PROCESSAMENTO DE IMAGENS ORIUNDAS DE EXPERIMENTOS PIV EM TANQUE AGITADO

Palavras-Chave: PROCESSAMENTO DE IMAGENS; TANQUE AGITADO; TURBULÊNCIA

Autores:
DESIRÉE G. H. RITA; FEQ-UNICAMP
Dr. WILLIAM D. P. FONSECA; CEPETRO-UNICAMP
Prof. Dr. GUILHERME J. CASTILHO (Orientador); FEQ-UNICAMP

1 INTRODUÇÃO

Tanques agitados são equipamentos amplamente utilizados nas indústrias química, farmacêutica, alimentícia e petrolífera em operações como mistura de líquidos, mistura sólido-líquido, dispersão gás-líquido e intensificação de transferência de calor e massa [1]. Apesar de sua grande importância, a dinâmica do escoamento nesses sistemas ainda não é completamente compreendida, e muitos parâmetros operacionais são definidos de forma empírica [2]. A necessidade de otimização desses processos evidencia a importância de estudos que caracterizem detalhadamente a hidrodinâmica desses sistemas [3].

O comportamento do escoamento em tanques agitados é fortemente influenciado pela configuração dos impelidores, especialmente pelo ângulo de inclinação das pás [4]. Esse parâmetro define os padrões de escoamento, como a formação de jatos e vórtices, que impactam diretamente a eficiência da mistura [5].

Para compreender melhor esses padrões e avaliar quantitativamente o escoamento, diversas técnicas experimentais têm sido empregadas. Uma das técnicas não intrusivas mais utilizadas para o estudo do comportamento da mistura é a velocimetria por imagem de partículas (PIV) [2]. O PIV permite mapear campos de velocidade em planos 2D, bem como calcular grandezas derivadas, por meio da correlação de imagens sequenciais de escoamentos com partículas traçadoras, auxiliando na caracterização detalhada do movimento [6]. Em sistemas agitados, o uso da média temporal das velocidades pode levar a distorções significativas nos níveis de turbulência, uma vez que variações periódicas podem ser interpretadas erroneamente como flutuações turbulentas reais [7]. Para superar essa limitação, medições resolvidas angularmente, obtidas por meio da sincronização do PIV com a posição angular do impelidor, permitem isolar os efeitos periódicos e gerar resultados mais representativos [8].

Nesse contexto, este trabalho se propõe a processar dados PIV obtidos experimentalmente, extraídos de experimentos realizados em um tanque agitado por impelidores de pás inclinadas (PBT) em diferentes ângulos [2]. A partir dessas imagens, foram calculados os campos de velocidade, vorticidade e intensidade de turbulência, com o objetivo de quantificar o escoamento e compreender a influência da geometria do impelidor na eficiência de mistura.

2 DADOS PIV

2.1 Aquisição

Os dados processados neste trabalho foram obtidos a partir de experimentos realizados em um sistema de agitação em escala piloto, conduzidos no Laboratório de Caracterização de Escoamentos Multifásicos (LACEM/FEQ/UNICAMP) [2]. O sistema consistia em um tanque cilíndrico de acrílico com diâmetro $T = 380$ mm, fundo torisférico com 10% da altura e quatro defletores metálicos igualmente espaçados. A agitação foi promovida por um impelidor de pás inclinadas (PBT) com diâmetro $D = \frac{2}{5}T$, acionado a uma rotação de $N = 480$ rpm, resultando em um número de Reynolds de $1{,}9 \times 10^5$, caracterizando um regime turbulento ($Re > 2\times10^4$). O fluido de trabalho foi água, com densidade $\rho = 997$ kg/m^3 e viscosidade dinâmica $\mu = 1{,}002 \times 10^{-3}$ Pa $\cdot$ s. A aquisição dos dados foi realizada por meio de um sistema comercial PIV da *Dantec Dynamics*. Essa mesma configuração experimental foi previamente adotada por Barbutti et al. [9].

O sistema PIV é composto por um laser Nd:YAG (532 nm, 200 mJ), que fornecia um plano de luz com espessura de 2 mm, e por uma câmera FlowSense EO 8M-21 (3312 $\times$ 2488 pixels). Como partículas traçadoras, utilizaram-se esferas de vidro revestidas com prata, com diâmetro $d_p = 10$ μm. As imagens foram adquiridas em quatro posições angulares da pá: 0°, 22,5°, 45° e 67,5°. O controle da posição angular foi realizado por um microcontrolador acoplado

ao sincronizador do sistema PIV.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geométricos do sistema, enquanto a Fig. 1 ilustra o arranjo experimental com o tanque agitado e o sistema PIV acoplado.

Tabela 1: Configuração geométrica do tanque agitado.

Propriedade	**Notação**	**PBT**
Diâmetro do tanque (m)	T	0.38
Altura do líquido (m)	H	T
Número de chicanas	n_B	4
Largura da chicana	B	$T/12$
Ângulo entre chicanas	γ_B	90°
Folga inferior	C	$T/3$
Diâmetro do impulsor	D	$2T/5$
Número de pás	n_P	4
Ângulo das pás	a_P	45°
Velocidade rotacional (RPM)	N	480
Velocidade periférica (m/s)	U_{tip}	3.82

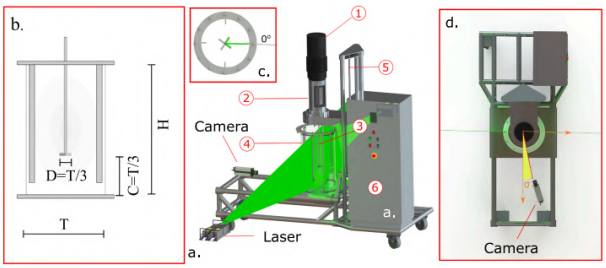


Figura 1: (a) Tanque agitado experimental e sistema PIV: (1) motor; (2) torquímetro; (3) eixo do impelidor; (4) tanque; (5) sistema de ajuste de altura do impelidor; (6) painel elétrico com inversor de frequência. (b) Detalhes das dimensões do tanque e do impelidor. (c) Posição do plano azimutal das medições de PIV. (d) Posição da câmera em relação ao plano de luz do laser. Extraído de Barbutti et al. [9].

2.2 Processamento

O processamento de dados foi realizado utilizando o software *Davis 8.0* (LaVision). As imagens do escoamento turbulento foram adquiridas em modo *double-frame* com frequência de 5 Hz, utilizando 1000 pares de imagens para cada ângulo de pá analisado. O tempo entre quadros foi fixado em 100 μs.

O pré-processamento das imagens incluiu a aplicação sequencial de: (i) filtro Gaussiano (kernel 3×3 pixels, $\sigma = 0{,}3$) para otimização do formato das partículas; (ii) subtração de mínimo local (7×7 pixels) para eliminação de ruído de fundo; (iii) filtro de homogeneização de intensidade; e (iv) três aplicações de subtração de média local (11×11 pixels) seguidas por filtro Gaussiano ($\sigma = 0{,}6$). Reflexos nas chicanas e pás foram removidos mediante aplicação do método Otsu-Gauss-Wiener [10], com máscaras geradas a partir das imagens brutas. As imagens foram subsequentemente reconstruídas (*dewarping*) utilizando funções de mapeamento obtidas durante a calibração e interpolação cúbica [9, 11].

A estratégia iterativa *multigrid*, com janelas de interrogação decrescentes, foi utilizada para o processamento das imagens PIV. As dimensões das janelas de interrogação em cada passada estão apresentadas na Tabela 2. O pós-processamento incluiu a remoção de *outliers* pelo método de Westerweel & Scarano [12], além de uma limiarização baseada em informação mútua [9].

Tabela 2: Janela de interrogação (em pixels) e sobreposição de cada passada na estratégia iterativa de multigrid aplicada no processamento PIV.

Passada	**Janela Inicial**	**Sobreposição**	**Janela Final**
1	64 × 64	25%	48 × 48
2	48 × 48	25%	32 × 32
3	32 × 32	25%	24 × 24
4	24 × 24	25%	18 × 18

3 CÁLCULOS

A partir dos campos de velocidade instantânea obtidos a partir do processamento PIV, foram calculadas grandezas derivadas para a análise angularmente resolvida do escoamento. Foram consideradas as componentes radiais (v_r) e azimutais (v_θ) da velocidade, obtidas a partir da conversão do campo vetorial cartesiano para coordenadas polares. A partir dessas componentes, foram calculadas a magnitude da velocidade polar, o campo de vorticidade e a intensidade turbulenta, conforme descrito a seguir.

3.1 Magnitude da Velocidade Polar

A magnitude da velocidade polar ($|\vec{v}_{\text{polar}}|$) foi calculada com base nas componentes radial (v_r) e azimutal (v_θ) da velocidade, conforme a seguinte equação:

$$|\vec{v}_{\text{polar}}| = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} \tag{1}$$

Essa grandeza representa a intensidade do escoamento no plano definido pelas direções radial e azimutal em coordenadas polares, desconsiderando a componente axial da velocidade. Os valores apresentados correspondem a médias resolvidas em conjunto (*ensemble-averaged*), obtidas a partir do processamento de múltiplas realizações do escoamento, representando a velocidade total do escoamento no plano radial-azimutal, refletindo a intensidade do movimento nessa região.

3.2 Vorticidade

O campo de vorticidade foi obtido a partir das componentes médias de velocidade cartesianas u (horizontal) e v (vertical), utilizando a definição bidimensional da componente axial da vorticidade (ω_z):

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2}$$

As derivadas espaciais foram calculadas por diferenças finitas centrais a partir de malhas regulares

para x e y. Esse parâmetro indica o grau de rotação do fluido em torno do eixo perpendicular ao plano de escoamento.

3.3 Intensidade Turbulenta

A intensidade turbulenta foi avaliada com base na análise das flutuações de velocidade obtidas a partir da decomposição de Reynolds, em que a média foi calculada ponto a ponto por média de conjunto (*ensemble average*) sobre a sequência de aquisições PIV. As componentes médias da velocidade foram determinadas conforme:

$$\overline{u} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i \quad ; \quad \overline{v} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i \tag{3}$$

em que n é o número total de imagens, e u_i e v_i são as componentes instantâneas da velocidade obtidas em cada aquisição. As flutuações em torno da média foram quantificadas pelo desvio padrão das componentes de velocidade, ou seja, a raiz quadrada da variância (RMS):

$$u'_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(u_i - \overline{u})^2} \tag{4}$$

$$v'_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i - \overline{v})^2} \tag{5}$$

A intensidade turbulenta foi então definida como a razão entre a magnitude das flutuações de velocidade e a magnitude da velocidade média local, conforme:

$$TI = \frac{\sqrt{u'^2_{\mathrm{RMS}} + v'^2_{\mathrm{RMS}}}}{\sqrt{\overline{u}^2 + \overline{v}^2}} = \frac{\mathbf{u}'}{U_{\text{médio}}} \tag{6}$$

A grandeza adimensional TI fornece uma estimativa local da razão entre os níveis de flutuação turbulenta e o escoamento médio. Valores elevados de TI estão associados a regiões com maior atividade turbulenta, tipicamente relacionadas à presença de zonas de cisalhamento e alto potencial de mistura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do processamento das imagens PIV angularmente adquiridas. São analisados os campos médios de velocidade, vorticidade e intensidade turbulenta em diferentes posições angulares do impelidor, com o objetivo de investigar a influência da geometria e da posição relativa das pás sobre a dinâmica do escoamento e os mecanismos de mistura no tanque agitado. A Figura 2 apresenta uma visão geral dos resultados obtidos para os quatro ângulos analisados (0°, 22,5°, 45° e 67,5°), incluindo os campos de: (a) magnitude polar das velocidades, (b) vorticidade e (c) intensidade turbulenta. A partir desses resultados, são discutidos a seguir os principais padrões observados e suas implicações para a eficiência de mistura no sistema agitado.

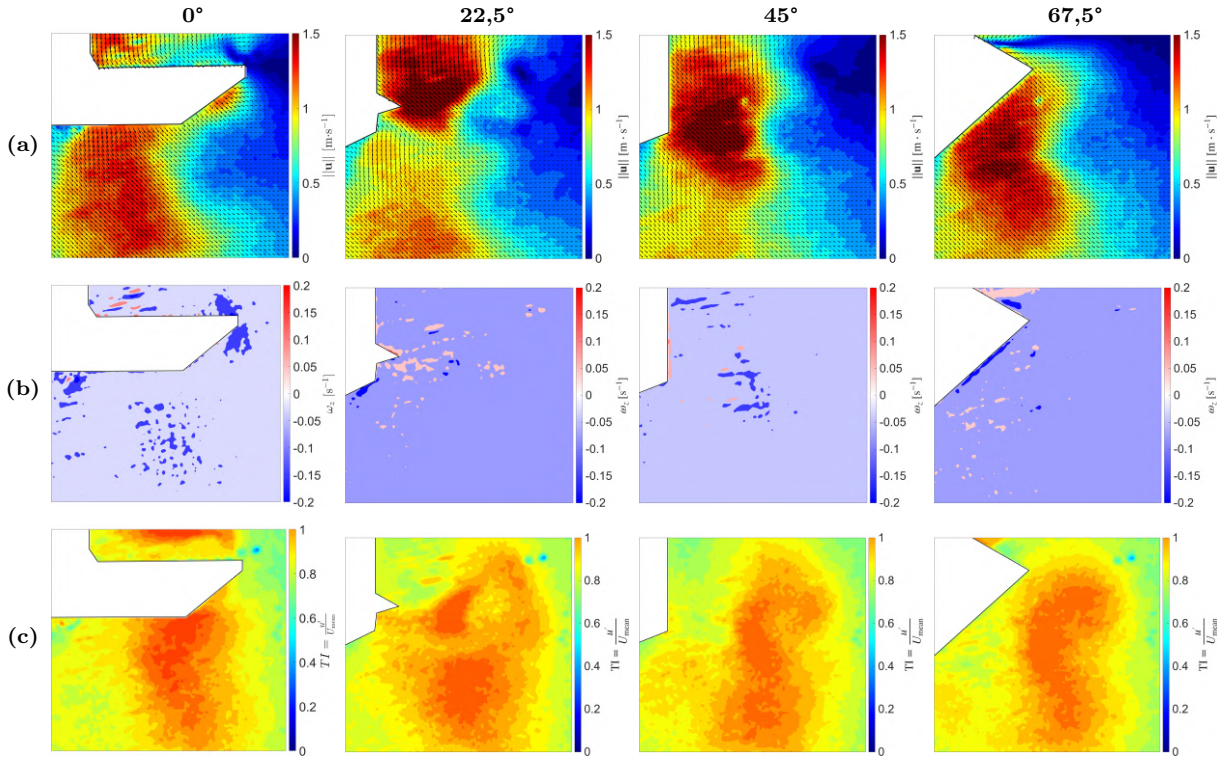
4.1 Magnitude da Velocidade Polar

A Figura 2(a) apresenta os campos médios da magnitude polar da velocidade para quatro posições angulares do impelidor. Em todas as configurações, é evidente a presença do jato gerado pela pá, com valores máximos de até 1,5 ms^{-1}. Além dessa estrutura dominante, destacam-se regiões de recirculação bem definidas, caracterizadas por baixos valores de velocidade e orientação vetorial coerente, sugerindo a formação de vórtices persistentes.

Na posição de 0°, o jato é direcionado para baixo e rapidamente desviado pela parede inferior do tanque, gerando um vórtice intenso na região inferior esquerda, onde parte da energia é redistribuída. Também se observa uma recirculação próxima à extremidade da pá, associada à separação do escoamento logo após sua ejeção. Em 22,5°, o jato se propaga para cima e induz um vórtice de grande escala, com rotação anti-horária. Parte do escoamento é redirecionada para baixo, contribuindo para o surgimento de estruturas secundárias no campo. Já a 45°, a trajetória do jato é descendente e voltada para o centro do domínio, formando uma região de alta velocidade mais extensa e difusa. Essa configuração favorece maior alcance hidrodinâmico e melhor distribuição de energia nas regiões centrais, o que pode beneficiar os mecanismos de mistura. Por fim, em 67,5°, o jato mantém forte componente descendente e gera uma região de alta velocidade concentrada na parte inferior. A orientação do escoamento sugere a prevalência de uma corrente dominante em direção ao fundo do tanque, com menor nível de agitação nas regiões superiores.

4.2 Vorticidade

A Figura 2(b) apresenta os campos de vorticidade ω_z para as quatro posições angulares do impelidor analisadas. Em 0°, observa-se uma região de vorticidade negativa ($\omega_z < 0$) abaixo da extremidade da pá, associada ao forte cisalhamento gerado pela deflexão descendente do jato contra a parede inferior. Pequenas regiões de vorticidade positiva também surgem na porção superior do campo. Em 22,5°, destaca-se uma faixa de vorticidade positiva logo após a pá, refletindo a rotação induzida pelo jato ascendente, além de zonas negativas residuais junto à pá e na lateral esquerda. Para 45°, a distribuição de ω_z torna-se mais difusa e de menor intensidade, sem núcleos dominantes. Em 67,5°, reaparece uma região de vorticidade negativa ao longo da borda inferior da pá, coerente com o jato descendente concentrado. Observa-se também uma mancha de vorticidade positiva acima da pá, associada ao escoamento de retorno. Além disso, estruturas positivas mais difusas se desenvolvem no quadrante inferior direito, indicando recirculações locais.



(a) Magnitude polar das velocidades **(b)** Vorticidade **(c)** Intensidade turbulenta

Figura 2: Análise do escoamento para diferentes ângulos: magnitude de velocidade (linha superior), campo de vorticidade (linha média) e intensidade turbulenta (linha inferior).

4.3 Intensidade Turbulenta

A Figura 2(c) apresenta os campos de intensidade turbulenta (Eq. 6) obtidos para diferentes posições angulares ao redor do impelidor. Na posição de 0°, observa-se que os maiores níveis de TI coincidem com o núcleo do jato descendente, região na qual também se verifica a máxima magnitude da velocidade média. Essa configuração revela que as flutuações intensas de velocidade são diretamente relacionadas ao forte cisalhamento imposto pelo jato gerado pela pá, caracterizando uma fonte primária de geração de turbulência nesse regime de escoamento. Em 22,5°, o campo de intensidade turbulenta indica que as regiões de maior TI se originam a partir da borda inferior da pá e se estendem até a região central do domínio. Esses núcleos coincidem com zonas de transição entre áreas de alta e baixa velocidade no campo médio (Fig. 2a), sugerindo que os elevados níveis de flutuação são intensificados pelos gradientes de velocidade associados à deflexão e redirecionamento do jato ascendente. Esse comportamento evidencia a presença de mecanismos de produção de turbulência não apenas no núcleo do jato, mas também em suas interfaces laterais.

Na posição de 45°, observam-se níveis moderados de TI próximos à região adjacente ao impelidor, enquanto os valores mais elevados se desenvolvem em regiões mais afastadas, coincidindo com áreas de alto gradiente de velocidade previamente identificadas no campo de magnitude (Fig. 2a). Por fim, em 67,5°, observa-se um padrão geral de distribuição de TI semelhante ao verificado em 45°, com um núcleo bem definido ao longo da trajetória média do jato. No entanto, a região de maior TI apresenta um deslocamento em direção à pá, evidenciando a presença de uma zona de recirculação intensa próxima à superfície da lâmina. Esse comportamento indica que, além das flutuações associadas ao cisalhamento do jato, a turbulência também é sustentada por mecanismos de recirculação local, que promovem intensas variações de velocidade.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram processadas imagens obtidas por PIV com aquisições angularmente resolvidas, realizadas em um tanque agitado por um impelidor de pás inclinadas (PBT). A partir dos campos de velocidade, vorticidade e intensidade turbulenta, foi possível extrair as seguintes conclusões principais:

- A análise da magnitude da velocidade evidenciou a formação de jatos pronunciados a partir das pás do impelidor, cuja direção varia conforme a posição angular da pá. Esses jatos são os principais responsáveis pela movimentação do fluido e pela formação de zonas de recirculação.

- Os campos de vorticidade revelaram regiões de cisalhamento intenso próximas às extremidades das pás, bem como estruturas rotacionais mais difusas associadas ao escoamento secundário induzido pelos jatos.

- A intensidade turbulenta (TI) apresentou valores mais elevados nas regiões com maior gradiente de velocidade, principalmente no núcleo e nas bordas dos jatos. A distribuição de TI foi influenciada diretamente pela posição angular do impelidor e pela presença de zonas de recirculação.
- A utilização de medições angularmente resolvidas permitiu isolar os efeitos periódicos da rotação do impelidor, proporcionando uma representação mais fiel das estruturas hidrodinâmicas e dos mecanismos de geração de turbulência no escoamento.

Esses resultados contribuem para a compreensão da hidrodinâmica em tanques agitados e reforçam a importância da caracterização espacial e angular do escoamento na avaliação da eficiência de mistura em processos industriais.

Referências

[1]C. Yang e Z. Mao, "Multiphase stirred reactors", Numerical Simulation of Multiphase Reactors with Continuous Liquid Phase, 75–151 (2014).

[2]A. G. Mitri et al., "Tilted PIV: A novel approach for estimating the turbulent kinetic energy in stirred tanks", Measurement **217**, 113112 (2023).

[3]A. Guida, A. W. Nienow e M. Barigou, "The effects of the azimuthal position of the measurement plane on the flow parameters determined by PIV within a stirred vessel", Chemical Engineering Science **65**, 2454–2463 (2010).

[4]L. Xinhong et al., "Particle image velocimetry study of turbulence characteristics in a vessel agitated by a dual Rushton impeller", Chinese Journal of Chemical Engineering **16**, 700–708 (2008).

[5]P. T. Koyro et al., "Comparison of PIV measurements and OpenFOAM simulations of a stirred tank: study of the azimuthal position effect", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering **44**, 421 (2022).

[6]M. Raffel et al., *Particle image velocimetry: a practical guide* (springer, 2018).

[7]N. Fentiman et al., "On the trailing vortices around hydrofoil impeller blades", Chemical Engineering Research and Design **77**, 731–740 (1999).

[8]K. H. Chung, M. J. Simmons e M. Barigou, "Angle-resolved particle image velocimetry measurements of flow and turbulence fields in small-scale stirred vessels of different mixer configurations", Industrial & Engineering Chemistry Research **48**, 1008–1018 (2009).

[9]A. D. Barbutti et al., "A new field correction method for PIV measurements based on mutual information: case study on a stirred tank flow", Measurement **186**, 110130 (2021).

[10]R. d. L. Amaral et al., "A novel method based on the Otsu threshold for instantaneous elimination of light reflection in PIV images", Measurement Science and Technology **33**, 025401 (2021).

[11]J. S. Ayala et al., "Two-dimensional shear rate field and flow structures of a pseudoplastic fluid in a stirred tank using particle image velocimetry", Chemical Engineering Science **248**, 117198 (2022).

[12]J. Westerweel e F. Scarano, "Universal outlier detection for PIV data", Experiments in Fluids **39**, 1096–1100 (2005).