



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Química

LUCAS FREITAS DE LIMA E FREITAS

CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS DE UM TANQUE
AGITADO COM MEDIDAS PIV 2C-2D

TURBULENT CHARACTERISTICS OF A STIRRED TANK WITH
2C-2D PIV MEASURES

CAMPINAS

2020

LUCAS FREITAS DE LIMA E FREITAS

CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS DE UM TANQUE
AGITADO COM MEDIDAS PIV 2C-2D

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José de Castilho

Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO LUCAS
FREITAS DE LIMA E FREITAS, E
ORIENTADA PELO PROF. DR.
GUILHERME JOSÉ DE CASTILHO.

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F884c Freitas, Lucas Freitas de Lima e, 1991-
Características turbulentas de um tanque agitado com medidas PIV 2C-2D /
Lucas Freitas de Lima e Freitas. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Guilherme José de Castilho.
Coorientador: José Roberto Nunhez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Química.

1. Tanques. 2. Fluidodinâmica. 3. escoamento turbulento. 4. Dissipação de
energia. 5. Pesquisa experimental. I. Castilho, Guilherme José de, 1983-. II.
Nunhez, José Roberto, 1961-. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Turbulent characteristics of a stirred tank with 2C-2D PIV
measures

Palavras-chave em inglês:

Tanks

Fluid dynamics

Turbulent flow

Energy dissipation

Experimental research

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Guilherme José de Castilho [Orientador]

Erick de Moraes Franklin

Savio Souza Venancio Vianna

Data de defesa: 16-12-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8730-8045>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0070921834910367>

Folha de Aprovação da Dissertação de Mestrado defendida por Lucas Freitas de Lima e Freitas - RA 192527, em 16 de dezembro de 2020 pela banca examinadora constituída pelos doutores.

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
Presidente e Orientador
FEQ / UNICAMP
Videocoferência

Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin
FEM / UNICAMP
Videocoferência

Prof. Dr. Savio Souza Venancio Vianna
FEQ / UNICAMP
Videocoferência

A Ata da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

*À minha família por todo o apoio e incentivo
na minha educação.*

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Valeria Freitas de Lima e Freitas e Luiz Arnaldo da Silva Freitas (*in memoriam*), pelo tempo e pelos recursos investidos na minha educação.

Aos meus amigos, Paula Trindade da Silva, Thalita Cardoso Neves, Gustavo Carvalho Menezes e Aliandra Duarte Barbutti, que fiz ao longo da minha passagem na **Unicamp** pelo companheirismo e pela motivação na forma de estudo, de descontração e de apoio quando se fez necessário.

Ao Professor Doutor Guilherme José de Castilho pelo empenho ao me ensinar grande parte do que sei sobre o tema e dedicação à defesa dessa Dissertação de Mestrado, acima de tudo, pela sua amizade. Obrigada pela sua orientação.

Ao Professor Doutor José Roberto Nunhez pela sua coorientação.

Aos doutores Helder Moura de Lima e Rodrigo de Lima Amaral pelo exemplo de profissionalismo, indescritível apoio ao meu desenvolvimento acadêmico durante esses dois anos de trabalho e atenção dedicada à produção desse texto.

Aos meus colegas de trabalho, que se fizeram verdadeiros amigos durante esses anos de convivência no **LACEM** (Laboratório de Caracterização de Escoamentos Multifásicos), por todo suporte oferecido.

A Petróleo Brasileiro S / A - PETROBRAS (Cenpes) pelo suporte financeiro por meio do Processo 2017 / 00376-1.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*Se teu Orixá deixou que uma pedra atrapalhasse seu caminho,
é porque ele confiava na sua capacidade de retirá-la e seguir.*

RESUMO

Tanques de agitação são normalmente utilizados em muitas operações industriais. A qualidade da mistura gerada a partir de um determinado *design* do tanque de agitação pode ser obtida utilizando métodos experimentais e/ou computacionais. A técnica experimental de velocimetria por imagem de partícula (PIV – *Particle Image Velocimetry*) em duas dimensões e duas componentes (PIV 2C-2D) pode fornecer informações detalhadas sobre as variações espaço-temporais em um tanque de mistura. As características do fluxo turbulento são fundamentais para a compreensão da operação nesses equipamentos, sendo a energia cinética turbulenta (TKE) e a taxa de dissipação de energia (EDR), parâmetros que vêm sendo amplamente investigados para caracterizar o escoamento dentro de um tanque de mistura. Para obter a TKE, a técnica bidimensional PIV (2C-2D) gera resultados satisfatórios a partir de formulações aproximadas que pode ser obtida diretamente de alguns *softwares* computacionais. Para a determinação da EDR, faz-se necessário um método adicional para correção, pois alguns estudos relatam que os valores obtidos empregando a PIV (2C-2D) são subestimados e, portanto, deve ser investigado separadamente, por exemplo, criando e/ou testando rotinas/métodos em *softwares* numéricos. Além disso, uma outra questão reside na maioria dos trabalhos nessa área assumirem condição de simetria axial nas medições PIV, o que não é plenamente justificada para campos eulerianos devido à própria anisotropia do escoamento. Diante dessas questões, para um melhor entendimento das características de um processo de mistura monofásico, esse trabalho tem como objetivo principal investigar as características turbulentas em termos de TKE e EDR a partir dos campos de velocidade obtidos nas medidas experimentais PIV (2C-2D) com ângulo resolvido em um tanque de mistura mecanicamente agitado.

Palavras-chaves: tanque de mistura; PIV; energia cinética turbulenta; taxa de dissipação de energia.

ABSTRACT

Stirred tanks are typically used in many industrial operations. The quality of the mixture generated from a given design of the stirring tank can be obtained using experimental and/or computational methods. The Particle Image Velocimetry (PIV) in two dimensions and two components (PIV 2C-2D) is an experimental technique that can provide detailed information about the space-time variations in a stirred tank. The characteristics of the turbulent flow are fundamental for the understanding of the operation in this equipment, in which the turbulent kinetic energy (TKE) and the energy dissipation rate (EDR) are parameters that have been extensively investigated to characterize its flow. To obtain TKE, the two-dimensional PIV technique generates satisfactory results from approximate formulations that can be obtained directly from some computational software. For the determination of the EDR, an additional method for correction is necessary, once some studies report that the values obtained using the PIV 2C-2D are underestimated. Therefore, the EDR must be investigated separately, for example, creating and/or testing routines/methods in numerical software. Furthermore, another issue lies in the fact that most studies in this area assume axial symmetry in PIV measurements, which is not entirely justified for Eulerian fields due to the anisotropy of the flow. Given these questions, for a better understanding of the characteristics of a single-phase mixing process, this work has as main goal the investigation of the turbulent characteristics in terms of TKE and EDR from the velocity fields obtained by experimental measurements using the PIV 2C-2D with angle-resolved in a stirred tank.

Keywords: stirred tank; PIV; turbulent kinetic energy; energy dissipation rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Espectro de energia de um escoamento turbulento.....	24
Figura 2: Número de potência dos impelidores em função do D/T.....	25
Figura 3: Dependência do fator de correção em relação à resolução espacial para uma dada máxima dissipação de energia.	31
Figura 4: Princípio de funcionamento da Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) 2D Clássico.....	39
Figura 5: (a) Representação da planta piloto de agitação; (b) foto real do sistema de agitação.	42
Figura 6: (a) Representação da configuração do sistema PIV 2D Clássico na planta piloto de agitação, 1. Motor, 2. Eixo para ajuste da altura do impelidor, 3. Torquímetro, 4. Tanque de agitação, 5. Câmera; (b) configuração do tanque, 6. Defletores, 7. Eixo, 8. Impelidor PBT 45°.	44
Figura 7: Metodologia experimental para obter dados por ângulo resolvido.....	45
Figura 8: Fluxograma da metodologia que será empregada nas medições experimentais.....	46
Figura 9: Correlação entre o número de Reynolds e número da potência com dados experimentais do sistema tanque e impelidor.....	50
Figura 10: Campos da velocidade com diferentes resoluções espaciais para o plano de 0°. ...	54
Figura 11: Campos de TKE com diferentes resoluções espaciais para o plano de 0°.....	55
Figura 12: Campos da velocidade com resolução espacial de 10 x 10 px para os planos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°.	57
Figura 13: Campos de TKE com resolução espacial de 10 x 10 px para os planos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°.	58
Figura 14: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36 × 36 px e 10 × 10 px para o plano de 0° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.	60
Figura 15: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36 × 36 px e 10 × 10 px para o plano de 45° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.	61
Figura 16: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36 × 36 px e 10 × 10 px para o plano de 75° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.	62
Figura 17: Taxa média de dissipação energia obtida em função da janela de interrogação para os planos (a) 0°, (b) 45°, e (c) 75° sobre a região de escoamento do impelidor.	64
Figura 18: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 5 × 5 px para o plano de 45° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.	65
Figura 19: Subestimação do coeficiente (f_e) para EDR utilizando o método MDE para resolução espacial de (a) 36 × 36 px e (b) 10 × 10 px para o plano de 45°.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros analisados e fornecidos para o método de quantificação de incerteza estatística de correlação.	41
Tabela 2: Parâmetros geométricos do tanque de mistura e características do fluido e partículas traçadoras.	43
Tabela 3: Dados calculados para Np e Re a partir dos dados obtidos experimentalmente para o tanque mecanicamente agitado por um impelidor PBT 45°.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 2C – Duas Componentes
- 2D – Bidimensional
- 3C – Três Componentes
- 3D – Tridimensional
- ASME – Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (*American Society of Mechanical Engineers*)
- AR – Ângulo resolvido
- AS – Suposição de Axissimetria Local (*Assumption of Local Axisymmetry*)
- CCD – Dispositivo de Carga Acoplada (*Charge-Coupled Device*)
- CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computacional Fluid Dynamics*)
- CMOS – Semicondutor Complementário de Óxido de Metal (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*)
- CS – Estatística de Correlação (*Correlation Statistics*)
- DE – Estimativa Direta (*Direct Estimation*)
- EDR – Taxa de Dissipação de Energia (*Energy Dissipation Rate*)
- LDA – Anemometria *laser* Doppler (*Laser Doppler Anemometry*)
- LES – Simulação das Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation*)
- MDE – Estimativa Modificada Direta (*Modified Direct Estimation*)
- Nd:YAG – Granada de Óxido de Ítrio e Alumínio Cristalino Dopada com Neodímio (*Neodymium-doped yttrium aluminum garnet*)
- PBT – Impelidor com Pá Inclinada (*Pitched Blade Turbine*)
- PIV – Velocimetria por Imagem de Partícula (*Particle Image Velocimetry*)
- ppr – Pulsos por Revolução
- RANS – Equação Média de Reynolds (Reynolds-averaged Navier–Stokes)
- RMS – Raiz Média Quadrada (Root Mean Square)
- SGS – Escalas de Sub-Grade (*Subgrid Scales*)
- SNR – Razão Sinal Ruído (*Signal-to-Noise-Ratio*)
- SSC – Correlação Padrão (*Standard Cross-Correlation*)
- TKE – Energia Cinética Turbulenta (*Turbulent Kinetic Energy*)
- Tomo-PIV – Velocimetria por Imagem de Partícula Tomográfica (*Tomographic-PIV*)
- TTP – Impelidor Axial da Mixel

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A – Constante

B – Largura do Defletor [m]

C – Distância do Impelidor para o Fundo do Tanque [m]

C_s – Constante de Smagorinsky para ε_{LES}

D – Diâmetro do Impelidor [m]

f_e – Fator de Correção para ε_{MDE}

k – Energia Cinética Turbulenta [$m^2 s^{-2}$]

N – Velocidade Angular do Impelidor [rpm]

Ngl – Número de Grau de Liberdade [-]

N_p – Número de Potência [-]

M – Torque [Nm]

P – Potência [W]

ppp – Concentração de Partículas na Imagem [$partículas/pixel$]

px – *Pixel*

Re – Número de Reynolds [-]

s_{ij} – Tensor da Taxa de Deformação para ε_{LES}

T – Diâmetro do Tanque [m]

U – Velocidade Instantânea [$m s^{-1}$]

u_1, u_2, u_3 – Velocidade do Escoamento (u, v, w)

\bar{u} – Velocidade Média no Tempo [$m s^{-1}$]

u' – Componentes Flutuantes da Velocidade no Tempo [$m s^{-1}$]

$\bar{\bar{u}}, \bar{\bar{v}}, \bar{\bar{w}}$ – Raiz Quadrada Média da Velocidade Flutuante [$m s^{-1}$]

u_p – Componente de Velocidade Periódica da Velocidade do Ângulo Resolvido [$m s^{-1}$]

u'' – Componentes Flutuantes da Velocidade do Ângulo Resolvido [$m s^{-1}$]

\bar{u}_θ – Velocidade Média do Ângulo Resolvido [$m s^{-1}$]

U_{tip} – Velocidade da Ponta do Impelidor [$m s^{-1}$]

V – Volume do Tanque [m^3]

v, w, u – Radial, Azimutal e Axial Componentes da Velocidade [$m s^{-1}$]

x_1, x_2, x_3 – Vetor de Direção (x, y, z)

x, y, z – Coordenadas Cartesianas

W – Largura da Pá [m]

Letras Gregas

α – Constante para ε_{MDE}

Δ – Janela de Interrogação [mm]

Λ – Macro Escala

ε - Taxa de Dissipação de Energia [$m^2 s^{-3}$]

$\bar{\varepsilon}_T$ – Taxa Média de Dissipação de Energia

η – Escala de Kolmogorov de Comprimento [mm]

λ – Microescala de Taylor

μ – Viscosidade Dinâmica [$Pa s$]

ρ – Densidade [$kg m^{-3}$]

τ_{ij} – Tensor Tensão de SGS para ε_{LES}

ν – Viscosidade Cinemática [$m^2 s^{-1}$]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Considerações Iniciais	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2. OBJETIVO GERAL	19
1.2.1. Objetivos Específicos	19
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	21
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1.1. Relação entre os parâmetros de operação e os parâmetros de escoamento	21
2.1.2. Escoamento Turbulento	22
2.2. PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO TURBULENTO	25
2.2.1. Energia Cinética Turbulenta	26
2.2.2. Taxa de Dissipação de Energia	28
Estimativa Direta da Taxa de Dissipação de Energia.....	28
Estimativa Modificada Direta da Taxa de Dissipação de Energia.....	30
Estimativa da Taxa de Dissipação de Energia por Suposição de Axissimetria Local...	31
Estimativa Indireta da Taxa de Dissipação de Energia – <i>Large Eddy</i>	32
2.3. ESTADO DA ARTE	34
CAPÍTULO 3 – Material e Métodos	38
3.1. FUNDAMENTOS DA TÉCNICA PIV	38
3.1.1. PIV 2C-2D	38
3.1.2. Quantificação da Incerteza PIV	40
Método da Estatística de Correlação.....	40
3.2. DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL	41
3.2.1. Planta Piloto de Agitação	41
3.2.2. Sistema PIV	43
3.3. MÉTODOS	46
CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão	48
4.1. VERIFICAÇÃO DO REGIME DO ESCOAMENTO DO FLUIDO NO TANQUE MECANICAMENTE AGITADO	48
4.2. EFEITO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NOS CAMPOS DE VELOCIDADE E DE ENERGIA CINÉTICA TURBULENTO (TKE) EM UM TANQUE AGITADO UTILIZANDO MEDIDAS PIV	51
4.3. ESTIMAÇÃO DA TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA (EDR) EM UM TANQUE MECANICAMENTE AGITADO UTILIZANDO MEDIDAS PIV	58
CAPÍTULO 5 – Considerações Finais	68
5.1. CONCLUSÕES	68

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
<i>REFERÊNCIAS</i>.....	71

CAPÍTULO 1 – Considerações Iniciais

Este capítulo introdutório apresenta a contextualização e a motivação pela escolha do tema desta Dissertação de Mestrado. Os objetivos gerais e específicos e a organização da apresentação da Dissertação são expostos em seguida.

1.1 INTRODUÇÃO

Os tanques de mistura mecanicamente agitados são equipamentos bastante utilizados em operações industriais tais como na área alimentícia, farmacêutica, petrolífera, química e metalúrgica. Eles são usados para misturas de líquidos, sólido-líquido, dispersão de gás em líquidos, escoamentos reativos e para melhorar a eficiência de transferência de massa e calor (GUIDA; NIENOW; BARIGOU, 2010). Os impelidores (ou rotores ou agitadores mecânicos) e os defletores (ou chicanas) são os elementos básicos de um tanque de mistura. Devido à aplicação do tanque de mistura em diferentes contextos, a sua geometria, o *design* dos impelidores e a quantidade de defletores são variáveis importantes na otimização desses equipamentos. Assim, essas propriedades geométricas e as condições operacionais podem definir diretamente a dinâmica do fluido dentro do tanque (BASAVARAJAPPA et al., 2015; SOSSA-ECHEVERRIA; TAGHIPOUR, 2015).

Os fluxos gerados nos tanques agitados são predominantemente turbulentos devido às altas velocidades de rotação do impelidor usadas para alcançar as condições de processo necessárias, como por exemplo, o tempo de mistura (BASAVARAJAPPA et al., 2015). Pesquisas para investigar as características do escoamento turbulento em processos são importantes para o entendimento das operações industriais citadas anteriormente. A distribuição da energia cinética turbulenta (TKE, do inglês *turbulent kinetic energy*) e taxa de dissipação de energia (EDR, do inglês *energy dissipation rate*) são amplamente estudadas para determinar características do processo de mistura monofásico e multifásico (JOSHI et al., 2011; LIU et al., 2016).

As técnicas experimentais têm sido utilizadas para estudar a dinâmica em tanques de mistura fornecendo dados para modelos oriundos da fluidodinâmica computacional (OCHIENG; ONYANGO; KIRIAMITI, 2009). A velocimetria por imagem de partículas (PIV, do inglês *particle image velocimetry*) é uma das técnicas experimentais de maior

relevância na contribuição de muitos avanços no entendimento de escoamento turbulento e complexo (WESTERWEEL; ELSINGA; ADRIAN, 2013). A técnica PIV é um método não-intrusivo de medição de escoamento que fornece campos instantâneos de velocidade por meio de partículas traçadoras introduzidas no escoamento (OKAMOTO et al., 2000; PRASAD, 2000). Tal técnica pode ser classificada em função do domínio de medida que pode ser bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), e das componentes da distribuição de velocidade, que, dependendo da configuração do sistema PIV, podem gerar duas (2C) ou três (3C) componentes. Como exemplo, encontra-se na literatura a aplicação das técnicas PIV 2D Clássico, *Stereo-PIV* ou *Tomographic-PIV (Tomo-PIV)*, que fornecem campos de velocidade 2C-2D, 3C-2D e 3C-3D, respectivamente (OKAMOTO et al., 2000; PRASAD, 2000; RAFFEL et al., 2007).

Uma limitação que acontece na reconstrução por imagens de partículas utilizada na técnica *Tomo-PIV*, desenvolvida por Elsinga et al. (2006), são picos de intensidade que não correspondem à real localização das partículas medidas, causando um efeito chamado de partícula fantasma (OKAMOTO et al., 2000; ATKINSON, et al., 2011; ELSINGA et al., 2011). Assim, as técnicas PIV classificadas como bidimensionais têm um melhor desempenho, acurácia e reprodutibilidade nas medidas por serem mais simples, práticas e acessíveis que quando comparadas à técnica PIV 3D. Como alternativa, existe uma técnica que consiste em medir planos adjacentes para obter campos de distribuição de velocidade, ou seja, reconstrução do escoamento médio tridimensional (pseudo 3C-3D) utilizando um sistema PIV 3C-2D de duas câmeras. Porém, como a aquisição dos diferentes planos não é simultânea, não é possível determinar campos de velocidade instantâneo. Entretanto, a reconstrução de séries temporais de campo de velocidade é permitida pelo uso de informação da fase fenomenológica (KORKISCHKO, 2011).

De acordo com Hoque et al. (2014), a partir de dados PIV 2D é possível calcular parâmetros importantes como gradiente de velocidade, escala de comprimento integral, funções de estrutura e espectro de energia espacial. Em relação aos parâmetros turbulentos, existem certas condições para estimar a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia a partir dos dados de velocidade. Porém, cada uma delas possui limitações dependendo dos pressupostos da teoria subjacente como, por exemplo, assumir a condição de isotropia, que pode falhar na representatividade da dissipação dos vórtices.

Segundo Drumm, Hlawitschka e Bart (2011), para atingir 95% de confiança nos dados é necessária uma janela de interrogação (Δ) da medida PIV adequada, que é inerente da escala de Kolmogorov de comprimento (η) e que, por sua vez, depende da EDR. Em adição, a condição de isotropia precisa ser corrigida para não fornecer dados subestimados de EDR. Eventualmente, para uma melhor investigação e qualidade das medidas, são feitas medidas em vários planos, ou seja, variando o plano azimutal para uma melhor visão do comportamento anisotrópico do fluxo no tanque (GUIDA; NIENOW; BARIGOU, 2010).

Mesmo com o aumento significativo de pesquisas na área de fluidodinâmica, ainda existe uma lacuna a ser preenchida no quesito de um melhor entendimento dos parâmetros turbulentos em tanques de mistura por métodos experimentais não intrusivos. Em razão disso, esse trabalho utilizou a técnica PIV clássica para estudar as características turbulentas do fluxo em um tanque de agitação para um melhor entendimento das características de um processo de mistura monofásico. Esse trabalho é uma das etapas do projeto fomentado pela Petróleo Brasileiro S.A., e intitulado de “Experimento e simulação numérica para avaliação da formação de borra em tanques de armazenamento de petróleo” que é dividido em um grupo computacional e outro experimental do qual esse faz parte.

1.2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho busca investigar as características turbulentas em termos de energia cinética turbulenta (TKE) e taxa de dissipação de energia (EDR) a partir dos campos de velocidade obtidos a partir de medidas experimentais PIV (2C-2D) com ângulo resolvido em um tanque agitado.

1.2.1. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos relacionados abaixo são propostos:

- ✓ Verificação do regime do escoamento do fluido no tanque mecanicamente agitado.
- ✓ Avaliação das características turbulentas (TKE e EDR) em função do ângulo resolvido pela técnica PIV (2C-2D).

- ✓ Avaliação da influência da resolução espacial PIV nos campos TKE e EDR.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, conforme descritos a seguir:

- No Capítulo 1, Introdução, são apresentados a contextualização do tema, objetivos e a estrutura da dissertação.

- O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica acerca do problema proposto com o intuito de contextualizar a teoria relacionada às características turbulentas e sua aplicação em tanques de agitação empregados para o armazenamento de petróleo. O capítulo é concluído com a apresentação do estado da arte referenciando os principais trabalhos que serviram de subsídio para este estudo.

- O Capítulo 3, Material e Métodos, destina-se à descrição dos materiais e dos equipamentos (tanque de mistura e sistema PIV 2C-2D) utilizados para a realização dos experimentos. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Caracterização de Escoamentos Multifásicos (LACEM) do Departamento de Engenharia de Processos (DEPro), da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Adicionalmente, a técnica experimental PIV tem os seus conceitos apresentados nessa seção.

- No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos da investigação das características turbulentas obtidas por medidas experimentais PIV (2C-2D) de ângulo resolvido em um tanque agitado. A primeira parte apresenta os resultados da verificação do regime do escoamento do fluido no tanque mecanicamente agitado, a segunda parte apresenta os resultados da avaliação da influência da resolução espacial PIV nos campos de TKE, e a terceira parte apresenta a comparação dos diferentes métodos para estimação da EDR.

- Finalmente, o Capítulo 5 dispõe sobre as principais conclusões obtidas a partir da investigação proposta, finalizando com a apresentação das sugestões para sequência deste trabalho.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

Para contextualizar o tema da presente Dissertação, este capítulo apresenta o significado de cada conceito-chave e como eles estão relacionados entre si. Em seguida, apresenta-se uma revisão sobre as diferentes características encontradas em um regime turbulento como energia cinética turbulenta e taxa de dissipação de energia. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas como estado da arte desse trabalho.

2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1. Relação entre os parâmetros de operação e os parâmetros de escoamento

Apesar de ser usado como uma unidade básica de operação pela maioria das indústrias de processamento químico, os tanques de mistura têm um escoamento tridimensional não uniforme e complexo. Entretanto, os projetos de um tanque de mistura são baseados principalmente em correlações globais envolvendo, por exemplo, número de Reynolds, potência e número de Froude, ainda assim esses *designs* – projetos – não fornecem informações detalhadas sobre os fenômenos de fluxo local que governam o resultado do processo desejado (BASHIRI et al., 2016).

De acordo com Ochieng, Onyango e Kiriamiti (2009), o estudo do escoamento em tanques de agitação possibilita reduzir os custos em processo de mistura e aumentar a qualidade do produto que são dependentes da geometria do tanque, do impelidor, e das propriedades do fluido. Muitos tipos de impelidores são empregados para melhorar a mistura em sistemas monofásicos e multifásicos. Os métodos convencionais de avaliação da qualidade da mistura, como tempo de mistura e potência, não fornecem informação suficiente para o *design* do sistema de agitação.

Segundo Joshi et al. (2011), a disponibilidade de um número tão grande de parâmetros, como *design* do tanque, quantidade, tipo, localização e tamanho dos impelidores, em adição da variabilidade de escala – o que torna impossível achar grupos adimensionais adequados, já que não há invariabilidade de escala – torna difícil a atividade de otimizar o processo. Ou seja, o maior obstáculo tem sido a falta de compreensão na dinâmica do fluido e,

portanto, das relações quantitativas entre os parâmetros do sistema de agitação e o desempenho do processo.

Em fluxos turbulentos, os parâmetros de turbulência que estão diretamente relacionados à capacidade e desempenho de um tanque de mistura são a escala de turbulência e a taxa de dissipação de energia de turbulência, ou seja, uma competição entre produção de turbulência (grandes escalas) e a dissipação de turbulência (pequenas escalas). O primeiro é uma medida do tamanho do turbilhão, isto é, uma medida da área de superfície intermaterial para mistura molecular; o segundo, de acordo com Kolmogorov, é uma característica importante da turbulência quando o número de Reynolds é suficientemente alto (WU; PATTERSON, 1989).

2.1.2. Escoamento Turbulento

Um escoamento turbulento possui várias características, por exemplo, o escoamento é irregular, caótico, tridimensional, instável, dissipativo e o aumento da difusividade (POPE, 2001; TENNEKES; LUMLEY, 1972). O número de Reynolds é um parâmetro de controle da transição à turbulência, e sabe-se que o valor crítico para sustentar o escoamento turbulento depende da forma que o escoamento está sendo perturbado. Em tanques de mistura, o número de Reynolds (Re) é usualmente baseado no diâmetro do impelidor (D), ND como escala de velocidade (N é a velocidade angular do impelidor), com a viscosidade cinemática do líquido (ν) (ZHANG; GAO; LI, 2017).

$$Re = \frac{ND^2}{\nu} \quad (1)$$

O valor obtido tem que ser alto suficiente para que o fluxo do fluido seja considerado totalmente turbulento, ou seja, alto o suficiente em relação à dissipação para manter um certo grau de agitação ($Re \geq 40.000$) (BASHIRI et al., 2016; MACHADO et al., 2013; MARTÍNEZ-DELGADILLO et al., 2019). Caso contrário, um regime transiente pode ser imposto no fluxo e essa energia se dissipa. No regime turbulento, a dinâmica dos fluidos é caracterizada por uma ampla gama de escalas de comprimento, por exemplo, a escala de Kolmogorov (η , onde a energia cinética turbulenta é dissipada pela viscosidade molecular – Equação (2)), a microescala de Taylor (λ , um tamanho caracterizado pelas menores estruturas energéticas – Equação (3)) e a macro escala (L , que corresponde localmente ao tamanho da estrutura energética mais turbulenta – Equação (4)) (ESCUDIE; LINE, 2003).

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{15\nu\overline{u'^2}}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{10\nu k}{\varepsilon}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = A \frac{u^3}{\Lambda} \quad (4)$$

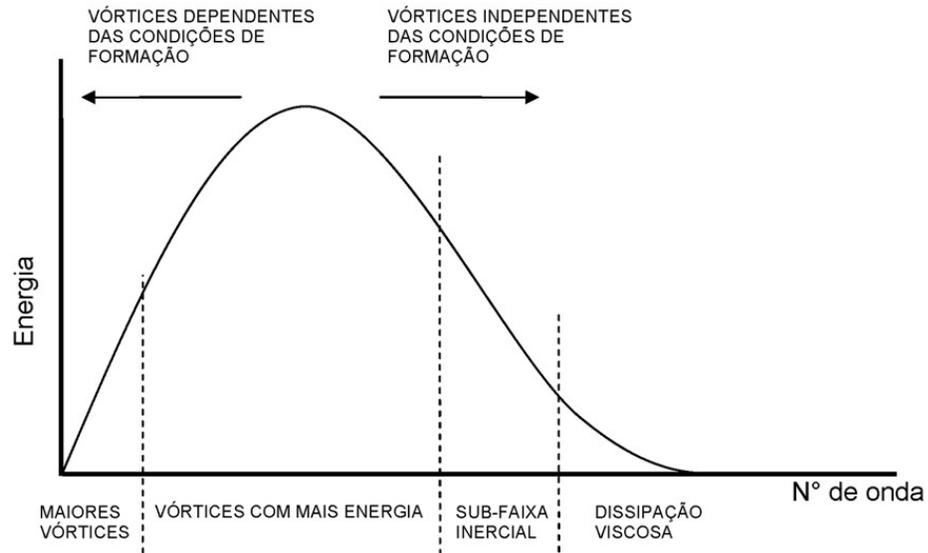
Em que A é uma constante igual a 1.

Segundo a primeira hipótese de Kolmogorov, quando o número de Reynolds é suficientemente alto há uma faixa de altos números de onda onde a turbulência está estatisticamente em equilíbrio e é unicamente determinada pela taxa de dissipação EDR e viscosidade ν , e esse estado de equilíbrio é universal (portanto é chamado intervalo de equilíbrio universal). Para casos de não-equilíbrio, a segunda hipótese de Kolmogorov dá a mesma relação para a suposição invíscida da taxa de dissipação. Com essa suposição é possível chegar à razão da escala de comprimento representada pela Equação (5) (SAARENINNE; PIIRTO; ELORANTA, 2001; SULC; PESAVA; DITL, 2015).

$$\frac{\Lambda}{\eta} = Re^{3/4} \quad (5)$$

De acordo com Gabriele, Nienow e Simmons (2009) e Silveira Neto (2002), para altos valores do número de Reynolds é possível adotar a teoria da cascata de energia (Figura 1) como modelo para o comportamento dos fluidos, o qual deverá ser portador de uma larga banda de frequências ou comprimentos de onda. Um escoamento turbulento exibe um espectro contínuo de dimensões de vórtices, de modo que a quantidade de diferentes tamanhos presentes no espectro é diretamente proporcional ao número de Reynolds do escoamento médio. Por exemplo, os vórtices maiores apresentam frequências de flutuação mais baixas e, conforme pode ser observado na Figura 1, possuem as maiores escalas de comprimento, ocorrendo o oposto na situação dos vórtices menores (EIGER, 1989; SOUZA et al., 2011).

Figura 1: Espectro de energia de um escoamento turbulento.



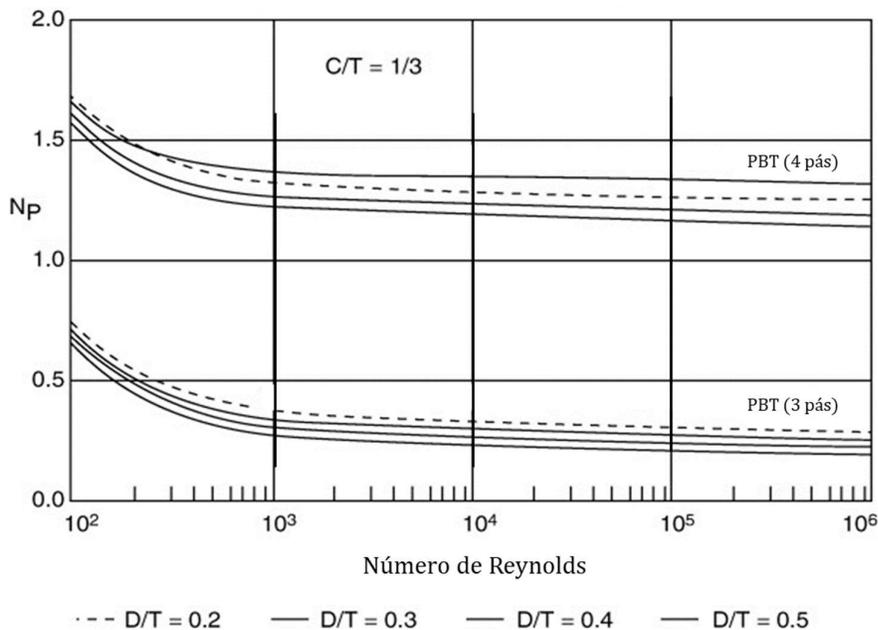
Fonte: Souza et al. (2011).

Como já foi dito anteriormente, a turbulência apenas ocorre para altos números de Reynolds, o que implica que se trata de um fenômeno a altos números de grau de liberdade (Equação (6)). Outra forma de determinar se o escoamento atingiu o fluxo turbulento é utilizando o gráfico do número de potência (N_p) em função do número de Reynolds, como pode ser visto na Figura 2. A figura abaixo mostra a correlação para o número de potência (Equação (7)) para dois tipos de impelidores. No fluxo turbulento, a curva se torna horizontal e o número de potência é independente do número de Reynolds (COUPER et al., 2005).

$$N_{gl} = \left(\frac{\Delta}{\eta}\right)^3 = Re^{9/4} \quad (6)$$

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (7)$$

Figura 2: Número de potência dos impelidores em função do D/T.



Fonte: Couper et al. (2005).

2.2. PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO TURBULENTO

Basavarajappa et al. (2015) afirmaram que os fluxos gerados em tanques de mistura são predominantemente turbulentos e complexos devido o sistema ser não uniforme e anisotrópico. Assim, pesquisas sobre as características de escoamento turbulento em processos multifásicos e monofásicos são de fundamental importância. A TKE e a EDR são parâmetros quantitativos de fluxos investigados para um melhor entendimento do fluxo turbulento (LIU et al., 2016).

Esses parâmetros caracterizam o grau de flutuação da velocidade ao longo do tempo em áreas fixas, bem como o consumo de energia espacial e temporal (KRESTA, 1998; GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009; LI; BAO; GAO, 2011). Kumaresan e Joshi (2006) definiram a qualidade da mistura como dependente principalmente da distribuição relativa da energia cinética média e turbulenta, sendo que o padrão de fluxo desejado depende de sua aplicação.

As metodologias a seguir descrevem o método para avaliar a energia cinética turbulenta (TKE) utilizado neste trabalho e as diferentes formas de estimar a taxa de

dissipação de energia (EDR) baseada em campos quantitativos de velocidade. O entendimento desses métodos é de suma importância, principalmente na compreensão das suposições assumidas em suas formulações.

2.2.1. Energia Cinética Turbulenta

O escoamento turbulento é caracterizado por flutuações temporais na velocidade do fluido em qualquer ponto. Para qualquer sistema de coordenada de fluxo, que seja em média estável, é possível decompor as flutuações instantâneas de velocidade (U) em um componente médio temporal, \bar{u} , e um componente de flutuação (desvio da média), u' (GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009; GUIDA; NIENOW; BARIGOU, 2010):

$$U = \bar{u} + u' \quad (8)$$

De acordo com Gabriele, Nienow e Simmons (2009), uma vez que a componente flutuante, u' , pode assumir valores positivos ou negativos, o grau de desvio da velocidade média é representado pela raiz média quadrada (RMS, do inglês *root mean square*):

$$\bar{u} = \sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\overline{(U - \bar{u})^2}} \quad (9)$$

A velocidade contém a componente de flutuação periódica e a velocidade temporal no sistema de agitação (LIU et al., 2016), que pode ser decomposta em:

$$U = \bar{u}_\theta + u'' \quad (10)$$

$$U = \bar{u} + u_p + u'' \quad (11)$$

$$u_p = \bar{u}_\theta - \bar{u} \quad (12)$$

$$u'' = u' - u_p \quad (13)$$

Nas Equações (10) e (13), \bar{u}_θ representa a velocidade média do ângulo resolvido – variação do plano de luz do *laser* em diferentes domínios de medição –, u'' representa a componente de flutuação da velocidade do ângulo resolvido e u_p representa as flutuações na velocidade periódica devido a passagem da pá do impelidor (GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009; LIU et al., 2016). Segundo Guida, Nienow e Barigou (2010), em um tanque de mistura o impelidor transmite energia cinética para o fluido, gerando tanto o campo

de fluxo médio quanto as velocidades flutuantes associadas a ele. A energia cinética turbulenta é a porção de energia cinética por unidade de massa devido às flutuações de velocidade, e assume a forma da metade do traço do tensor de Reynolds de acordo com a Equação (14).

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad (14)$$

Para medir a energia cinética com precisão suficiente para atingir 95% do valor correto, a janela de interrogação deve ser vinte (20) vezes a escala de Kolmogorov de comprimento, e noventa (90) vezes a escala de Kolmogorov para alcançar 65% (SAARENINNE; PIIRTO; ELORANTA, 2001). Na Equação (14), a terceira componente flutuante da velocidade não pode ser obtida a partir da técnica PIV 2C-2D. Uma simplificação, utilizada por Khan (2005), considera que $\bar{w}^2 = \bar{u}^2$, utilizando uma hipótese pseudo-isotrópica. A expressão para estimar a TKE torna-se:

$$k = \frac{1}{2}(2\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \quad (15)$$

Uma segunda aproximação considera que a terceira componente, \bar{w}^2 , pode ser caracterizada pela combinação de \bar{u}^2 e \bar{v}^2 (GABRIELE; NIENOW; SIEMMONS, 2009; SHENG; MENG; FOX, 2000):

$$\bar{w}^2 = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \quad (16)$$

Combinando as Equações (14) e (16), tem-se:

$$k = \frac{3}{4}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \quad (17)$$

Embora essa hipótese não tenha uma justificativa teórica em um tanque agitado mecanicamente (KRESTA; WOOD, 1993), ela foi confirmada experimentalmente por Khan (2005), Khan, Rielly e Brown (2006) e Chung, Barigou e Simmons (2007). Adotando uma RMS do ângulo resolvido $\bar{u} = \sqrt{u'^2}$, sendo assim mais representativa, a RMS do ângulo resolvido foi usada para estimar a taxa de dissipação de energia local para investigar a anisotropia no campo do escoamento turbulento (GABRIELE; NIENOW, SIMMONS, 2009; LIU et al., 2016). Liu et al. (2016) justificam o uso da Equação (17) por medidas com PIV

com ângulo resolvido pois as distribuições de velocidade radiais são afetadas pela posição do impelidor.

2.2.2. Taxa de Dissipação de Energia

A taxa de dissipação de energia turbulenta pode ser estimada a partir de sua definição, que é composta por um termo de viscosidade e a derivada do gradiente da RMS (LIU et al., 2016). A viscosidade cinemática aplicada nas análises é baseada nas medidas feitas previamente em laboratório. De acordo com Hinze (1959), a expressão tensorial da taxa de dissipação de energia (ε ou EDR) é apresentada a seguir:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)} \quad (18)$$

Estimativa Direta da Taxa de Dissipação de Energia

Expandido a forma de tensor em um sistema de coordenadas cartesianas, a taxa de dissipação de energia pode ser calculada por:

$$\varepsilon_{DE} = \nu \left[2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial u \partial v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial u \partial w}{\partial z \partial x} + \frac{\partial v \partial w}{\partial z \partial y} \right)} \right] \quad (19)$$

O subscrito *DE* indica que a dissipação de energia é calculada a partir de um método de estimação direto, adotado por Gabriele, Nienow e Simmons (2009). A Equação (19) requer medidas instantâneas totalmente em 3D com resolução mais refinada na flutuação dos campos de velocidade. Portanto, uma resolução mais refinada e medidas de gradiente de velocidade são necessárias para determinação mais precisa da taxa de dissipação de energia (KHAN, 2005). Porém, como nos dados da técnica PIV 2C-2D apenas as componentes axiais e radiais da velocidade podem ser medidos no plano $x - y$, ou seja, somente cinco dos doze termos na Equação (19) podem ser obtidos (UNADKAT, 2009), é necessário fornecer uma estimativa para o terceiro componente. Neste caso, utilizando a hipótese de isotropia estatística, apresentada nas Equações (20)-(22) (DELAFOSSÉ et al., 2011; GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009; HOQUE et al., 2015; KHAN, 2005; LIU et al., 2016; SHARP; ADRIAN, 2001) obtém-se a Equação (23).

$$\overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} = \frac{1}{2} \left[\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \right] \quad (20)$$

$$\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} = \frac{1}{2} \left[\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \right] \quad (21)$$

$$\frac{\overline{\partial u \partial w}}{\partial z \partial x} = \frac{\overline{\partial v \partial w}}{\partial z \partial y} = \frac{-\frac{1}{2} \left[\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \right]}{2} = -\frac{1}{4} \left[\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \right] \quad (22)$$

$$\varepsilon_{DE} = v \left[2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} + 3 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} + 3 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + 2 \frac{\overline{\partial u \partial v}}{\partial y \partial x} \right] \quad (23)$$

De acordo com Kolmogorov (1991), na teoria de cascata de energia, as interações diretas entre os grandes turbilhões contendo energia e os pequenos dissipando energia não existem. Em vez disso, a energia cinética é transferida de grandes para pequenos vórtices em uma cascata com base no espectro de energia cinética de turbulência (BALDYGA; PODGORSKA, 1998). Dentro deste espectro, os maiores vórtices drenam energia do escoamento médio e a transferem para outros menores, e estes para outros menos ainda e assim sucessivamente. Cria-se então um processo contínuo de transferência de energia, que vai em direção a uma escala de tamanhos onde a energia passa a ser dissipada pelas tensões viscosas, atingindo-se um estado de equilíbrio (ROSMAN, 1989).

Assim, segundo Drumm, Hlawitschka e Bart (2011) e Liu et al. (2016), para estimar a EDR é necessário medir até a escala de Kolmogorov de comprimento para resolver completamente o comportamento espacial da quantidade de turbulência de um escoamento, pois a resolução espacial das medidas PIV afeta a magnitude da taxa de dissipação medida. A estimativa da taxa de dissipação é difícil com qualquer método e, para atingir 90% da EDR, a janela de interrogação deve ser em torno de 2η , e 9η para alcançar 65% (SAARENINNE; PIIRTO; ELORANTA, 2001).

Khan (2005) utilizou campos de velocidade obtidos através de um PIV 3D para verificar as Equações (20)-(22). Com os dados obtidos com as medidas PIV 3D foi calculado os termos $\overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2}$ e $\overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2}$ que são estimados utilizando a Equação (21), porém ainda assim não

é possível calcular nenhum gradiente de velocidade com a componente z, como $\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2}$, $\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$ e $\overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2}$. Os termos de gradiente de velocidade que foram estimados são subestimados em até 53% em relação aos resultados medidos experimentalmente.

Estimativa Modificada Direta da Taxa de Dissipação de Energia

Como citado anteriormente, os dados experimentais obtidos pela técnica PIV são incapazes de resolver a menor escala de comprimento, resultando na subestimação da dissipação turbulenta. Segundo Alekseenk (2007), uma das formas de corrigir esse problema é através do fator de correção, baseado no espectro de Pao, descrito a seguir:

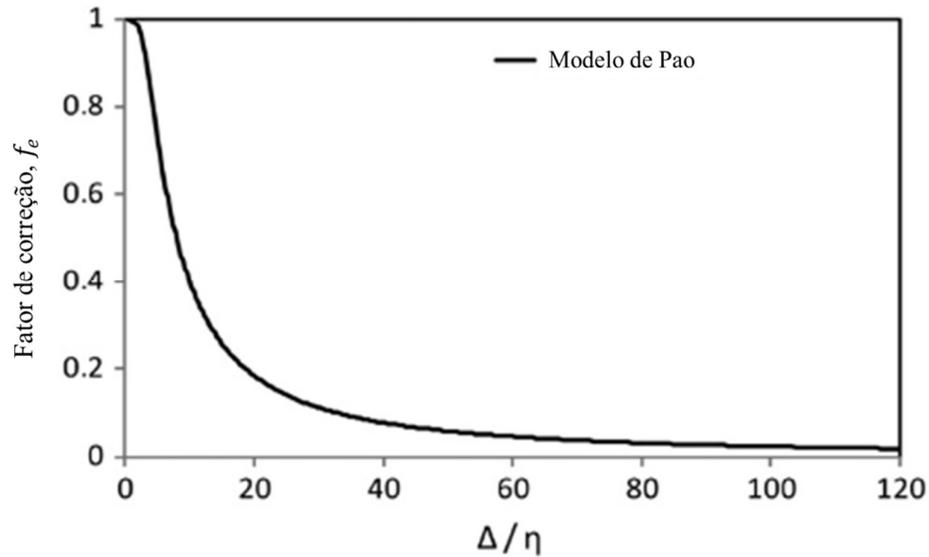
$$f_e = 1 - e^{\left[-\frac{3}{2}\alpha\left(\frac{\pi}{\Delta}\eta\right)^{4/3}\right]} \quad (24)$$

$$\eta = \left(\frac{v^3 f_e}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{MDE} = \varepsilon_{DE}/f_e \quad (26)$$

Em que α é uma constante igual a 1,6, e ε_{MDE} é calculado iterativamente da seguinte forma: no primeiro ciclo, f_e é tido como unidade e o valor de η é estimado a partir de um valor hipotético de ε , onde $\varepsilon = \max(\varepsilon_{MDE})$ (ALEKSEENK et al., 2007; HLAWITSCHKA; BART, 2012). No segundo ciclo, f_e é calculado utilizando a Equação (24), e η é recalculado (LIU et al., 2016). A Figura 3 mostra dependência do fator de correlação em relação à resolução espacial para um valor máximo medido de $0,155 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ para EDR. A determinação da taxa de dissipação de energia local é calculada pela média de cada posição (HLAWITSCHKA; BART, 2012).

Figura 3: Dependência do fator de correção em relação à resolução espacial para uma dada máxima dissipação de energia.



Fonte: Hlawitschka e Bart (2012).

Estimativa da Taxa de Dissipação de Energia por Suposição de Axissimetria Local

Trabalhos experimentais demonstram que as suposições da isotropia local não se mantêm em uma variedade de situações de fluxo (DORON et al., 2000). Segundo George e Hussein (1991), a turbulência em pequena escala pode ser melhor descrita como localmente axissimétrica, ou seja, invariável às rotações em torno de um eixo preferido. Essa hipótese leva às seguintes suposições:

$$\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3}\right)^2} \quad (27)$$

$$\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1}\right)^2} \quad (28)$$

$$\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right)^2} \quad (29)$$

$$\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3}\right)^2} = \overline{\left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2}\right)^2} \quad (30)$$

$$\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)^2} = \frac{1}{3}\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2} + \frac{1}{3}\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3}\right)^2} \quad (31)$$

$$\overline{\frac{\partial u_2}{\partial x_3} \frac{\partial u_3}{\partial x_2}} = \frac{1}{6}\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2} - \frac{1}{3}\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3}\right)^2} \quad (32)$$

$$\overline{\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \frac{\partial u_2}{\partial x_1}} = \overline{\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \frac{\partial u_3}{\partial x_1}} = -\frac{1}{3}\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2} \quad (33)$$

Em que u_n representa a componente da velocidade na direção x_n , sendo n igual a 1, 2 ou 3, ou seja, as diferentes direções (x , y e z). Assim, uma vez identificado o eixo assimétrico, essa hipótese leva a uma estimativa da EDR usando os quatro gradientes de velocidade resolvidos no PIV 2D Clássico – uma forma alternativa, dependendo apenas das medidas no plano $x - y$ (XU; CHEN, 2013). A forma exata da Equação (34) irá depender da escolha da direção e suas combinações derivativas para expressar os invariantes independentes.

$$\varepsilon_{AS} = v \left[-\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2} + 8\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2} \right] \quad (34)$$

A EDR pode ser então estimada a partir dos gradientes de velocidade dos planos medidos:

$$\varepsilon_{AS} = v \left[-\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 8\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + 2\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \right] \quad (35)$$

Estimativa Indireta da Taxa de Dissipação de Energia – *Large Eddy*

Quando as escalas sub-integrais estiverem em equilíbrio dinâmico, o fluxo de energia cinética turbulenta através do subintervalo inercial será igual à taxa de dissipação da turbulência. Como o fluxo de energia cinética turbulenta pode ser estimado a partir das escalas dentro do subintervalo inercial, esse método não requer que o campo de velocidade seja resolvido até a escala de Kolmogorov. Assim, é possível uma estimativa direta da taxa de dissipação em grandes regiões (KHAN, 2005).

Sheng, Meng e Fox (2000) propuseram o método *large eddy* PIV, explorando uma analogia entre o método de simulação das grandes escalas (LES, do inglês *large eddy simulation*), que envolve a técnica PIV e solução da equação de Navier-Stokes filtrada, ou seja, a utilização de um filtro passa baixo (LPF, do inglês *low pass filter*) é aplicado à equação Navier-Stokes para separar as escalas resolvidas das escalas de sub-grade (SGS, do inglês *subgrid scales*). Segundo Khan (2005), se a escala filtrada estiver na subfaixa inercial, as pequenas SGS devem exibir isotropia local, portanto, um modelo simples de hipótese de viscosidade turbulenta deve ser suficiente para prever as taxas de dissipação. Esse modelo de turbulência utiliza a hipótese de Boussinesq (1877) que se baseia na relação linear entre o tensor das tensões anisotrópico (τ_{ij}), e o tensor médio da taxa de deformação (s_{ij}) para o fechamento das equações médias RANS (MARTINS; RODRIGUEZ, 2019; SCHMITT, 2007) Assim, o modelo proposto por Sheng, Meng e Fox (2000) é dado por:

$$\varepsilon \approx \overline{\varepsilon_{SGS}} = -2\overline{\tau_{ij}s_{ij}} \quad (36)$$

Onde s_{ij} é o tensor da taxa de deformação com escala resolvida, calculado por:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (37)$$

O tensor tensão de SGS (τ_{ij}) não pode ser calculado diretamente e deve ser estimado utilizando o modelo de Smagorinsky, dado pela Equação (38).

$$\tau_{ij} = -C_s^2 \Delta^2 |s_{ij}| s_{ij} \quad (38)$$

Sendo $|s_{ij}|$ a taxa de deformação característica com escala filtrada definida por $\sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$. Dessa forma, a Equação (36) é proposta como:

$$\varepsilon = C_s^2 \Delta^2 (2\overline{s_{ij}s_{ij}})^{3/2} \quad (39)$$

Expandido a Equação (39) em coordenadas cartesianas, a EDR torna-se:

$$\varepsilon_{LES} = C_s^2 \Delta^2 \left[2 \left(\overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2} + 2 \left(\overline{\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y}} \right) \right]^{3/2} \quad (40)$$

Em que Δ é a escala filtrada – tamanho da janela de interrogação utilizado no PIV – e C_s é a constante de Smagorinsky, igual a 0,21 (MEYERS; SAGAUT, 2007). A Equação (40) é idêntica à Equação (19), exceto que a viscosidade molecular é substituída pela viscosidade turbulenta, e que os termos de gradientes de escala resolvida são substituídos por termos de gradiente de escala filtrada. Os termos instantâneos dos produtos cruzados podem ter resultados negativos e positivos, que tendem a se cancelar no processo de média do tempo, concluindo-se que, em comparação com os outros termos da Equação (40), os termos do gradiente de produto cruzado podem ser negligenciados (DARABI et al., 2017; KHAN, 2005). Portanto, a Equação (40) torna-se:

$$\varepsilon_{LES} = C_s^2 \Delta^2 \left[2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} \right]^{3/2} \quad (41)$$

Com a utilização da técnica PIV 2D Clássico, os gradientes de velocidade tangencial e na terceira direção não podem ser determinados, ou seja, cinco termos na Equação (41) não podem ser obtidos. Nesse caso, Sheng, Meng e Fox (2000) estimaram a EDR multiplicando o somatório dos termos conhecidos por $9/5$. Porém, vale ressaltar que alguns termos na Equação (41) têm o coeficiente igual a 2, resultando em um número total de termos de 12 dos quais 6 são desconhecidos. Consequentemente, os gradientes de velocidade devem ser substituídos pela soma dos termos conhecidos multiplicado por $12/6$. Assim, a estimativa da EDR é dada por:

$$\varepsilon_{LES} = C_s^2 \Delta^2 \left[4 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2} + 4 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} + 2 \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} \right]^{3/2} \quad (42)$$

2.3. ESTADO DA ARTE

Na literatura existem inúmeros trabalhos utilizando a técnica PIV para análise de processos químicos em tanques de mistura. A técnica tem sido utilizada com sucesso para a determinação de: características de escoamentos monofásicos (LI; BAO; GAO, 2011; SHARP; ADRIAN, 2001); energia cinética turbulenta e distribuição da taxa de dissipação de energia com ângulo resolvido (DELAFOSSE et al., 2011; GABRIELE; NIENOW;

SIMMONS, 2009); influência da resolução espacial PIV nos valores de EDR (SAARENINNE; PIIRTO; ELORANTA, 2001); modificação de hipótese isotrópica (DELAFOSSÉ et al., 2011).

Guida, Nienow e Barigou (2010) utilizaram um PIV 2D Clássico para investigar os efeitos da posição azimutal do plano de medição em um tanque agitado por um impelidor com pá inclinada (PBT, do inglês *pitch blade turbine*). Os autores analisaram dezessete (17) planos localizados em intervalos de cinco (5) graus entre dois defletores adjacentes utilizando 500 pares de imagens na estimativa do RMS e da média temporal. Os campos de velocidade média e os campos de TKE foram obtidos sob condições turbulentas em função da posição azimutal do plano do *laser*.

Outro exemplo refere-se ao estudo de Liu et al. (2016), que utilizaram o mesmo tipo de impelidor e PIV do trabalho anterior. Os autores analisaram quatro (4) planos, sendo eles 0° , $22,5^\circ$, 45° e $67,5^\circ$ para demonstrar a anisotropia do escoamento no tanque agitado. Para cada experimento, foram utilizados 100 pares de imagens para calcular a velocidade. Os autores analisaram a influência da resolução espacial na distribuição de TKE e EDR e os efeitos do método utilizado para estimar a EDR.

Liu et al. (2016) concluíram que na região do impelidor as variações da TKE são ligeiramente flutuantes e não foi observado uma variação óbvia da TKE para as distribuições médias com 16×16 px e 32×32 px. Em geral, em sistemas monofásicos, as flutuações na TKE e velocidade podem ser inibidas com o aumento da densidade e viscosidade. As duas resoluções espaciais mostram tendências semelhantes, mas na resolução mais refinada (16×16 px) é obtido um maior valor de TKE. No entanto, os valores de EDR aumentam e as regiões com esses valores altos também, o que, segundo os autores indica uma RMS da flutuação da velocidade. Devido à aleatoriedade da turbulência e anisotropia do fluxo de um tanque agitado, o gradiente da RMS da velocidade em relação à localização espacial pode ter uma discrepância maior para uma área de interrogação pequena. É notório que a distribuição de EDR obtida pelos dois métodos (DE e MDE) mostram tendências semelhantes, ou seja, EDR alta na região do impelidor. Porém, utilizando MDE obtém-se uma distribuição de EDR com maiores valores do que a obtida pelo método direto.

Gabriele, Nienow e Simmons (2009) reportaram medidas experimentais PIV com ângulo resolvido para determinação e avaliação dos campos de velocidade, TKE e EDR de

um tanque de mistura agitado por um impelidor com 45° (PBT). Os autores compararam a taxa de dissipação de energia calculada a partir de três métodos (DE, AS e LES) com base no torque do impelidor. O método DE forneceu uma subestimação significativa (de 1/5) devido à limitação das escalas de comprimento, enquanto os métodos AS e LES demonstram superestimar a energia dissipada por um fator de 5 e 2, respectivamente. O método LES mostrou ser o mais promissor e, alterando o valor da constante Smagorinsky, uma melhor convergência foi obtida.

Li, Bao e Gao (2011) estimaram a TKE a partir das distribuições das velocidades média e resolvida em um tanque agitado por um impelidor Rushton com PIV e LDA (do inglês *laser doppler anemometry*). Segundo os autores, os vórtices se movem gradualmente para o fundo do tanque com a rotação das pás do impelidor. Foi verificado que as regiões com altos níveis de TKE são consistentes com os vórtices nas pás do impelidor, e que a energia é transferida pelos vórtices do impelidor para o centro do tanque. Os autores também analisaram a anisotropia do sistema na região de descarga do impelidor e comprovaram que as regiões com os vórtices nas pontas das pás do impelidor se desviam de um estado isotrópico, o que ajuda a explicar por que o modelo $k-\epsilon$ falha em prever campos de fluxo complexos.

Saarenrinne, Piirto e Eloranta (2001) utilizaram a técnica PIV para determinação dos parâmetros de turbulência TKE e EDR. Os autores determinaram uma função entre a resolução espacial e os parâmetros turbulentos. Os resultados obtidos para dois tamanhos de imagem diferentes na mesma posição no campo de escoamento são comparados com tamanhos de áreas de interrogação diferentes. O tamanho da imagem parece produzir dependência em todos os parâmetros estimados, mas não há evidências claras da dependência do tamanho da área de interrogação sobre os campos de distribuição dos parâmetros turbulentos.

Delafosse et al. (2011) propõem a estimativa da EDR a partir de medidas PIV 2C-2D em um tanque agitado por um impelidor axial TTP (Mixel). A EDR é um parâmetro-chave em tanques mecanicamente agitados e seus valores locais podem ter uma forte influência no desempenho de muitos processos. Os autores propõem uma hipótese e a validam na zona de descarga do impelidor, onde são encontrados os valores máximos de EDR. Esse método supõe que todos os gradientes de produtos cruzados desconhecidos são considerados iguais aos medidos experimentalmente. Em adição, os autores observaram a influência da resolução espacial nos valores estimados da taxa de dissipação local. Como a EDR é dissipada

principalmente nas menores escalas turbulentas, ou seja, nas chamadas escalas de Kolmogorov, a resolução espacial das medições de PIV deve ser o mais próxima possível da escala de Kolmogorov.

Quantificar a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação energia fornece uma visão sobre a física do escoamento de um tanque de mistura. A TKE é uma característica já muito bem discutida e definida em consenso na literatura. No entanto, a precisão da estimativa da taxa de dissipação energia usando dados de velocidade medidos por PIV 2D Clássico é afetada pelo método escolhido para de estimar os termos de gradiente de velocidade não resolvidos e a resolução espacial de PIV. Na literatura, ainda não se tem um consenso da melhor forma de se estimar a EDR. Por isso, este trabalho vem como forma de acrescentar mais conhecimento na área das características turbulentas para um melhor entendimento de um processo de mistura monofásico em um tanque de mistura mecanicamente agitado.

CAPÍTULO 3 – Material e Métodos

Nesta seção são apresentados os fundamentos da técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV 2D-2C) e os métodos de quantificação de incerteza experimental. Em seguida, a unidade experimental composta por uma planta piloto de agitação e um sistema PIV é apresentada. Adicionalmente, a metodologia utilizada para a análise das técnicas aplicadas na investigação do escoamento neste processo é introduzida.

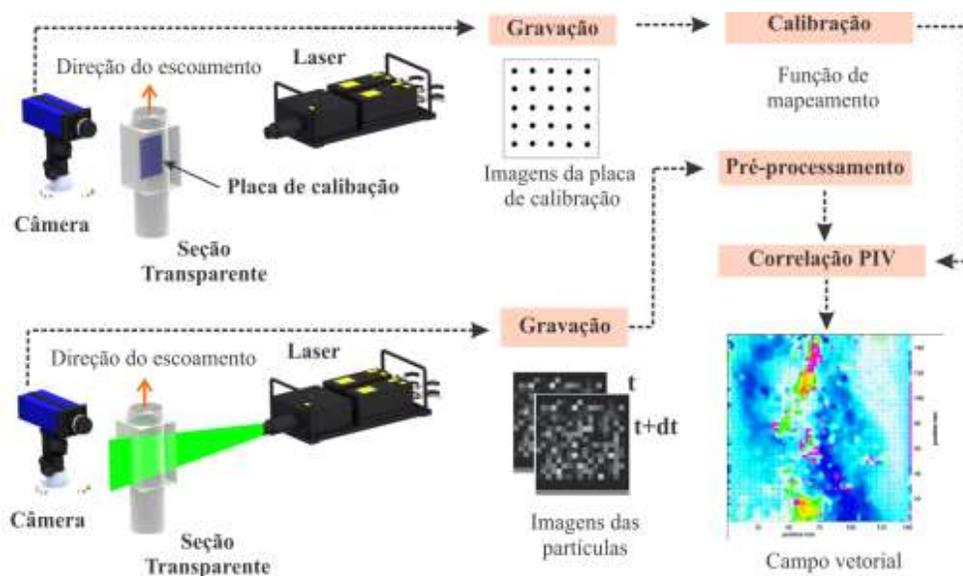
3.1. FUNDAMENTOS DA TÉCNICA PIV

A aplicação da técnica PIV permite obter informações instantâneas de campo para velocidades, bem como velocidades quadradas médias e vórtices de pequena escala (LIU et al., 2016). O desempenho da técnica PIV é determinado pela qualidade das imagens gravadas e pelo tratamento dos dados obtidos após a aquisição (RAFFEL et al., 2007).

3.1.1. PIV 2C-2D

O princípio de funcionamento da técnica PIV 2D Clássico é apresentado na Figura 4. Basicamente, pode-se dividir a análise PIV em cinco etapas: calibração, gravação, pré-processamento de imagem, processamento e pós-processamento. A PIV 2D Clássico emprega partículas traçadoras que são iluminadas por uma folha de luz pulsada, geralmente luz *laser*, e espalham a luz em uma câmera, geralmente localizada a 90° da folha de luz, de modo que o plano do objeto em foco coincida com a fatia iluminada do escoamento (ADRIAN, 1991; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; PRASAD, 2000; RAFFEL et al., 2007; SCARANO, 2013).

Figura 4: Princípio de funcionamento da Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) 2D Clássico.



Fonte: Amaral (2013).

As imagens são formadas em um sensor (CCD ou CMOS) e são, em seguida, transferidas para um computador para análise. Em vez de determinar o deslocamento individual das imagens de partículas, é determinado o movimento médio de pequenas populações de imagens de partículas contidas em regiões, conhecidas como janelas de interrogação, fornecendo um vetor de deslocamento por janela. Na gravação *doubleframe*, um algoritmo PIV (geralmente correlação cruzada) é utilizado para correlacionar as imagens de partícula em dois instantes de tempos (ADRIAN, 1997; ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; PRASAD, 2000; RAFFEL et al., 2007).

A essência da imagem PIV é correlacionar imagens para obter o deslocamento mais provável de um grupo de partículas (plano/espço do objeto) no plano de imagem em um procedimento de calibração. O mapeamento deve ser uma função M (conhecida como Função de Mapeamento) que relacione a localização tridimensional da partícula no fluido com o espaço bidimensional do plano de imagem.

O processo de calibração (Figura 4) do sistema é realizado manualmente pela orientação prévia da linha de visão da câmera, ajustando-se a lente da câmera e certificando-se que a imagem completa esteja em foco, tendo como alvo uma placa de calibração. O

desenho do alvo de calibração é a parte mais importante da realização deste procedimento. As imprecisões na calibração são causadas por distorção óptica devido ao alinhamento óptico impreciso, imperfeição no *design* da lente, refração por janelas ópticas, interfaces de fluidos e outros elementos de óptica em um experimento (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL et al., 2007; SOLOFF; ADRIAN; LIU, 1997).

O pré-processamento PIV tem como objetivo aumentar a qualidade da imagem obtida na gravação antes de ser feito o cálculo de correlação cruzada no processamento. A escolha do tratamento de imagem feita no pré-processamento pode melhorar ou prejudicar as informações contidas na gravação.

Na correlação PIV uma fonte de erro comum é causada pelo *peak locking*, quando o diâmetro de imagem de partícula é na ordem ou menor que 1 *pixel*. Nesse caso, o algoritmo de ajuste de pico não pode avaliar precisamente o deslocamento médio das partículas com uma precisão sub-*pixel* (ADRIAN; WESTERWEEL, 2011; RAFFEL et al., 2007).

3.1.2. Quantificação da Incerteza PIV

Apesar das numerosas aplicações, teoria e contribuições das diferentes técnicas PIV, atualmente não existe nenhum quadro amplamente aceito para quantificação confiável da incerteza de medição PIV (FARIAS et al., 2016; XUE; CHARONKO; VLACHOS, 2014). A situação é agravada pelo fato de que as medições PIV envolvem cadeias de instrumentos e algoritmos com fontes de incerteza acopladas tornando a quantificação da incerteza muito mais complexa do que a maioria das técnicas de medição (XUE; CHARONKO; VLACHOS, 2014).

Método da Estatística de Correlação

O método proposto por Wieneke (2015), denominado estatística de correlação (CS, do inglês *correlation statistics*), quantifica a diferença entre duas janelas de interrogação, mapeada uma sobre a outra, pelo campo de deslocamento calculado. Entretanto, ao invés de identificar a contribuição de partículas individuais, este método analisa a contribuição geral dos *pixels* no formato do pico de correlação. A abordagem baseia-se no pressuposto de que o algoritmo de interrogação PIV deverá sempre produzir um pico de correlação simétrico após a convergência. No entanto, o pico de correlação simétrico surge a partir das contribuições não

só das imagens de partículas correspondidas corretamente, mas também do ruído nas gravações (análise estatística dos padrões de intensidade dos pares de imagens).

A contribuição das imagens de partículas não correspondidas produz a forma assimétrica do pico de correlação. O desvio padrão das contribuições fornece uma estimativa da assimetria esperada devido ao ruído de imagem, que está relacionado com a incerteza do vetor de deslocamento. Em princípio, este método leva em conta todos os fatores como disparidades de partícula, ruído de imagem de fundo ou movimento para fora do plano das partículas que afetam a função de correlação (NEAL et al., 2015; SCIACCHITANO; WIENEKE; SCARANO, 2013; WIENEKE, 2015). A Tabela 1 apresenta um resumo do método descrito.

Tabela 1: Parâmetros analisados e fornecidos para o método de quantificação de incerteza estatística de correlação.

Método	Ano de Desenvolvimento	Pontos Considerados	Parâmetros de Saída
Estatística de Correlação	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Campo vetorial medido; • Contribuições de imagem na função de correlação-cruzada. 	<ul style="list-style-type: none"> • U_x e U_y: Incerteza das componentes x e y de velocidade.

Fonte: Adaptado de Wieneke (2015).

Sciacchitano, Wieneke e Scarano (2013) observaram que a abordagem da estatística de correlação (CS) fornece as estimativas de incerteza mais precisas entre os métodos de quantificação de incerteza. O erro RMS é normalmente reproduzido com precisão maior que 85% mesmo na presença de fontes de erro relevantes para experimentos PIV. O método apresenta uma sensibilidade muito boa a variações do erro de medição no intervalo entre 0,03 e 0,25 *pixel*.

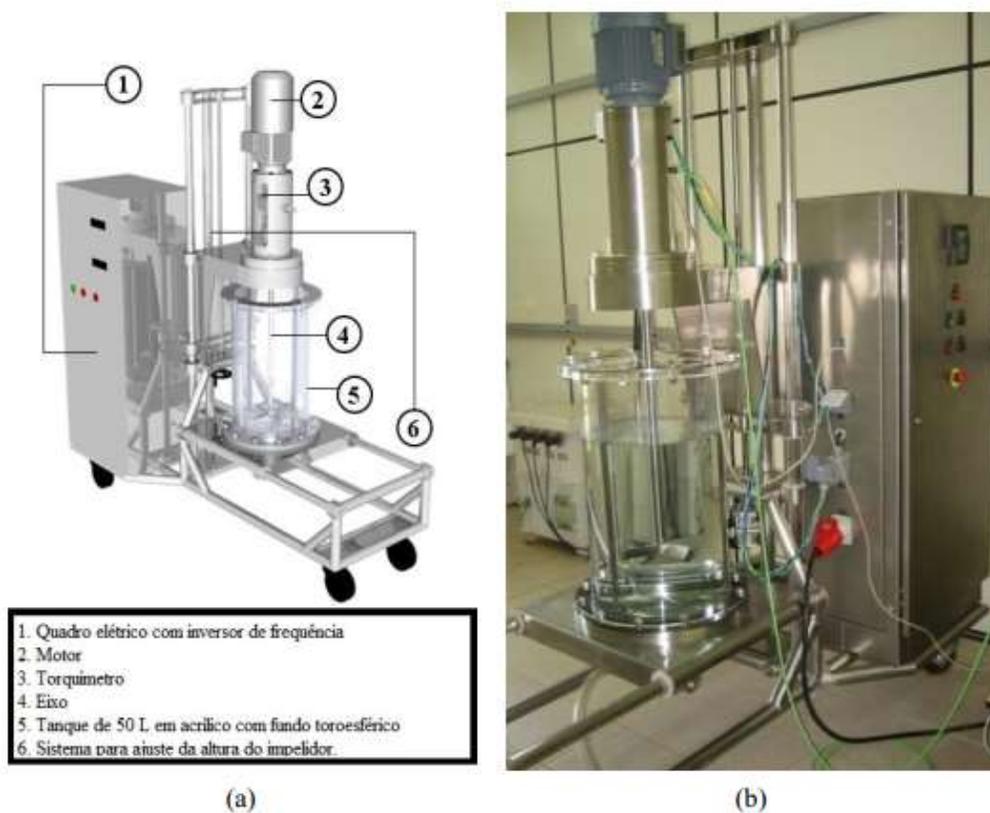
3.2. DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

3.2.1. Planta Piloto de Agitação

A planta piloto de agitação (Figura 5) é composta por um chassi móvel fabricado em aço inoxidável 316L, tanque de 50 L feito em acrílico com fundo toro esférico ASME

10%, eixo rotacional ligado a torquímetro MAGTROL® que permite a leitura de dados de torque e potência.

Figura 5: (a) Representação da planta piloto de agitação; (b) foto real do sistema de agitação.



Fonte: Simões (2017).

O diâmetro interno (T) do tanque é de 380 mm com altura de 760 mm. Será utilizado um impelidor do tipo PBT, do inglês *pitch blade turbine* – um impelidor de quatro (4) pás inclinadas com ângulo de 45° com bombeamento descendente (ou, em inglês, *pumping-down*) que têm largura de 20% do diâmetro do impelidor, ou seja, $\frac{W}{D} = 0,2$ ($D = T/3$ e $C = T/3$) e 4 defletores igualmente espaçados ($B = 0,1 T$). O fluido utilizado nos experimentos será água a temperatura ambiente (Tabela 2), com partículas traçadoras de vidro oca revestida de prata com diâmetro de 10 μm .

Tabela 2: Parâmetros geométricos do tanque de mistura e características do fluido e partículas traçadoras.

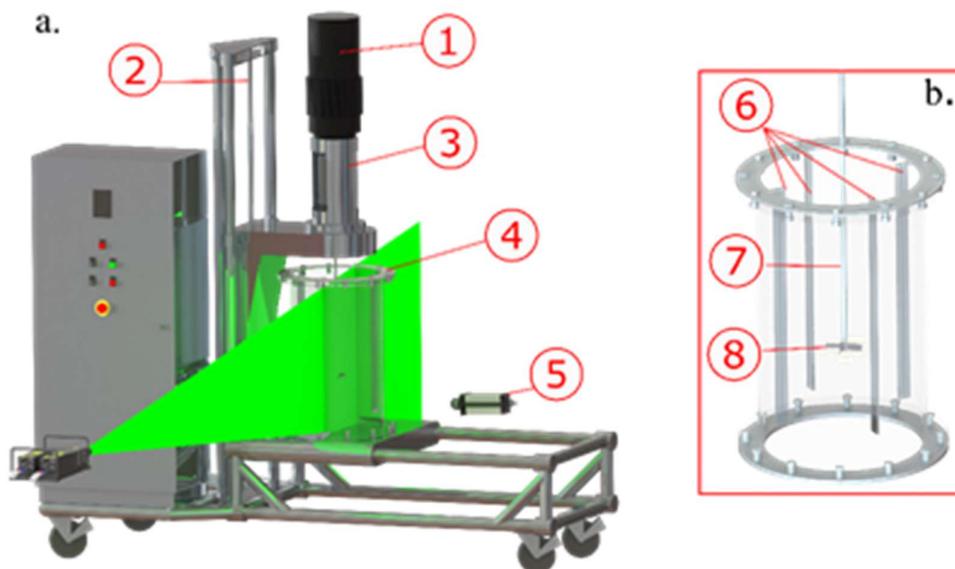
Tanque	
Diâmetro Interno (T)	0,380 m
Altura do Fluido (H)	0,380 m
Volume do Tanque (V)	0,05 m ³
Distância do Impelidor ao Fundo (C)	0,127 m ($T/3$)
Defletor	
Número de Defletores	4
Posição dos Defletores	90°
Largura do Defletor (W)	0,0254 m ($0,2 \times D$)
Impelidor	
Tipo de Impelidor	PBT 45°
Número de Pás	4
Diâmetro do Impelidor (D)	0,127 m ($T/3$)
Fluido	
Fluido	Água
Temperatura	25 °C
Densidade (ρ)	998,2 kg · m ⁻³
Viscosidade Dinâmica (μ)	1,003 mPa · s
Viscosidade Cinemática (ν)	1,005 m ² s ⁻¹
Partículas Traçadoras	
Tipo de Partículas	Esferas de vidro oca revestida de prata
Diâmetro das Partículas	10 μm

3.2.2. Sistema PIV

As imagens foram obtidas utilizando um sistema PIV 2D-2C (duas dimensões e duas componentes) desenvolvido pela *Dantec Dynamics*. As partículas traçadoras foram

esferas de vidro oca revestidas de prata com diâmetro médio de $10 \mu\text{m}$. Para iluminação das partículas foi utilizado um *laser* pulsado Nd:YAG 532 nm , energia de 200 mJ por pulso e a espessura da folha de luz foi de 2 mm . A área total investigada foi de $0,43 \text{ m} \times 0,57 \text{ m}$ (mantendo diâmetro de imagem de partícula igual a 3 pixels). A gravação foi feita utilizando uma câmera do modelo FlowSense EO 8M-21 $3312 \times 2488 \text{ pixels}$, 21 fps com lentes que utilizam filtro de alto desempenho para 527 nm e 532 nm . Para garantir a convergência estatística dos resultados PIV, foram gravadas 1.000 pares de imagens em modo *doubleframe* com um tempo *interframe* de $100 \mu\text{s}$. A calibração foi feita com uma placa de $270 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$. As imagens foram processadas utilizando a correlação padrão (SCC - *standard cross-correlation*) e otimizadas a partir de ferramentas de qualidade como a SNR (*signal-to-noise-ratio*). A Figura 6 mostra a configuração do sistema PIV 2D Clássico com uma câmera. Toda estrutura do PIV é suportada por perfis de alumínio (estruturas adaptáveis).

Figura 6: (a) Representação da configuração do sistema PIV 2D Clássico na planta piloto de agitação, 1. Motor, 2. Eixo para ajuste da altura do impelidor, 3. Torquímetro, 4. Tanque de agitação, 5. Câmera; (b) configuração do tanque, 6. Defletores, 7. Eixo, 8. Impelidor PBT 45° .



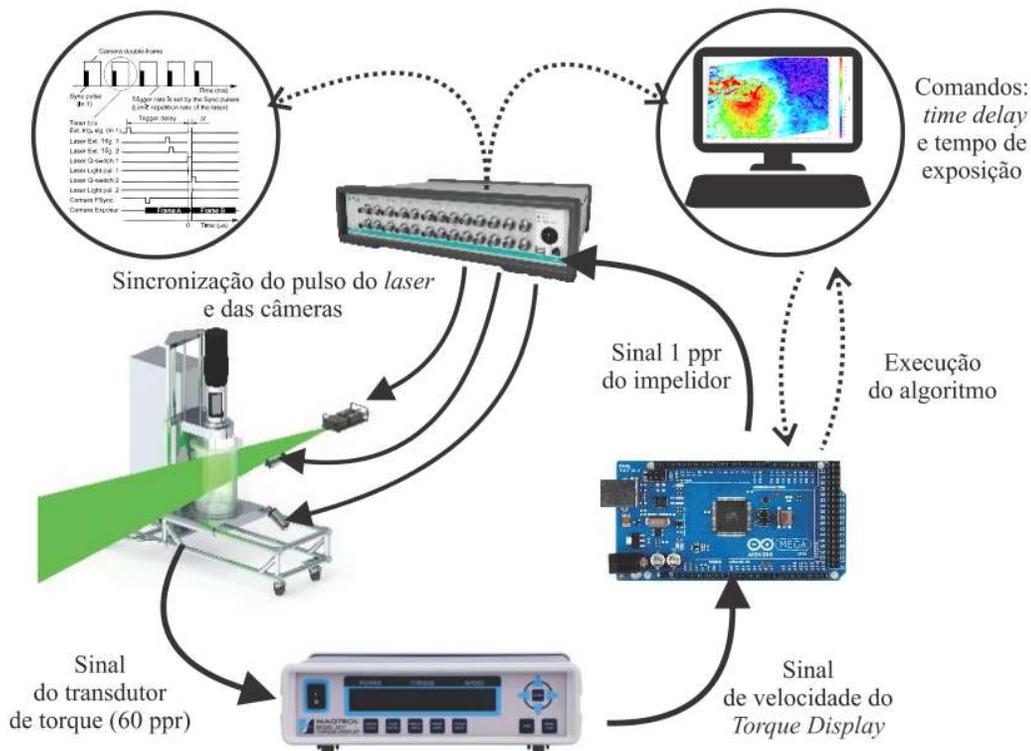
Fonte: Elaborado pelo grupo.

Uma forma de reduzir os ruídos no espaço físico causados pela reflexão da luz *laser* na parede cilíndrica do tanque é oferecida pelo posicionamento da câmera próxima o suficiente do tanque para manter uma resolução mais refinada. Esse procedimento é utilizado

para minimizar os efeitos da curvatura para evitar ou ao menos reduzir as distorções nas imagens.

Experimentalmente, a metodologia com ângulo resolvido foi utilizada para fornecer um pulso a cada uma revolução do eixo do impelidor. Para isso, o sinal de um *encoder* fornecendo 60 pulsos por revolução (ppr) foi configurado como *input* no *Torque Display* MAGTROL® 3410 (com o transdutor de torque do tanque devidamente calibrado). Em seguida, o sinal de velocidade em ppr do *Torque Display* foi configurado como entrada em um microcontrolador (Arduino). Esse microcontrolador, por sua vez, calculava exatamente cada revolução do eixo do tanque por meio de um algoritmo. O sinal de saída do microcontrolador foi então conectado ao sincronizador do sistema PIV. A partir disso, o disparo de gravação das câmeras e do acionamento do *laser* ficaram sob o controle de um gatilho externo, que nesse caso, foi de um pulso por revolução do eixo do impelidor. A Figura 7 ilustra o sistema descrito acima.

Figura 7: Metodologia experimental para obter dados por ângulo resolvido.

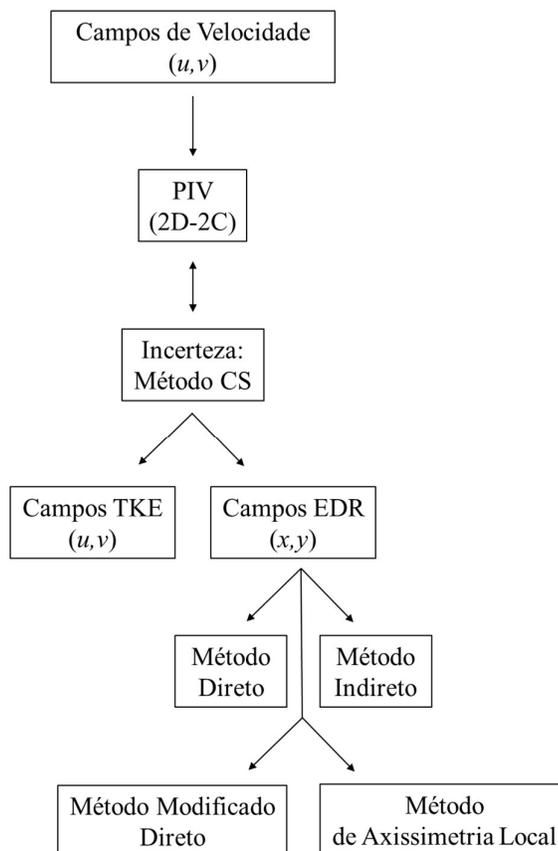


Fonte: Elaborado pelo grupo.

3.3. MÉTODOS

A variação do ângulo resolvido no mapeamento PIV foi feita para analisar o efeito da posição do impelidor no escoamento, conseqüentemente fornecendo uma maior acurácia na quantificação dos parâmetros de turbulência. As medidas em ângulo resolvido (AR) foram realizadas considerando uma posição fixa entre dois defletores consecutivos (45°), e variando o plano relativo a posição do impelidor, considerando o ponto 0° de partida neste plano. Em outras palavras, a ponta do impelidor foi alinhada a 0° relativo ao plano de 45° entre dois defletores. Toda a aquisição de dados foi realizada utilizando o software *Dynamic Studio*, da *Dantec Dynamics*. A Figura 8 apresenta a metodologia empregada nas medições experimentais do tanque de agitação. A avaliação dos resultados é dada pela análise dos campos vetoriais de velocidade e TKE, e a estimação da EDR com o auxílio do *software MATLAB* por diferentes métodos: suposição de axissimetria local (AS), método direto (DE), método modificado direto (MDE) e método indireto (LES), conforme apresentados no Capítulo 2 (Seção 2.2 – Propriedades do Escoamento Turbulento).

Figura 8: Fluxograma da metodologia que será empregada nas medições experimentais.



Utilizando a metodologia descrita na Figura 8, foram calculados os parâmetros TKE e EDR a partir dos campos de velocidade obtidos por medições PIV variando o ângulo resolvido. No processamento de imagens foi aplicado a estratégia iterativa *multigrid* de deformação da janela de interrogação, que é realizada a partir da adaptação da resolução espacial (KIM; SUNG, 2006). Dessa maneira, o tamanho da janela de interrogação foi diminuído progressivamente em 5 passos, sendo possível obter 6 resoluções espaciais diferentes para analisar os campos de TKE e EDR: 36×36 px (1,08 mm), 27×27 px (0,81 mm), 20×20 px (0,6 mm), 15×15 px (0,45 mm), 10×10 px (0,3 mm) e 5×5 px (0,15 mm). Para isso, as imagens obtidas foram processadas utilizando a correlação padrão (SSC – *standard cross-correlation*), otimizadas a partir da ferramenta de qualidade SNR (*signal-to-noise-ratio*) e analisadas pelo método de estatística de correlação (CS) proposto por Wieneke (2015). Os experimentos foram realizados com a câmera focada numa área de imagem limitada para obter níveis de resolução espacial mais refinados. Após o processamento, os campos obtidos foram utilizados para determinar a TKE com duas componentes (Equação (17)). Com a utilização dos resultados da técnica PIV 2D-2C foi possível estimar a EDR pelo método direto (Equação (23)) e método direto corrigido (Equação (26)), e assim avaliar a influência da resolução espacial nos campos obtidos. Adicionalmente, a EDR também foi estimada pelo método da suposição de axissimetria local (Equação (35)) e pelo método *Large Eddy Simulation* (Equação (42)). Para concluir o trabalho, uma avaliação das simplificações utilizadas pelos métodos supracitados para estimar a terceira componente nos parâmetros turbulentos foi realizada.

CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão

Nesta seção, os resultados experimentais sobre a investigação das características turbulentas em termos de TKE e EDR a partir dos campos de velocidade obtidos por PIV (2C-2D) com ângulo resolvido em um tanque agitado são apresentados e discutidos em três partes. A primeira delas apresenta os resultados da verificação do regime do escoamento do fluido no tanque mecanicamente agitado. Na segunda parte, são apresentados e discutidos os resultados da influência da resolução espacial PIV nos campos de velocidade e TKE. Finalizando, a terceira parte apresenta a influência da resolução espacial PIV nos campos de EDR assim como a comparação dos diferentes métodos para estimação deste parâmetro turbulento.

4.1. VERIFICAÇÃO DO REGIME DO ESCOAMENTO DO FLUIDO NO TANQUE MECANICAMENTE AGITADO

Um ponto importante a ser verificado, antes de entrar no mérito do cálculo da escala de Kolmogorov (η), energia cinética turbulenta (TKE) e taxa de dissipação de energia (EDR), é o regime de operação (laminar, transição ou turbulento) do tanque agitado. A maioria dos artigos que aborda o tema tanque de mistura e turbulência utiliza apenas o número de Reynolds (Re) para caracterizar o regime. O regime laminar para muitos impelidores corresponde a um $Re < 10$, sendo que, neste caso, existe uma relação linear entre Re e o número de potência, N_p , onde $(N_p) \propto 1/Re$. Segundo Doran (2013), a energia necessária para o regime/fluxo turbulento é independente da viscosidade do fluido, mas diretamente proporcional à densidade do fluido. Grande parte considera que a turbulência ocorre para números de Reynolds maiores que 10^4 ou 20^4 . No entanto, segundo Doran (2013) e Ghotli et al. (2013), pode-se estimar os diferentes regimes por meio da curva de Número de Potência versus Reynolds ($N_p \times Re$), assim como demonstra a Figura 2, apresentada no Capítulo 2 (Seção 2.1 – Fundamentação Teórica).

Para o sistema tanque e impelidor utilizado neste trabalho (Figuras 5 e 6, Capítulo 3), operado a uma velocidade de 660 rpm, é plausível afirmar que o regime é turbulento. No caso deste trabalho, utilizando como exemplo a menor velocidade de rotação do impelidor, de 150 rpm (ou 2,5 rev/s) e com as propriedades da água em temperatura ambiente ($\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e $\mu = 1,003 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, densidade e viscosidade dinâmica, respectivamente), o número de Reynolds pode ser calculado pela Equação (1). Como a viscosidade cinemática (ν) é definida pela relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, o número de

Reynolds também pode ser calculado pela Equação (43). O resultado obtido foi de $3,91 \times 10^5$ (Tabela 3), o qual se trata de um valor característico do regime turbulento, ou seja, $Re > 10^4$.

$$Re = \rho ND^2 / \mu \quad (43)$$

Tabela 3: Dados calculados para N_p e Re a partir dos dados obtidos experimentalmente para o tanque mecanicamente agitado por um impelidor PBT 45°.

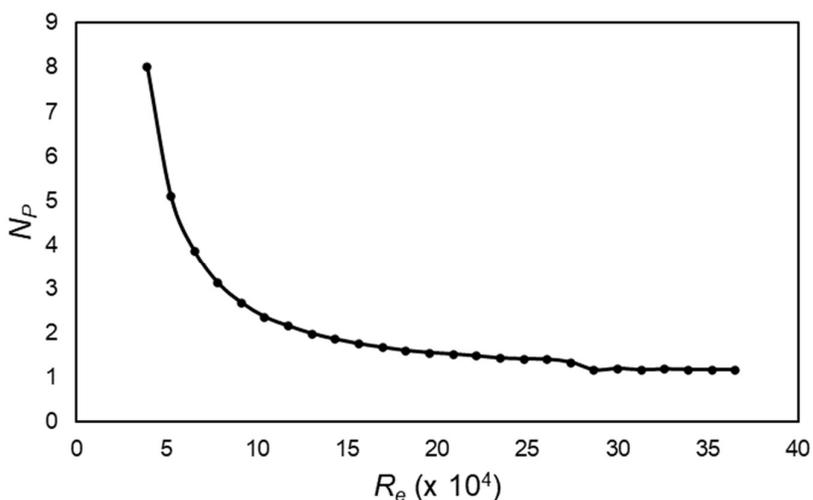
Velocidade (N), rpm	Número de Reynolds (Re), $\times 10^4$	Torque (M), Nm	Potência (P), W	Número de Potência (N_p)
150	3,91	0,06	3,87	8,01
200	5,22	0,08	5,84	5,10
250	6,52	0,13	8,65	3,86
300	7,82	0,18	12,11	3,13
350	9,13	0,24	16,47	2,68
400	10,43	0,31	21,63	2,36
450	11,74	0,41	28,16	2,16
500	13,04	0,51	35,54	1,98
550	14,35	0,64	44,32	1,86
600	15,65	0,79	54,28	1,75
650	16,95	0,95	65,94	1,68
660	17,19	0,99	68,49	1,66
700	18,26	1,14	78,67	1,60
750	19,56	1,36	93,90	1,55
800	20,87	1,62	111,74	1,52
850	22,17	1,89	130,29	1,48
900	23,47	2,16	149,62	1,43
950	24,78	2,51	173,76	1,41
1.000	26,08	2,91	201,01	1,40
1.050	27,39	3,21	222,07	1,34
1.100	28,69	3,77	260,80	1,16
1.150	30,00	4,18	288,95	1,20
1.200	31,30	4,79	331,31	1,17
1.250	32,60	5,34	369,29	1,18
1.300	33,91	5,98	413,62	1,17
1.350	35,21	6,69	462,11	1,17
1.400	36,52	7,36	508,98	1,18

Com base nos dados obtidos experimentalmente com a variação da velocidade angular do impelidor (N) e aferição do torque (M) e potência (P) pelo torquímetro MAGTROL®, foi possível determinar o torque em função da rotação para o impelidor PBT

45°. Assim, para o exemplo utilizado com $N = 150 \text{ rpm}$, determinou-se $M \cong 0,06 \text{ Nm}$, o que implica em $P \cong 3,9 \text{ W}$.

Estimando o N_p com a Equação (7), é possível correlacionar os números de Reynolds e Potência (Figura 9). Analisando a Figura 9, observa-se que com o aumento do número de Reynolds para cerca de 10.000 – transição para turbulento – a curva de potência tem uma tendência ao comportamento horizontal, isto é, N_p sofre pouca variação com Re . O mesmo fenômeno foi observado por Ghotli et al. (2013). Como pode ser visto na Figura 9 e Tabela 3, para altos valores de Re , correspondentes ao regime turbulento, a curva atinge um valor de N_p quase constante, próximo de 1,2, o que pode ser observado com maior clareza para Re maiores que 29×10^4 , correspondente a velocidades angulares superiores a 1.100 rpm. Essa tendência de N_p para um valor constante está associada ao comportamento da potência consumida que tende a ser proporcional ao cubo da velocidade angular, ou seja, com um aumento da velocidade angular tem-se maior resistência ao escoamento dentro do tanque, e assim torna-se necessário maior trabalho para se ter um equilíbrio. Porém, por conta do fluido utilizado, na faixa de N_p constante a agitação correspondente encontrada foi muito vigorosa. Dessa forma, por conta da estabilidade mecânica, a velocidade de 660 rpm foi utilizada para as próximas análises.

Figura 9: Correlação entre o número de Reynolds e número da potência com dados experimentais do sistema tanque e impelidor.



É importante mencionar que o número de potência, N_p , pode indicar a atribuição de um regime pseudo-turbulento que, por sua vez, pode estar associado a alguns fatores como a forte resistência do fluido, altos níveis de torque e transferência de uma maior potência na mesma velocidade de operação. Esses são uns dos principais motivos para empregar a técnica PIV com ângulo resolvido, que atenua a periodicidade gerada pela passagem das pás. Para estimar os parâmetros turbulentos como TKE e EDR, a questão da pseudo-turbulência possui maior relevância. Por exemplo, no trabalho de Escudié e Liné (2003), os autores relatam que diferentes tipos de movimento coexistem no tanque: o fluxo médio (ou circulação global), as flutuações periódicas (ou vórtices de arrasto) induzidas pela rotação da pá na região do impelidor e as flutuações turbulentas (que dissipam a energia cinética). Além disso, no trabalho de Delafosse et al. (2008), seguindo a mesma lógica, dois tipos de energia cinética são distinguidos: uma energia cinética periódica e uma energia cinética turbulenta, sendo a energia cinética total do fluxo a soma dessas duas. Experimentalmente, a transferência da energia cinética entre as componentes periódicas e turbulentas foi investigada por Escudié e Liné (2003) que, assumindo que o movimento organizado é gerado pelas pás do impelidor, propôs a sincronização da aquisição de dados com a posição da pá para ser usada na separação das flutuações periódicas e turbulentas.

4.2. EFEITO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NOS CAMPOS DE VELOCIDADE E DE ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (TKE) EM UM TANQUE AGITADO UTILIZANDO MEDIDAS PIV

Segundo Escudié e Liné (2003), o tamanho da área de medição deve ser tão grande quanto possível, a fim de determinar o campo de velocidade em um grande domínio. Contudo, a resolução espacial deve ser pequena o suficiente para que qualquer redemoinho turbulento possa ser identificado. Por exemplo, as velocidades/gradientes do fluido são muito mais altas perto do impelidor, mas a magnitude da velocidade diminui rapidamente com a maior parte do fluxo em relação ao domínio restante (regiões de grande circulação geralmente possuem velocidades mais baixas em relação ao impelidor). Em adição, quanto maior o diâmetro do tanque e velocidade de rotação, é necessária uma resolução espacial mais refinada para se ter resultados confiáveis. Esse fato condiz com o espectro da turbulência sem a interferência da macro circulação ou da contribuição periódica da passagem das pás do

impelidor. Porém, é importante destacar que ao refinar a resolução espacial (ou seja, diminuir a janela de interrogação – Δ) maior será a dificuldade para obter esses dados experimentalmente, por conta do tamanho da imagem, tempo maior de processamento e sensibilidade ao ruído.

Desta forma, em relação à resolução espacial PIV (vetor/mm² ou vetor/pixel²), pode-se resumir três fatores que contribuem diretamente: a resolução do sistema de imagem (pixel/mm), a concentração de imagem de partícula (ppp) e o ruído no plano de correlação. O primeiro e o segundo são definidos na gravação, enquanto o terceiro surge do processamento PIV. É importante ressaltar que neste trabalho a avaliação do efeito da resolução espacial utilizou a deformação da janela de interrogação, que é realizada a partir da adaptação da resolução espacial (espaço físico) pela estratégia iterativa *multigrid* (KIM; SUNG, 2006). Adicionalmente, pode-se realizar um estudo em relação à resolução espacial pelo espaço óptico, ou seja, utilizando toda a resolução da câmera, aplicando diferentes lentes ou aproximando a câmera.

O tamanho da janela de interrogação, ou seja, a resolução espacial PIV, pode ser otimizado tendo como base o *signal-to-noise-ratio* (SNR) e a coerência do campo bruto. Com o comprimento da escala de Kolmogorov calculado pela Equação (2), usando a taxa média de dissipação de energia ($\bar{\varepsilon}_T$) assumindo que a taxa de dissipação de energia é uniforme no tanque, ou seja, $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_T$ (LIU et al., 2016). A $\bar{\varepsilon}_T$ foi de $1,37 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$, determinada pela Equação (44), sendo os dados obtidos experimentalmente (Tabela 3). Desta forma, o comprimento da escala de Kolmogorov, η , obtido foi de $0,029 \text{ mm}$ e, nesse trabalho, foi possível obter uma janela de interrogação, Δ , de até $0,15 \text{ mm}$, como mostrado anteriormente no Capítulo 3 (Seção 3.3 – Métodos).

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon}_T = P/\rho V \quad (44)$$

Em que P representa a potência e V o volume do tanque.

Saarenrinne et al. (2001) reportaram que é possível obter uma precisão de 95% na estimativa de TKE para $\Delta \approx 20\eta$ e 65% de precisão para $\Delta \approx 90\eta$. Assim, aplicando esse conceito para a resolução espacial de $10 \times 10 \text{ px}$ tem-se $\Delta \approx 10\eta$ ($\Delta/\eta = 3,0 \times 10^{-4} \text{ m}/2,9328 \times 10^{-5} \text{ m} = 10,23$), ou seja, uma representação próxima de 100% para os campos de TKE. No caso da resolução espacial menos refinada avaliada ($36 \times 36 \text{ px}$), o valor calculado foi de $\Delta \approx 37\eta$ ($\Delta/\eta = 0,00108 \text{ m}/2,9328 \times 10^{-5} \text{ m} = 36,82$) que

equivale a uma precisão de 85% para TKE. Essas resoluções possibilitam trabalhar com medidas PIV de confiabilidade para medidas TKE. Vale ressaltar que as possíveis regiões de interesses (com altos gradientes) concentram-se próximas às extremidades do impelidor.

As Figuras 10 e 11 apresentam os campos de velocidade e TKE com diferentes resoluções espaciais obtidos pela a técnica PIV com ângulo resolvido para o plano de 0° . Os campos estão normalizados com a velocidade da ponta do impelidor, U_{tip} (Equação (45)) para a média do módulo da velocidade e U_{tip}^2 para a TKE, respectivamente. Assim, os campos de velocidade e TKE foram normalizados por aproximadamente $4,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e $18,7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, respectivamente.

$$U_{tip} = \pi ND \quad (45)$$

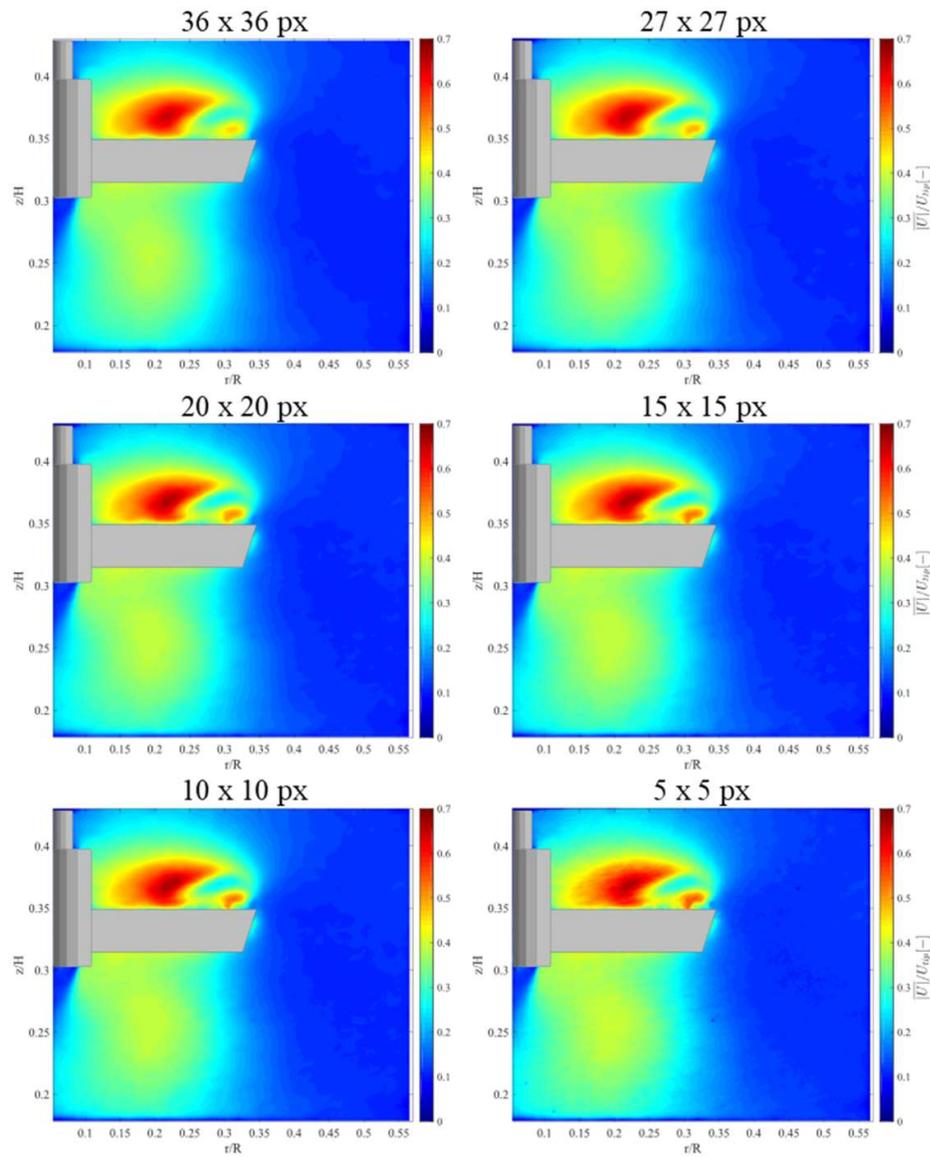
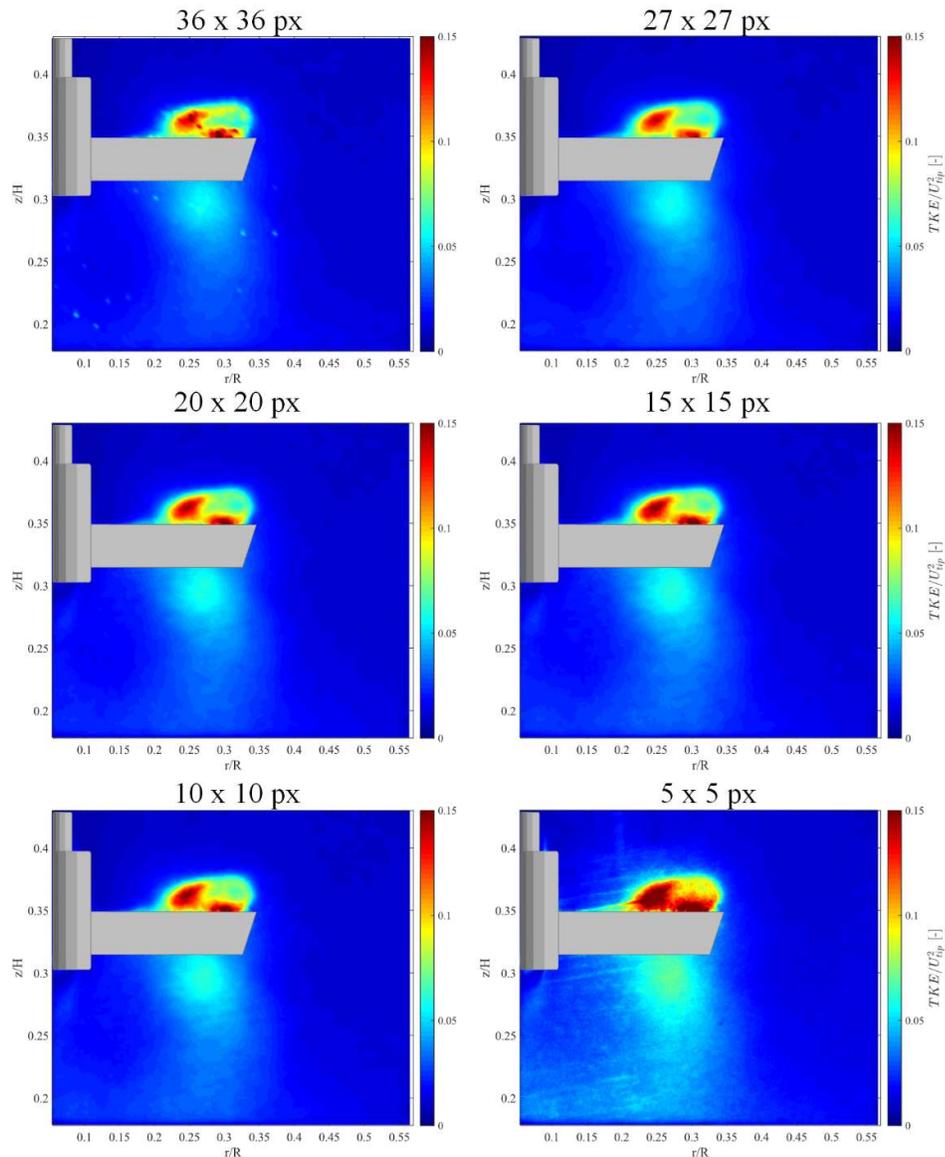
Figura 10: Campos da velocidade com diferentes resoluções espaciais para o plano de 0° .

Figura 11: Campos de TKE com diferentes resoluções espaciais para o plano de 0° .

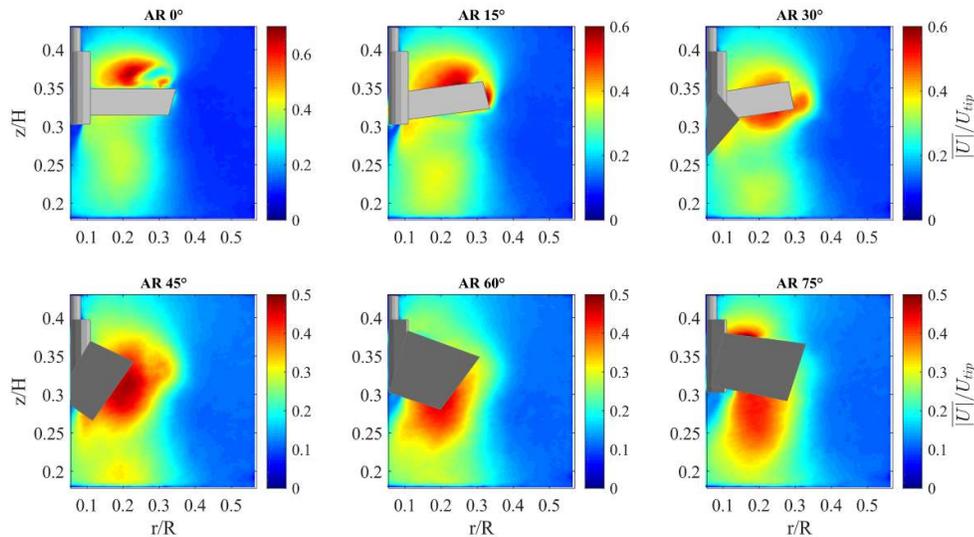


É interessante observar que tanto nos campos de velocidade (Figura 10) quanto nos campos de TKE (Figura 11), embora todas as resoluções mostrem tendências semelhantes – os parâmetros de 1ª e 2ª ordem são pouco afetados pela mudança da resolução espacial –, os campos de velocidade e TKE obtidos usando a resolução de 10×10 px têm os valores mais altos, excluindo os campos com resolução espacial de 5×5 px dessa análise já que apresentaram muitos ruídos. Por exemplo, o campo de TKE obtido usando a resolução espacial de 10×10 px é 15% maior na proximidade impelidor quando comparado com o de resolução espacial menos refinada (36×36 px). Isso ocorre, pois, maiores janelas de

interrogação tendem a omitir flutuações turbulentas de pequenas velocidades trazidas por pequenos turbilhões, e as janelas de interrogação menores reservam valores maiores de velocidades locais e turbilhões turbulentos menores. Consequentemente, aumentando-se os valores dos vetores de velocidade, têm-se a maior probabilidade de aumentar a TKE (LIU et al., 2016). Entretanto, para a resolução mais refinada (5×5 px), foi observada uma superestimação das características turbulentas pela interferência dos ruídos nas medidas PIV 2C-2D. Segundo Tanaka e Eaton (2007), esse efeito pode acontecer devido diversos fatores nas medições PIV como a possível insuficiência de pares de imagens de partículas correlacionadas, reflexões da luz do laser e diâmetro de partícula muito próximo ao valor de Δ . Esse fato será explicado melhor na Seção 4.3. Este resultado implica que a resolução espacial de 10×10 px é a mais adequada para a análise dos campos de velocidade e TKE para a condição avaliada neste trabalho. Outro fato importante reside nas regiões coincidentes com pontos de máximas velocidade e TKE, encontrados na parte superior do impelidor, revelando que a área com gradientes elevados é realmente restrita.

Como pode ser observado na Figura 12, que apresenta os campos de velocidade variando o ângulo resolvido, as variações entre os planos estão relacionadas às variações das flutuações e estruturas turbulentas, como os vórtices formados atrás da pá do impelidor. Ressalta-se que no estudo por ângulo resolvido, a pá do impelidor tem posição fixa (CHUNG, SIMMONS; BARIGOU, 2009; ROY; ACHARYA; CLOETER, 2010). Pela figura, nota-se que os maiores valores nos campos de velocidade normalizado ($|\bar{U}|/U_{tip}$) estão na região de descarga do impelidor, ou seja, quando a pá está no plano (AR 0°), obtendo um máximo de 0,64 entre a posição radial de $0,24 < r/R < 0,26$. Nesta área específica, existe um grande desvio entre as velocidades medidas de um plano de ângulo resolvido para outro. As velocidades nesta região são sensíveis ao ângulo em relação à pá e a região se move ligeiramente para o fundo do tanque e para longe do impelidor conforme o ângulo aumenta, ou seja, as velocidades tomam seus valores máximos próximos à região da pá e reduzem lentamente ao se afastar do impelidor. No entanto, a distribuição espacial de velocidade em $r/R > 0,4$ e em todo o volume do tanque, permanece relativamente constante ($|\bar{U}|/U_{tip}=0,1$).

Figura 12: Campos da velocidade com resolução espacial de 10 x 10 px para os planos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°.

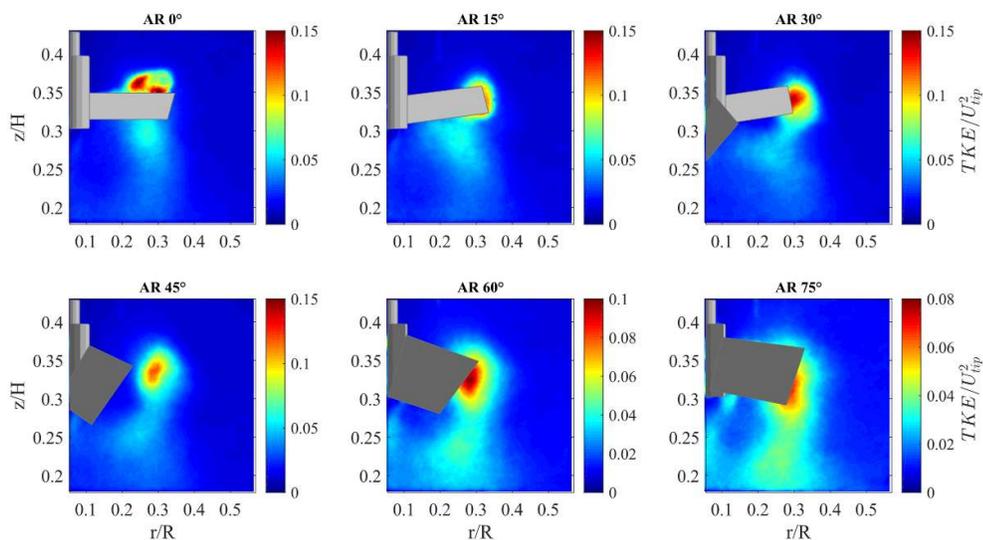


Nos campos de TKE/U_{tip}^2 , apresentados pela Figura 13, os valores de TKE/U_{tip}^2 mais altos ocorrem periodicamente em locais por onde passam os vórtices. Como pode ser observado, essa região é contida na área de descarga do impelidor. Áreas com $TKE/U_{tip}^2 > 0,1$ mostram a presença do vórtice, que se afasta da pá conforme a rotação do ângulo aumenta e persiste até AR 75°. Em outras palavras, as variações para os diferentes planos com ângulo resolvido no campo da distribuição de TKE que são observadas na região mais afastada do impelidor ocorrem devido ao vórtice gerado pela pá anterior. Com o aumento do ângulo, a região com altos TKE/U_{tip}^2 se afasta da pá e, ao mesmo tempo, essa região torna-se maior e mais espalhada na maior parte da região de circulação (ALBERINI et al., 2017; CHUNG, SIMMONS; BARIGOU, 2009; GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009; KHAN; RIELLY; HARGRAVE, 2004) com valores de $TKE/U_{tip}^2 > 0,04$. Desta forma, na Figura 13, a região de maior TKE encontra-se na região de descarga do impelidor com valor máximo de 0,11, para AR 15° na posição radial $r/R = 0,32$. Por outro lado, as regiões com $z/H > 0,4$ apresentam energia cinética muito baixa – na ordem de $TKE/U_{tip}^2 = 0 - 0,02$.

A partir dessas análises, conclui-se que essas medidas são recomendadas para a validação de modelos obtidos por CFD. A metodologia da determinação dos campos de velocidade e de TKE pela variação do ângulo resolvido remove a contribuição do efeito da

periodicidade das pás e, conseqüentemente, não superestimam os níveis de turbulência (SCHAFER et al., 1998; YIANNESKIS, 2000).

Figura 13: Campos de TKE com resolução espacial de 10 x 10 px para os planos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°.



4.3. ESTIMAÇÃO DA TAXA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA (EDR) EM UM TANQUE MECANIMANENE AGITADO UTILIZANDO MEDIDAS PIV

De acordo com Saarenrinne et al. (2001), na faixa dissipativa as tensões de Reynolds aumentam com a redução do tamanho da área de interrogação. Assim, passa-se então da microescala de Taylor para a escala de Kolmogorov. Nessa última escala, a resolução espacial é fortemente ligada à taxa de dissipação de energia, a EDR. Quando o espaçamento da janela de interrogação é maior que a escala de Kolmogorov, a dissipação é subestimada devido às pequenas flutuações que são filtradas.

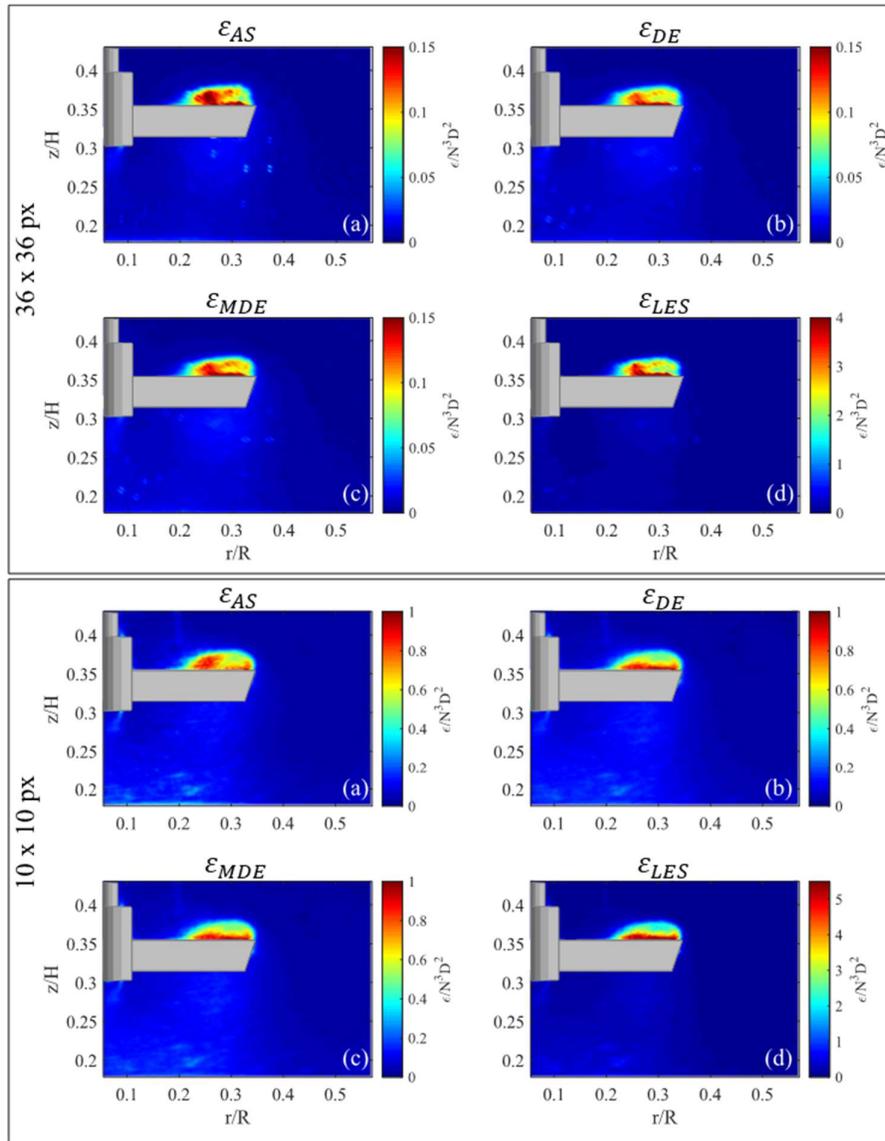
A Figura 14 apresenta os resultados dos campos de distribuição de EDR obtidos em medidas AR 0° para duas resoluções espaciais, 36 × 36 px (1,08 mm) e 10 × 10 px (0,3 mm). Os campos de EDR foram estimados pelos quatro métodos descritos no Capítulo 2. Os campos estão representados por valores normalizados pela velocidade de rotação (N) e diâmetro do tanque (D), na relação $\varepsilon/N^3 D^2$.

Os resultados para a resolução de 36×36 px mostram que os valores de EDR normalizados variaram em um intervalo de 0 a 0,15, considerando os métodos AS, DE e MDE. Já para o método LES, o valor máximo local de EDR normalizado foi igual a 4. Para os campos de EDR obtidos para a resolução espacial de 10×10 px, os valores de máxima $\epsilon/N^3 D^2$ aumentaram 85% para os primeiros 3 métodos, com um valor máximo igual a $\epsilon/N^3 D^2 = 1$, enquanto que pelo método LES, o aumento entre as duas resoluções espaciais foi menor, com apenas 20% de variação em relação à resolução de 36×36 px.

É evidente o aumento da coerência espacial nos campos de distribuição de EDR normalizados ($\epsilon/N^3 D^2$) pela variação da janela de interrogação de 1,08 mm para 0,3 mm (Figura 14). Verifica-se que a maior taxa de dissipação de energia cinética turbulenta está localizada logo acima da ponta do impelidor, e concentra-se nessa região para ambas as resoluções espaciais no plano AR 0° . Em contrapartida, longe desta região, pouca variação da taxa de dissipação de energia foi observada. Este comportamento está relacionado com a formação e dissipação dos vórtices atrás da pá de referência, que ocorre a partir deste ângulo em um movimento circulatório por meio da interação das pás do impelidor com os defletores, como descrito por Schäfer et al. (1998). Em outras palavras, uma mudança significativa da velocidade causada pelo movimento das pás ocorre nesta região próxima ao impelidor, o que gera considerável dissipação de energia logo atrás e acima da pá de referência em AR 0° .

O fato de a turbulência ter sido analisada pela abordagem de ângulo resolvido houve uma atenuação da periodicidade induzida pelo cruzamento das pás, de modo que os valores de dissipação encontrados têm uma contribuição principalmente randômica. Em outras palavras, essa é a turbulência intrínseca ao escoamento (YIANNESKIS, 2000).

Figura 14: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36×36 px e 10×10 px para o plano de 0° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.



As Figuras 15 e 16 mostram a distribuição de $\epsilon/N^3 D^2$ estimada pelos mesmos métodos e mesmas resoluções espaciais, porém agora para as medidas de AR 45° e 75° , respectivamente. Analisando Figura 15 para AR 45° , é possível observar desvios dos valores máximos de $\epsilon/N^3 D^2$ devido ao aumento da resolução espacial para os modelos AS, DE e MDE, cujo valor máximo teve um aumento de 87,5%, sendo o valor máximo igual a $\epsilon/N^3 D^2 = 0,4$ na resolução espacial de 10×10 px. Já para o modelo LES, com o incremento da janela de interrogação para 0,3 mm, o valor máximo de $\epsilon/N^3 D^2$ passou de 0,8 para 1,5,

representando um aumento de 46,67%. Com relação à posição angular AR 75°, cujos campos estão apresentados na Figura 16, verificou-se que os desvios entre os valores máximos de ε/N^3D^2 , com relação às resoluções espaciais, foram próximos a 90% para os três primeiros métodos. O valor máximo apresentado foi de $\varepsilon/N^3D^2 = 0,25$ para os métodos AS e DE, e de 0,3 para o método MDE na resolução espacial de 10×10 px. Para o método LES, a variação entre as resoluções foi de 50%, com um valor máximo igual a $\varepsilon/N^3D^2 = 0,6$ na resolução mais refinada.

Figura 15: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36×36 px e 10×10 px para o plano de 45° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.

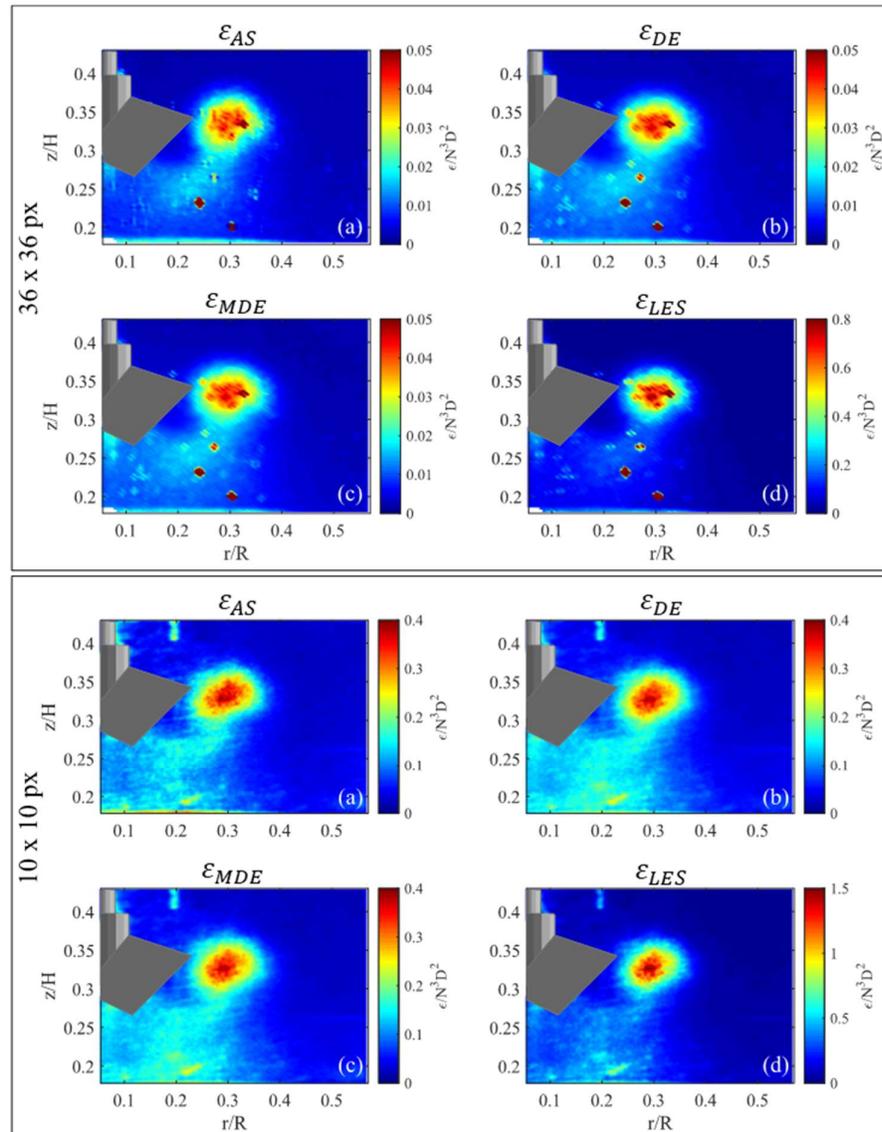
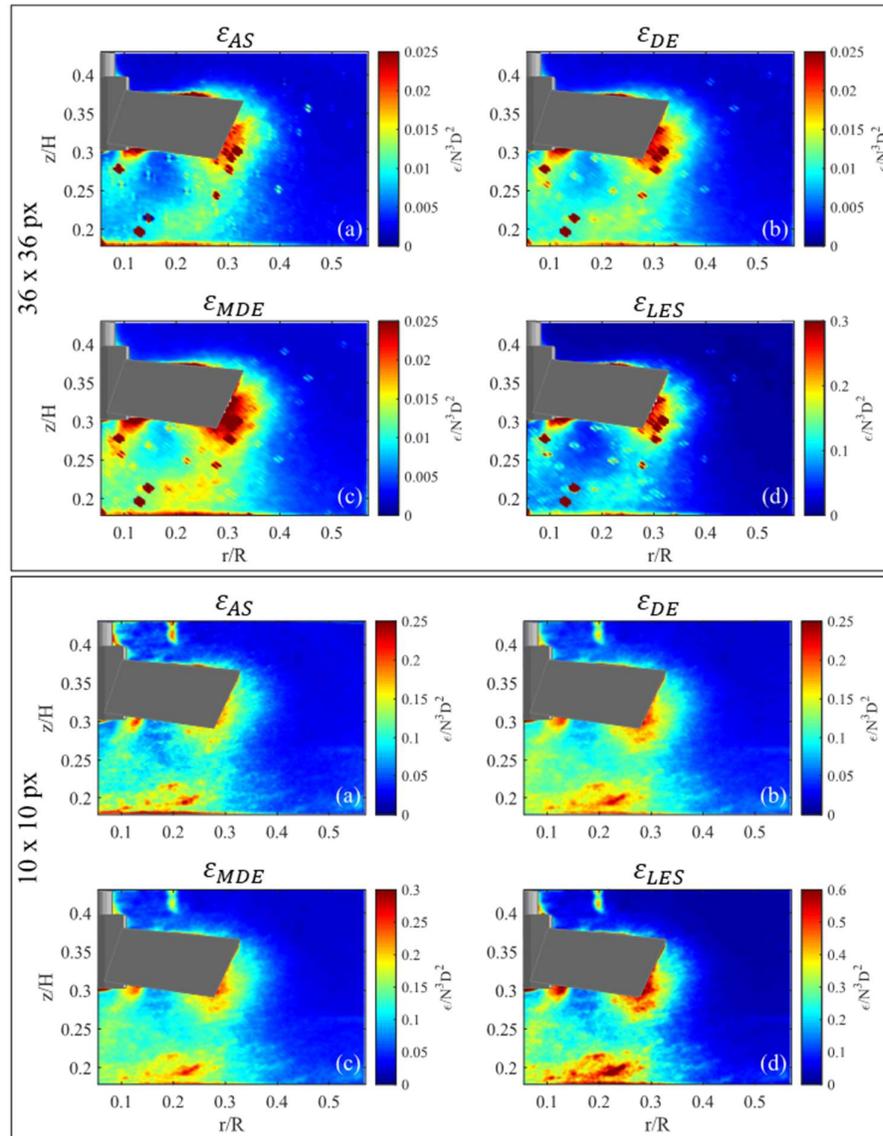


Figura 16: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 36×36 px e 10×10 px para o plano de 75° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.



Pôde-se observar que o aumento da AR leva a um aumento de desvio entre os valores máximos locais de EDR, por exemplo para os modelos AS, DE e MDE o desvio aumenta de 85% para 90% entre os valores máximos das duas resoluções espaciais para o plano de 0° para 75° . Isso pode estar relacionado ao maior grau de anisotropia para ângulos maiores associado ao efeito do aumento da resolução espacial. Resoluções espaciais mais refinadas implicam em um número mais significativo de vetores de velocidade computados no plano, otimizando a representatividade de $\epsilon/N^3 D^2$. Essa aplicação é importante

principalmente em regiões predominantemente anisotrópicas, que apresentam diferentes escalas de turbulência (MICHELETTI et al., 2004; LIU et al., 2016). Esse problema de resolução pode ser evidenciado pela presença de pontos de máximo da ε/N^3D^2 , possivelmente inadequados em termos de representatividade do fenômeno, na resolução de 36×36 px na região de descarga do impelidor (Figuras 15 e 16). Esses pontos inadequados ocorreram para ambos os ângulos de 45° e 75° na região de vórtice do impelidor. Esta região é caracterizada por um escoamento de fluxo não estacionário, com recirculação, vórtices, turbilhões e pseudo-turbulência (periodicidade) que podem estar relacionados a diferentes fenômenos de macro instabilidade (HASAL; JAHODA; FOŘT, 2008).

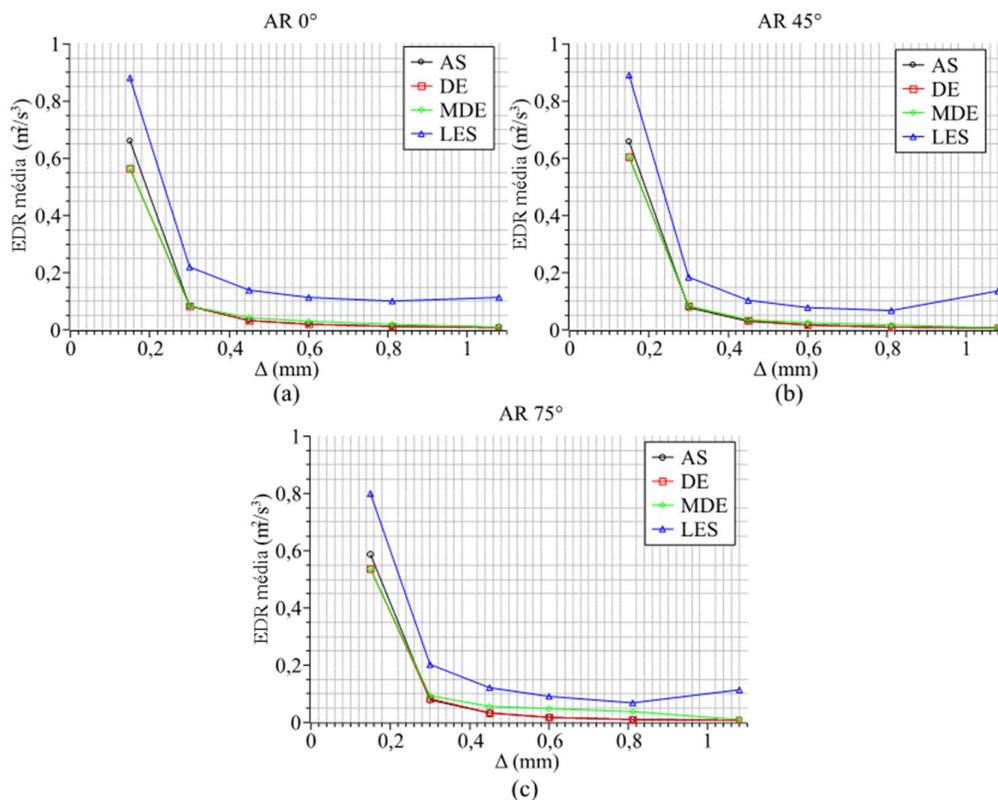
Ainda comparando o fenômeno de dissipação para diferentes ângulos, de uma perspectiva global, foi possível observar, para todos os ARs, uma região de alta dissipação de energia que se apresenta na região próxima à ponta do impelidor. Além disso, fica claro que o ponto máximo desloca no plano de medição, conforme a pá do impelidor muda seu ângulo, indicando a movimentação e dissipação dos vórtices na região de descarga, sugerindo uma forma circular helicoidal (SCHÄFER et al., 1998; ROY; ACHARYA; CLOETER, 2010). Comparando os ângulos de 0° , 45° e 75° , os pontos máximos de ε/N^3D^2 reduzem proporcionalmente com o aumento do ângulo da pá. Isso indica que a dissipação dos vórtices ocorre em uma pequena região, gradativamente com o movimento do impelidor em relação ao defletor. Também foi possível observar que para AR 45° , o ponto máximo ocorreu mais distante da ponta do impelidor, indicando que, para este ângulo, ocorre uma significativa extensão axial dos vórtices dissipados.

Para AR 75° , entretanto, foi possível observar um maior espalhamento da dissipação na região de descarga do impelidor, pois, neste ângulo, houve maior interação entre o vórtice formado pelas pás do impelidor e o escoamento na região de circulação resultando em um conjunto de altos e baixos valores de ε/N^3D^2 . Este fenômeno descreve a dispersão (homogeneização), na qual os vórtices produzidos próximos à pá do impelidor se rompem à medida que essas estruturas se movem da ponta para a região de forte turbulência, onde o atrito com o fluido dissipa a maior parte da energia (YIANNESKIS, 2000; DUCCI; YIANNESKIS, 2007). A compreensão desse processo de mistura e a caracterização dessas macro instabilidades definidas por vórtices e seu efeito na eficiência dos processos de agitação é complexo e ainda apresenta oportunidades de estudo, como mencionado por Martínez-Delgado et al. (2019) e Nikiforaki et al. (2003).

Como citado anteriormente, $\eta = 0,029$ mm, e em relação às resoluções espaciais de 36×36 px e 10×10 px têm-se o equivalente a $\Delta \approx 37\eta$ e $\Delta \approx 10\eta$, respectivamente. Desta forma, de acordo com o conceito de Saarenrinne et al. (2001), que para uma precisão de 90% da distribuição de EDR é necessário $\Delta \approx 2\eta$, e para a representação de 65% é preciso se ter $\Delta \approx 9\eta$, neste trabalho, com base nas resoluções espaciais de 36×36 px e 10×10 px, foi possível obter uma representação próxima de 8% e 50% para a distribuição de EDR, respectivamente.

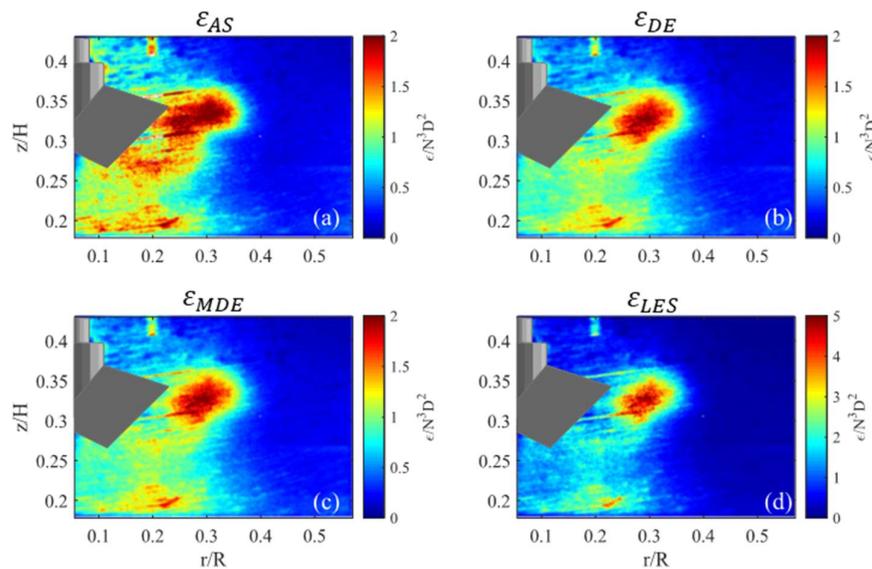
A Figura 17 mostra os resultados para a taxa média de dissipação energia obtida em função da janela de interrogação para os planos de AR 0° , 45° , e 75° . Os resultados mostram um efeito exponencial dos valores da EDR com a diminuição da janela de interrogação, Δ , confirmando o que já foi relatado na literatura por Tanaka e Eaton (2007). para grandes espaçamentos, a taxa de dissipação medida cai rapidamente. Porém, o efeito oposto ocorre quando a medição do campo de velocidade utiliza uma janela de interrogação muito pequena pois os campos são contaminados por ruído.

Figura 17: Taxa média de dissipação energia obtida em função da janela de interrogação para os planos (a) 0° , (b) 45° , e (c) 75° sobre a região de escoamento do impelidor.



Na Figura 18, encontram-se os campos de EDR estimados por 4 diferentes métodos utilizando uma resolução de 5×5 px ($\Delta = 0,15$ mm) para o AR 45° . Verifica-se que para esta resolução mais refinada, a interferência do ruído passa ser predominante devido a diversos fatores nas medições PIV como a possível insuficiência de pares de imagens de partículas correlacionadas, reflexões da luz do laser, diâmetro de partícula muito próximo ao valor de Δ , entre outros (TANAKA; EATON, 2007). Desta forma, conclui-se que os valores da distribuição de EDR foram superestimados para esta resolução.

Figura 18: Campo de distribuição de EDR com resolução espacial de 5×5 px para o plano de 45° usando diferentes métodos de estimação: (a) AS; (b) DE; (c) MDE e (d) LES.



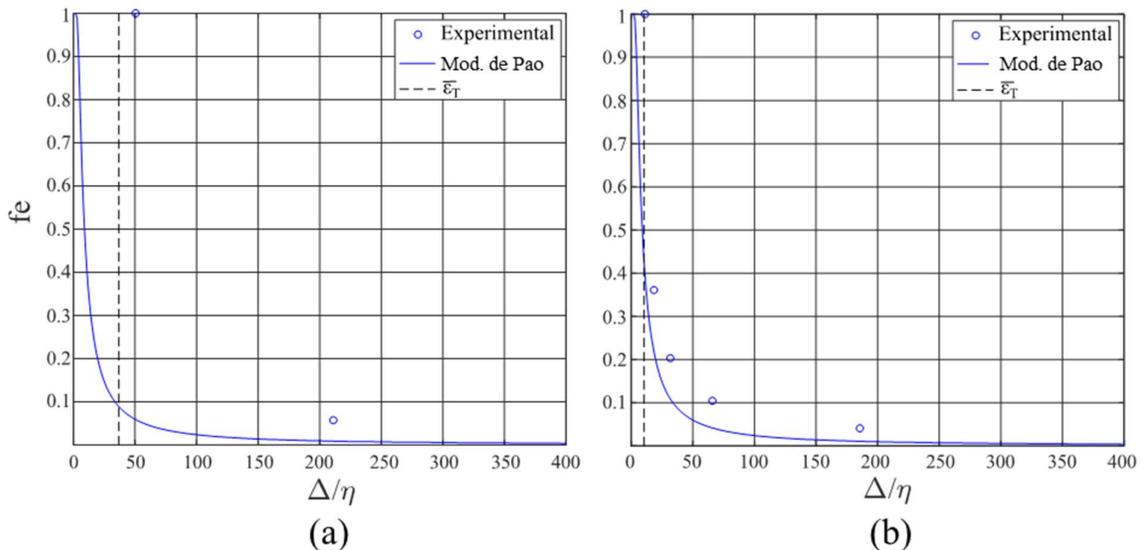
Na Figura 17, pode-se observar que a estimação direta de EDR usando gradientes de velocidade com a suposição de isotropia (DE), axissimetria local (AS) ou isotropia local (MDE) resultou em uma subestimação significativa de EDR com o aumento da resolução espacial. No que diz respeito à estimação indireta (LES), esta resultou em maiores valores de EDR em relação aos outros métodos, embora tenha apresentado a mesma tendência de variação com o aumento da resolução espacial.

Os métodos DE e AS mostraram diferenças sutis para EDR (Figura 17), podendo ser explicadas pelos valores subestimados devido às hipóteses consideradas. Por exemplo, a suposição de isotropia, que aproxima sete componentes do tensor de gradiente de velocidade dificulta a precisão do método DE, uma vez que o fluxo em pequena escala é anisotrópico,

não apenas próximo à ponta da pá do impelidor, mas em toda a região investigada (SHARP; ADRIAN, 2001). Além da suposição de isotropia, o erro numérico na estimativa do gradiente de velocidade dos dados PIV aumenta a susceptibilidade da presença de dados ruidosos (HOQUE et al., 2015). Para a aplicação do método AS, o eixo assimétrico deve ser pré-determinado, sendo que diferentes seleções resultam em diferentes EDR. Assim como para o método DE, os valores podem ser subestimados significativamente com o aumento do tamanho da janela de interrogação (XU; CHEN, 2013).

Com relação ao método MDE, o modelo de Pao (1965) – Figura 3 – foi utilizado para avaliar os resultados obtidos. Na Figura 19, é apresentado o efeito da subestimação do coeficiente (f_e) para estimar a EDR utilizando o método MDE com uma resolução de 36×36 px e 10×10 para o AR 45° . A Figura 19 (a) mostra, por exemplo, que para AR 45° os dados obtidos a partir da resolução espacial de 36×36 px não se adequaram ao modelo apresentado. Já para os dados obtidos com resolução espacial de 10×10 px (Figura 19 (b)), houve uma convergência razoável na região de $30 < \Delta/\eta < 250$. Portanto, é possível presumir que o modelo MDE apresenta-se com baixo potencial para corrigir a subestimação da EDR.

Figura 19: Subestimação do coeficiente (f_e) para EDR utilizando o método MDE para resolução espacial de (a) 36×36 px e (b) 10×10 px para o plano de 45° .



Baseado em uma abordagem LES, a estimativa da EDR captura pelo menos 70% do valor real da dissipação de energia cinética no escoamento usando PIV (SHARP; ADRIAN, 2001). O método LES estima as taxas de dissipação usando um modelo de hipótese

de viscosidade turbulenta simples. Como mostrado na Figura 14, os valores obtidos para EDR pelo método LES são superiores aos métodos DE, MDE e AS. Uma vez que as medidas PIV 2C-2D não são resolvidas na escala de Kolmogorov, o modelo de Smagorinsky é usado para estimar a quantidade de dissipação contida nas escalas não resolvidas. Assim, este método é dependente da constante de Smagorinsky, C_s . Segundo Meyers e Sagaut (2007), em muitas simulações práticas o comportamento teórico da C_s está longe de ser constante. Nesse trabalho, um valor de $C_s = 0,21$ foi adotado conforme apresentado no Capítulo 2. Na literatura, o valor da constante de Smagorinsky geralmente varia entre 0,13 (GABRIELE; NIENOW; SIMMONS, 2009), 0,17 (SHENG; MENG; FOX, 2000; POPE, 2001), e 0,21 (MEYERS; SAGAUT, 2007; SHARP; ADRIAN, 2001). O método do LES resultou em um resultado mais realista, onde os campos EDR tiveram um desvio menor que 50% para os ângulos 0° , 45° , e 75° entre as diferentes resoluções espaciais. Assim, pode-se concluir que o método LES apresenta a maior promessa para estimar a taxa de dissipação de energia a partir de dados experimentais de PIV. No entanto, este método precisa ser mais refinado para evitar ter que fazer suposições sobre os termos de gradiente desconhecidos para obter estimativas precisas de EDR.

CAPÍTULO 5 – Considerações Finais

Este capítulo apresenta as conclusões referentes aos objetivos geral e específicos delineados nesta Dissertação. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são delineadas tendo em vista a continuidade da pesquisa relacionada ao tema apresentado nesta Dissertação.

5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou investigar as características turbulentas em termos de TKE e EDR a partir dos campos de velocidade obtidos por medidas experimentais PIV (2C-2D) com ângulo resolvido em um tanque parcialmente preenchido com água mecanicamente agitado por um impelidor com 4 pás inclinadas (PBT 45° com bombeamento descendente) e 4 defletores igualmente espaçados. O sistema tanque-impelidor com velocidade de 660 rpm foi validado por meio da curva $N_p \times Re$ como escoamento em regime turbulento ($Re = 1,7 \times 10^5$). Desta forma, foi possível avaliar a influência das características turbulentas (EDR e TKE) em função de parâmetros operacionais.

Foi verificado que a análise da janela de interrogação (Δ) aliada à possibilidade da medição de ruídos deve ser considerada nos experimentos. Nesse trabalho, foi possível obter uma janela de interrogação de até 0,15 mm. Foi verificado que as possíveis regiões de interesses (com altos gradientes) concentram-se próximas às extremidades do impelidor. Para os campos de velocidade e TKE, a coerência espacial pode servir como indicativo de uma boa representatividade. Porém, foi observado que tanto para os campos de velocidade quanto para os campos da distribuição de TKE, o efeito da resolução espacial é mínimo, indicando que os parâmetros de 1ª e 2ª ordem são poucos afetados pela mudança da resolução espacial.

Os campos de distribuição da EDR com ângulo resolvido de 0°, 45° e 75° foram analisados usando diferentes métodos (AS, DE, MDE e LES). Ao contrário dos campos de distribuição de velocidade e TKE, os campos de distribuição de EDR mostraram uma forte influência com a resolução espacial. Para a resolução mais refinada (5×5 px), foi observada uma superestimação dos níveis de EDR causando perda de coerência no fenômeno de dissipação. O desvio entre o valor máximo encontrado para os campos EDR na resolução espacial de 36×36 px e 10×10 px para os planos com ângulo resolvido (0°, 45° e 75°) foram acima 80% para os métodos AS, DE e MDE. Apenas os campos EDR estimados pelo método LES, tiveram um desvio menor que 50% para os ângulos 0°, 45°, e 75°.

Assim, este trabalho contemplou a possibilidade de uma abordagem híbrida com PIV e LES para simular as menores escalas a partir do campo de velocidade e determinar a EDR no nível da escala de Kolmogorov de comprimento. Contudo, para a EDR, ainda é um desafio unir uma medição confiável com a limitação experimental, por conta de uma resolução espacial insuficiente.

O estudo da taxa de dissipação de energia e energia cinética turbulenta (características turbulentas) são úteis para uma investigação mais profunda nos mecanismos de mistura do escoamento de um tanque mecanicamente agitado. As medidas experimentais PIV (2C-2D) com ângulo resolvido foram feitas para analisar o efeito da posição do impelidor no escoamento, conseqüentemente fornecendo uma maior acurácia na quantificação dos parâmetros de turbulência pois atenua a contribuição do efeito da periodicidade das pás e, conseqüentemente, não superestimam os níveis de turbulência. Assim, este trabalho vem como forma de contribuir principalmente na estimação da taxa de dissipação de energia usando diferentes métodos – estimativa direta (DE) com suposição de isotropia, estimativa modificada direta (MDE) pela suposição de isotropia local, estimativa por suposição de axissimetria local (AS) e a estimativa indireta (LES) com a constante de Smagorinsky –, por ser ainda considerado um desafio se obter um valor aproximado da real dissipação de energia cinética no escoamento pelas limitações experimentais. Mais trabalhos e melhores metodologias experimentais, teóricas e computacionais ainda são claramente necessárias nesta área de estudo.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A lista a seguir apresenta algumas sugestões para continuidade deste trabalho:

- ✓ Tornam-se necessárias investigações mais detalhadas a fim de se obter o erro acoplado com a utilização da técnica PIV (2C-2D).
- ✓ É interessante a exploração de dados, assim, sugere-se a determinação de vetoriais com diferentes parâmetros operacionais. Pode-se avançar na aplicação da técnica de medida PIV, então, propõe-se estimar a TKE e a EDR a partir dos campos de velocidade obtidos com medidas *Stereo*-PIV (3C-2D) utilizando diferentes parâmetros operacionais com diferentes números de Reynolds e configurações de impelidores.

- ✓ Estudar a reconstrução do escoamento médio tridimensional (pseudo-3D) a partir dos campos de velocidade obtidos com medidas *Stereo*-PIV (3C-2D) e investigar a influência da terceira componente e dimensão na obtenção dos parâmetros turbulentos como a natureza do escoamento turbulento dos fluidos é inerente tridimensional.
- ✓ Implementar outros valores para a constante de Smagorinsky (C_s) na estimação da EDR pelo método indireto e investigar os diferentes comportamentos resultantes, pois como mostrado na literatura o comportamento da C_s é variável.
- ✓ Usar campos totais de visão diferentes, ou seja, trocando a lente da câmera ou aproximando para dar um *zoom* óptico para filmar uma região cada vez menor de forma a aproveitar toda a resolução da câmera (FlowSense EO 8M-21 3312 × 2488 *pixels*, 21 fps com lentes que utilizam filtro de alto desempenho para 527 nm e 532 nm).
- ✓ Determinar a escala de Kolmogorov de comprimento (η) em relação a macro escala (A) e números de Reynold de modo a comparar com o resultado obtido neste trabalho, o qual utilizou uma taxa de dissipação média para o cálculo de η . Adicionalmente, poder-se-á analisar como os diferentes métodos de determinação de η afetam os resultados.

REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R. J. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, v. 8, p. 1393-1398, 1997.
- ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. Particle image velocimetry. New York: Cambridge University Press, 2011, 584 p.
- ALBERINI, F.; LIU, L.; STITT, E. H.; SIMMONS, M. J. H. Comparison between 3-D-PTV and 2-D-PIV for determination of hydrodynamics of complex fluids in a stirred vessel. *Chemical Engineering Science*, v. 171, p. 189-203, 2017.
- ALEKSEENKO, S. V.; BILSKY, A. V.; DULIN, V. M.; MARKOVICH, D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 28, p. 1340-1359, 2007.
- AMARAL, R. L. Uso da Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) na indústria do petróleo. In: Universidade Federal de Pernambuco, 2013. Recife: UFPE, 2013.
- ATKINSON, CALLUM; COUDERT, SEBASTIEN; FOUCAUT, JEAN-MARC; STANISLAS, MICHEL; SORIA, JULIO. The accuracy of tomographic particle image velocimetry for measurements of a turbulent boundary layer. *Exp Fluids*, v. 50, p. 1031-1056, 2011.
- BASAVARAJAPPA, MANJUNATH; DRAPER, TERI; TOTH, PAL; RING, TERRY A.; MISKOVIC, SANJA. Numerical and experimental investigation of single phase flow characteristics in stirred tank using Rushton turbine and flotation impeller. *Minerals Engineering*, v. 83, p. 156-167, 2015.
- BASHIRI, HAMED; ALIZADEH, EBRAHIM; BERTRAND, FRANÇOIS; CHAOUKI, JAMAL. Investigation of turbulent fluid flows in stirred tanks using a non-intrusive particle tracking technique. *Chemical Engineering Science*, v. 140, p. 233-251, 2016.
- BOUSSINESQ, J. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences de l'Institut National de France, Tome XXIII, No 1. Paris: Imprimerie Nationale, 1877.
- CHUNG, K. H. K.; BARIGOU, M.; SIMMONS, M. J. H. Reconstruction of 3-D flow field inside miniature stirred vessels using a 2-D PIV technique. *Chem. Eng. Res. Des.*, v. 85, p. 560-567, 2007.

- CHUNG, K. H. K.; SIMMONS, M. J. H.; BARIGOU, M. Angle-resolved particle image velocimetry measurements of flow and turbulence field in small-scale stirred vessels of different mixer configurations. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 48, p. 1008-1018, 2009.
- COUPER, J. R.; PENNEY, W. R.; FAIR, J. R.; WALAS, S. M. *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Texas: Gulf Professional Publishing, 2005, 833 p.
- DARABI, H.; KOLEINI, S. M. J.; DEGLON, D.; REZAI, B.; ABDOLLAHY, M. Particle image velocimetry study of the turbulence characteristics in an aerated flotation cell. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 66, p. 13919-13928, 2017.
- DELAFOSSÉ, A.; COLLIGNON, M. L.; CRINE, M.; TOYE, D. Estimation of the turbulent kinetic energy dissipation rate from 2D-PIV measurements in a vessel stirred by an axial Mixel TTP impeller. *Chem. Eng. Sci.*, v. 66, p. 1728-1737, 2011.
- DORAN, P. M. *Bioprocess engineering principles*. 2.ed. Waltham, MA: Academic Press, 2013. Cap. 8.1: Functions of mixing, p. 255-256.
- DORON, P.; BERTUCCIOLI, L.; KATZ, J.; OSBORN, T. R. Turbulence characteristics and dissipation estimates in the coastal ocean bottom boundary layer from PIV data. *Journal of Physical Oceanography*, v. 31, p. 2108-2134, 2000.
- DRUMM, CHRISTIAN; HLAWITSCHKA, MARK W.; BART, HANS-JORG. CFD simulations and particle image velocimetry measurements in an industrial scale rotating disc contactor. *AIChE Journal*, v. 57, n. 1, p. 10-26, 2011.
- DUCCI, A.; YIANNESKIS, M. Vortex Tracking and Mixing Enhancement in Stirred Processes. *AIChE Journal*, v. 53, p. 305-315, 2007.
- EIGER, S. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Coleção da ABRH: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. Vol. 1, Cap. 2: Modelos de Escoamentos Turbulentos, p. 84-155.
- ELSINGA, G. E.; SCARANO, F.; WIENEKE, B.; VAN OUDHEUSDEN, B. W. Tomographic particle image velocimetry. *Exp Fluids*, v. 41, p. 933-947, 2006.
- ELSINGA, G. E.; WESTERWEEL, J.; SCARANO, F.; NOVARA, M. On the velocity of ghost particles and the bias errors in Tomographic-PIV. *Exp. Fluids*, v. 50, p. 825-838, 2011.
- ESCUDIÉ, R.; LINÉ, A. Experimental analysis of hydrodynamics in a radially agitated tank. *AIChE Journal*, v. 49, n. 3, p. 585-603, 2003.
- FARIAS, M. H.; TEIXEIRA, R. S.; KOILLER, J.; SANTOS, A. M. Brief review of uncertainty quantification for particle image velocimetry. *J. Phys.: Conf. Ser.*, v. 733, 2016.

- GABRIELE, A.; NIENOW, A. W.; SIMMONS, M. J. H. Use of angle resolved PIV to estimate local specific energy dissipation rates for up- and down-pumping pitched blade agitators in a stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, v. 64, p. 126-143, 2009.
- GABRIELE, A.; TSOLIGKAS, A. N.; KINGS, I. N.; SIMMONS, M. J. H. Use of PIV to measure turbulence modulation in a high throughput stirred vessel with the addition of high Stokes number particles for both up- and down-pumping configurations. *Chem. Eng. Sci.*, v. 66, p. 5862-5874, 2011.
- GEORGE, W. K.; HUSSEIN, H. J. Locally axisymmetric turbulence. *J. Fluid Mech.*, v. 233, p. 1-23, 1991.
- GHOTLI, R. A., RAMAN, A. A. A., IBRAHIM, S., BAROUTIAN, S. Liquid-liquid mixing in stirred vessels: A review. *Chem. Eng. Commun.*, v. 200, n. 5, p. 595-627, 2013.
- GUIDA, ANTONIO; NIENOW, ALVIN W.; BARIGOU, MOSTAFA. The effects of the azimuthal position of the measurement plane on the flow parameters determined by PIV within a stirred vessel. *Chemical Engineering Science*, v. 65, p. 2454-2463, 2010.
- HASAL, P.; JAHODA, M.; FOŘT, I. Macro-instability: A chaotic flow component in stirred tanks. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 366, p. 409-418, 2008.
- HINZE, J. O. *Turbulence*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- HLAWITSCHKA, M. W.; BART, H. -J. Determination of local velocity, energy dissipation and phase fraction with LIF- and PIV-measurement in a Kuhni miniplant extraction column. *Chem. Eng. Sci.*, v. 69, n. 1, p. 138-145, 2012.
- HOQUE, M. M.; SATHE, M. J.; JOSHI, J. B.; EVANS, G. M. Analysis of turbulence energy spectrum by using particle image velocimetry. *Procedia Engineering*, v. 90, p. 320-326, 2014.
- HOQUE, M. M.; SATHE, M. J.; MITRA, S.; JOSHI, J. B.; EVANS, G. M. Comparison of specific energy dissipation rate calculation methodologies utilising 2D PIV velocity measurement. *Chemical Engineering Science*, v. 137, p. 752-767, 2015.
- JOSHI, JYESHTHARAJ B.; NERE, NANDKISHOR K.; RANE, CHINMAY V.; MURTHY, B. N.; MATHPATI, CHANNAMALLIKARJUN S.; PATWARDHAN, ASHWIN W.; RANADE, VIVEK V. CFD Simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 89, p. 23-82, 2011.

- KHAN, F. R. Investigation of turbulent flows and instabilities in a stirred vessel using a particle image velocimetry. 2005. 256 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Department of Chemical Engineering, Loughborough University, Loughborough, 2005.
- KHAN, F. R.; RIELLY, C. D.; BROWN, D. A. R. Angle-resolved stereo-PIV measurements close to a down-pumping pitched-blade turbine. *Chem. Eng. Sci.*, v. 61, n. 9, p. 2799-2806, 2006.
- KHAN, F. R.; RIELLY, C. D.; HARGRAVE, G. K. A multi-block approach to obtain angle-resolved PIV measurements of the mean flow and turbulence fields in a stirred vessel. *Chem. Eng. Technol.*, v. 27, n. 3, p. 264-269, 2004.
- KIM, B. J.; SUNG, H. J. A further assessment of interpolation schemes for window deformation in PIV. *Experiments in Fluids*, v. 41, p. 499-511, 2006.
- KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynold number. *Proc. R. Soc. Lond. A*, v. 434, p. 9-13, 1991.
- KORKISCHKO, Ivan. Investigação experimental e analítica do escoamento ao redor de cilindro circular com supressores de VIV. 2011. 162 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 2011.
- KRESTA, S. Turbulence in stirred tanks: anisotropic, approximate, and applied. *Can. J. Chem. Eng.*, v. 76, p. 563-576, 1998.
- KRESTA, S. M.; WOOD, P. E. The flow field produced by a pitched blade turbine characterization of the turbulence and estimation of the dissipation rate. *Chem. Eng. Sci.*, v. 48, n. 10, p. 1761-1774, 1993.
- KUMARESAN, T.; JOSHI, J. B. Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, v. 115, p. 173-193, 2006.
- LI, Z.; BAO, Y.; GAO, Z. PIV experiments and large eddy simulations of single-loop flow fields in Rushton turbine stirred tanks. *Chem. Eng. Sci.*, v. 66, p. 1219-1231, 2011.
- LIU, NANNAN; WANG, WEI; HAN, JIACHENG; ZHANG, MENG; ANGELI, PANAGIOTA; WU, CHANGCHUN; GONG, JING. A PIV investigation of the effect of disperse phase fraction on the turbulence characteristics of liquid-liquid mixing in a stirred tank. *Chemical Engineering Science*, v. 152, p. 528-546, 2016.
- MACHADO, M. B.; BITTORF, K. J.; ROUSSINOVA, V. T.; KRESTA, S. M. Transition from turbulent to transitional flow in the top half of a stirred tank. *Chemical Engineering Science*, v. 98, p. 218-230, 2013.

- MARTINS, G. B.; RODRIGUEZ, S. Verificação experimental da hipótese de Boussinesq para escoamento de camada limite turbulenta. *Revista IPT: Tecnologia e Inovacao*, v. 2, n. 10, p. 53-61, 2019.
- MARTÍNEZ-DELGADILLO, S. A.; ALONZO-GARCIA, A.; MENDOZA-ESCAMILLA, V. X.; GONZÁLEZ-NERIA, I.; YÁÑES-VARELA, J. A. Analysis of the turbulent flow and trailing vortices induced by new design grooved blade impellers in a baffled tank. *Chemical Engineering Journal*, v. 358, p. 225-235, 2019.
- MAVROS, P. Flow visualization in stirred vessels: a review of experimental techniques. *Trans IChemE.*, v. 79, p. 113-127, 2001.
- MEYERS, J.; SAGAUT, P. On the model coefficients for the standard and the variational multi-scale Smagorinsky model. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 569, p. 287-319, 2007.
- MICHELETTI, M.; BALDI, S.; YEOH, S. L.; DUCCI, A.; PAPADAKIS, G.; LEE, K. C.; YIANNESKIS, M. On spatial and temporal variations and estimates of energy dissipation in stirred reactors. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 82, p. 1188-1198, 2004.
- MOURA, H. L. Análise da qualidade de medidas F-PIV e da fluidodinâmica em coluna de bolhas utilizando invariantes caóticos. 2017. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- NEAL, D. R.; SCIACCHITANO, A.; SMITH, B. L.; SCARANO, F. Collaborative framework for PIV uncertainty quantification: the experimental database. *Measurement Science and Technology*, v. 26, 2015.
- NIKIFORAKI, L.; MONTANTE, G.; LEE, K. C.; YIANNESKIS, M. On the origin, frequency and magnitude of macro-instabilities of the flows in stirred vessels. *Chemical Engineering Science*, v. 58, p. 2937-2949, 2003.
- OCHIENG, A.; ONYANGO, M.; KIRIAMITI, K. Experimental measurement and computational fluid dynamics simulation of mixing in a stirred tank: a review. *South African Journal of Science*, v. 105, p. 421-426, 2009.
- OKAMOTO, K.; NISHIO, S.; KOBAYASHI, T.; SAGA, T.; TAKEHARA, K. Evaluation of the 3D-PIV standard images (PIV-STD Project). *Journal of Visualization*, v. 3, n. 2, p. 115-123, 2000.
- PAO, Y. H. Structure of turbulent velocity and scalar fields at large wavenumbers. *Physics of Fluids*, v. 8, p. 1063-1075, 1965.
- POPE, S. B. *Turbulent flow*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

- PRASAD, AJAY K. Particle image velocimetry. *Current Science*, v. 79, n. 1, p. 51-60, 2000.
- RAFFEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. Particle image velocimetry: a practical guide. 2.ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 460 p.
- ROSMAN, P. C. C. Modelos de circulação em corpos d'água rasos. In: SILVA, R. C. V. (Ed.). Métodos numéricos em recursos hídricos. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. cap. 3, p. 156-221.
- ROY, S.; ACHARYA, S.; CLOETER, M. D. Flow structure and the effect of macro-instabilities in a pitched-blade stirred tank. *Chemical Engineering Science*, v. 65, p. 3009-3024, 2010.
- SAARENINNE, P.; PIIRTO, M.; ELORANTA, H. Experiences of turbulence measurement with PIV. *Meas. Sci. Technol.*, v. 12, n. 11, p. 1904-1910, 2001.
- SCARANO, F. Tomographic PIV: principles and practice. *Meas. Sci. Technol.*, v. 24, 2013.
- SCHAFER, M.; YIANNESKIS, P.; WACHTER, P.; DURST, F. Trailing vortices around 45° pitched-blade impeller. *AIChE Journal*, v. 44, n. 6, p. 1233-1246, 1998.
- SCHMITT, F. G. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: Historical remarks and a direct evaluation of its validity. *Comptes Rendus Mécanique*, v. 335, n. 9-10, p. 617-627, 2007.
- SCIACCHITANO, A.; WIENEKE, B.; SCARANO, F. PIV uncertainty quantification by image matching. *Meas. Sci. Technol.*, v. 24, 2013.
- SHARP, K. V.; ADRIAN, R. J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine. *AIChE J.*, v. 47, p. 766-778, 2001.
- SHENG, J.; MENG, H.; FOX, R. O. A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation. *Chem. Eng Sci.*, v. 55, n. 20, p. 4423-4434, 2000.
- SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da turbulência nos fluidos. Uberlândia: FEMEC, Faculdade Federal de Uberlândia, 2002. 52 p.
- SIMÕES, DANIEL DE S. Determinação experimental do número de potência de agitadores de proximidade para líquidos de alta viscosidade. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2017. 78 p. Tese (Doutorado).
- SOLOFF, S.; ADRIAN, R.; LIU, Z. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, v. 8, p. 1441-1454, 1997.
- SOSSA-ECHEVERRIA, JAIME; TAGHIPOUR, FARIBORZ. Computational simulation of mixing flow of shear thinning non-Newtonian fluids with various impellers in a stirred