard disk of a microcomputer. The recorded images shows the micro movement of the particles allowing to a mobility study. The velocity of the particles was performed by two approaches. The first was, based on the search for individual particles, identified in two subsequent moments and in two different images in order to measure the displacement and to calculate the velocity based on the time between two separated images. The second one uses a high concentration of tracer particles distributed in the flow. Images in two different instants was obtained and the flow velocity is calculated by cross correlation of functions corresponding to each image. The main objective was to measure a complete flow field in a two-dimensional area, seeking for an ideal concentration of particles in each method.*

Keywords: PIV; Particle Tracking Velocimetry; High Density of Particles Velocimetry