

**CAMPO DE VELOCIDADES DE MICROALGAS EM TANQUES DE
CULTIVO POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS****Sonia Magalhães dos Santos**[e-mail: vnsantos@mikrus.com.br](mailto:vnsantos@mikrus.com.br)**Jorge Alberto Almeida**[e-mail: dfsjaa@furg.br](mailto:dfsjaa@furg.br)**Ivoni Carlos Acunha Jr.****Luciano Vaghetti de Oliveira**[e-mail: lvaghetti@vetorialnet.com.br](mailto:lvaghetti@vetorialnet.com.br)Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)
CP 474 – Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

Resumo. Num tanque de cultivo é estudado o campo de velocidades de microalgas visando conhecer-se a taxa de sedimentação e os seus movimentos, bem como as formas de circulação de ar para melhor sobrevivência. O tanque de acrílico de forma circular contém entradas de ar na parte inferior sendo seis entradas periféricas e uma central, e a vazão de ar é medida por rotâmetro de forma a injetar-se iguais quantidades de ar. Um feixe de luz produzido por uma fonte de laser é transformado num plano de pequena espessura após passar por uma lente cilíndrica, sendo as microalgas em movimento iluminadas pelo plano de laser incidente num diâmetro do tanque. Uma câmera de vídeo CCD posicionada perpendicularmente ao escoamento registra o movimento das microalgas dispersas na água. Sucessivas imagens adquiridas proporcionam a determinação do campo de velocidades das partículas obtido pelo método da correlação cruzada. Uma região contendo o ponto no qual desejamos determinar a velocidade é selecionada na primeira imagem e então a mesma configuração das partículas é procurada na segunda imagem, pesquisando-se o coeficiente de correlação máximo. Foram construídos cinco planos de laser entre duas entradas consecutivas de ar defasados de 15°. O objetivo do estudo é analisar o caráter tridimensional da movimentação das microalgas aplicando-se a equação de conservação da massa entre planos consecutivos.

Palavras chave: escoamento multifásico; escoamento tridimensional; velocimetria por imagens de partículas

1. Introdução

O escoamento multifásico tem sido estudado por métodos experimentais, salientando-se: a propagação de ondas de pressão com bolhas de gás e partículas sólidas pesquisado por Nakoryakov *et al.* (1994); a determinação do campo de velocidades de líquidos em colunas de bolhas por Anemometria Laser Doppler descrita por Mudde *et al.* (1997) e Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV - pesquisada por (Chen & Fan, 1992 e Dewsbury *et al.* 1999).

Sua inquestionável importância deve-se às aplicações em processos químicos e bioquímicos, cujos fluxos de cada fase ocorrem em correntes paralelas ou cruzadas em reatores verticais. Conforme Mitra-Majumdar *et al.* (1997), primeiramente, foram simulados escoamentos bifásicos baseados em soluções numéricas das equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, complementadas por equações para parâmetros turbulentos e termos de transferência interfacial para descrever as características do escoamento e perfis de temperatura no domínio do fluxo.

Num dos estudos mais completos descrito por Mitra-Majumdar *et al.*(1995), foi utilizado um modelo computacional para examinar o comportamento de um fluxo multifásico (água – ar – partículas) através de uma coluna vertical, incorporando estudos de Spalding (1980); Hrenya *et al.* (1995), entre outros.

De acordo com Souza (2001), conhece-se uma grande quantidade de técnicas de visualização em meio líquido, onde destacam-se as técnicas óticas de visualização de escoamento que utilizam diretamente as propriedades intrínsecas do meio (índice de refração, densidade, etc.). As técnicas mais utilizadas hoje utilizam tintas e corantes como traçadores líquidos e, bolhas de ar ou hidrogênio como traçadores gasosos, aplicadas principalmente em túneis hidrodinâmicos. Como traçadores sólidos, usa-se pó de alumínio, pó de serra tratado, minério de ferro, purpurina, etc.

Na visualização de escoamentos é recomendável o uso de água destilada, para evitar que impurezas interfiram no método de medição da velocidade. O uso de gases exige partículas muito pequenas para que a força gravitacional não predomine sobre a força de arraste e o empuxo do fluido, o que exigiria maior resolução do sistema de filmagem e uma fonte de luz de maior potência, onerando o trabalho.

Na visualização do escoamento, segundo Almeida (1997), as partículas traçadoras desempenham um papel

fundamental no sistema de medição, pois elas são responsáveis pelo espalhamento da luz, devendo produzir imagens de boa qualidade e seguir de maneira fiel o escoamento, não perturbando o campo de velocidades. Como o campo na região próxima a cada partícula é inevitavelmente afetado devido ao escoamento não ser uniforme, as partículas devem ser suficientemente pequenas e estar suficientemente dispersas para minimizar o efeito de sua presença. Portanto, as partículas devem apresentar baixa concentração em volume, além de possuírem pequeno diâmetro.

Por outro lado, a concentração deve ser suficientemente grande para que o campo de velocidades possa ser completamente reconstituído. Devido a estes fatores, aliados ao baixo custo, utilizou-se como partículas traçadoras primeiramente partículas de purpurina, para estudos a nível de laboratório, e após foram utilizadas as partículas reais, as microalgas. Embora procure-se obter o campo de velocidades em uma malha uniforme, a distribuição das partículas é aleatória, e ocorrem pontos onde não é possível obter-se a velocidade devido a existência de poucas partículas nestas regiões.

As características da imagem registrada dependem fortemente da concentração das partículas traçadoras, 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), pode-se classificar os modos de operação dos sistemas de velocimetria de luz em: Velocimetria por padrões de laser (Laser Speckel Velocimetry - LSV), Velocimetria por acompanhamento de partículas (Particle Tracking Velocimetry – PTV) e Velocimetria de alta densidade de imagem de partículas (Particle Image Velocimetry – PIV).

Para 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. Quando a concentração das partículas traçadoras situa-se em um valor abaixo daqueles necessários para produzir padrões (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.

A velocimetria por acompanhamento de partículas (PTV) possui uma sutil diferença na forma de análise das imagens das partículas quando comparada com os sistemas de alta densidade de partículas (PIV). Ao invés de ser analisada uma sub-região com diversas partículas, esta metodologia caracteriza-se pela busca do deslocamento individual de cada partícula ao longo do tempo. Deste modo, a concentração das partículas deve ser muito inferior à técnica do PIV, e as partículas não podem estar agrupadas nas sub-regiões de análise mas sim serem as únicas em cada uma delas. Para se determinar o deslocamento da partícula, sua posição individual deve ser determinada em dois ou mais instantes subseqüentes e desta forma sua velocidade pode ser encontrada a partir do seu traçado.

Comparado com o sistema PIV, no sistema PTV, as partículas podem ser maiores, desde que mantenham a premissa de seguirem adequadamente o escoamento, e mais esparsas, ou seja, com menores concentrações.

No trabalho realizado por Santos et al. (2000) foi medido o campo completo de velocidades em regiões bidimensionais utilizando os métodos de velocimetria de alta densidade de partículas e velocimetria por acompanhamento de partículas, descritos por Almeida (1997) e Gutkoski (1999), procurando a faixa ideal de concentração de partículas (microalgas) para utilização de cada método.

Na busca do traçado de partículas individuais o ponto em questão é saber como identificar uma partícula em dois instantes subseqüentes diferentes e em imagens diferentes para medir seu deslocamento e desta forma calcular sua velocidade baseando-se no tempo de separação entre imagens. Neste método, 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. Em termos de pixels, esta área de busca na maioria dos escoamentos com microalgas analisados permitiram um deslocamento de dez pixels. Isto implica, que se num instante, tem-se uma partícula em um determinado ponto da imagem, pode-se buscá-la na imagem subseqüente numa região circunvizinha aumentada de dez pixels, em ambas as direções. 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.

Com base nos resultados apresentados por Santos et al. (2000), com 15 amostras testadas de microalgas (com tamanho de 2 a 15µm), até a concentração de 0,240 litros de microalgas/12 litros de água do mar, o método de velocimetria por acompanhamento de partículas apresentou-se como a técnica mais adequada, porque reproduz de maneira mais completa o campo estudado. Para concentrações superiores não foi possível acompanhar satisfatoriamente as partículas devendo-se obter o campo de velocidades pelo método de alta densidade de partículas.

O trabalho aqui proposto apresenta o estudo do escoamento multifásico (três fases: água, ar e partículas) utilizando Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV). O campo de velocidades é obtido pelo método de alta densidade de partículas traçadoras distribuídas no escoamento (concentração de 0,320 litros de microalgas em 12 litros de água do mar) calculando-se a função correlação cruzada das funções correspondentes a duas imagens obtidas em instantes diferentes.

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um Sistema para Monitoramento de Microorganismos Aquáticos por Processamento Digital de Imagens, visando:

Apoio aos Projetos: “Repovoamento do camarão rosa *Penaeus paulensis* no estuário da Lagoa dos Patos, Rio Grande, RS”, e “Produção do Camarão Marinho *Penaeus paulensis* no Sul do Brasil: Cultivo em Estruturas Alternativas” desenvolvidos na Estação Marinha de Aquicultura da FURG, reconhecidos nacional e internacionalmente, através dos seguintes procedimentos:

- Aplicação de metodologia desenvolvida para determinação do campo de velocidades de microalgas em tanques de cultivo, permitindo o conhecimento de taxas de crescimento e sedimentação. O interesse é medir o campo completo de velocidades em regiões bidimensionais utilizando os métodos de velocimetria de alta densidade de partículas. Através dos planos bidimensionais é estudado o caráter tridimensional do escoamento e suas conseqüências nas condições de sobrevivência dos microorganismos nos tanques de cultivo.

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;

-Possibilitar o estudo de diferentes formas de circulação de água e ar em tanques de cultivo.

Como seqüência do estudo do escoamento de microalgas em tanques de cultivo, está em fase inicial o projeto "Desenvolvimento de um Sistema de Imageamento Estéreo para Monitoramento de Escoamentos Tridimensionais", proposto por (Santos et al., 2002), conforme descrito por Gonzalez e Woods (2000). Este projeto mais complexo será constituído das seguintes etapas:

1- Visão artificial: Desenvolvimento de programa computacional para determinar a distância entre um objeto estático e as câmeras. As imagens não necessitam de aquisição simultânea;

2- Desenvolvimento de um sistema para medir a velocidade de um objeto na direção paralela ao eixo das lentes das câmeras. Neste caso, é necessário o projeto de um " trigger" para as câmeras e aquisição simultânea das imagens;

3- Calibração do sistema desenvolvido com deslocamentos e intervalos de tempo conhecidos;

4- Aplicar o sistema calibrado na medição do campo de velocidades de escoamentos tridimensionais.

2. Descrição do Experimento

Foi utilizada uma bancada de testes, conforme Fig. (1), composta dos seguintes equipamentos:

A- fonte de laser de 1mW;

B- lente cilíndrica de vidro de 0.006 m de diâmetro;

C- tanque de acrílico de 0.36 m diâmetro com 0.32 m de altura e espessura de 0.086 m

D- sistema de ar comprimido com 7 entradas de 0.005 m de diâmetro cada, no fundo do tanque, sendo uma entrada central e 6 entradas periféricas distanciadas de 60°;

E- câmera de vídeo monocromática, CCD, 30 imagens por segundo, lente de abertura $F=1,2$ e luminosidade mínima de 0,003 lux e resolução de 768 x 494 pixels;

F- microcomputador Pentium II 200 MHz com placa de aquisição de imagens de 640x480 pixels.

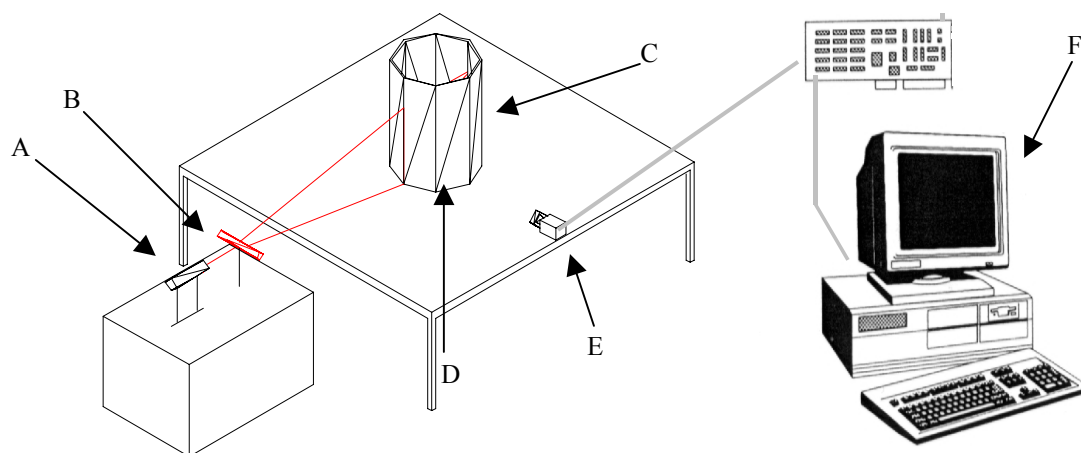


Figura 1. Vista da Bancada de testes.

No tanque circular de acrílico, com circulação de ar, foram colocadas as partículas traçadoras. O feixe de luz produzido pela fonte de laser é transformado em um plano de pequena espessura (2 mm) 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.

A vazão de ar em cada entrada foi controlada e medida de modo a haver fluxos de ar aproximadamente iguais em cada entrada. O objetivo do estudo é analisar o caráter tridimensional da movimentação das microalgas aplicando-se a equação de conservação da massa entre planos consecutivos.

Para estudar-se o caráter tridimensional do escoamento foram filmados 5 planos de laser, igualmente espaçados (0°, 15°, 30°, 45° e 60°) e um outro plano a 90°, conforme Fig.(2). Os planos 0° e 60° são limitados nas suas extremidades por uma entrada de ar.

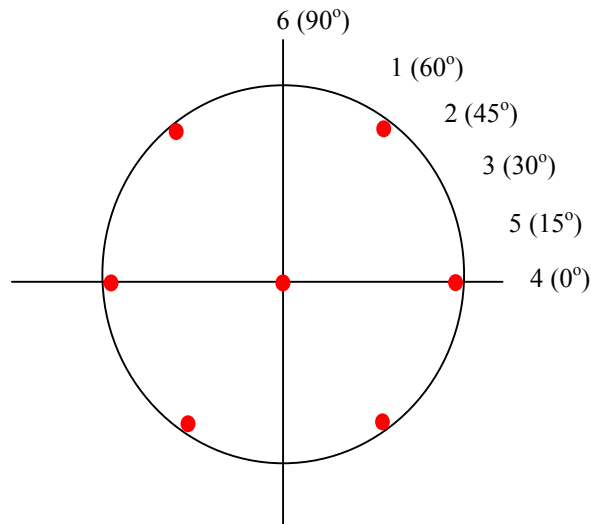


Figura 2. Planos de laser filmados - 1 a 6.

3. Equacionamento

Aplica-se a equação de conservação da massa, Eq. (1) no elemento de volume do fluido no tanque de cultivo mostrado na Fig. (3).

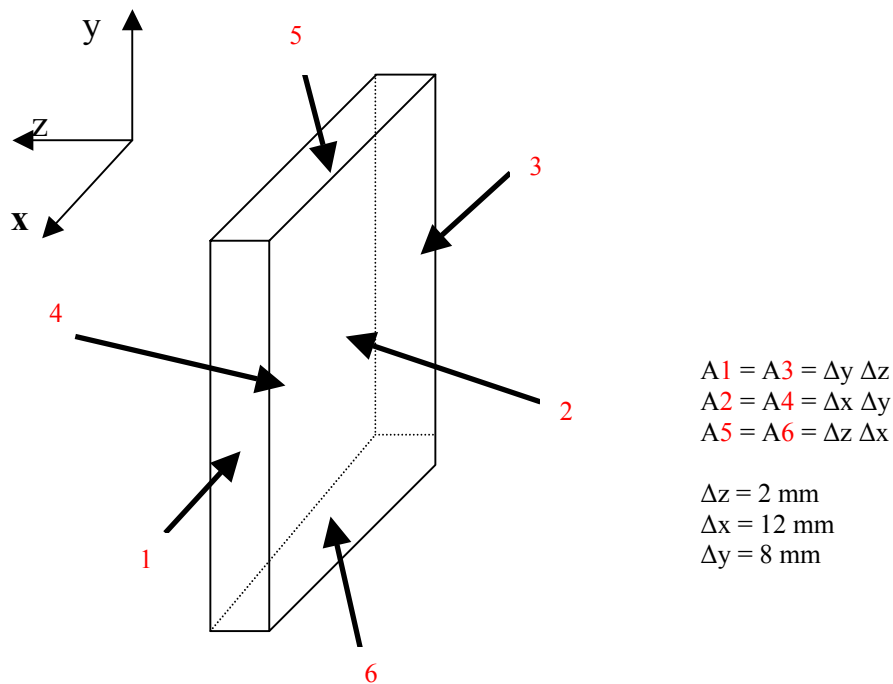


Figura 3. Elemento de volume do fluido no tanque de cultivo.

$$\dot{\Sigma m} = \Sigma \rho \cdot V \cdot A = 0 \quad (1)$$

Para as 6 áreas do volume de controle, a Eq. (1) transforma-se na Eq. (2), em coordenadas retangulares, já que Δz (espessura medida do plano de laser = 2mm) é muito pequena:

$$\Delta z \cdot \Delta y \cdot u_{1x} + \Delta x \cdot \Delta y \cdot w_{2ij} + \Delta z \cdot \Delta x \cdot v_{5x} - \Delta z \cdot \Delta y \cdot u_{3x} - \Delta x \cdot \Delta y \cdot w_{4ij} - \Delta z \cdot \Delta x \cdot v_{6x} = 0 \quad (2)$$

Rearranjando a Eq. (2), obtém-se a Eq. (3), que calcula a variação da componente da velocidade na direção circunferencial, Δw :

$$\Delta w = w_{2ij} - w_{4ij} = \frac{\Delta z}{\Delta x} (u_{3x} - u_{1x}) + \frac{\Delta z}{\Delta y} (v_{6x} - v_{5x}) \quad (3)$$

Os valores de u_{1x} , u_{3x} , v_{5x} e v_{6x} são as componentes do vetor velocidade nas direções u e v , conforme descrito pelas Eqs. (4) e (5) da seção 4.

Nas Eqs. (2) e (3) apresentam-se índices nas velocidades. Os índices numéricos estão relacionados com a área do elemento de volume apresentado na Fig. (3); os índices i e j representam a variação da posição das partículas nas imagens capturadas em cada plano de laser, conforme Fig(4).

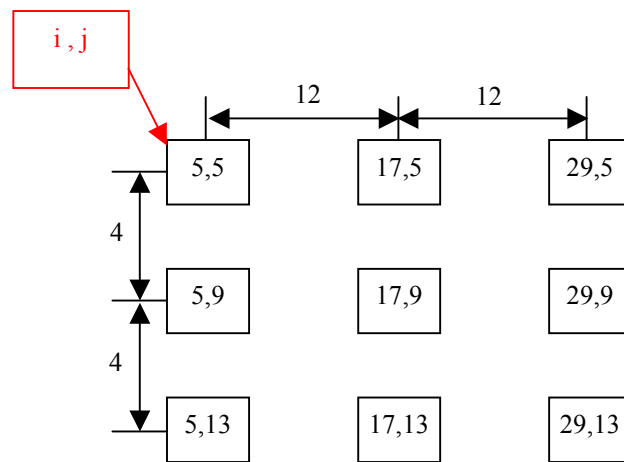


Figura 4. Posição das partículas nas imagens capturadas em cada plano de laser, com os respectivos valores de i e j .

4. Velocimetria de alta densidade de partículas: método da correlação cruzada

Para o caso de imagens com alta densidade de partículas, o campo de escoamento foi obtido através da utilização do método de correlação espacial das imagens descrito por Adrian (1991) e Almeida (1997).

O método consiste em obter uma imagem I_1 no instante t e outra I_2 no instante $t+\Delta t$, isto é, tem-se duas imagens do escoamento. 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, sendo a velocidade máxima 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 et al. (1989) e Willert e Gharib (1991).

Arbitra-se as dimensões de uma região base na imagem I_1 e procura-se o mesmo padrão de agrupamento das partículas na região base na imagem I_2 contido numa região de busca arbitrada maior do que a região base. A escolha do tamanho de cada região depende do escoamento.

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 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. Como a função de correlação é normalizada, o coeficiente de correlação R , varia entre 0 e 1 (correlação perfeita). É necessário estabelecer um valor de R acima do qual a deformação do padrão de partículas é aceitável.

As Eqs. (4) e (5) permitem 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.

$$u = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \tag{4}$$

$$v = FS \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \tag{5}$$

A profundidade de campo coloca uma forte restrição no sistema de aquisição das imagens. Será adequado utilizar um plano de luz com espessura para iluminar somente as partículas localizadas dentro da região na qual as partículas estão em foco. Se a espessura do plano de luz for maior do que a profundidade de campo, as partículas dentro do plano de luz e fora da profundidade de campo aparecerão fora de foco na imagem, isto é, borradas, e portanto causando prejuízo à qualidade da imagem.

Para se ter uma boa resolução espacial, uma partícula deve ocupar pelo menos de 2 a 3 pixels na imagem. Se grandes recipientes contendo o escoamento de partículas com diâmetros pequenos são filmados, o fator de escala FS em mm/pixel da imagem pode ser tal que uma partícula pode se deslocar muitas vezes o tamanho do seu diâmetro sem ser detectada. Como as partículas são menores do que 1 pixel (tamanho de 2 a 15 μ m), para que as partículas tenham um

deslocamento maior, correlacionou-se quadros separados por maior intervalo de tempo (1s), em vez de correlacionar imagens consecutivas ($t=1/30$ s).

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 curvatura do recipiente onde o fluido está armazenado e a mudança de meio ar-acrílico-água, ocasiona uma razão de magnificação, M_t , devendo estar incluída também no fator FS para cálculo das componentes da velocidade. Para calcular M_t foi construída uma grade de acrílico de 100mm de largura x 78mm de altura com divisões de 1mm. Foram feitas imagens da grade fora do tanque de cultivo e dentro do tanque de cultivo com água, estando a grade nas 2 imagens à mesma distância da câmera de vídeo.

Para minimizar a incerteza do cálculo de u e v atuou-se no fator de escala, tomando-se imagens de meio recipiente, duplicando a resolução espacial na direção de u .

5. Resultados

A Figura (5) apresenta como exemplo uma imagem (plano2) de metade do tanque de cultivo (0,93mm/pixel) e utilizada no programa PIV desenvolvido por Almeida (1997).

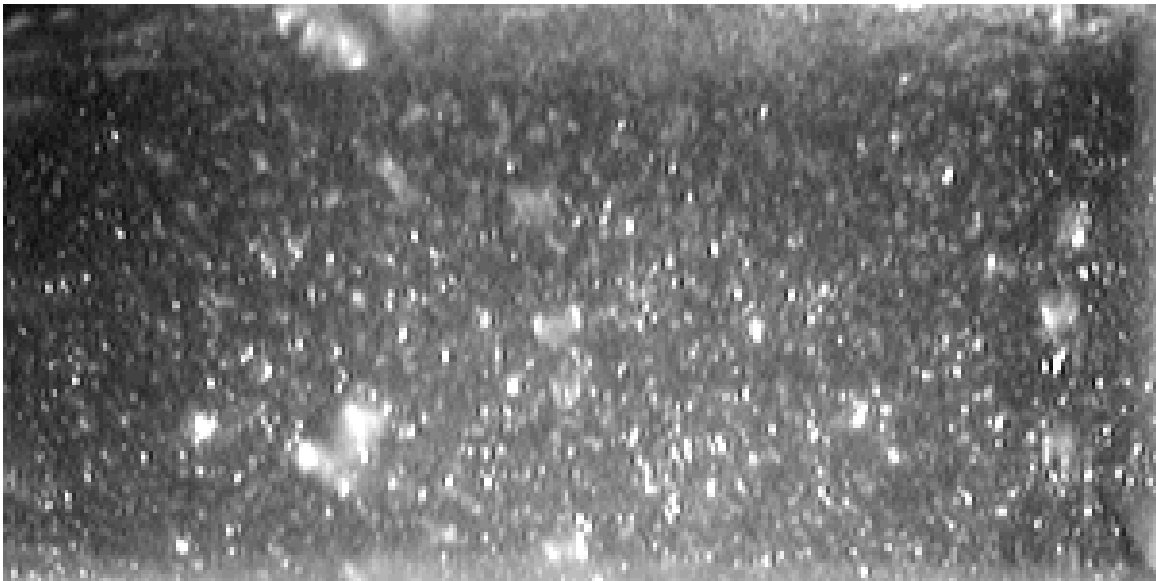


Figura 5. Imagem capturada de metade do tanque (plano2)

Para obtenção do campo de velocidades foram usados os seguintes dados no programa PIV:
 número de pontos para determinar a velocidade: 25 na direção horizontal e 35 na vertical;
 tamanho da região base: 5 pixels na direção horizontal e na vertical;
 tamanho da região de busca: 10 pixels na direção horizontal e na vertical;
 intervalo de tempo entre 2 imagens correlacionadas: 1s;
 fator de correlação R mínimo admitido: 0,95.

Foram testadas várias opções do conjunto de dados atribuídos. Os dados escolhidos foram o que melhor aproveitaram a geometria do tanque de cultivo para correlação de 2 imagens da metade do tanque, conforme Fig. (6).

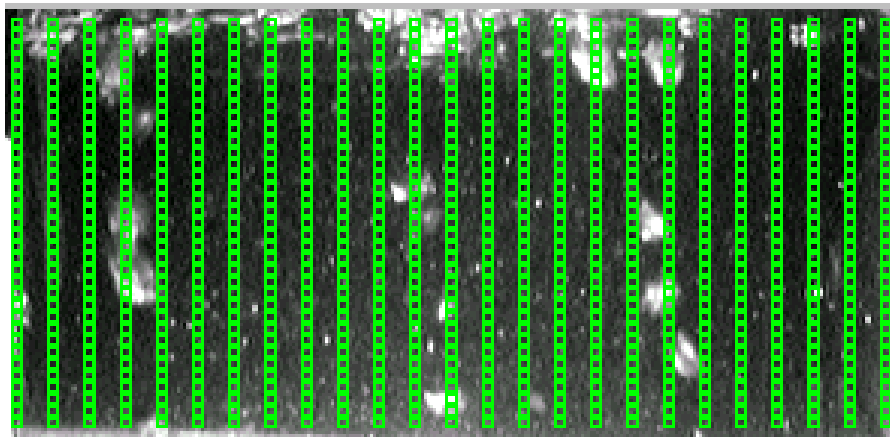


Figura 6. Imagem do plano 1 com as regiões base superpostas.

As Figuras (7) e (8) apresentam os vetores velocidades, em mm/s, para o plano 3 (30°) e plano 5(15°), respectivamente, conforme Fig.(2). As componentes da velocidade u e v variaram, em módulo, de 0,93 mm/s a 1.86 mm/s.

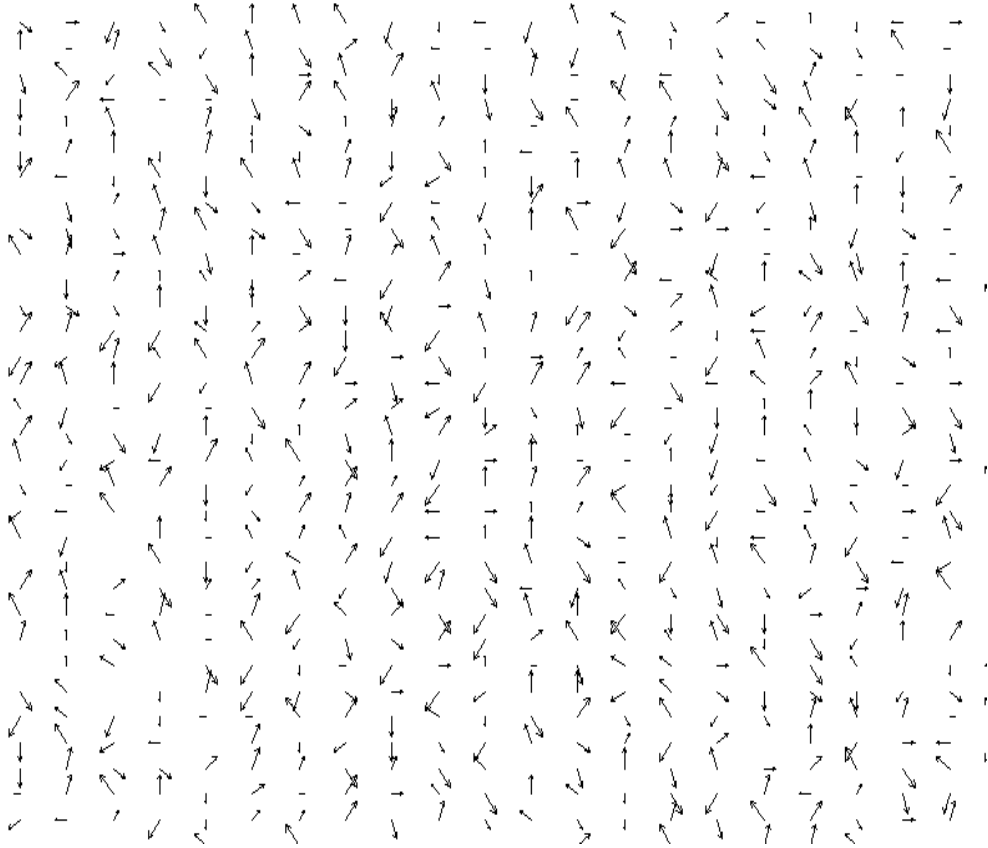


Figura 7. Campo de velocidades para o plano 3 (30°).

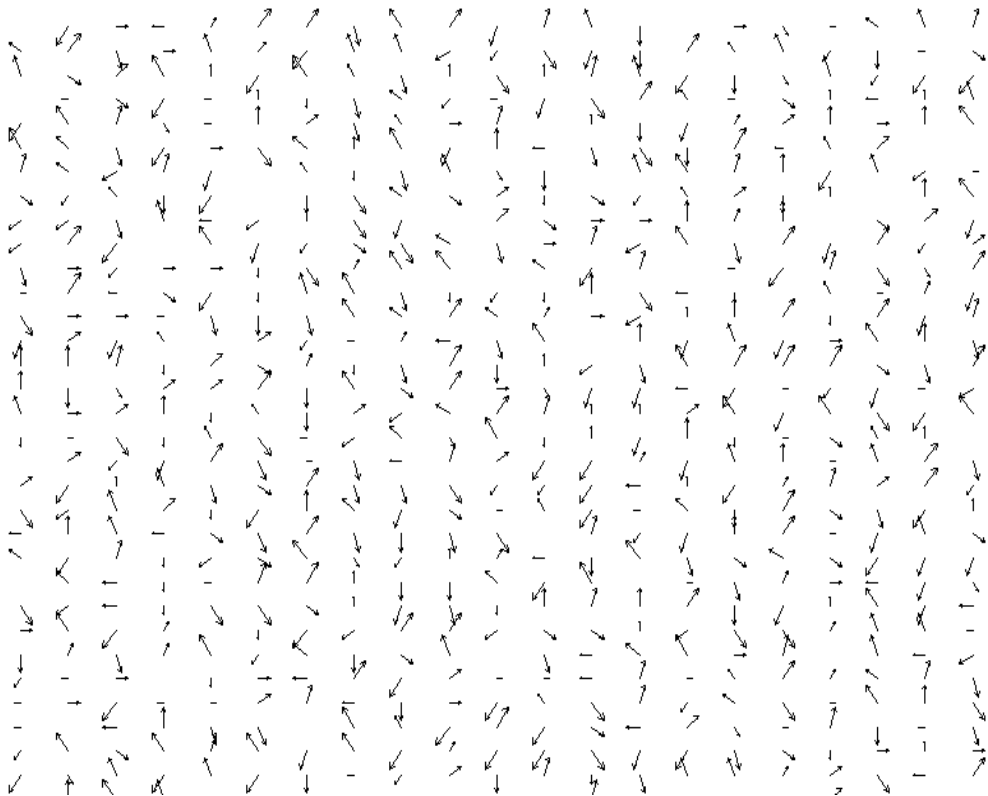


Figura 8. Campo de velocidades para o plano 5 (15°).

As Figuras (9) a (13) mostram o resultado dos valores de Δw (mm/s), calculados de acordo com a Eq. (3), para os planos estudados, da coluna 1(periferia do tanque) à coluna 10 (mais próxima ao centro do tanque).

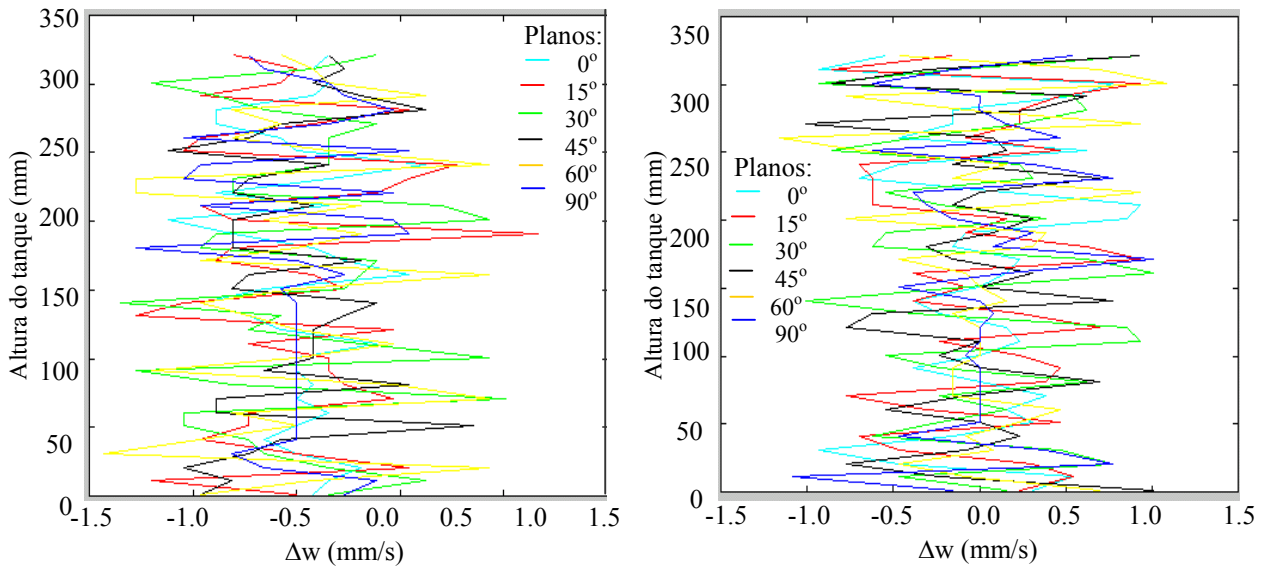


Figura 9. Valores de Δw para os planos estudados: esquerda coluna 1 (periferia do tanque); direita coluna 2

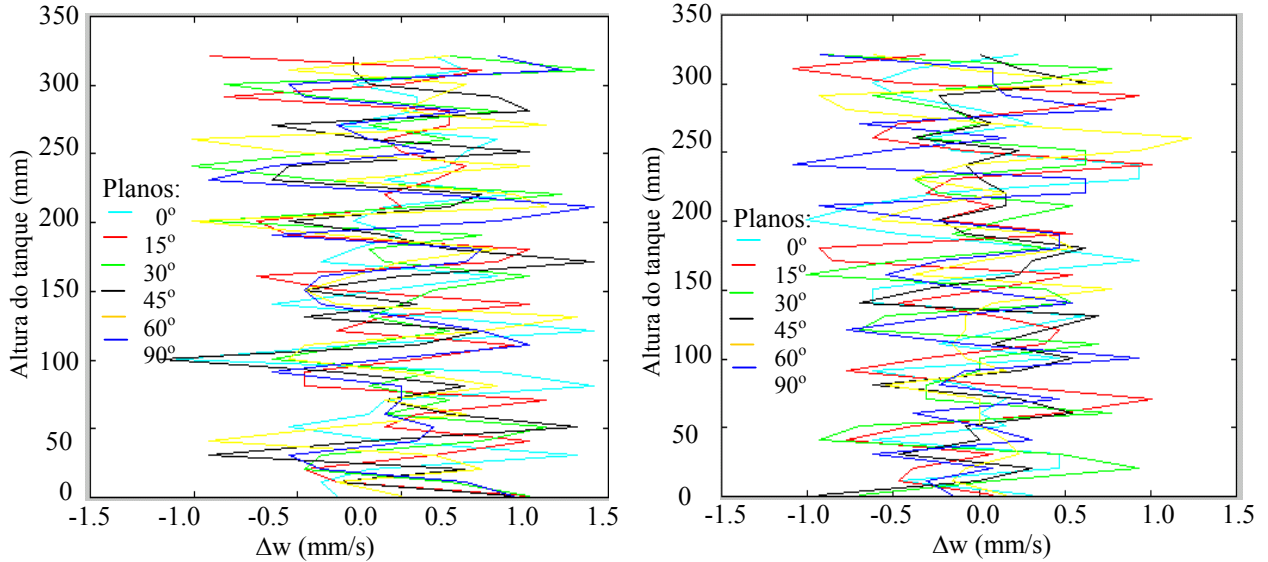


Figura 10. Valores de Δw para os planos estudados: esquerda coluna 3; direita coluna 4

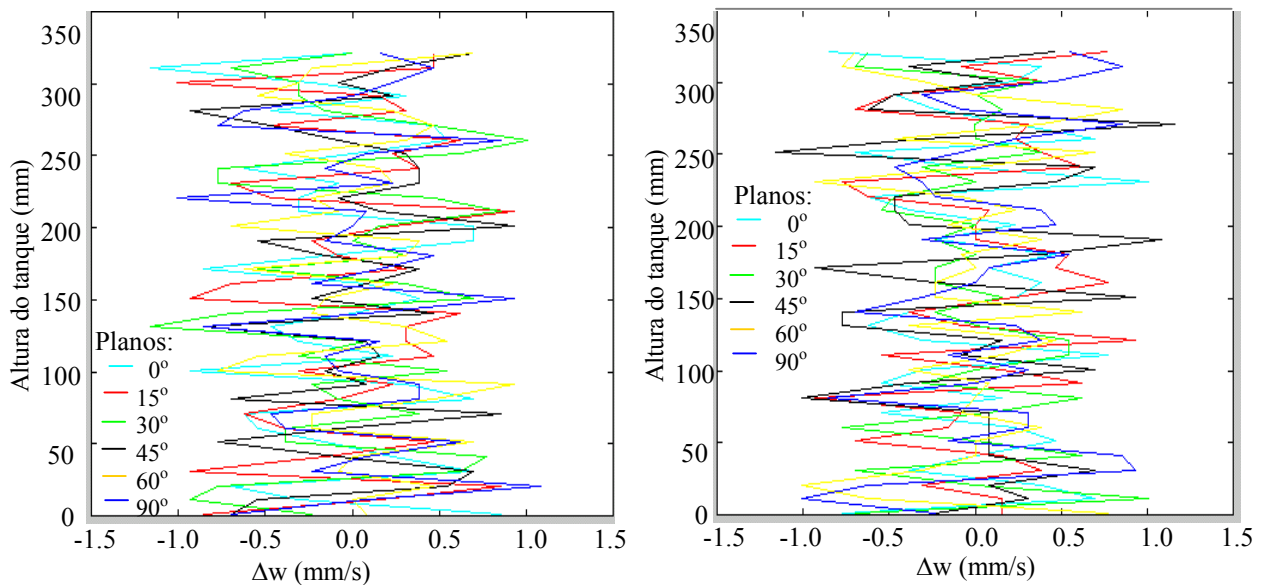


Figura 11. Valores de Δw para os planos estudados: esquerda coluna 5; direita coluna 6

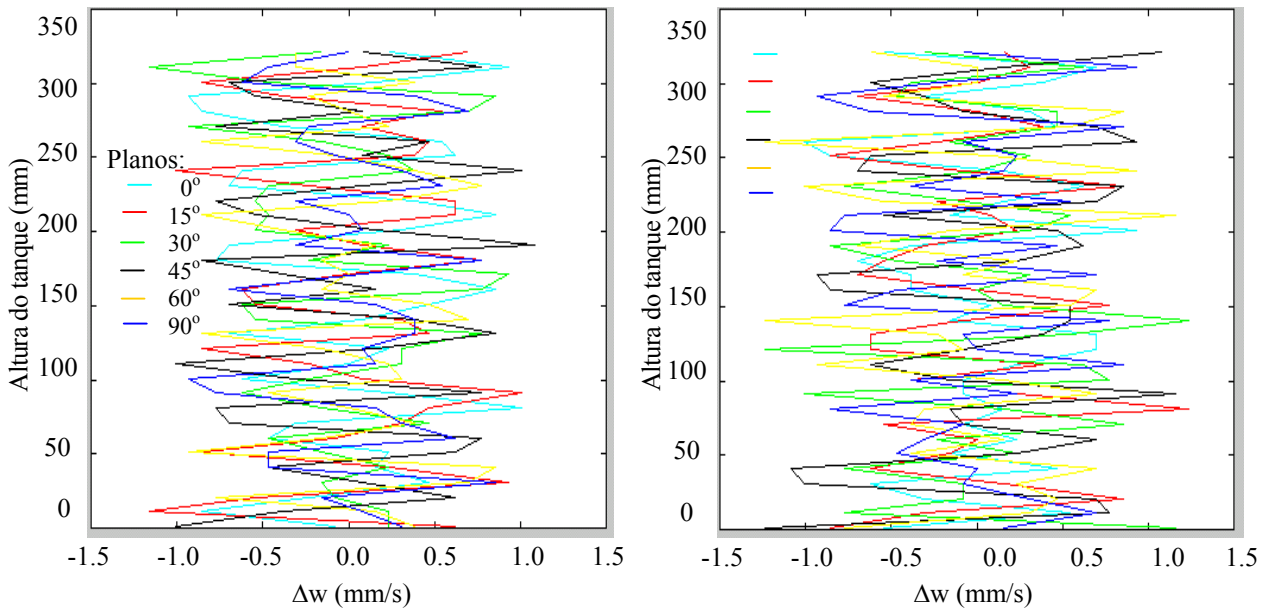


Figura 12. Valores de Δw para os planos estudados: esquerda coluna 7; direita coluna 8

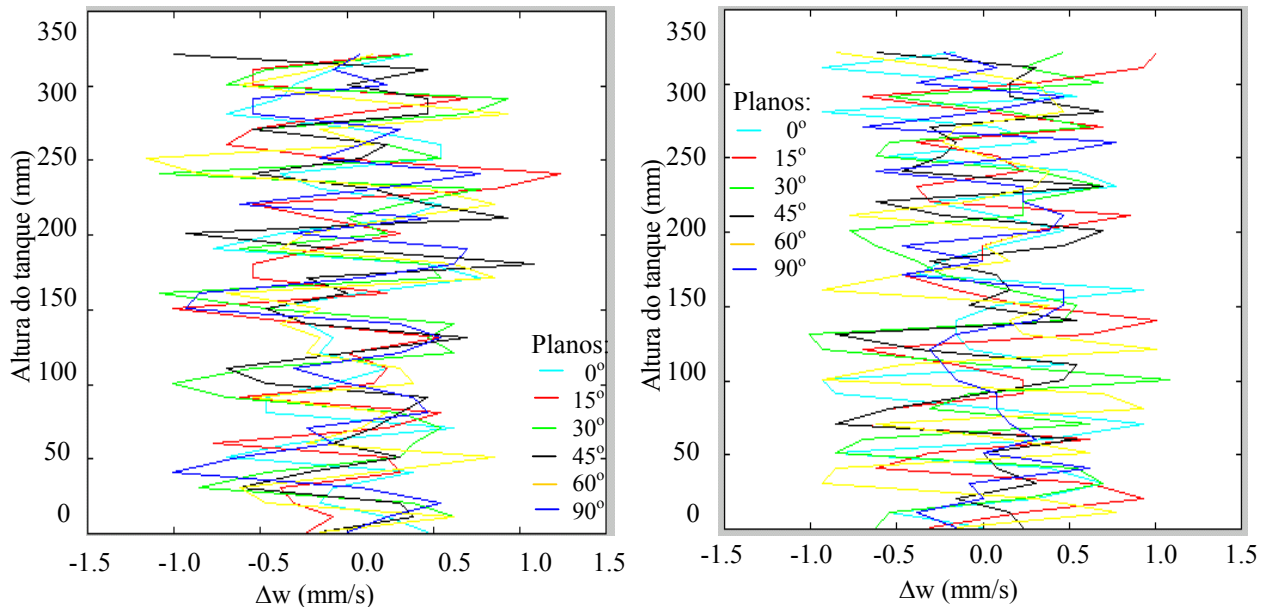


Figura 13. Valores de Δw para os planos estudados: esq. coluna 9; dir.coluna 10 (mais próxima ao centro do tanque).

6. Conclusões

A adequação da técnica utilizada de determinação do campo de velocidades pelo método de alta densidade de partículas se deve à concentração de microalgas de 0,320 litros em 12 litros de água do mar, superior a 0,240 litros em 12 litros de água do mar, quando o método de análise que reproduz o campo de maneira mais completa é o de velocimetria por acompanhamento de partículas, de acordo com Santos *et al.* (2000).

Embora a potência da fonte de laser seja de apenas 1mW, as imagens obtidas permitem observar com nitidez as partículas traçadoras devido à sensibilidade da câmera de vídeo de 0,003 lux.

O campo de velocidades obtidos (exemplos das Figs. 7 e 8) têm vetores adjacentes que possuem direções opostas devido às 7 entradas de ar no tanque, o que impõe às componentes da velocidade u , v e w direções e sentidos variáveis em cada plano, sendo esta movimentação das microalgas observada durante os experimentos numa vista de cima do tanque e nos planos de laser formados.

De acordo com Almeida (1997), as incertezas consideradas no experimento são: fator de escala F_s ($\approx 2\%$); coordenadas espaciais das partículas no campo à qual esta velocidade é atribuída ($\approx 6\%$); componentes da velocidade u , v e w ($\approx 8\%$).

Pelos resultados apresentados pode-se concluir que o escoamento é caracterizado como tridimensional em vista da componente circunferencial Δw ser diferente de zero em todos os planos analisados.

De acordo com as figuras (9) a (13) observa-se que quanto mais próximo ao centro do tanque (coluna 10- figura 13) maior é a variação da componente Δw em todos os planos porque esta região é a que mais sofre interferência das 6 entradas de ar periféricas, caracterizando-se claramente o escoamento como tridimensional. De forma oposta, próximo à periferia do tanque (coluna 1-figura 9) é menor a variação da componente Δw , principalmente no plano de 90° , onde há um maior afastamento das entradas de ar. Outro fator que altera Δw é o ângulo em que foi criado o plano de laser ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) devido à maior ou menor proximidade de entradas de ar (figura 2).

A determinação do valor desta componente circunferencial da velocidade será possível adquirindo-se dados na junção de dois planos perpendiculares, o que será feito em trabalhos futuros.

Para variar este valor da componente circunferencial da velocidade em cada plano pode-se alterar a disposição e o número de entradas de ar no tanque de cultivo conforme julgue-se necessário, permitindo o estudo do comportamento das microalgas sob diversas configurações do escoamento de ar.

7. Referências

- Adrian, R. J., 1991, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annual Review Fluid Mechanics, vol. 23, pp.261–304.
- Almeida, J.A., 1997, "Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas", Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro.
- Chen, R.C. and Fan, L.S., 1992, "Particle Image Velocimetry for Characterizing the Flow Structure in Three Dimensional Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds", Chem.Engng. Sci.,Vol. 47, Nos 13 e 14, pp.3615-3622.
- Dewsbury, K., Karamanev, D. and Margaritis, A., 1999, "Hydrodynamic Characteristics of Free Rise of Light Solid Particles and Gas Bubbles in non -Newtonian Liquids", Chem.Engng. Sci.,Vol. 54, pp.4285-4830.
- 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. e Woods, R. E., 2000, "Processamento de Imagens Digitais", Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 509p.
- Gutkoski, L.L., 1999, "FlowViewer - Medida de Fluxo através de Imagens", Relatório de Pesquisa, LTMF, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Hrenya,C.M., Bolio, E.J., Chakrabarti,D. and Sinclair,J.L., 1995, "Comparison of Low Reynolds Number k- ϵ Turbulence Models in Predicting Fully Developed Pipe Flow", Chem.Engng. Sci.,Vol. 50, No 12, pp.1923-1941.
- Mitra- Majundar, D., Farouk,B. & Shah, Y.T., 1995,"Modeling of Three-Phase (Gás-Liquid-Solid) Flows through Vertical Columns", IMECE-HTD, vol. 137, pp.191-209.
- Mitra-Majundar, D., Farouk, B. and Shah, Y.T., 1997, "Hydrodynamic Modeling of Three-Phase Flows through a Vertical Column", Chem.Engng. Sci.,Vol. 52, No 24 pp.4485-4497.
- Mudde, R.F., Groen, J.S., and Van der Akken, H.E. A. , 1997, "Liquid Velocity Field in a Bubble Column: LDA Experiments", Chem.Engng. Sci.,Vol. 47, pp.4217-4224.
- Nakoryakov, V.E., Dontsov, V.E. and Pokusaev, B.G., 1994, "Propagation of Pressure Waves in Liquid with GasBubbles and Solid Particles", Russian Journal of Engineering Thermophysics, Vol.4, pp. 173-188.
- Santos, S.M., Almeida, J. A. , Ferreira, V. C. S., Gutkoski, L. L., 2000, "Estudo do Escoamento Multifásico através da Velocimetria por Processamento de Imagens de Partículas", ENCIT 2000, Porto Alegre, RS.
- Santos, S.M., Almeida, J. A. , Gonçalves, G.A., Santos, L.A. P., Oliveira, L.V., 2002, "Desenvolvimento de um Sistema de Imageamento Estéreo para Monitoramento de Escoamentos Tridimensionais", Proposta Projeto de Pesquisa CNPq, FURG, Rio Grande, RS.
- Sousa, J.M.M., 2001, Investigação Numérica e Experimental de Instabilidade e Transição em Escoamentos de Fluidos", Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Spalding, D.B., 1980, "Numerical Computation of Multiphase Flow and Heat Transfer", EPRIWS 78-143 2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, pp. 219-275.
- Willert, C. E., Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids- Springer-Verlag, pp.181-193.

FIELD OF VELOCITIES OF MICROALGAE IN CULTURE TANKS BY DIGITAL IMAGES PROCESSING

Sonia Magalhães dos Santos

[e-mail: vnsantos@mikrus.com.br](mailto:vnsantos@mikrus.com.br)

Jorge Alberto Almeida

[e-mail: dfsjaa@furg.br](mailto:dfsjaa@furg.br)

Ivoni Carlos Acunha Jr.

Luciano Vagheti de Oliveira

[e-mail: lvagheti@vetorialnet.com.br](mailto:lvagheti@vetorialnet.com.br)

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

CP 474 – Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

Abstract. *The microalgae velocity field is studied in a culture tank in order to obtain the settlings tax and the movement, as well as the air circulation forms for best survival. The circular shape acrylic tank contains air inlets on bottom side (six peripheral and one in the center), and the air flow is measured by a flow meter in order to inject equal volumes of air. A laser light beam is transformed in a small thickness plane after passing through a cylindrical lens, and the moving microalgae are illuminated by the incident laser plan in a tank diameter. A CCD video camera is located perpendicularly to the plan of laser. The successive images obtained provide a determination of the flow field which is obtained by the cross correlation method. The region enclosing the place in which the velocity is obtained is selected from the first image, and then the same particles configuration is searched from the second image where is the maximum correlation coefficient. Five laser planes were constructed between two adjacent air inlets delayed by 15°. The objective of the study is to analyse the 3-D behavior of the microalgae movement by applying the mass conservation equation between two adjacent planes.*

Keywords: *multiphase flow; 3D flow; velocimetry by images particles*