AMANARA POTYKYTĀ DE SOUSA DIAS VIEIRA

Tese de Doutorado

**Modelagem de escoamento em tanque com grade oscilante e
desenvolvimento/investigação de sonda lastreada no fenômeno da refração ótica para
medida de parâmetros turbulentos na superfície livre da água**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Woodrow Nelson Lopes Roma

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos, SP

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dm de Sousa Dias Vieira, Amanara Potykytã
Modelagem de escoamento em tanque com grade
oscilante e desenvolvimento/investigação de sonda
lastreada no fenômeno da refração ótica para medida de
parâmetros turbulentos na superfície livre da água /
Amanara Potykytã de Sousa Dias Vieira; orientador
Woodrow Nelson Lopes Roma. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de
Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Instrumentação. 2. Simulação numérica. 3.
Transferência de massa. 4. Turbulência. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **AMANARA POTYKYTĀ DE SOUSA DIAS VIEIRA.**

Título da tese: "Modelagem de escoamento em tanque com grade oscilante e desenvolvimento/investigação de sonda lastreada no fenômeno da refração ótica para medida de parâmetros turbulentos na superfície livre da água".

Data da defesa: 05/08/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Woodrow Nelson Lopes Roma**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Nivaldo Aparecido Corrêa**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Apro vado

Prof. Titular **Paulo Seleghim Junior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Milton Dall Aglio Sobrinho**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

APROVADO

Prof. Dr. **Erich Kellner**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profª. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Maria Irenilda de Sousa Dias e Rui Vieira de Souza, pelo amor, conversas e conselhos que foram imprescindíveis para que eu realizasse meu mestrado e doutorado;

Ao professor Woodrow Nelson Lopes Roma, orientador deste trabalho, por compartilhar seus conhecimentos e me orientar nos caminhos da pesquisa, durante o mestrado e doutorado;

Ao professor John Gulliver, orientador estrangeiro durante o período de doutorado sanduíche na Universidade de Minnesota, por suas orientações e sugestões, além da excelente recepção;

Ao técnico do laboratório de fenômenos de transporte, Roberto Cezar Bergamo, pela prestatividade e rapidez em solucionar problemas durante a realização deste trabalho;

Aos funcionários do departamento de Hidráulica e Saneamento, Rosemeire Aparecida de Jesus Veroneze, Maria Auxiliadora de C. Altieri Pin, Priscila Carla Toselli de Almeida e André Canale Garcia, por tornar todos os trâmites burocráticos da vida acadêmica mais fáceis;

Ao Pablo Andretta Jaskowiak por seu amor, suporte e paciência que foram fundamentais nos períodos difíceis deste doutorado;

Aos meus amigos Joice Jaqueline Kaschuk e Guilherme Vuitik pela amizade, hospedagem e risadas, e aos demais amigos que fiz em São Carlos durante meus sete anos de mestrado e doutorado;

Por fim, agradeço à fundação CAPES e CNPq pela concessão de bolsas durante a realização desta pesquisa.

Resumo

VIEIRA, A. P. de S. D. (2016). Modelagem de escoamento em tanque com grade oscilante e desenvolvimento/investigação de sonda lastreada no fenômeno da refração ótica para medida de parâmetros turbulentos na superfície livre da água. São Carlos, 2016. 183p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O fenômeno da transferência de massa entre dois meios é altamente dependente da concentração do componente a ser transferido e da velocidade na camada limite de troca. A medida de velocidade na superfície da água em uma interface ar/água ainda não é realidade devido a falta de instrumental adequado.

Procurando sanar este obstáculo, esta pesquisa propôs o desenvolvimento de uma sonda ótica para medida de turbulência na superfície da água em um tanque agitado por grade oscilante.

O funcionamento desta sonda foi investigado e suas medidas comparadas a medidas realizadas pelo instrumento microADV, de forma a verificar se o parâmetro medido pelo novo instrumento era relacionado à componente vertical da velocidade próximo à superfície.

O comportamento do escoamento no tanque foi modelado com o uso do *software* Open-FOAM, visando uma maior compreensão do fenômeno.

A pesquisa resultou na modelação do escoamento e no desenvolvimento de um dispositivo auxiliar que possibilita o uso do microADV em medidas próximas à superfície livre. A comparação das medidas adquiridas pela sonda ótica e microADV mostram que, apesar de as medidas da sonda terem relação com a turbulência no tanque, este parâmetro turbulento apresenta fraca correlação com a medida da componente vertical da velocidade.

Palavras-chave: Instrumentação, simulação numérica, transferência de massa e turbulência.

Abstract

VIEIRA, A. P. de S. D. (2016). Modeling of flow in tank with oscillating grid and development / investigation of a probe based in the optical refraction phenomenon to measure turbulent parameters on the free surface of the water. São Carlos, 2016. 183p. Thesis (Doctorate) – School of Engineer of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.

The mass transfer phenomena is highly dependent on the concentration of the component to be transferred and the velocity on the exchange layer. The velocity measurement at the surface of the water in an air / water interface is not yet a reality due to lack of appropriate instruments.

In order to overcome this obstacle, this research proposed the development of an optical probe to measure turbulence on the surface of water in an oscillating grid tank.

We investigated the operation of the proposed probe comparing its measurements to measurements made by microADV to check the relation between the parameter measured by the new instrument and the vertical velocity near to the surface.

The flow behavior in the tank was MODELLED using the *software* OpenFOAM seeking a greater understanding of the phenomenon.

The research resulted in the modeling of the flow in the tank and the development of an auxiliary device that allows the use of microADV in near-surface measurements. Although the probe measurement have relation with the turbulence in the tank, the comparison of measurements acquired by the optical probe and microADV shows the turbulent parameter presenting weak correlation to the measurement of the vertical velocity.

Keywords: Instrumentation, mass transfer, numerical simulation and turbulence.

LISTA DE FIGURAS

2	Velocidade desconhecida na camada limite	26
3	Gradientes de velocidade em uma camada limite	39
4	Velocimetria lagrangiana	47
5	Velocimetria euleriana	47
6	Sonda ótica	50
7	MicroADV	51
8	Etapas da solução de um problema no ambiente OpenFOAM	56
9	Caso Oscillating box do OpenFOAM	56
10	Resolução tempo x frequência: (a)Transformada de Fourier de tempo curto (Gabor) e (b)Transformada Wavelet	60
11	Função wavelet	61
12	(a) Sinal; (b) Sinal decomposto-aproximação (a1); (c) Sinal decomposto-detalle (d1)	62
13	Decomposição da aproximação em mais de um nível	62
14	Wavelet packet	62
15	Cálculo da energia <i>wavelet</i> dos vetores de decomposição	64
16	Gráfico gerado pela ferramenta <i>wcoherence</i>	64
17	Sistema gerador de turbulência	67
18	Grade	68
19	Foto do tanque com grade oscilante	68
20	Esquema de funcionamento da Sonda Ótica	69
21	MicroADV- volume da amostra observada (Adaptado Fonte: http://www.sontek.com)	71
22	Esquema do dispositivo criado para utilização do microADV na superfície, com diâmetros superior e inferior diferentes	72
23	MicroADV com peça acoplada	72
24	Dispositivo auxiliar cilíndrico (com diâmetros superior e inferior iguais)	73
25	Esquema do dispositivo criado para utilização do microADV na superfície, com diâmetros superior e inferior iguais	73
26	Dimensões da malha nos eixos x,y e z	75

27	Geometria do tanque gerada no <i>software</i> OpenFOAM	76
28	Exemplo de imagem visualizada no <i>software</i> paraview	78
29	Árvore de decomposição <i>wavelet packet</i> até o nível 3	79
30	Função <i>Daubechies 2</i>	79
31	Comparação da distribuição de informações em faixas de frequência	80
32	Gráfico <i>Wavelet coherence</i> com informações do eixo y convertidas para frequência	81
33	Posicionamento do MicroADV com dispositivo auxiliar	82
34	Arranjo do experimento para avaliar influência do dispositivo auxiliar nas medidas	84
35	Sinal de velocidades verticais simulado para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm ou 0,304 Hz	85
36	Estabilização do valor da média RMS janelada no sinal simulado	85
37	Posicionamento da Sonda Ótica e MicroADV equipado com o dispositivo para medida de velocidade na superfície	88
38	Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 18,25 opm ou 0,304 Hz da grade .	88
39	Valores da média RMS de cada um dos oito sinais gerados pela Sonda Ótica . .	89
40	Sinal de componentes verticais da velocidade gerado pelo microADV na ve- locidade da grade 18,25 opm ou 0,304 Hz	89
41	Valores da média RMS de cada um dos oito sinais de velocidades verticais gerados pelo microADV	90
42	Imagens geradas no Paraview da simulação numérica realizada no OpenFOAM (18,25 opm ou 0,304 Hz da grade)	92
43	Sinal de velocidades verticais simulado para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm ou 0,304 Hz	93
44	Estabilização do valor da média RMS janelada do sinal simulado	93
45	Velocidade vertical com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm	93
46	Curva dos valores RMS dos sinais simulados com o aumento da velocidade de oscilação da grade	94
47	Arranjo experimental para avaliar influência do dispositivo auxiliar nas medidas do microADV	95
48	Médias RMS de sinais adquiridos pelo microADV com sem dispositivo auxiliar	95

49	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (18,25 opm ou 0,304 Hz)	96
50	(a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal do microADV com dispositivo e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal do microADV sem dispositivo (18,25 opm ou 0,304 Hz)	97
51	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo (18,25 opm ou 0,304 Hz)	97
52	Posicionamento da Sonda Ótica e microADV durante ensaios	98
53	(a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica(18,25 opm ou 0,304 Hz)	99
54	(a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (18,25 opm ou 0,304 Hz)	99
55	<i>Wavelet Coherence</i> Sonda Ótica e MicroADV (18,25 opm ou 0,304 Hz)	100
56	(a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)	100
57	(a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)	101
58	<i>Wavelet Coherence</i> Simulação Numérica e MicroADV (18,25 opm ou 0,304 Hz)	101
59	(a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (18,25 opm)	102
60	(a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)	103
61	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 18,25 opm	103
64	Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo Open-FOAM (38 opm ou 0,633 Hz da grade)	137
65	Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo Open-FOAM (57,25 opm ou 0,954 Hz da grade)	139
66	Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo Open-FOAM (95,5 opm ou 1,591 Hz da grade)	141
67	Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo Open-FOAM (118 opm ou 1,966 Hz da grade)	143

68	Velocidade vertical simulada para frequência de oscilação da grade de 135,25 opm ou 2,254 Hz	145
69	Velocidade vertical simulada para frequência de oscilação da grade de 154,255 opm ou 2,570 Hz	147
70	Imagens da simulação elaborada pelo OpenFOAM para 175 OPM da grade . .	149
74	Velocidade vertical com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 175 opm	151
75	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (38 opm ou 0,633 Hz) . . .	152
76	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (57,25 opm ou 0,954 Hz) .	153
77	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (95,5 opm ou 1,591 Hz) . .	153
78	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (118 opm ou 1,966 Hz) . . .	153
79	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (135,25 opm ou 2,254 Hz) .	154
80	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (154,25 opm ou 2,570 Hz) .	154
81	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (175 opm ou 2,916 Hz) . . .	154
82	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 38 opm	155
83	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 57,25 opm	155
84	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 95,5 opm	156
85	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 118 opm	156
86	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 135,25 opm	156
87	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 154,25 opm	157
88	<i>Wavelet Coherence</i> MicroADV com e sem dispositivo 175 opm	157
89	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (38 opm ou 0,633 Hz)	158
90	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (38 opm ou 0,633 Hz)	159

91	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 38 opm ou 0,633 Hz	159
92	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (57,25 opm ou 0,954 Hz) . .	160
93	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (57,25 opm ou 0,954 Hz)	161
94	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 54,25 opm ou 0,954 Hz	161
95	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (95,5 opm ou 1,591 Hz) . . .	162
96	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (95,5 opm ou 1,591 Hz)	163
97	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 95,5 opm ou 1,591 Hz	163
98	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (118 opm ou 1,966 Hz) . . .	164
99	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (118 opm ou 1,966 Hz)	165
100	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 118 opm ou 1,966 Hz	165
101	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (135,25 opm ou 2,254 Hz) .	166
102	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (135,25 opm ou 2,254 Hz)	167
103	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 135,25 opm ou 2,254 Hz	167
104	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (154,25 opm ou 2,570 Hz) .	168
105	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (154,25 opm ou 2,570 Hz)	169
106	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 154,25 opm ou 2,570 Hz	169
107	Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (175 opm ou 2,916 Hz) . . .	170

108	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal obtido pela sonda ótica (175 opm ou 2,916 Hz)	171
109	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e microADV 175 opm ou 2,916 Hz	171
110	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (38 opm)	172
111	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (38 opm)	173
112	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 38 opm	173
113	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (57,25)	174
114	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (57,25 opm)	175
115	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 57,25 opm	175
116	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (95,5)	176
117	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (95,5 opm)	177
118	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 95,5 opm	177
119	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (118 opm)	178
120	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (118 opm)	179
121	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 118 opm	179
122	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (135,25 opm)	180
123	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (135,25 opm)	181
124	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 135,25 opm	181

125	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho	182
126	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (154,25 opm)	183
127	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 154,25 opm	183
128	Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (175 opm)	184
129	Comparação entre (a) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> da simulação numérica e (b) Distribuição da energia <i>Wavelet</i> do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (175 opm)	185
130	<i>Wavelet Coherence</i> sonda ótica e simulação na velocidade 175 opm	185

LISTA DE SÍMBOLOS

$a(t)$	Função <i>wavelet</i> -pai
β	Termo que define a variação d velocidade normal à interface pela distância vertical até a interface
CO_2	Dióxido de carbono
C_i	Concentração da espécie absorvida na interface do líquido
C_B	Concentração da espécie absorvida onde esta se encontra bem misturada ao líquido
c	Concentração da espécie na fase líquida
C	Concentração no líquido
$cgau3$	Função <i>wavelet</i> Gaussiana 3 da família Gaussiana
D_m	Coefficiente de difusão molecular
D	Difusividade
$daub2$	Função <i>wavelet</i> Daubechies 2 da família Daubechies
ene	Energia <i>wavelet</i>
f	Frequência da oscilação da grade(Hz)
g^*	Função <i>wavelet</i> -mãe
g	Aceleração gravitacional
H	Constante de solubilidade de Henry
K_l	Coefficiente global de transferência de massa
K	Coefficiente de transferência de massa
L_f	Espessura do filme ou camada superficial líquida de troca de massa
N	Taxa de absorção por unidade de área
n	Quantidade de elementos
p^*	Pressão parcial das espécies na fase gasosa sob condições de equilíbrio
p	Pressão estática
ρ	Massa específica do fluido
s	Taxa de produção da superfície por unidade total de área
t	Tempo
t_e	Tempo médio de exposição de uma superfície de fluido a um gás
u	Componente da velocidade turbulenta no eixo x
u'	Componente da flutuação da velocidade no eixo x
$\bar{u}$	Componente da velocidade turbulenta no eixo x
v	Componente da velocidade turbulenta no eixo y
v'	Componente da flutuação da velocidade no eixo y
$\bar{v}$	Componente da velocidade turbulenta no eixo y
V_{RMS}	Raíz quadrada da média quadrática da velocidade turbulenta

$\bar{V}$	Velocidade média
V	Velocidade turbulenta
V'	Flutuação da velocidade
V_z	Componente da vertical da velocidade
v_x	Componente da velocidade no eixo x
v_y	Componente da velocidade no eixo y
v_z	Componente da velocidade no eixo z
ν	Viscosidade cinemática
$\nabla * \vec{V}$	Tensões de Reynolds (tensões viscosas)
V_{res}	Velocidade resultante
$V_{vertical}(i)$	Componente vertical da velocidade da posição i do tempo do sinal
w	Componente da velocidade turbulenta no eixo z
w'	Componente da flutuação da velocidade no eixo z
$\bar{w}$	Componente da velocidade turbulenta no eixo z
$W(a,t)$	Coefficientes <i>wavelet</i>
x_i	Coefficiente wavelet na posição <i>i</i>
$x(t)$	Sinal discreto e digitalizado
x	Eixo cartesiano
y	Eixo cartesiano (também será usado como distância vertical até a interface)
z	Eixo cartesiano

LISTA DE SIGLAS

ADV	<i>Acoustic Doppler velocimeter</i>
CFD	Fluidodinâmica computacional
DNS	Simulação Numérica Direta (<i>Direct Numerical Simulation</i>)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
FOAM	<i>Open Field Operation and Manipulation</i>
LES	Simulação de Grandes Escalas (<i>Large Eddy Simulation</i>)
OPM	Oscilações por minuto
OD	Oxigênio dissolvido
PIV	Velocimetria por imagem de partículas (<i>Particle Image Velocimeter</i>)
PTV	Velocimetria por rastreamento de partículas (<i>Particle Tracking Velocimeter</i>)
RMS	Valor quadrático médio ou média RMS (<i>Root mean square</i>)
RSSG	Medidor de inclinação de onda por foto reflexiva estéreo
SAFL	<i>Saint Anthony Falls Laboratory</i>
STIV	Velocimetria por imagens espaço-temporais

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	17
LISTA DE SIGLAS	19
1 Introdução	25
2 Estrutura da tese	29
3 Objetivos	31
3.1 Objetivos Gerais	31
3.2 Objetivos Específicos	31
4 Turbulência e transferência de massa	33
4.1 Tratamento estatístico da turbulência	34
4.2 Problema de fechamento da turbulência	37
4.3 Camada limite	39
4.3.1 Teoria dos dois filmes	40
4.3.2 Teoria da penetração	40
4.3.3 Teoria da renovação superficial	41
4.4 Turbulência na superfície livre da água e transferência de massa	41
5 Instrumentação para velocimetria	47
5.1 Velocimetria na superfície da água	48
5.1.1 Sonda Ótica	49
5.1.2 MicroADV	50
6 Simulações numéricas	53
6.1 Simulação de escoamentos	53
6.1.1 Tratamento da turbulência em simulações numéricas computacionais .	54
6.1.2 OpenFOAM	55

6.1.3	Oscillating box	56
7	Análise de sinal	59
7.1	Sinais e análise de sinal	59
7.1.1	Wavelet	60
7.1.2	Energia wavelet	63
7.1.3	Coerência wavelet	63
8	Metodologia	67
8.1	Geração de turbulência	67
8.2	Velocimetria	69
8.2.1	Sonda Ótica	69
8.2.2	MicroADV	70
8.3	Simulação em OpenFOAM	74
8.3.1	Geração da malha	75
8.3.2	Processamento	76
8.3.3	Pós processamento	77
8.4	Análise de sinal	77
8.4.1	Energia Wavelet	78
8.4.2	<i>Wavelet coherence</i>	80
8.4.3	Transformada rápida de Fourier	81
8.5	Experimentos e comparações	81
8.5.1	Comparação Sonda Ótica e MicroADV	82
8.5.2	Comparação entre MicroADV com e sem dispositivo auxiliar	83
8.5.3	Comparação MicroADV e simulação numérica	84
8.5.4	Comparação Sonda Ótica e simulação numérica	85
9	Resultados e discussão	87
9.1	Sonda ótica	87
9.2	MicroADV	89
9.3	Simulação OpenFOAM	90

9.4	Comparação MicroADV com e sem dispositivo auxiliar	94
9.5	Comparação Sonda Ótica e MicroADV	98
9.6	Comparação Simulação numérica e MicroADV	100
9.7	Comparação Sonda Ótica e Simulação Numérica	102
10	Conclusões	105
11	Sugestões para trabalhos futuros	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
A	OpenFOAM script U	111
B	OpenFOAM script <i>polymesh</i>	113
C	OpenFOAM script p	117
D	OpenFOAM script pgh	119
E	OpenFOAM script controlDict	121
F	OpenFOAM script topoSetDict	124
G	MatLAB script para extração da velocidade	128
H	MatLAB script para geração de dados e gráficos da ferramenta energia <i>wavelet</i>	129
I	MatLAB script para análise de Fourier	131
J	MatLAB script para <i>wavelet coherence</i>	132
K	MatLAB script para janelamento dos sinais simulados	133
L	Medidas Sonda Ótica	134
M	Medidas MicroADV	135
N	Visualização das Simulações Numéricas	136

O	Simulação numérica-Sinais da componente vertical	150
P	Análise espectral (Fourier) para medidas dos ensaios de comparação entre o microADV com e sem dispositivo auxiliar	152
Q	<i>Wavelet coherence</i> comparação entre sinais de velocidade resultante do microADV com e sem dispositivo auxiliar	155
R	Comparações entre sinais da Sonda Ótica e MicroADV	158
R.0.1	38 oscilações por minuto da grade	158
R.0.2	57,25 oscilações por minuto da grade	160
R.0.3	95,5 oscilações por minuto da grade	162
R.0.4	118 oscilações por minuto da grade	164
R.0.5	135,25 oscilações por minuto da grade	166
R.0.6	154,25 oscilações por minuto da grade	168
R.0.7	175 oscilações por minuto da grade	170
S	Comparações entre sinais da Sonda Ótica e Simulação numérica	172
S.0.1	38 oscilações por minuto da grade	172
S.0.2	57,25 oscilações por minuto da grade	174
S.0.3	95,5 oscilações por minuto da grade	176
S.0.4	118 oscilações por minuto da grade	178
S.0.5	135,25 oscilações por minuto da grade	180
S.0.6	154,25 oscilações por minuto da grade	182
S.0.7	175 oscilações por minuto da grade	184

1 Introdução

O conhecimento sobre o comportamento estático e dinâmico dos fluidos é fundamental para o entendimento de fenômenos físicos e químicos, naturais ou artificiais. O comportamento dinâmico predominante dentre os fluidos, tanto em fenômenos naturais quanto em obras realizadas pelo ser humano, é o comportamento turbulento. Por este motivo, o entendimento deste regime de escoamento é de extrema importância. O atual conhecimento sobre o regime turbulento é usado na elaboração de modelos climáticos para previsão de ventos e furacões, em projetos de aeronaves, em estudos que envolvem troca gasosa entre meios, na elaboração de modelos de circulação de sangue, no entendimento do transporte de sedimentos etc. Em nível astronômico, a turbulência é a causa do campo magnético da Terra e responsável pelas explosões solares.

Além do regime turbulento, é comum que problemas fluidodinâmicos envolvam mais de um fluido (problemas multifásicos), dependendo assim de características e do comportamento de mais de uma fase. Estes problemas não são de fácil equacionamento, levando-se em consideração que estes fluidos não permanecem isolados, mas interagem entre si. O entendimento de trocas de massas gasosas em sistemas gás-liquido é importante em equipamentos industriais, como caldeiras e condensadores, no entendimento de questões ambientais, como o balanço de CO₂ e mudanças climáticas, e na geofísica, por exemplo. Na área sanitária, há grande interesse no estudo da reaeração (oxigênio-água) de corpos hídricos, que se relaciona com a qualidade da água. Esta última questão é importante na área de engenharia hidráulica e saneamento, além da gestão ambiental e pública, pois vários usos que fazemos da água exigem características mínimas para torná-la apta à atividade.

Um indicador importante da qualidade da água é o oxigênio dissolvido (OD). A concentração de OD em corpos d'água possui estreita relação com a quantidade de matéria orgânica, indício de poluição. Este parâmetro tem grande importância na qualidade da água, pois ele é fundamental para a sobrevivência da vida aquática.

(a) Transferência de oxigênio da atmosfera para a água por meio de difusão molecular

(b) Transferência de oxigênio da atmosfera para a água acelerada pela turbulência

Na natureza, uma apreciável fonte de oxigênio para a água é a atmosfera. A água recebe oxigênio da atmosfera naturalmente através da superfície livre, pelo mecanismo da difusão molecular. Este fenômeno está relacionado ao movimento das moléculas de um fluido e, como toda troca de massa, busca equilibrar a concentração do elemento (oxigênio) entre os dois ambientes da troca (ar e água). A difusão molecular é um processo lento, mas que pode ser acelerado pelo aumento do movimento das moléculas. Assim, a troca de massa entre a atmosfera e a água, através da superfície livre, é acelerada em regimes turbulentos (Figuras 1a e 1b).

A transferência de massa em uma interface gás / água, acelerada pela turbulência próxima à superfície, é um fenômeno ainda não compreendido totalmente. Uma das barreiras para essa compreensão é a dificuldade em quantificar a turbulência na superfície (interface), principalmente a componente vertical da velocidade, considerando que os instrumentos de medida são perturbados pela presença da superfície ou interferem no fenômeno pela presença no meio (Figura 2).

Figura 2: Velocidade desconhecida na camada limite

Com o passar dos anos, o problema foi abordado por diversas frentes de estudo. Novas técnicas de instrumentação permitiram que se passasse da observação visual com uso de corantes, a medições usando sensores, até o desenvolvimento da velocimetria com lasers e câmeras de alta velocidade. Observações que outrora eram feitas em córregos e canais de con-

creto podem ser feitas, hoje em dia, em caixas de acrílico transparentes, permitindo a condução da pesquisa em ambiente controlado e quase livre de interferências. Outro aspecto importante foi a melhoria na velocidade de processamento e armazenamento dos computadores, facilitando a obtenção de respostas de simulação e de cálculos numéricos.

Na literatura, encontram-se trabalhos que visam medir a turbulência próxima à superfície, porém a medida da velocidade resultante $\left(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}\right)$ ou da componente vertical da velocidade na camada limite ainda não é uma realidade. Kiefhaber et al. (2011) afirmam que medidas de turbulência próximas à superfície livre ainda carecem de instrumental adequado.

Outra via de abordagem que vem sendo utilizada em problemas de fluidodinâmica são as simulações numéricas computacionais (Lobosco (2013), Simoes (2012), Oliveira (2013)). Estas simulações, realizadas por meio de *softwares* como o OpenFOAM, CFX, Fluent, entre outros, utilizam modelos numéricos para a resolução de problemas propostos (turbulência, superfície livre, transferência de massa, transferência de calor, etc). Obviamente para a aplicação destes modelos é necessário incluir várias simplificações ao fenômeno, o que pode distanciar a solução numérica de uma solução analítica. Por este motivo, é comum adotar abordagens experimental e numérica em um mesmo estudo de caso.

Uma método de medição da turbulência na superfície foi proposta por Roma (1988). O autor desenvolveu uma sonda baseada no princípio da refração ótica para quantificar a turbulência na superfície da água, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

O atual trabalho buscou o desenvolvimento e investigação de técnicas de medida de turbulência na superfície, promovendo novos estudos no limite da interface atmosfera/água, utilizando a Sonda Ótica proposta por Roma (1988). O estudo contou com mais um instrumento de velocimetria de geração mais recente, o microADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), e com resultados obtidos por simulação numérica, através do *software* livre OpenFOAM.

2 Estrutura da tese

Na introdução deste texto foram apresentados conceitos relacionados à turbulência e transferência de massa. Além disto, justificou-se a importância da elaboração de um instrumento para medida de velocidade na camada limite entre água e atmosfera.

O capítulo 4 apresenta uma revisão bibliográfica e discussão mais aprofundada sobre o regime turbulento de escoamento e o fenômeno da transferência de massa, citando trabalhos relevantes nestes campos de estudo.

O capítulo 5 é uma introdução a conceitos inerentes à instrumentação voltada à velocimetria. A discussão é afunilada para a velocimetria na superfície da água, dando enfoque nos dois instrumentos utilizados nesta pesquisa, sonda ótica (que foi desenvolvida) e microADV. É apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos atuais nesta área.

No capítulo 6 apresenta-se uma revisão bibliográfica de trabalhos que relacionam simulação numérica e turbulência. Nesta seção também são apresentados conceitos básicos sobre simulação computacional e fluidodinâmica computacional (CFD). No referido capítulo serão discutidas algumas opções de simulação que foram adotadas no trabalho.

O capítulo 7 apresenta uma revisão bibliográfica sobre análise de sinal, dando enfoque principalmente às técnicas utilizadas durante a investigação e pesquisa.

No capítulo 8, metodologia, encontra-se a descrição de toda a investigação, desde a geração de turbulência, elaboração da sonda ótica, medidas realizadas pela sonda, artifícios usados com o microADV para a sua utilização próximo à superfície, medidas realizadas com o microADV, modelação do escoamento no tanque, até o estudo e comparação destes resultados.

Os capítulos 9 e 10 apresentam os resultados, discussões e conclusões desta pesquisa.

3 Objetivos

3.1 Objetivos Gerais

- Realizar medidas de parâmetros turbulentos na superfície livre da interface ar e água, com enfoque em sonda lastreada no fenômeno da refração ótica;
- Desenvolver técnica de medida próximo à superfície líquida utilizando medidor acústico de velocidade (microADV);
- Modelar o escoamento existente no tanque com grade oscilante;
- Realizar comparações entre os dois instrumentos de velocimetria para a validação das técnicas de medida junto à superfície líquida.

3.2 Objetivos Específicos

- Estudar os conceitos inerentes ao funcionamento e operação da sonda ótica e microADV;
- Estudar os conceitos inerentes à simulação numérica de escoamentos com uso do *software* OpenFOAM;
- Estudar e aplicar técnicas de análise de sinal às medidas.

4 Turbulência e transferência de massa

Em nosso dia a dia, estamos cercados de fluidos. Água e ar são os exemplos mais visíveis, sendo indiscutível a importância de compreender o comportamento de meios fluidos em movimento.

O escoamento de qualquer fluido pode ser classificado como turbulento ou laminar, de acordo com sua estrutura interna. No regime laminar, o fluido em movimento não apresenta grande mistura, o escoamento é mais "tranquilo". Enquanto que no regime turbulento há grande difusibilidade.

O regime turbulento é o tipo de escoamento mais comum na natureza. Lobosco (2013) diz que, em geral, escoamentos com superfície livres são turbulentos.

A turbulência é um regime de escoamento complexo. Prova disso são as várias definições encontradas para este fenômeno na literatura. Souza et al. (2011) dizem que o certo é que a turbulência é um fator complicador na análise dos fenômenos de transporte de massa, *momentum* e energia.

Feghali (1974) diz que o predomínio das forças de inércia sobre as de viscosidade rompe a estabilidade do escoamento, dando lugar a um regime complexo de movimento, no qual as grandezas físicas em todos os pontos da massa fluida variam a cada instante. Este fenômeno, denominado turbulência, acarreta uma mistura contínua de matéria, como foi demonstrado pela difusão do corante na experiência de Reynolds.

Tennekes e Lumley (1972) destacam que: (i) uma característica muito importante dos escoamentos turbulentos é a sua habilidade para misturar ou transportar propriedades a taxas muito mais elevadas do que aquelas alcançadas pela difusão molecular; (ii) escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e o mecanismo da turbulência necessita de uma alimentação contínua de energia para suprir as perdas viscosas de modo que, se nenhuma energia for fornecida ao escoamento, a turbulência decai rapidamente e (iii) a turbulência é um fenômeno *continuum*, ou seja, mesmo os menores vórtices encontrados nestes escoamentos são tipicamente muito

maiores que a escala de comprimento molecular, fazendo com que a Hipótese do *Continuum* seja válida e o escoamento turbulento seja governado pelas equações de Navier-Stokes.

Hinze (1959) observou a aleatoriedade da turbulência, mas ao mesmo tempo a possibilidade de descrever algumas de suas variáveis de forma estatística, por isso definiu o movimento turbulento de um fluido como a condição irregular do escoamento na qual várias quantidades apresentam comportamento aleatório no tempo e espaço, mas das quais valores médios podem ser obtidos estatisticamente.

Visando simplificar o estudo do fenômeno turbulência, alguns pesquisadores procuram gerar e compreender o comportamento de escoamentos turbulentos isotrópicos e homogêneos. Nesta direção estão os trabalhos com o uso de tanques com grades oscilantes (Yu et al. (2013), Vieira (2012), Zhou e Cheng (2009), Righetto (2008) e etc). Barra (2002) diz que a existência de características comuns a todos os escoamentos turbulentos permite que a compreensão da turbulência isotrópica e homogênea esclareça questões referentes às formas mais complexas de turbulência.

É importante lembrar que na prática não é possível gerar um escoamento totalmente homogêneo e isotrópico. Vieira (2012) testou a isotropia e homogeneidade da turbulência gerada pelo tanque com grade oscilante utilizado neste presente trabalho, por meio de um sistema de PIV estereoscópico. O escoamento turbulento gerado pelo tanque foi considerado homogêneo, porém não isotrópico.

4.1 Tratamento estatístico da turbulência

Em 1895, Osborne Reynolds teve a iniciativa de separar o escoamento turbulento em uma parte média e outra flutuante (Souza et al. (2011)), um passo importante em direção à compreensão e quantificação da turbulência.

A velocidade turbulenta é a soma da velocidade média e a flutuação da velocidade em torno do seu valor médio, ou seja:

$$V = \bar{V} + V' \quad (1)$$

Sendo,

V : Velocidade turbulenta;

$\bar{V}$: Velocidade média;

V' : Flutuação da velocidade.

Como a turbulência é um fenômeno tridimensional, a equação acima se aplica às três componentes da velocidade.

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (2)$$

Sendo,

u : Componente da velocidade turbulenta no eixo x ;

v : Componente da velocidade turbulenta no eixo y ;

w : Componente da velocidade turbulenta no eixo z ;

$\bar{u}$: Componente da velocidade média no eixo x ;

$\bar{v}$: Componente da velocidade média no eixo y ;

$\bar{w}$: Componente da velocidade média no eixo z ;

u' : Componente da flutuação da velocidade no eixo x ;

v' : Componente da flutuação da velocidade no eixo y ;

w' : Componente da flutuação da velocidade no eixo z .

No tanque de grade oscilante, equipamento utilizado neste trabalho para geração de turbulência, não há um escoamento médio, pois todo o movimento é resultado das oscilações da

grade. Por não haver escoamento médio, a velocidade turbulenta medida é a própria flutuação da velocidade. Há então a eliminação de uma variável (velocidade média).

$$V = V' \quad (3)$$

Sendo,

V : Velocidade turbulenta;

V' : Flutuação da velocidade.

Para encontrar padrões no fenômeno, a turbulência começou a ser tratada de forma estatística, analisando-se suas variáveis por meio de valores médios e não valores instantâneos. Porém a média simples das flutuações da velocidade instantâneas de um escoamento em regime turbulento resultaria em zero, pois as flutuações negativas anulariam as positivas.

Para conseguir encontrar a magnitude da velocidade turbulenta, costuma-se usar o valor RMS (*root mean square*), que é a raiz quadrada da média quadrática dos valores, como visto na equação 4.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum V'^2} \quad (4)$$

Sendo,

V_{RMS} : Magnitude da velocidade turbulenta;

V' : Flutuação turbulenta instantânea;

n : Número de elementos.

Por meio do valor RMS é possível saber a amplitude da curva formada pelas flutuações das velocidades instantâneas ao longo do tempo, o que chamamos de intensidade turbulenta.

4.2 Problema de fechamento da turbulência

Para descrever o escoamento de um fluido utilizam-se equações obtidas a partir das leis da conservação de massa e da quantidade de movimento. Para escoamentos em geral é possível chegar à Equação da Continuidade (Equação 5) a partir da lei da conservação da massa e à Equação de Navier-Stokes a partir da conservação da quantidade de movimento. Estas equações utilizam valores instantâneos.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5)$$

Sendo,

u : Componente da velocidade no eixo x ;

v : Componente da velocidade no eixo y ;

w : Componentes da velocidade no eixo z ;

ρ : Massa específica do fluido;

x : Eixo cartesiano;

y : Eixo cartesiano;

z : Eixo cartesiano;

t : Tempo.

Em uma descrição analítica de um escoamento turbulento é necessário substituir os valores instantâneos por valores médios mais a sua flutuação, o que gera equações mais complexas. Porém o escoamento médio se comporta da mesma maneira que o escoamento laminar. Desta forma, seria necessário então a inserção de forças adicionais que considerariam os efeitos da turbulência, chamadas de forças aparentes. Reynolds propôs aproximações conhecidas como tensões de Reynolds ou aparentes, que estão associadas a estas forças (Equação 6).

$$\begin{aligned}
(df_x)_{ap} &= \frac{\partial(\sigma_{xx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})_{ap}}{\partial z} \\
(df_y)_{ap} &= \frac{\partial(\tau_{yx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})_{ap}}{\partial z} \\
(df_z)_{ap} &= \frac{\partial(\tau_{zx})_{ap}}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zy})_{ap}}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zz})_{ap}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{6}$$

Reynolds inseriu as tensões aparentes na Equação de Navier-Stokes (Equação 7).

$$\begin{aligned}
\rho \frac{du}{dt} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\
\rho \frac{dv}{dt} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\
\rho \frac{dw}{dt} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right]
\end{aligned} \tag{7}$$

Sendo,

ρ : Massa específica do fluido;

g : Aceleração gravitacional;

p : pressão estática;

ν : viscosidade cinemática;

$\nabla \cdot \vec{V}$: Tensões de Reynolds (tensões viscosas).

As tensões de Reynolds, ou produto de flutuações de velocidade em diferentes direções, representam o transporte de quantidade de movimento em um escoamento turbulento. Porém a solução destas tensões conduzem a cálculos mais complexos que geram mais incógnitas do que equações, não sendo possível ainda fechar o equacionamento do movimento turbulento.

4.3 Camada limite

O termo camada limite foi inserido primeiramente por Ludwig Prandtl em 1904 em seu trabalho, traduzido para o inglês, "*On the motion of fluids with very little friction*". É chamada de camada limite a região fronteira, ou interface, entre um fluido e outro fluido, um fluido e um sólido, ou até mesmo o mesmo fluido, porém com características ou condições diferentes (água líquida e gelo, por exemplo). A camada limite é uma região com grandes gradientes de velocidade (Figura 3). Estes gradientes são relevantes em fenômenos referentes à interação entre as duas fases, como por exemplo troca de massa ou troca de calor (sendo o gradiente de velocidade já uma troca de quantidade de movimento) .

Figura 3: Gradientes de velocidade em uma camada limite

Segundo Pereira (2002), o fenômeno de transferência de massa em escoamentos turbulentos foi quantificado pela primeira vez por Nernst (1904). Alguns dos modelos para descrição da transferência de massa em escoamentos turbulentos são a teoria dos dois filmes, teoria da penetração, teoria da renovação superficial e modelo da penetração do filme.

4.3.1 Teoria dos dois filmes

Nernst (1904) propôs esta teoria que é descrita por Lewis e Whitman (1924) (*apud* Bennett e Rathbun (1972)). A teoria dos dois filmes afirma que a transferência de massa é regida por uma camada laminar gasosa e outra camada laminar líquida, chamadas de filmes. Nestes filmes a transferência de massa se dá por difusão molecular. Os dois filmes seriam a única resistência à transferência de massa (Pereira (2002)). A equação 8 define a teoria.

$$K_L = D_m / L_f \quad (8)$$

Sendo,

D_m : coeficiente de difusão molecular;

L_f : espessura do filme;

K_L : coeficiente global de transferência de massa.

4.3.2 Teoria da penetração

Higbe (1935), *apud* Coulson e Richardson (1985), defende que esse filme formado na interface ar/água possui um tempo de vida, que é o tempo de formação de outro filme por uma nova porção de líquido proveniente do escoamento. A transferência de massa se daria também pela troca do volume líquido do filme. De acordo com a teoria, todos os elementos da superfície são considerados como possuidores de uma mesma idade, sendo substituídos no mesmo tempo (Pereira (2002)). A equação 9 descreve a teoria.

$$K_L = 2\sqrt{\frac{D_m}{t_e}} \quad (9)$$

Sendo,

K_L : Coeficiente global de transferência de massa;

D_m : Coeficiente de difusão molecular;

t_e : Tempo médio de exposição de uma superfície de fluido a um gás.

4.3.3 Teoria da renovação superficial

Danckwerts (1951), *apud* Coulson e Richardson (1985), expande a teoria da penetração, defendendo que cada elemento da superfície teria tempos diferentes, ou seja, a superfície não seria trocada toda de uma única vez. A equação 10 define a teoria.

$$K_L = \sqrt{D_m s} \quad (10)$$

Sendo,

K_L : Coeficiente global de transferência de massa;

D_m : Coeficiente de difusão molecular;

s : Taxa de produção da superfície por unidade total de área.

4.4 Turbulência na superfície livre da água e transferência de massa

A transferência de massa, passagem de um determinado elemento de um ambiente para outro, é relevante na compreensão de processos e operações industriais e fenômenos da natureza. No campo do saneamento e meio ambiente, tem grande importância o estudo deste fenômeno entre a atmosfera e corpos hídricos, principalmente a transferência de oxigênio. O oxigênio dissolvido é um indicador de qualidade da água e a reaeração de corpos hídricos se relaciona com o processo de autodepuração dos cursos de água.

A transferência de massa ocorre porque as moléculas de determinada espécie tendem a buscar o equilíbrio em regiões com diferentes concentrações. A taxa de absorção por unidade de área em um líquido é dada pela seguinte equação:

$$N = K(C_i - C_B) \quad (11)$$

Sendo,

N : Taxa de absorção por unidade de área;

K : Coeficiente de transferência de massa;

C_i : Concentração da espécie absorvida na interface do líquido;

C_B : Concentração da mesma espécie no local onde este se encontra bem misturado ao líquido.

Hanratty (1991) diz que por causa das pequenas difusividades dos componentes gasosos dissolvidos no líquido, a taxa de transferência no gás, para a maioria dos componentes, é muito maior do que na fase líquida. Como consequência, a pressão parcial das espécies na fase gasosa não varia com a distância da interface, a concentração na interface líquida é o valor de equilíbrio, dado pela lei de Henry (Equação 12) e a taxa de transferência de massa é controlada pelos processos de transporte do líquido.

$$H = \frac{c}{p^*} \quad (12)$$

Sendo,

H : Constante de solubilidade de Henry;

c : Concentração da espécie na fase líquida;

p^* : Pressão parcial das espécies na fase gasosa sob condições de equilíbrio.

Segundo Turney e Banerjee (2010), os valores do coeficiente K de transferência de gás na interface ar / água dependem da interação entre o fluxo próximo à superfície e campos de concentração química.

Pereira (2002) diz que a absorção de gás por um líquido é influenciada fortemente pelo campo de velocidade. Em água parada, o processo de transferência de massa (gás/líquido) ocorre através de difusão molecular, um processo lento. Em águas agitadas, o fenômeno é acelerado e depende de ferramentas complexas relacionadas aos escoamentos turbulentos.

A Lei de Fick da difusão molecular estabelece que o transporte de uma dada molécula se dá devido às interações moleculares. No regime laminar estas interações são lentas, devido à falta de turbilhões. Duclaud e Bowen (2007) citam alguns pesquisadores que mediram simultaneamente turbulência e taxa de oxigenação (Moog e Jirka (1999), Zappa et al. (2003), McKenna e McGillis (2003) e Tsumori e Sugihara (2006)) e como resultado observaram a dependência entre ambas.

Um dos problemas fundamentais que necessita de resolução é relacionar o coeficiente K com o comportamento hidrodinâmico da fase líquida. Pela equação do balanço de massa, descrita por Hanratty (1991), podemos relacionar o campo de concentração no líquido com a velocidade (Equação 13):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{U} + u) \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (13)$$

Sendo,

C : Concentração no líquido;

u, v e w : componentes da velocidade;

x, y e z : direções coordenadas cartesianas.

Esta equação estabelece o balanço de massa em um escoamento ocorrendo principalmente na direção x , por isso o termo $\bar{U}$. Porém, no caso investigado neste trabalho, a velocidade média é igual a zero, ocorrendo apenas as flutuações da velocidade.

Segundo Hanratty (1991), medidas revelam que a espessura da camada limite de concentração é realmente pequena, sendo da ordem de 10 – 200 *microns*. Por este motivo, as derivadas na direção y (normal à interface) são muito maiores do que as derivadas nas outras direções. Sendo assim, percebe-se que a transferência de massa é altamente dependente das flutuações da velocidade normal na região próxima à interface ($\frac{\partial v}{\partial y}$), podendo-se simplificar a equação 13 na forma da equação 14.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (14)$$

Sendo,

C : Concentração;

t : Tempo;

v : Velocidade relativa à interface ou normal;

y : Eixo vertical, normal à interface;

D : Difusividade.

Gulliver (1991) comenta que a teoria discutida por Hanratty (1991), que considera a equação do transporte de massa na camada limite de concentração e elimina muito do empirismo das teorias anteriores, tem forte potencial para aplicação em problemas de transferência de massa entre ar e água em escoamentos turbulentos se a turbulência próxima à esta camada limite puder ser medida.

A velocidade relativa à interface, v , pode ser representada pelo primeiro termo de uma expansão de série de Taylor. Assim, depois de considerar a conservação da massa, próximo a uma interface imóvel, onde u e w não variem, v seria igual ao produto de β , um termo que define a variação da velocidade normal à interface no tempo, pela distância vertical y até a interface, ao quadrado (Equação 15).

$$v = \beta * y^2 \quad (15)$$

e seria igual a equação 16, para interfaces móveis.

$$v = \beta * y \quad (16)$$

Logo, para interfaces móveis,

$$\beta = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (17)$$

Hanratty (1991) comenta que o coeficiente de transferência de massa K seria dependente do divergente β .

$$K \sim \beta \quad (18)$$

A quantificação da transferência de oxigênio é comumente obtida experimentalmente (Zhang et al. (2013), Janzen, Schulz e Jirka (2010), Righetto (2008)). Ao passo que, a medida da velocidade na superfície da água ainda não foi atingida, se tornando um obstáculo na obtenção de um modelo descritivo que relacione reaeração e turbulência.

5 Instrumentação para velocimetria

A medida de velocidade de fluidos (velocimetria) é necessária para solucionar problemas envolvendo fluidodinâmica. O primeiro registro de uma observação mais detalhada da velocidade de um escoamento de água foi feito por Leonardo da Vinci (1452-1519). Ele usou sementes para flutuarem em um escoamento e desenhou um esboço de suas trajetórias.

Existem duas abordagens para observação de um fluxo, a lagrangiana e a euleriana. Pela abordagem lagrangiana, o observador acompanha uma parcela de fluido movendo-se pelo espaço e pelo tempo (Figura 4). Na abordagem euleriana, o observador fixaria seu ponto de observação no espaço e conseguiria visualizar o desenvolvimento do escoamento naquele ponto ao longo do tempo (Figura 5). A observação feita por Da Vinci foi lagrangeana, já que este observou a trajetória de pequenas porções de fluido ao longo do espaço e tempo.

Figura 4: Velocimetria lagrangiana

Figura 5: Velocimetria euleriana

Desde então, várias técnicas e instrumentos para velocimetria foram desenvolvidos: tubos de pitot, anemômetros a fio e filme quente, PIV (*Particle Image Velocimeter*), sensores Doppler, sensores ultrassônicos (microADV), etc (Obs.: todos os instrumentos citados baseiam-se na abordagem lagrangeana).

5.1 Velocimetria na superfície da água

Estudiosos que visam calcular a taxa de transferência de massa têm grande interesse na medida de turbulência na superfície, ou camada limite de troca. Na literatura, encontram-se trabalhos que visam medir a turbulência próximo à superfície, porém a medida de turbulência nesta camada ainda não é uma realidade devido a limitações nos métodos de medida, que são perturbados pela presença da superfície ou interferem na camada superficial pela presença no meio. Seguindo esta tendência, Kiefhaber et al. (2011) afirmam que medidas de turbulência próximas à superfície livre ainda carecem de instrumental adequado.

A troca de gases na interface ar-água é fortemente dependente da forma do campo de onda. Inúmeros instrumentos e métodos foram desenvolvidos para medir as propriedades do campo de onda no oceano aberto, que vão desde a medida da capacitância de fios, até o uso de radar com auxílio de satélites. Os métodos óticos têm a vantagem de serem não-intrusivos. Cox e Munk (1954), considerados pioneiros nas medições óticas de estatísticas de onda, tiraram fotografias do reflexo do sol na superfície do mar e derivaram distribuições de probabilidade da inclinação da onda. Outra abordagem, de medições baseadas em reflexão da estrutura da superfície da água feita por Zappa et al. (2003), usou a dependência angular da polarização da luz refletida. Esta técnica de imagem polarimétrica é capaz de reconstruir mapas 2D da inclinação da superfície da água, mas é limitada a condições ambientais restritas.

Com base no trabalho de Cox e Munk, Waas e Jähne (1992) desenvolveram o medidor de inclinação de onda por foto reflexiva estéreo (RSSG). Usando uma fonte de luz artificial, o RSSG pode medir estatísticas de superfície do talude independente das condições do dia e do meio ambiente. Uma configuração de câmera especial estéreo que é otimizada para a superfície da água, refletindo specularmente, permite a medição simultânea da inclinação de onda e sua amplitude.

Orlins et al. (2001) mapearam a superfície livre de um escoamento utilizando um PIV, mostrando o comportamento da velocidade em duas dimensões. O trabalho aponta para a necessidade de novas técnicas de análise de sinal, que considerem tempo e frequência, para a descrição completa da turbulência em uma superfície livre.

Fujita (2002) também utilizou um método ótico na tentativa de medir a velocidade na superfície livre da água. Com um sistema denominado velocimetria por imagens espaço-temporais (STIV), Fujita (2002) obteve um gradiente de brilho da superfície da água que está diretamente relacionado com a velocidade superficial na direção do escoamento principal. O método STIV não funciona bem em baixas velocidades, quando há poucas ondulações na superfície.

Kiefhaber et al. (2011) desenvolveram e construíram um instrumento ótico melhorado para a medição da inclinação e estatísticas de altura de ondas gravitacionais, capilares e curtas, geradas pelo vento no oceano.

Com base na literatura recente sobre a troca de gases na superfície livre, entende-se que a medida de turbulência na interface gás/água ainda é uma área com dificuldades de avanço, seja devido à introdução de elementos que perturbam o escoamento ou de perturbação nas medidas causadas pela presença das tensões superficiais, ressaltando que a turbulência é um fenômeno tridimensional.

Essa situação, que ainda perdura, já motivara, em 1988, o desenvolvimento de sonda utilizando o fenômeno da refração ótica para quantificar a turbulência na superfície da água, na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) (Roma (1988)).

Neste trabalho, dois instrumentos serão utilizados para realizar medidas de velocidade na superfície da água, a Sonda Ótica e o microADV, descritos nas seções 5.1.1 e 5.1.2.

5.1.1 Sonda Ótica

Segundo Pereira (2002), o funcionamento da sonda proposta por Roma (1988) baseia-se na refração ótica da luz. A sonda capta a variação da luz causada pelo movimento da interface ar/água e gera um sinal elétrico proporcional a este movimento ou deformação. O sensor ótico consiste em duas partes conectadas, o emissor e o receptor de luz. O emissor de luz é composto por uma lâmpada incandescente e refletor parabólico. O receptor de luz é constituído por um foto transistor submerso na água. O foto transistor gera um sinal elétrico que é digitalizado e

coletado por um registrador de dados. A partir deste ponto, os dados podem ser lidos, tratados e analisados.

Figura 6: Sonda ótica

5.1.2 MicroADV

O microADV ou ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) é uma sonda ultrassônica que utiliza ondas sonoras para obter as componentes da velocidade em um volume. O volume de controle do instrumento é de $0,1 \text{ cm}^3$ e localiza-se a 5 cm do sensor. O microADV pode medir desde velocidades menores que 1 mm/s até velocidades maiores que 2,5 m/s e a aquisição de dados ocorre a frequências de até 50 Hz (Figura 7).

O microADV é composto por um emissor de ultrassom, três receptores (correspondentes às direções x, y e z) e um módulo eletrônico de processamento. O emissor gera um sinal que é refletido pelas partículas presentes no meio líquido para os receptores e utilizado para calcular as componentes da velocidade com base no efeito *Doppler*.

Uma dificuldade do microADV em seu uso na medida de velocidade na superfície é o fato de que o emissor e os receptores têm que estarem no mesmo meio que o volume de medida, e neste caso têm que estarem submersos para realizar as medidas.

Figura 7: MicroADV

Beya, Peirson e Banner (2011) usaram um microADV para medir a turbulência gerada por gotas de chuva. As medidas não são feitas na superfície, pois existe a limitação da amostra ter de estar a 5 cm do sensor e este ter de estar submerso. Para estudos que visam calcular a taxa de transferência de massa seria necessária a medida da turbulência na superfície, que é a camada limite da troca.

6 Simulações numéricas

Métodos numéricos são um conjunto de ferramentas e/ou métodos utilizados para obter a solução de problemas matemáticos de forma aproximada. Estas ferramentas são utilizadas quando não é possível encontrar uma solução analítica exata para o problema. Normalmente nestes casos se tem uma equação em que uma variável é função de outra ou outras variáveis com curvas características próprias (função própria).

A simulação numérica nada mais é do que a aplicação computacional dos métodos numéricos, o que só tornou-se possível com o advento do computador. A resolução de problemas mais complexos avançou juntamente com o avanço dos recursos computacionais.

Atualmente, a simulação numérica é utilizada para resolver problemas relacionados a escoamentos turbulentos, Mansour (1999), aerodinâmica, Wang e Hu (2012), geologia e geofísica, TANG (1997), etc.

É importante lembrar que a simulação numérica não descarta a necessidade de trabalhos experimentais, pois estes, na maioria dos casos, representam a única forma de validação dos modelos.

6.1 Simulação de escoamentos

Dentro do campo de simulações numéricas, o conjunto de técnicas matemáticas e numéricas que, através de cálculos computacionais, é capaz de fornecer soluções e análises de problemas que envolvam escoamento de fluidos associados ou não com transferência simultânea de massa ou calor é conhecido como CFD (Fluidodinâmica Computacional) (Mendes (2012)).

Neste trabalho simulou-se um escoamento ocorrendo em um tanque, ocasionado pela oscilação de uma grade (como o caso real). Este caso envolve dois fluidos (água e ar), regime turbulento de escoamento e superfície livre.

Alguns ambientes para a realização da simulação numérica (*softwares*) são o OpenFOAM, CFX, ANSYS, Fluent, dentre outros. Neste trabalho escolheu-se o *software* OpenFOAM por este ser um *software* livre de código aberto, o que além do fator econômico, proporciona o acesso aos códigos de *solvers* já implementados, permitindo a inclusão de características específicas de cada caso.

6.1.1 Tratamento da turbulência em simulações numéricas computacionais

Na área de dinâmica de fluidos, a compreensão e representação da turbulência é considerada uma tarefa complexa, lembrando que o regime turbulento é formado por estruturas tridimensionais de diferentes tamanhos. O próprio estudo teórico do fenômeno esbarra nas dificuldades matemáticas comentadas anteriormente neste trabalho. Em se tratando de simulações numéricas, cálculos relacionados a escoamentos turbulentos são muito mais difíceis e custosos computacionalmente do que cálculos relacionados a escoamentos laminares. Os custos aumentam ainda mais de acordo com o nível de detalhamento da investigação.

A simulação de escoamentos turbulentos pode ser dividida em três categorias. A primeira delas, considerada a mais complexa é a Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation-DNS*). A DNS pretende calcular o escoamento não permanente em todas as escalas do escoamento turbulento, calculando variações do movimento no tempo e no espaço, além da presença de grandes e pequenos turbilhões (limitados pelo refinamento da malha).

Em segundo nível de complexidade, está a Simulação de Grandes Vórtices (*Large Eddy Simulation-LES*). Esta técnica se torna menos complexa porque os cálculos são realizados apenas para os grandes vórtices, enquanto os menores vórtices existentes no escoamento são representados por valores obtidos em modelos pré existentes. No modelo dos pequenos vórtices considera-se que estes são isotrópicos, ou seja, são estatisticamente invariáveis rotacionalmente (no sistema de coordenadas).

A terceira categoria, menos custosa do que as duas anteriores, é a utilização de modelos pré calculados de turbulência para todo o escoamento, não pretendendo a realização de cálculos de um novo modelo para simular o comportamento não permanente em nenhuma escala. Nestes

modelos são embutidas aproximações que dependem de constantes ou funções empíricas para o fechamento matemático das equações Simoes (2012).

Nesta pesquisa optou-se pela utilização da simulação numérica direta, tendo-se em mente que o comportamento da turbulência gerada no tanque não é isotrópica. Além disto, considerou-se importante em uma primeira abordagem realizar os cálculos em todas as escalas existentes, limitando-se apenas pelas dimensões da malha. Desta forma, a técnica DNS foi considerada a melhor opção para modelar o comportamento turbulento do tanque, com suas variações no tempo e espaço.

6.1.2 OpenFOAM

O OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) é principalmente uma biblioteca de arquivos escritos na linguagem C++ usados para criar aplicações executáveis. Estas aplicações podem ser *solvers*, desenvolvidos para resolver problemas específicos, ou utilitários, desenvolvidos para resolver tarefas envolvendo a manipulação de dados. Um dos pontos fortes do OpenFOAM é a possibilidade de criar um novo *solver* OpenFoam (2015).

O seu desenvolvimento começou no final da década de 80 no *Imperial College*, em Londres, motivado pela vontade de encontrar uma plataforma de simulação mais robusta e flexível que a plataforma padrão naquela época, o Fortran. Desde então, o OpenFOAM evoluiu, tendo sido reescrito várias outras vezes. O predecessor, FOAM, foi vendido pela companhia britânica Nabla Ltd. antes de ser liberado como código aberto em 2004.

A solução de qualquer problema no OpenFOAM deve passar por três etapas, o pré-processamento, solução e pós-processamento. O pré-processamento inclui a definição de condições iniciais, definição de geometria e de malha e configuração de características de cada fase (no caso de um problema multifásico). A solução envolve a escolha do solver correto para o problema específico. Nesta etapa o problema será solucionado, de acordo com as informações dadas e com os tempos e intervalos especificados. O pós-processamento é a visualização destes resultados. Neste ponto é necessário algum outro *software*. O Paraview foi escolhido para esta tarefa (Figura 8).

Figura 8: Etapas da solução de um problema no ambiente OpenFOAM

6.1.3 Oscillating box

O caso oscillating box, existente no conjunto de casos resolvidos para escoamentos incompressíveis, simula uma caixa que oscila na superfície de um canal. Este caso base possui semelhanças com o caso real que se desejava simular, já que a situação representa um escoamento com superfície livre e movimento oscilatório. Por este motivo, este caso foi utilizado como caso base.

No caso original, uma caixa na superfície livre de um canal oscila verticalmente gerando ondas (Figura 9). A superfície livre da água é simulada através do *solver* potentialFreeSurfaceFoam, que será explicado adiante.

Figura 9: Caso Oscillating box do OpenFOAM

***Solver* potentialFreeSurfaceFoam**

O potentialFreeSurfaceFoam é um solver que soluciona as equações de Navier-Stokes em casos de escoamentos monofásicos e incompressíveis. Porém, o *solver* pode prever adequadamente o comportamento de uma superfície livre onde os efeitos da fase de menor densidade

podem ser negligenciados e onde não há quebra de ondas. O custo computacional deste *solver* é significativamente mais baixo do que *solvers* que capturam a interface, pois neste *solver* a superfície livre é simulada através de condições de contorno e não através do mapeamento de diferentes características físicas dos dois fluidos e interação entre eles.

O problema é resolvido em uma malha estática, portanto o perfil da superfície livre só é conhecido através de valores denominados zeta, que descrevem a provável altura de onda na superfície livre. Quando abastecido com as condições de contornos apropriadas, o *solver* pode aproximar geometrias móveis mesmo com uma malha estática.

A condição de contorno utilizada para simular a superfície livre é a *waveSurfacePressure*. Esta condição é aplicada para superfícies que correspondam à superfície livre. Ela computa a altura de onda e a mudança de pressão devido à mudança do perfil da superfície. Esta mudança é calculada integrando a velocidade do fluido na superfície livre através do tempo. A pressão muda devido à variação da posição da superfície relativa ao nível contínuo da água.

O *potentialFreeSurfaceFoam* possui baixo custo computacional em comparação com *solvers* multifásicos e de malha dinâmica, porém ainda pode simular a superfície livre. Outra vantagem do seu uso é que a malha estática facilita a preparação de um código computacional para a extração das informações em um único ponto na superfície (mesmo ponto no espaço e tempo para todas as velocidades de oscilação da grade). Assume-se que o fator importante na redução da componente vertical da velocidade ao se aproximar da superfície livre é a presença da própria superfície. Logo, se nesta camada as condições corretas são assumidas (pressão e nível), é possível observar o comportamento da velocidade na região.

7 Análise de sinal

7.1 Sinais e análise de sinal

Um sinal é definido como a variação de um ente físico em função de uma variável independente, sendo muito comum a descrição do comportamento de um fenômeno ao longo do tempo.

Este sinal pode ser analógico, discreto ou digital. Chama-se analógico o sinal que é contínuo, ou seja, em um passo da variável independente se encontram infinitos valores, com precisão infinita. Um sinal discreto é um sinal que possui uma taxa de amostragem finita. Se em um sinal discreto a precisão dos valores de cada ponto também for finita, podendo estes valores serem armazenados e registrados em um computador, este sinal é chamado de digital.

A maioria dos fenômenos ocorrem naturalmente de forma analógica. Porém as ferramentas mais avançadas de processamento e análise de sinais se aplicam a sinais digitais, tornando-se necessária a sua discretização e digitalização. Os instrumentos utilizados neste trabalho medem um fenômeno contínuo, mas geram um sinal digital.

Com o intuito de encontrar similaridades entre os sinais obtidos pela sonda ótica, microADV e simulação numérica, foram estudadas ferramentas de correlação e comparação. Primeiramente pensou-se na correlação simples de Pearson, porém segundo Pereira (2013), medidas comuns de correlação podem não ser adequadas para a tarefa de encontrar similaridades entre sinais variantes no tempo. Esta inadequabilidade foi também verificada neste trabalho.

Uma ferramenta considerada interessante e estudada mais a fundo neste trabalho foram as transformadas *Wavelet*, pois estas possuem a capacidade de manter informações de frequência e tempo.

7.1.1 Wavelet

O conceito de *wavelet* é introduzido no início da década de 80 por Alex Grossmann e Jean Morlet, embora Alfred Haar já houvesse mencionado em sua tese de doutorado, em 1909, a ideia de uma análise de sinal escalonada. Alex Grossman e Jean Morlet analisavam sinais geofísicos destinados à exploração de petróleo e gás quando constataram que, durante as repentinas variações do sinal, a análise de Fourier não estava sendo eficiente Oliveira (2007). Em 1985, Stephane Mallat deu às *wavelets* um grande impulso através de seu trabalho em processamento digital de imagens Lima (2003).

A análise *wavelet* se mostra útil em situações em que o sinal possui variações abruptas e curtas, pois permite uma resolução variável no tempo. A resolução no tempo torna-se boa para altas frequências e a resolução em frequência torna-se boa para baixas frequências (Figura 10).

Figura 10: Resolução tempo x frequência: (a) Transformada de Fourier de tempo curto (Gabor) e (b) Transformada Wavelet

O procedimento de análise adota uma função, chamada de *wavelet*-mãe e uma função de escala, comumente chamada de *wavelet*-pai. Toda função *wavelet* deve possuir oscilações com decaimento rápido no tempo (característica que dá origem ao seu nome) (Figura 11). Da análise, resultam coeficientes que são a projeção do sinal original sobre a função *wavelet* e função escala (Equação 19). Em posse dos coeficientes, da função *wavelet*-mãe e da *wavelet*-pai, é possível reconstruir o sinal.

Figura 11: Função wavelet

$$W(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) d\tau \quad (19)$$

onde,

$W(a, t)$: Coeficientes wavelets

a : Função escala, *wavelet*-pai;

$x(t)$: Sinal original;

$g(t)$: Função *wavelet*-mãe;

Usando-se *wavelet* é possível decompor o sinal, separando este em uma parte de frequências mais baixas, chamada de aproximação ($a1$), e uma outra parte de frequências mais altas, chamada de detalhe ($d1$) (Figura 12). Os dois sinais gerados da decomposição possuem a mesma duração do sinal original. O número de amostras, originalmente, também é o mesmo. Porém, se esta característica permanecesse, a quantidade de dados no total aumentaria, o que não é interessante. Por isso apenas uma em cada duas amostras do sinal filtrado é considerada, seguindo a ideia de *downsampling*. Os sinais gerados são resultantes de transformadas *Wavelet*, ou seja, sinais compostos de coeficientes e não dados exatamente iguais ao sinal original. Estes sinais permitem a reconstrução do sinal original e portanto carregam informações sobre ele.

É possível decompor o sinal em mais níveis, sendo comum continuar a decompor as aproximações (Figura 13). A decomposição dos detalhes e das aproximações em mais de um nível recebe o nome de *wavelet packet* (Figura 14).

Figura 12: (a) Sinal; (b) Sinal decomposto-aproximação (a1); (c) Sinal decomposto-detalle (d1)

Figura 13: Decomposição da aproximação em mais de um nível

Figura 14: Wavelet packet

As funções e transformadas *wavelet* vêm sendo muito utilizadas em análise de sinais. Gamboa-Medina (2013) usou a ferramenta para analisar sinais de vazão e pressão, com o objetivo de detectar vazamentos em redes sob pressão. McCullough e Kareem (2013) usaram *wavelet* para testar a estacionaridade de sinais. Segundo eles, as transformadas *wavelet* pro-

duzem uma distribuição tempo-frequência da energia e possuem a habilidade de identificar componentes em transição em processos não-estacionários.

Como visto anteriormente, é possível decompor um sinal utilizando as transformadas *wavelet* com resolução variável. A partir destes sinais decompostos em faixas de frequência e/ou tempo, é possível ainda aplicar outras ferramentas. Neste trabalho as duas ferramentas utilizadas foram a energia e a coerência *wavelet*.

7.1.2 Energia wavelet

A ferramenta energia *wavelet* permite, a partir dos sinais decompostos, conhecer a quantidade de informação do sinal contida em cada faixa de frequência. Este valor é obtido através do somatório dos coeficientes existentes em cada sinal decomposto (Equação 20), sendo o coeficiente uma medida de proximidade entre o sinal original e a função *wavelet* na frequência corrente.

$$ene = \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (20)$$

Com os valores de energia calculados para cada vetor resultante da decomposição é possível saber a quantidade de informação (ou energia) do sinal contida em cada faixa de frequência (Figura 15).

7.1.3 Coerência wavelet

Uma ferramenta utilizada para comparar sinais temporais não-estacionários é a coerência *wavelet* (Varanis e Pederiva (2011), Labat (2005), Jevrejeva (2004), Martinerie e Varela (2002)). Esta ferramenta avalia similaridades entre dois sinais e coerência (mesma defasagem entre um e outro, se existente) considerando diferentes escalas (frequências) do sinal por todo o seu comprimento (tempo). De acordo com Jevrejeva (2004), é útil pensar na ferramenta coerência *Wavelet* como um coeficiente de correlação localizado no espaço tempo-frequência.

Figura 15: Cálculo da energia *wavelet* dos vetores de decomposição

A ferramenta gera como resultado um gráfico com cores variando do azul ao amarelo representando valores de 0 a 1, que avaliam a similaridade entre os dois sinais comparados em cada ponto. Além disto, a ferramenta não é afetada por pequenos deslocamentos no tempo. Somente as regiões correlatas são comparadas também quanto à coerência (mesmo deslocamento no tempo entre os sinais) entre os valores. A defasagem é mostrada por setas que indicam o atraso de fase (Figura 16). Por exemplo, setas horizontais apontando para a esquerda indicam uma defasagem de 180° e para a direita, uma defasagem de 0° .

Figura 16: Gráfico gerado pela ferramenta *wcoherence*

No eixo x da figura 16 observa-se o tempo ou comprimento do sinal (4096 no caso das comparações entre sonda ótica e microADV). No eixo y o gráfico gerado mostra originalmente frequências normalizadas, ou quantidade de ciclos por amostra. Por exemplo, 0,25 ciclos por amostra significa que 1 ciclo é dado a cada 4 amostras do sinal. Logo, em um sinal obtido a uma taxa de amostragem de 32 Hz, 0,25 ciclos por amostra equivale a 8 Hz, sendo que a máxima frequência possível observada será de 16 Hz. Como esta forma de notação para frequência não é comumente usada, os resultados de coerência *Wavelet* gerados nesta pesquisa tiveram seu eixo y alterado para frequências de onda, em *Hz*.

8 Metodologia

8.1 Geração de turbulência

A primeira etapa do trabalho consistiu em gerar turbulência na água com diferentes intensidades. O sistema de geração de turbulência utilizado, composto de um tanque de acrílico e um sistema biela-manivela acoplado a uma grade para gerar oscilações, foi montado por Righetto (2008). O tanque possui base de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ e 1 m de altura. O material escolhido para a fabricação foi acrílico, e o nível da água foi mantido em aproximadamente 55 cm .

O sistema biela-manivela foi montado para ser acionado por um conjunto de polias e movido por meio de um motor elétrico. A rotação do motor faz com que a grade oscile verticalmente de acordo com o comprimento e raio da biela-manivela.

Para variar a rotação do motor instalou-se um inversor de frequência (WEG) e para contabilizar as oscilações da grade utilizou-se um contador digital.

Na Figura 17 é representado o esquema de oscilação da grade dentro do tanque. Com a oscilação da grade, o fluido é forçado a passar através dela formando jatos que movimentam massa fluida gerando turbilhões que se propagam, provocando a turbulência na superfície.

Figura 17: Sistema gerador de turbulência

A grade oscilante tem barras de seção $10 \times 10 \text{ mm}$, montadas em forma de malha quadrada, com *mesh* (espaçamento) de 5 cm . Possui $49 \times 49 \text{ cm}$ de medidas externas e $27,98\%$ de solidez

(Figura 18). Ela está localizada a 16 *cm* do fundo e oscila verticalmente com 10 *cm* de amplitude.

Figura 18: Grade

Na Figura 19 é ilustrado o sistema completo utilizado no experimento. Foram realizados ensaios em oito frequências de oscilação da grade pré-determinadas: 18,25; 38; 57,25; 95,5; 118; 135,25; 154,25; e 175 *opm*, que correspondem a 0,304; 0,633; 0,954; 1,591; 1,966; 2,254; 2,571 e 2,916 *Hz*.

Figura 19: Foto do tanque com grade oscilante

8.2 Velocimetria

Os instrumentos medidores de velocidade utilizados neste trabalho foram o microADV e a Sonda Ótica. O microADV é um instrumento consagrado que tem seu funcionamento baseado no efeito doppler. A velocidade nesta sonda é calculada a partir de um sinal elétrico gerado pela reflexão de ondas ultrassônicas causada pela presença de partículas que se movimentam acompanhando o movimento da água.

A sonda ótica é o instrumento proposto e investigado nesta pesquisa e baseia-se no fenômeno da refração ótica. O sinal medido pelo instrumento é a variação da intensidade luminosa que atinge o sensor após a refração causada pelo movimento da superfície livre.

8.2.1 Sonda Ótica

A Sonda Ótica é composta por uma lâmpada incandescente, alimentada por corrente contínua, que emite luz concentrada por um refletor parabólico, e um foto transistor que detecta a quantidade de luz alterada pelo movimento da água (Figura 20).

Figura 20: Esquema de funcionamento da Sonda Ótica

O movimento da água, gerado pelas oscilações da grade, altera a refração da luz emitida pela lâmpada incandescente. O foto transistor (receptor da luz) fica submerso na água e emite um sinal elétrico, que é armazenado em um datalogger (modelo CR10X).

Elaborou-se um programa na linguagem do datalogger para adquirir 4096 amostras a uma frequência de 32 Hz. Este valor de frequência de amostragem foi escolhido porque o datalogger,

equipamento que transforma o sinal analógico da sonda ótica em sinal digital, adquire dados em frequências com valores definidos por uma potência de 2. Já o microADV, o outro instrumento de velocimetria utilizado nesta pesquisa, permite uma frequência de amostragem de até 50 Hz . Para que os dois instrumentos realizassem medidas na mesma frequência escolheu-se a taxa de amostragem de 32 Hz , a maior frequência comum aos dois conjuntos.

A sonda gera um sinal de tensões elétricas (unidade mV) relacionado à turbulência, porém ainda não se sabe que característica é melhor representada por este sinal. Para descobrir se o sinal se relaciona à componente vertical da velocidade, os valores obtidos com a sonda ótica serão comparados aos valores obtidos pelo microADV. É importante lembrar que para um sinal formado à taxa de amostragem de 32 Hz , somente será possível observar frequências até metade deste valor, 16 Hz .

8.2.2 MicroADV

O microADV é um instrumento de velocimetria composto por um emissor de ultrassom, três receptores (correspondentes às direções x , y e z) (Figura 21) e um módulo eletrônico de processamento. O instrumento é sensível à reflexão de ondas ultrassônicas, causada pela presença de partículas adicionadas ou já existentes na água.

Por meio do *software* de visualização HorizonADV foi possível adquirir e observar os dados gerados, como componentes da velocidade na direção x , y ou z , amplitude dos sinais, ruídos, etc. Estes dados são sinais elétricos detectados e convertidos para componentes da velocidade na direção especificada.

Se os dados de velocidade mostrados pelo microADV estiverem com alto nível de ruído é necessário inserir material traçador na água. As partículas utilizadas como material traçador são microesferas de vidro ocas, com diâmetro médio de 10 *microns* e mesma densidade que a água.

Para esta pesquisa, que teve por objeto de estudo a turbulência diretamente na superfície, o instrumento possui o inconveniente de localizar seu volume de amostragem a 5 cm do emissor de ultrassom (devido à própria geometria do instrumento), e este ter de estar inserido na água.

Figura 21: MicroADV- volume da amostra observada (Adaptado Fonte: <http://www.sontek.com>)

Fez parte do escopo deste trabalho testar maneiras de superar esta dificuldade e tornar possível a utilização do microADV para realizar medidas de turbulência o mais próximo possível da superfície.

Um dispositivo auxiliar foi desenvolvido e fixado ao instrumento. O dispositivo é um reservatório cilíndrico com abertura inferior. A ideia consiste em manter a peça preenchida com água, com o emissor de ultrassom e sensores em seu interior. O fechamento e vedação completa da peça, acoplada ao microADV, permite que o sistema se posicione acima da superfície de água no tanque.

O dispositivo auxiliar utilizado nos ensaios de comparação entre microADV e Sonda Ótica possuía a abertura inferior com diâmetro menor que o diâmetro superior, com o intuito de minimizar a interferência que a presença da peça poderia estar causando na superfície livre, como é mostrado no esquema da Figura 22 e na imagem da Figura 23.

Alguns ensaios foram realizados para avaliar a interferência que o dispositivo auxiliar e a coluna de água contida nele, localizada acima da amostra, poderiam causar nas medidas.

Figura 22: Esquema do dispositivo criado para utilização do microADV na superfície, com diâmetros superior e inferior diferentes

Figura 23: MicroADV com peça acoplada

Nestes ensaios, o dispositivo utilizado era cilíndrico (Figura 24), possuindo o mesmo diâmetro superior e inferior, como na figura 25. Esta opção foi escolhida para facilitar o deslocamento do microADV além do nível em que está a peça. Estes ensaios serão melhor explicados na subseção 8.5.2.

Figura 24: Dispositivo auxiliar cilíndrico (com diâmetros superior e inferior iguais)

Figura 25: Esquema do dispositivo criado para utilização do microADV na superfície, com diâmetros superior e inferior iguais

O parâmetro escolhido para comparação com os resultados obtidos pela sonda ótica foi a componente vertical da velocidade.

8.3 Simulação em OpenFOAM

Uma abordagem utilizada para conhecer o fenômeno que ocorre no tanque foi a simulação numérica do escoamento. A modelação foi realizada através do *software* OpenFOAM. O desenvolvimento desta etapa da pesquisa ocorreu no *Saint Anthony Falls Laboratory*-SAFL, na Universidade de Minnesota, Estados Unidos.

A Universidade de Minnesota disponibiliza um sistema de servidores, compartilhado com grupos de pesquisa de diversas áreas. A utilização deste sistema impôs certas condições, como tempo limite, espaço em disco e limite de arquivos gerados, que serão comentados no decorrer desta seção.

A versão do *software* OpenFOAM escolhida foi a 2.20, versão mais recente dentre as disponibilizadas pelo sistema. Como já explicado na revisão bibliográfica, em simulações numéricas com o uso do OpenFOAM, é comum a utilização de um caso base como ponto de partida para a resolução de um problema de simulação. Nesta pesquisa, escolheu-se o caso *OscillatingBox*, contido nas opções de escoamentos incompressíveis. No caso original, uma caixa oscila na superfície livre de um canal, gerando ondulações. Estas ondulações são visualizadas através dos valores denominados zeta, porém não há deslocamento de malha.

Para a simulação numérica do escoamento no tanque com grade oscilante, primeiramente foi alterada a geometria e medidas da malha do caso original, transformando o canal em um tanque com dimensões iguais ao tanque real (Seção 8.3.1 e Apêndice B).

Em seguida, elaborou-se a geometria da grade, tratando esta como objeto oscilante, como antes era a caixa na superfície do canal. Especificando a grade como um objeto, é possível aplicar a todo ele uma velocidade de oscilação, que foi definida na descrição das velocidades (Apêndice A). Neste arquivo, para descrever a velocidade da grade, são definidas a amplitude de oscilação em metros e a velocidade em Hz .

As células contidas no interior da geometria da grade têm que ser removidas da malha estática para permitir a oscilação do objeto naquela região. Esta remoção é feita no arquivo *topoSetDict* (Apêndice F).

A categoria de simulação numérica escolhida foi a Simulação Numérica Direta (DNS). Apesar do custo computacional deste tipo de simulação, considerou-se importante esta ser a primeira abordagem. Este fato permite a observação de pequenos e grandes turbilhões, limitando-se pela dimensão das células.

8.3.1 Geração da malha

A primeira etapa de um trabalho de simulação numérica é a geração da geometria e da malha em que serão realizados os cálculos. A geometria gerada foi a do tanque com a grade, nas dimensões do caso real (Figura 27). A malha gerada possui 7661124 células. Buscando um maior refinamento na superfície da água, as células desta camada possuem dimensões diferentes do restante. Considerando o eixo de coordenadas mostrado na figura 27, as células na maior parte do corpo de escoamento possuem 3 mm no sentido x e z e 2 mm no sentido y. Na última camada, referente à superfície, estas dimensões continuam sendo de 3 mm no eixo x e z, mas foram alteradas para 1 mm no eixo y (visando uma definição maior no sentido da espessura da camada limite), conforme mostrado na figura 26.

Figura 26: Dimensões da malha nos eixos x,y e z

Em um primeiro momento, se pensou na geração de uma malha mais refinada próximo à superfície da água, com células de aproximadamente 100 microns de altura, pois segundo Hanratty (1991), vários estudos mostram que a espessura da camada limite varia entre 10 e 200 microns. Porém, este nível de refinamento não foi possível devido a algumas características do *software* e limitações do sistema. No caso escolhido como base neste trabalho, o *software* OpenFOAM não permite que exista um desencontro entre as dimensões x e z das células. Por este motivo, tanto no interior como na superfície, as dimensões no eixo x e z das células não

Figura 27: Geometria do tanque gerada no *software* OpenFOAM

são alteradas. O refinamento no eixo y é possível, desde que seja feito de forma gradual. No entanto, este refinamento foi limitado pelos recursos disponibilizados pelo sistema. O grande refinamento, mesmo que gradual, no eixo y da simulação acarretaria a geração de um número muito maior de células. Este incremento necessitaria de um limite maior de tempo, espaço em disco e de número de arquivos disponibilizados pelo sistema.

8.3.2 Processamento

Os casos no OpenFOAM possuem, normalmente, três pastas de informação ou dicionários: *0*, *constant* e *system*.

As condições iniciais são inseridas na pasta *0* ou *0.org*. No caso escolhido, estas condições incluem velocidade e pressão. O *solver potentialFreeSurface* permite a inclusão de uma condição de velocidade oscilatória, que foi utilizada neste trabalho (para cada um dos 8 ensaios realizados foi gerado um novo script de velocidade, alterando-se somente a velocidade de oscilação da grade). Os scripts do openFOAM com as condições iniciais estão disponíveis nos apêndices A, C e D.

Na pasta *constant* inserem-se as informações de geometria e malha. A pasta *system* contém arquivos com informações referentes à duração da simulação, intervalo de tempo entre as

simulações, intervalo de tempo em que se deve escrever os resultados, e outros dados inerentes ao *solver* (Apêndice E).

Como comentado anteriormente, o sistema de servidores disponível para a realização desta etapa do trabalho impôs algumas limitações. Uma destas limitações foi o tempo disponibilizado para resolução do problema. Cada trabalho submetido estava sujeito a um tempo limite de 96 horas. Este tempo não permitiu, nas configurações estabelecidas, a simulação de 128 segundos de escoamento (duração dos ensaios realizados com a sonda ótica e microADV). Desta forma, optou-se por encurtar a simulação, modelando o fenômeno para 70 segundos de duração.

8.3.3 Pós processamento

Para a visualização das imagens que representam o escoamento no tanque e da própria geometria e malha gerada foi utilizado o *software* paraview (Figura 28).

Além da modelagem do escoamento, foram extraídos dados de componentes verticais da velocidade ao longo do tempo, em um único ponto localizado na superfície. Este conjunto de dados foi comparado com os sinais adquiridos pelo microADV de forma a verificar a adequação da simulação com os dados experimentais. A realização de pequenos processamentos e análises é possível no paraview, porém o programa torna-se inviável para processos maiores, como foi o caso da extração de dados. Para esta tarefa, foi utilizado o *software* matLAB.

8.4 Análise de sinal

Os dois instrumentos de velocimetria, sonda ótica e microADV, foram configurados para gerar um sinal com 4096 pontos adquiridos a uma frequência de 32 Hz. A simulação numérica gerou sinais mais curtos, com 2240 pontos ou 70 segundos, gerados a uma frequência também de 32 Hz. O microADV disponibiliza vetores de velocidade resultante e componentes x, y e z da velocidade, em cm/s . A sonda ótica gera um vetor de tensões elétricas em mV e da simulação numérica foram extraídas séries de componentes verticais da velocidade em m/s .

Figura 28: Exemplo de imagem visualizada no *software* paraview

Estes sinais foram comparados com o uso das ferramentas energia *wavelet*, *Wavelet Coherence* e análise espectral, via transformada rápida de Fourier (FFT).

8.4.1 Energia Wavelet

Esta ferramenta é uma forma de visualizar a distribuição de informações nas faixas de frequência contidas em um sinal.

Para a aplicação da ferramenta energia *wavelet*, primeiramente realizou-se a decomposição dos sinais com o uso de *wavelet packet* até o nível três (Figura 29), utilizando-se a função *Daubechies 2* (daub2) (Figura 30). Esta família *wavelet* foi escolhida por ser uma função não trivial (suave) Lima (2003) e seu uso ser comum com dados não-estacionários Gamboa-Medina (2013), além de se esperar uma comparação válida utilizando esta família ou outra família, desde que aplicadas aos dois sinais a serem comparados.

Esta decomposição resultou em oito vetores com 512 coeficientes e mesma duração de tempo do sinal original (estes valores valem para a comparação entre resultados obtidos pela sonda ótica e microADV). Os vetores de decomposição foram obtidos nas faixas de frequência 0 – 2; 2 – 4; 4 – 6; 6 – 8; 8 – 10; 10 – 12; 12 – 14; e 14 – 16Hz.

Figura 29: Árvore de decomposição *wavelet packet* até o nível 3

Figura 30: Função *Daubechies 2*

Após a decomposição, a energia *wavelet* é calculada, gerando o resultado numérico e gráfico das porcentagens de informação em cada faixa de frequência. A decomposição dos sinais e a aplicação da ferramenta energia *wavelet* foram realizadas no ambiente MatLAB.

Através do cálculo de energia é possível comparar a distribuição de informações pelas faixas de frequência entre os sinais obtidos pela sonda ótica, microADV e simulação numérica para as mesmas condições e velocidade de oscilação da grade (Figura 31).

Figura 31: Comparação da distribuição de informações em faixas de frequência

8.4.2 Wavelet coherence

A coerência *wavelet* (*wavelet coherence*) é uma forma de observar regiões de similaridade e coerência no espaço tempo X frequência entre dois sinais comparados.

Esta ferramenta é disponibilizada no *software* matLAB 2016a através da função *wcoherence*. Para sua utilização, devem ser informados os dois sinais a serem comparados e suas taxas de amostragem. Os dois sinais devem ter a mesma duração e taxa de amostragem.

O resultado disponibilizado é o que se chama *Wavelet Coherence*. Nele é possível observar valores variando de zero a 1, que representam o nível de similaridade entre os dois sinais. Em regiões com alta correlação, o gráfico também mostra a existência ou não de coerência, ou seja, defasagem igual entre vários pontos de uma área (Figura 32). Esta defasagem é apresentada pelas setas presentes no gráfico. Uma seta no sentido horizontal e direção da esquerda para a direita, demonstra que há uma defasagem de 0° entre os sinais, ou seja, não há defasagem. Se a direção for a oposta, esta seta estaria representando uma defasagem de 180° entre as regiões comparadas.

Figura 32: Gráfico *Wavelet coherence* com informações do eixo y convertidas para frequência

8.4.3 Transformada rápida de Fourier

Através da transformada rápida de Fourier foi possível gerar análises espectrais para a observação da distribuição de frequências dos sinais analisados e o decaimento de informação nestas

A análise espectral gerada a partir da análise de Fourier é obtida no ambiente matLAB, através da função *periodogram*, apresentada a seguir:

$$periodogram(x, [], length(x), fs) \quad (21)$$

Sendo x o sinal analisado, $length(x)$ o comprimento deste sinal e fs a sua taxa de amostragem.

Estes resultados serviram para a compreensão do comportamento de cada um dos métodos, contribuindo na investigação e comparação dos sinais gerados pela sonda ótica, microADV e simulação numérica.

8.5 Experimentos e comparações

Antes da realização dos experimentos, a Sonda Ótica foi construída e calibrada com o uso de um osciloscópio para a otimização da resposta ao movimento da água. A partir deste ponto, foi realizado o arranjo do aparato experimental e as medidas com sonda ótica e microADV. Por fim, foi realizada a modelação do escoamento no tanque e extraídos os sinais simulados.

8.5.1 Comparação Sonda Ótica e MicroADV

Devido ao modo de operação da sonda ótica, foi considerado mais interessante a comparação do sinal por ela fornecido com a componente vertical da velocidade medida pelo microADV.

Este ensaio, localizando o volume de amostragem dos dois instrumentos próximo à superfície livre, só foi possível com o uso do dispositivo auxiliar no microADV, permitindo seu posicionamento acima do nível de água no tanque.

O microADV foi posicionado de forma perpendicular à interface (Figura 33). Sendo assim, a componente vertical da velocidade foi obtida analiticamente a partir das componentes fornecidas pelo software HorizonADV, que são obtidas na direção dos receptores acústicos do microADV.

Figura 33: Posicionamento do MicroADV com dispositivo auxiliar

Como a velocidade resultante e o ângulo entre a direção do vetor da velocidade resultante e o receptor acústico de referência são conhecidos, calcula-se o valor da componente vertical, usando a equação 22 para a situação geométrica do microADV adotada nos ensaios.

$$V_{vertical}(i) = V_{res}(i) * \cos(30 - \alpha(i)) \quad (22)$$

Sendo,

$V_{vertical}(i)$: componente vertical da velocidade na posição i do tempo do sinal;

$V_{res}(i)$: velocidade resultante na posição i do tempo do sinal;

$\alpha(i)$: ângulo entre direção da velocidade resultante e receptor acústico de referência na posição i do tempo do sinal.

O vetor de valores resultante do cálculo da componente vertical da velocidade foi comparado ao sinal obtido pela sonda ótica. Os sinais foram comparados quanto à distribuição das informações nas faixas de frequência com o uso de energia *wavelet* e análise de *Fourier*, além da verificação de similaridades através da ferramenta *wavelet coherence*.

8.5.2 Comparação entre MicroADV com e sem dispositivo auxiliar

Para avaliar a interferência que o dispositivo auxiliar e a presença de uma coluna de água em seu interior poderia vir a causar nas medidas do instrumento, foram realizados ensaios de comparação entre o microADV com e sem o dispositivo.

Para a realização destes ensaios foi utilizada uma peça cilíndrica com mesmo diâmetro superior e inferior, possibilitando a movimentação da sonda acústica para o exterior do dispositivo.

O experimento foi elaborado de forma a posicionar o sensor do microADV logo abaixo da superfície livre de água no tanque, sem que o dispositivo auxiliar encostasse na água. Nesta configuração, foram realizadas medidas para as 8 diferentes velocidades de oscilação da grade (0,304; 0,633; 0,954; 1,591; 1,966; 2,254; 2,570 e 2,916 *Hz*). Em seguida, adicionou-se à configuração anterior o dispositivo auxiliar em contato com a superfície livre e preenchido com água. Desta forma, apesar de o microADV estar na mesma posição, desta vez havia uma coluna de água acima do volume de amostragem, conforme a figura 34.

Os sinais medidos nas duas configurações foram comparados quando à média RMS, distribuição de frequências via transformada rápida de Fourier, energia *wavelet* e *wavelet coherence*.

(a) Arranjo do experimento-MicroADV com dispositivo

(b) Arranjo do experimento-MicroADV sem dispositivo

Figura 34: Arranjo do experimento para avaliar influência do dispositivo auxiliar nas medidas

8.5.3 Comparação MicroADV e simulação numérica

As comparações realizadas entre o microADV e a simulação numérica se deram entre as componentes verticais da velocidade, calculadas a partir de medidas do instrumento, e as componentes verticais da velocidade simuladas e extraídas de única célula da superfície. Todos estes resultados foram estudados e comparados com o cálculo das médias RMS para cada velocidade de oscilação da grade e uso de análises espectrais via FFT e energia *wavelet* e *wavelet coherence*.

A princípio, todos os sinais comparados foram adquiridos a uma taxa de amostragem de 32 Hz e tempo total de 70 segundos, ou 2240 pontos, devido à limitação do tempo imposta às simulações numéricas.

A visualização dos dados gerados mostrou que a simulação demora um certo número de iterações para estabilizar seus resultados (convergência) (Figura 43).

O tempo, ou número de iterações, que a simulação leva até convergir foi verificado por meio do cálculo do valor RMS em janelas de 5 segundos de comprimento ao longo do sinal (160 pontos) (Figura 44). O *script* escrito no matLAB para esta tarefa encontra-se no apêndice K.

Após visualizar o ponto de convergência para todos os sinais, se percebeu que seria necessário um corte dos mil pontos iniciais. Desta forma, todos os sinais de simulação numérica tiveram um corte no início com a finalidade de obter séries que representassem o regime permanente do escoamento. Para a comparação entre microADV e sinais simulados, cortou-se os sinais medidos no mesmo ponto.

Figura 35: Sinal de velocidades verticais simulado para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm ou 0,304 Hz

Figura 36: Estabilização do valor da média RMS janelada no sinal simulado

8.5.4 Comparação Sonda Ótica e simulação numérica

Como forma de reforçar os conceitos usados, foram realizadas comparações entre os sinais medidos pela sonda ótica e os sinais simulados. Como descrito anteriormente, os sinais foram cortados de forma a possuírem mesmo comprimento, tempo inicial e final.

9 Resultados e discussão

Nesta seção serão apresentados, primeiramente, os sinais obtidos através de medidas de velocimetria realizadas com a Sonda Ótica e MicroADV, as imagens geradas pela modelação do escoamento no tanque com grade oscilante e os sinais extraídos das simulações numéricas. Em seguida, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após as comparações entre os métodos.

No intuito de estabelecer o microADV como medida de referência, serão apresentados primeiro os resultados de comparação entre as medidas realizadas pelo microADV com e sem dispositivo auxiliar. O microADV foi escolhido por ser um instrumento de medida de velocidade já consolidado.

Devido ao volume de resultados, optou-se por incluir no capítulo de resultados apenas as medidas e comparações para um valor de velocidade da grade. Os outros resultados são encontrados nos apêndices citados em cada seção.

9.1 Sonda ótica

As medidas obtidas com a Sonda Ótica foram adquiridas em ensaios seguindo a configuração exposta na figura 52.

Na figura 38 vemos os valores obtidas pela sonda ótica no ensaio com velocidade de oscilação da grade de $0,304\text{ Hz}$, ou 18,25 oscilações por minuto. As demais imagens de medidas da sonda para outras velocidades de oscilação da grade encontram-se no apêndice L.

Todos os vetores de dados gerados pela Sonda Ótica possuem 4096 pontos, adquiridos a uma taxa de amostragem de 32 Hz e estão na unidade mV . De acordo com o teorema de Nyquist, o sinal gerado pela sonda ótica pode descrever frequências de até 16 Hz.

Na figura 39 são apresentados os valores das médias RMS para cada um dos 8 ensaios realizados pela sonda, nas 8 diferentes velocidades de oscilação da grade.

Figura 37: Posicionamento da Sonda Ótica e MicroADV equipado com o dispositivo para medida de velocidade na superfície

Figura 38: Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 18,25 opm ou 0,304 Hz da grade

Como se pode observar na mesma figura 39, a amplitude dos sinais da sonda aumenta de acordo com o aumento da velocidade de oscilação da grade do tanque gerador de turbulência. Isto só não ocorre entre as oscilações 2,254 e 2,570 opm, em que a média RMS permanece aproximadamente no mesmo valor.

Os valores das médias RMS dos sinais adquiridos pela sonda ótica aumentarem com o incremento da velocidade de oscilação da grade é um indício de que estes sinais possuem relação com a velocidade de escoamento no tanque.

Figura 39: Valores da média RMS de cada um dos oito sinais gerados pela Sonda Ótica

Figura 40: Sinal de componentes verticais da velocidade gerado pelo microADV na velocidade da grade 18,25 opm ou 0,304 Hz

9.2 MicroADV

As medidas feitas pelo microADV foram realizadas na mesma configuração apresentada na figura 52. Os valores considerados para comparações foram as componentes verticais da velocidade.

A figura 40 mostra o sinal de velocidade vertical obtido analiticamente a partir de medidas da sonda acústica (microADV) para a velocidade 0,304 Hz.

Na figura 41 são apresentados os 8 valores das médias RMS de cada sinal de componentes verticais da velocidade gerados pelo microADV para cada velocidade de oscilação da grade.

Como podemos observar na figura 41, a amplitude dos sinais da sonda acústica também aumenta de acordo com o aumento da velocidade de oscilação da grade. Novamente, isto só não

Figura 41: Valores da média RMS de cada um dos oito sinais de velocidades verticais gerados pelo microADV

ocorre entre as oscilações 2,254 e 2,570 opm. O aumento dos valores RMS com o aumento da velocidade de oscilação da grade mostra a relação existente entre as medidas do microADV e a velocidade do escoamento no tanque. Além disto, o fato deste aumento ocorrer, e novamente não ocorrer entre os ensaios para as velocidades 135,25 e 154,25 opm demonstra relação entre as medidas da sonda ótica e medidas do microADV, o que reforça a relação entre sonda ótica e velocidade do escoamento no tanque.

9.3 Simulação OpenFOAM

Como explicado anteriormente, a princípio houve a tentativa de simular 128 segundos de escoamento, duração de tempo dos ensaios em laboratório. Porém, devido a limitações de recursos computacionais, as simulações numéricas tiveram duração de 70 segundos. Os cálculos foram realizados em intervalos de 0,03125 segundos, resultando em sinais com frequência de amostragem de 32 Hz .

A figura 42 apresenta as imagens resultantes da modelação do escoamento salvas em intervalos de 5 segundos (com duração total de 70 segundos) para a velocidade de oscilação de 0,304 Hz . As demais imagens podem ser encontradas no apêndice N.

Após a simulação numérica do fenômeno, extraiu-se no ambiente MatLAB a componente vertical da velocidade em um único ponto da superfície. O sinal simulado, portanto, é composto

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

Figura 42: Imagens geradas no Paraview da simulação numérica realizada no OpenFOAM (18,25 opm ou 0,304 Hz da grade)

por componentes verticais da velocidade ao longo de 70 segundos de simulação. Esta extração gerou o sinal apresentado na figura 43.

Após observar as representações gráficas dos sinais simulados (figura 43), observou-se que os valores iniciais atenuavam o restante do sinal. Por isso, elaborou-se uma subrotina em matLAB para calcular a média RMS em janelas de 160 pontos. Desta forma, foi possível conhecer o local em que havia uma estabilização dos valores do sinal, podendo-se assim escolher corretamente onde poderia ser efetuado um corte de pontos (Figura 44).

A figura 44 apresenta a curva de estabilização dos valores médios dos sinais de simulação numérica. Todos os sinais possuem 2240 pontos e foram divididos em janelas de 160 pontos.

Em todos os casos observou-se a ocorrência de estabilização dos valores do sinal após a sexta janela. Por isso, para todos os sinais da simulação, optou-se pelo corte dos mil pontos iniciais ($6 * 160 = 960$). O sinal resultante após o corte, com 1240 pontos, está apresentado na figura 45.

Figura 43: Sinal de velocidades verticais simulado para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm ou 0,304 Hz

Figura 44: Estabilização do valor da média RMS janelada do sinal simulado

Figura 45: Velocidade vertical com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 18,25 opm

Figura 46: Curva dos valores RMS dos sinais simulados com o aumento da velocidade de oscilação da grade

A variação das médias RMS de cada sinal simulado (após o corte de mil pontos iniciais) de acordo com o acréscimo da velocidade de oscilação da grade é apresentado na figura 46.

Como podemos observar, existe um incremento do valor da média RMS das simulações até o quinto ensaio, correspondente à velocidade 118 *opm* ou 1,966 *Hz*. A partir do sexto ponto, a média RMS cai. Este é um indício de que, a partir da velocidade 135,25 *opm* ou 2,254 *Hz*, a simulação não conseguiu representar o caso real, já que nos outros dois instrumentos (sonda ótica e sonda acústica) observamos um aumento da amplitude do sinal com o aumento da quantidade de oscilações por minuto da grade (velocidade de oscilação da grade).

9.4 Comparação MicroADV com e sem dispositivo auxiliar

Como foi comentado no início deste capítulo, o microADV foi o instrumento de velocimetria escolhido como referência para comparação com os outros métodos.

Para avaliar a interferência que o dispositivo auxiliar e a coluna de água existente no interior deste poderiam causar nas medidas, arquitetou-se um experimento em que fosse possível realizar medidas em um mesmo local, com e sem o dispositivo auxiliar.

Nestes ensaios, o microADV foi posicionado abaixo da superfície livre, de forma que pudesse estar ali com ou sem dispositivo, como mostra a figura 47.

Figura 47: Arranjo experimental para avaliar influência do dispositivo auxiliar nas medidas do microADV

Figura 48: Médias RMS de sinais adquiridos pelo microADV com sem dispositivo auxiliar

Desenvolveu-se um dispositivo transparente cilíndrico de acrílico especificamente para estes ensaios, de forma que fosse possível transpor o microADV pela abertura inferior da peça.

As comparações apresentadas nesta seção foram realizadas entre as velocidades resultantes com as duas configurações.

A primeira característica comparada foi o comportamento da curva de médias RMS dos ensaios para a situação do microADV com dispositivo (a) e sem dispositivo (b), como é visto na figura 48.

As duas curvas possuem praticamente os mesmos valores iniciais e finais. Existem discrepâncias entre os valores no meio da curva, porém não eram esperados valores idênticos na

Figura 49: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (18,25 opm ou 0,304 Hz)

comparação de ensaios de escoamento turbulento, levando-se em consideração que uma das características da turbulência é a imprevisibilidade e os dois ensaios tiveram que ser realizados em tempos diferentes.

A análise espectral dos resultados foi realizada com o uso da análise de Fourier e também com a ferramenta energia *Wavelet*, que fornece a distribuição das informações do sinal entre as faixas de frequência graficamente. A figura 49 apresenta as análises espectrais baseadas na transformada rápida de Fourier para as medidas realizadas na velocidade 0,304 Hz, com e sem dispositivo auxiliar. As demais análises espectrais são encontradas no apêndice P.

Nestas análises percebemos que a distribuição de informação nas faixas de frequência entre os dois sinais é muito parecida. Este fato ocorre para os ensaios realizados em outras velocidades de oscilação da grade. Podemos visualizar melhor esta distribuição com a ferramenta energia *wavelet*, na figura 50. Os demais gráficos são encontrados no apêndice Q.

Em todas as velocidades de oscilação da grade observou-se uma distribuição de energia muito semelhante entre os sinais com e sem peça.

A terceira comparação foi realizada utilizando a ferramenta *wavelet coherence*, que mostra a existência de correlação e coerência entre os sinais, considerando-se um espaço tempo (número de amostras) versus frequência. O gráfico gerado para comparação na velocidade 0,304 Hz é mostrado na figura 51. As demais figuras encontram-se no apêndice Q.

Figura 50: (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal do microADV com dispositivo e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal do microADV sem dispositivo (18,25 opm ou 0,304 Hz)

Figura 51: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo (18,25 opm ou 0,304 Hz)

O gráfico 51 mostra a existência de muitas regiões de alta correlação (cor amarela) tanto nas baixas quanto nas altas frequências. Além disto, nas faixas mais baixas de frequência encontramos grandes regiões de coerência, ou seja, ângulo igual de defasagem entre os dois sinais em toda a região.

A completa concordância entre os dois sinais pode não ter sido obtida pelo fato de as medidas comparadas serem dois sinais turbulentos. Devido à imprevisibilidade do fenômeno, é impossível reproduzir os mesmos valores instantâneos neste regime de escoamento. Por causa desta característica da turbulência, análises espectrais e valores médios podem ser mais representativos do fenômeno.

Após a realização destas comparações, principalmente as comparações de análises espectrais, considerou-se neste trabalho que o dispositivo auxiliar interfere minimamente nas medidas realizadas pelo microADV. Desta forma, confirmou-se esta sonda como instrumento de referência.

9.5 Comparação Sonda Ótica e MicroADV

Nesta seção encontram-se as comparações realizadas entre as medidas da Sonda Ótica e o sinal de componentes verticais da velocidade obtidos analiticamente a partir de medidas do microADV. O arranjo experimental dos ensaios é explicitado na figura 52.

Figura 52: Posicionamento da Sonda Ótica e microADV durante ensaios

Figura 53: (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica(18,25 opm ou 0,304 Hz)

Figura 54: (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (18,25 opm ou 0,304 Hz)

A análise espectral via transformada rápida de Fourier (FFT) dos sinais medidos pela sonda ótica e microADV para a velocidade 0,304 Hz são apresentados na figura 53. As demais figuras são encontradas no apêndice R.

Como se vê, o sinal do microADV possui uma distribuição mais equilibrada de informações dentre as frequências. Esta constatação pode ser confirmada na figura 54, que apresenta a distribuição de energia, ou informação, nos dois sinais.

A ferramenta *Wavelet Coherence* apresenta um gráfico de comparação entre os dois sinais. No eixo "x" vemos a quantidade de amostras, neste caso 4096. No eixo "y" temos a frequência.

Figura 55: *Wavelet Coherence* Sonda Ótica e MicroADV (18,25 opm ou 0,304 Hz)

Figura 56: (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)

A figura 55 mostra algumas regiões de coerência e correlação distribuídas desde a frequência 8 Hz, até 0.0625 Hz.

Também pode-se observar uma linha inteira em destaque na base do gráfico 55, porém as regiões fora do cone de influência são desconsideradas, por causa dos possíveis erros devido ao efeito de borda.

9.6 Comparação Simulação numérica e MicroADV

Na figura 56 é possível visualizar as análises espectrais dos dos sinais adquiridos pelo microADV e simulado na velocidade de oscilação da grade 0,304 Hz.

Figura 57: (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)

Figura 58: *Wavelet Coherence* Simulação Numérica e MicroADV (18,25 opm ou 0,304 Hz)

As análises espectrais das medidas realizadas pelo microADV mostram um sinal contendo mais frequências do que o sinal simulado numericamente. Esta observação é confirmada com a ferramenta energia wavelet, na figura 57.

No gráfico 58, gerado pela ferramenta *wavelet coherence* observam-se poucas regiões correlatas. Porém é possível observar que entre as frequências 0,125 e 0,0625 Hz os dois sinais possuem alta correlação e coerência. Esta faixa de frequência é justamente onde se encontra a maior parte da informação existente nos sinais simulados.

Figura 59: (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (18,25 opm)

9.7 Comparação Sonda Ótica e Simulação Numérica

A figura 59 apresenta as análises espectrais do sinal simulado e da medida da Sonda Ótica para a velocidade $0,304 \text{ Hz}$. As demais figuras de comparações em outras velocidades de oscilação da grade são encontradas no apêndice S.

A curva de distribuição de informações através das frequências decai mais rapidamente no sinal obtido através de simulação numérica. Isto mostra que no sinal simulado encontram-se menos frequências do que as encontradas no sinal medido pela sonda.

É possível observar com a ferramenta anterior e com a energia *wavelet* (Figuras 59) que o sinal simulado possui duas faixas de frequências preponderantes, praticamente inexistindo informação nas frequências superiores a 4 Hz .

Na figura 61 observamos algumas áreas *spots* entre 0.5 e 0.125 Hz . A região à esquerda possui uma defasagem entre os sinais de aproximadamente 180° . Na segunda região, as informações dos dois sinais estão na mesma fase.

Figura 60: (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (18,25 opm ou 0,304 Hz)

Figura 61: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 18,25 opm

10 Conclusões

Durante este trabalho foi desenvolvido e investigado o funcionamento de uma sonda lastreada no fenômeno da refração ótica para medição da componente vertical da velocidade próximo à superfície livre da água. As medidas realizadas por este instrumento foram comparadas a medidas realizadas com o instrumento microADV. Além disto, foi realizado a modelação do fenômeno ocorrente no tanque gerador de turbulência utilizado para os ensaios.

O microADV foi utilizado com um dispositivo auxiliar para possibilitar seu posicionamento acima do nível da água no tanque. Para se estabelecer um instrumento de velocimetria como referência, foram realizados ensaios avaliando a interferência do dispositivo auxiliar adicionado ao microADV. Os sinais adquiridos pelo instrumento com e sem dispositivo foram comparados quanto a médias RMS, análise espectral via FFT, análise espectral via energia *wavelet* e coerência *wavelet*. As comparações mostraram que a interferência do dispositivo nas medidas é mínima, de forma que não é possível afirmar se esta pequena diferença entre os sinais é mesmo causada pela peça ou deve-se somente à imprevisibilidade do regime turbulento de escoamento. O dispositivo auxiliar desenvolvido durante a pesquisa demonstrou ser eficiente como um artifício que possibilita o funcionamento do microADV para realizar medidas próximas ao nível da superfície da água. Desta maneira, o microADV foi adotado como referencial.

Durante esta pesquisa foi elaborada uma aplicação executável no ambiente OpenFOAM capaz de simular através de Simulação Numérica Direta (DNS) um escoamento em tanque com grade oscilante, na existência de superfície livre.

Em um segundo momento, foram extraídos sinais simulados que também foram comparados aos sinais adquiridos pelo microADV. Porém, os sinais simulados mostraram ser mais simples em relação à composição espectral. Outra preocupação foi o fato de as médias RMS dos sinais simulados não aumentarem concomitantemente com o aumento da velocidade de oscilação da grade.

A sonda ótica, desde o início da pesquisa, mostrou gerar um sinal relacionado ao movimento da água no tanque. Isto podia ser observado através do osciloscópio utilizado para a sua calibração.

As comparações entre os sinais da sonda ótica e do microADV foram realizadas no intuito de verificar se as medidas da sonda estariam relacionadas à componente vertical da velocidade. Para consolidar as ferramentas já utilizadas, comparou-se também os sinais da sonda com os sinais simulados. As comparações entre sonda ótica e simulação numérica mostram alguma similaridade no decaimento de informações através das faixas de frequência e o aparecimento de regiões destacadas com o uso da coerência *wavelet*, demonstrando alta correlação nestas regiões. Porém os sinais obtidos por simulação numérica ainda carecem de mais estudos para sua melhor compreensão. As similaridades encontradas não são suficientes para confirmar a adequabilidade das rotinas elaboradas em representar a situação real.

Quanto às comparações realizadas entre sonda ótica e microADV, um forte indício de que os dois instrumentos medem parâmetros relacionados à componente vertical da velocidade no tanque é o fato de as curvas de média RMS para os dois casos terem se elevado juntamente com o aumento da velocidade de oscilação. As curvas ainda comportam-se de forma semelhante, havendo inclusive um intervalo, entre 2,254 e 2,579 Hz, em que não há aumento da amplitude dos sinais para os dois instrumentos. O gráfico de coerência *wavelet* demonstra a existência de diversas pequenas áreas de correlação entre os dois sinais. Porém observando as análises espectrais, vemos que as duas medidas possuem composição espectral e decaimento de energia muito diferentes.

É necessário ressaltar que o sinal de velocidade em cm/s gerado pelo microADV é resultado do processamento interno de um sinal elétrico originalmente medido e o sinal medido pela sonda ótica não passa por esse tipo de processamento. Porém, devido às diferentes estruturas dos dois sinais, conclui-se que a informação da sonda ótica não apresenta correlação estreita com a componente vertical medida pelo microADV, apesar de medirem parâmetros relacionados ao escoamento turbulento no tanque.

11 Sugestões para trabalhos futuros

Nesta pesquisa, investigou-se a relação existente entre as medidas realizadas pela Sonda Ótica e a componente vertical da velocidade. Para trabalhos futuros que pretendam continuar investigando o comportamento da sonda, seria interessante investigar a existência de relação entre as medidas e outros parâmetros, principalmente a deformação superficial.

Quanto à compreensão do escoamento no tanque por meio de simulação numérica, um melhor entendimento seria possível com modelações com maior duração de tempo, reduzindo o impacto do corte inicial de dados nos sinais simulados. A comparação de diferentes métodos de simulação (LES, DNS, entre outros) também pode auxiliar na compreensão do fenômeno e possibilitaria a escolha de um método mais adequado e de menor custo computacional.

Referências

- BARRA, L. *Estudo da estrutura turbulenta em escoamentos gerados por grades oscilantes*. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, 2002.
- BENNETT, J. P.; RATHBUN, R. E. *Reaeration in open channel flow*. [S.l.], 1972.
- BEYA, J.; PEIRSON, W.; BANNER, M. Rainfall-generated, near surface turbulence. In: *Gas Transfer at Water Surface*. [S.l.]: Kyoto University Press, 2011. p. 90–103.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. *Chemical engineering*. [S.l.], 1985.
- COX, C.; MUNK, W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J.Mar. Res.*, v. 2, n. 13, p. 198–227, 1954.
- DUCLAUD, B. R.; BOWEN, J. D. Using turbulence model results to quantify oxygen reaeration in an estuary dissolved oxygen model. *ASCE*, 2007.
- FEGHALI, J. P. *Mecânica de fluidos*. [S.l.]: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1974.
- FUJITA, I. A novel free-surface velocity measurement method using spatio-temporal images. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING-ASCE, Hydraulic measurement and experimental methods*, 2002.
- GAMBOA-MEDINA, M. M. *Deteção de vazamentos em redes sob pressão baseada na análise dos sinais de vazão e pressão com um sistema de reconhecimento de padrões*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2013.
- GULLIVER, J. S. Introduction to air-water mass transfer. *ASCE*, 1991.
- HANRATTY, T. J. Effect of gas flow on physical absorption. *ASCE*, 1991.
- HINZE, J. O. *Turbulence: An introduction to its Mechanism and Theory*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1959.
- JANZEN, J. G.; SCHULZ, H. E.; JIRKA, G. H. Turbulent gas flux measurements near the air–water interface in an oscillating-grid tank. *GTWS*, 2010.
- JEVREJEVA, A. G. J. C. M. S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004.
- KIEFHABER, D. et al. Improved optical instrument for the measurement of water wave statistics in the field. In: *GTWS 2010*. [S.l.]: Kyoto University Press, 2011.
- LABAT, D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1.a review of concepts. *Journal of Hydrology*, 2005.
- LIMA, P. C. Wavelets: Uma introdução. *Departamento de matemática ICEx-UFMG*, 2003.
- LOBOSCO, R. J. *Investigação teórico-numérica da aeração em estruturas de vertedouros em degraus com uso de software livre*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.
- MANSOUR, R. D. M. J. K. N. N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re = 590$. *Physics of fluids*, 1999.

- MARTINERIE, J.-P. L. A. L. D. R. D. C. M. L. V. Q. J.; VARELA, F. Estimating the time-course of coherence between single-trial brain signals: an introduction to wavelet coherence. *Clinical neurophysiology*, 2002.
- MCCULLOUGH, M.; KAREEM, A. Testing stationarity with wavelet-based surrogates. *ASCE*, 2013.
- MCKENNA, S. P.; MCGILLIS, W. R. The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer. *International journal of heat and mass transfer*, 2003.
- MENDES, F. A. A. *Estudo experimental, simulação numérica e modelagem fenomenológica da separação gravitacional de gás no fundo de poços direcionais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- MOOG, G. L.; JIRKA, G. H. Air-water gas transfer in uniform channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999.
- NERNST, W. Theorie der reaktionsgeschwindigkeit in heterogenen systemen. *Zeitschrift für physikalische chemie*, 1904.
- OLIVEIRA, A. B. F. de. *Modelagem e simulação da hidrodinâmica em aeração forçada considerando aspectos globais de escoamento turbulento*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.
- OLIVEIRA, H. M. de. *Análise de sinais para engenheiros- Uma abordagem via wavelet*. [S.l.]: BRASPORT, 2007.
- OPENFOAM. *User Guide*. [S.l.], 2015.
- ORLINS, J. J. et al. Piv measurements of free-surface turbulence in an open channel flow. *World Water Congress*, 2001.
- PEREIRA, C. E. *Estudo de parâmetros turbulentos e sua relação com o coeficiente de reeração com o uso da técnica fotográfica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2002.
- PEREIRA, R. F. d. M. C. M. M. Common dissimilarity measures are inappropriate for time series clustering. *RITA*, 2013.
- RIGHETTO, M. M. *Desenvolvimento e calibração de um tanque de reaeração equipado com grade oscilante*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2008.
- ROMA, W. N. L. *Medida dos parâmetros de turbulência superficial e sua interrelação com o coeficiente de reaeração*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1988.
- SIMÕES, A. L. A. *Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- SOUZA, J. F. A. d. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. *Revista brasileira de geofísica-RBGf*, v. 29, n. 1, 2011.
- TANG, C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997.

- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. *A first course in turbulence*. [S.l.]: The MIT Press, 1972.
- TSUMORI, H.; SUGIHARA, G. Lengthscales of motions that control air-tergas transferin grid-stirred turbulence. *Journal of marine systems*, 2006.
- TURNERY, D.; BANERJEE, S. Near surface turbulence and its relationship to air–water gas transfer rates. *GTWS*, 2010.
- VARANIS, M. V. M.; PEDERIVA, R. Detecção de correlação entre séries temporais utilizando espectro cruzado wavelet e coerência wavelet. *DINCON 2011*, 2011.
- VIEIRA, A. P. de S. D. *Estudo de estrutura turbulenta gerada por tanque de grade oscilante observada por PIV*. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, 2012.
- WAAS, S.; JÄHNE, B. Combined slope-height measurements of short wind waves: first results from field and laboratory measurements. *Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurements*, v. 1749, p. 295–306, 1992.
- WANG, J.; HU, X. Application of rng k- ϵ turbulence model on numerical simulation in vehical external flow field. *Applied mechanical and materials*, 2012.
- YU, X. et al. Numerical investigation of turbulence modulation by sediment-induced stratification and enhanced viscosity in oscillatory flows. *Applied optics*, v. 23, p. 1690, 2013.
- ZAPPA, C. J. et al. Variation in surface turbulence and the 3s transfer velocity over a tidal cycle in a macrotidal estuary. *Estuaries*, 2003.
- ZHANG, S. et al. Gas absorption enhancement mechanism in mechanically agitated multiphase system: Effect of fine solid particles and interfacial turbulence. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING-ASCE*, february 2013.
- ZHOU, Q.; CHENG, N.-S. Experimental investigation of single particle settling in turbulence generated by oscillating grid. *Chemical engineering journal*, v. 149, p. 289–300, 2009.

APÊNDICES

A OpenFOAM script U

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.2.0 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volVectorField;
    location "0";
    object U; }

// * * * * *

dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
    freeSurface
    {
        type pressureInletOutletParSlipVelocity;
        value uniform (0 0 0);
    }
}
```

```

walls
{
    type          fixedValue;
    value          uniform (0 0 0);
}

floatingObject
{
    type          oscillatingFixedValue;
    refValue       uniform (0 1 0);
    offset         (0 -1 0);
    amplitude      table
    (
        (0 0)
        (10 0.05)
        (1000 0.05)
    );
    frequency       constant 0.304;
    value          uniform (0 0 0);
}

frontAndBack
{
    type          fixedValue;
    value          uniform (0 0 0);
}
}

*****

```

B OpenFOAM script *polymesh*

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \\    / O peration   | Version:  2.2.0                       |
|   \\  / A nd          | Web:      www.OpenFOAM.org            |
|    \\/ M anipulation  |                                     |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}

// * * * * *

convertToMeters 1;

vertices
(
    (0 0 0)
    (0.5 0 0)
    (0.5 0.549 0)
    (0 0.549 0)
    (0 0 0.5)
    (0.5 0 0.5)
    (0.5 0.549 0.5)
    (0 0.549 0.5)
```

```

(0 0.55 0)
(0.5 0.55 0)
(0.5 0.55 0.5)
(0 0.55 0.5)

```

```
);
```

```
blocks
```

```

(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (167 275 167) simpleGrading (1 1 1)
    hex (3 2 9 8 7 6 10 11) (167 1 167) simpleGrading (1 1 1)

```

```
);
```

```
edges
```

```

(
);

```

```
boundary
```

```

(
    freeSurface
    {
        type wall;
        faces
        (
            (8 9 10 11)
        );
    }
)

```

```
walls
{
    type wall;
    faces
    (
        (4 0 3 7)
        (7 3 8 11)
        (5 1 2 6)
        (6 2 9 10)
        (4 5 1 0)

    );
}
```

```
floatingObject
{
    type wall;
    faces
    (

    );
};
```

```
frontAndBack
{
    type wall;
    faces
    (
        (0 1 2 3)
```

```
        (3 2 9 8)
        (4 5 6 7)
        (7 6 10 11)

    );
}

);

mergePatchPairs

(

);

// ***** //
```


C OpenFOAM script p

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 2.2.0 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
\*-----*/

FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class volScalarField;
    location "0";
    object p;
}

// * * * * *

dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField uniform 0;

boundaryField
{
    freeSurface
    {
        type calculated;
        value uniform 0;
    }
}
```

```
walls
{
    type          calculated;
    value          uniform 0;
}
floatingObject
{
    type          calculated;
    value          uniform 0;
}
frontAndBack
{
    type          calculated;
    value          uniform 0;
}
}
```

*****

D OpenFOAM script pgh

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \\    / O peration   | Version:  2.2.0 |
|   \\  / A nd          | Web:      www.OpenFOAM.org |
|    \\/ M anipulation  | |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       p_gh;
}

// * * * * *

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    freeSurface
    {
        type      waveSurfacePressure;
        value      uniform 0;
    }
}
```

```
walls
{
    type          zeroGradient;
}
floatingObject
{
    type          zeroGradient;
}
frontAndBack
{
    type          zeroGradient;
}
}

*****
```

E OpenFOAM script controlDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \\    / O peration   | Version:  2.2.0                       |
|   \\  / A nd          | Web:      www.OpenFOAM.org            |
|    \\/ M anipulation  |                                     |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict; }

// * * * * *

application     potentialFreeSurfaceFoam;

startFrom       startTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         70;

deltaT          0.03125;

writeControl     adjustableRunTime;
```

```
writeInterval    0.03125;

purgeWrite       0;

writeFormat      ascii;

writePrecision   6;

writeCompression uncompressed;

timeFormat       general;

timePrecision    6;

runTimeModifiable yes;

adjustTimeStep   yes;

maxCo            0.4;

maxDeltaT        1;

functions
{
    forces
    {
        type          forces;
        functionObjectLibs ("libforces.so");
```

```

        outputControl    outputTime;

        patches          (floatingObject);

        pName            p;

        UName            U;

        rhoName          rhoInf;

        log              yes;

        rhoInf           1000;

        CofR             (0 0 0);
    }

    poolHeight
    {
        type              faceSource;

        functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");

        enabled           yes;

        outputControl     timeStep;

        outputInterval    1;

        log               yes;

        valueOutput       no;

        source             faceZone;

        sourceName        f0;

        operation          areaAverage;

        fields
        (
            zeta

        );
    }
};

*****

```

F OpenFOAM script topoSetDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \\    / O peration   | Version:  2.2.0                       |
|   \\  / A nd          | Web:      www.OpenFOAM.org             |
|    \\/ M anipulation  |                                         |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       topoSetDict;
}

// * * * * *

actions
(
    {
        name      c0;
        type      cellSet;
        action     new;
        source     boxToCell;
        sourceInfo
        {
            boxes (
                (0.005 0.16 0.035) (0.495 0.17 0.045)
                (0.005 0.16 0.095) (0.495 0.17 0.105)
            )
        }
    }
)
```



```

        (0.005 0.16 0.155) (0.495 0.17 0.165)
        (0.005 0.16 0.215) (0.495 0.17 0.225)
        (0.005 0.16 0.275) (0.495 0.17 0.285)
        (0.005 0.16 0.335) (0.495 0.17 0.345)
        (0.005 0.16 0.395) (0.495 0.17 0.405)
        (0.005 0.16 0.455) (0.495 0.17 0.465)
        (0.035 0.16 0.005) (0.045 0.17 0.495)
        (0.095 0.16 0.005) (0.105 0.17 0.495)
        (0.155 0.16 0.005) (0.165 0.17 0.495)
        (0.215 0.16 0.005) (0.225 0.17 0.495)
        (0.275 0.16 0.005) (0.285 0.17 0.495)
        (0.335 0.16 0.005) (0.345 0.17 0.495)
        (0.395 0.16 0.005) (0.405 0.17 0.495)
        (0.455 0.16 0.005) (0.465 0.17 0.495)
    );
}

{
    name    c0;
    type    cellSet;
    action  invert;
}

{
    name    f0;
    type    faceSet;
    action  new;
    source  patchToFace;
}

```

```

    sourceInfo
    {
        name    grid;
    }
}

{
    name      f0;
    type      faceSet;
    action    subset;
    source    boxToFace;
    sourceInfo
    {
        boxes (
            (0.005 0.16 0.035) (0.495 0.17 0.045)
            (0.005 0.16 0.095) (0.495 0.17 0.105)
            (0.005 0.16 0.155) (0.495 0.17 0.165)
            (0.005 0.16 0.215) (0.495 0.17 0.225)
            (0.005 0.16 0.275) (0.495 0.17 0.285)
            (0.005 0.16 0.335) (0.495 0.17 0.345)
            (0.005 0.16 0.395) (0.495 0.17 0.405)
            (0.005 0.16 0.455) (0.495 0.17 0.465)
            (0.035 0.16 0.005) (0.045 0.17 0.495)
            (0.095 0.16 0.005) (0.105 0.17 0.495)
            (0.155 0.16 0.005) (0.165 0.17 0.495)
            (0.215 0.16 0.005) (0.225 0.17 0.495)
            (0.275 0.16 0.005) (0.285 0.17 0.495)
            (0.335 0.16 0.005) (0.345 0.17 0.495)
            (0.395 0.16 0.005) (0.405 0.17 0.495)

```

```

        (0.455 0.16 0.005) (0.465 0.17 0.495)
    );

}

}

{
    name      f0;
    type      faceZoneSet;
    action    new;
    source    setToFaceZone;
    sourceInfo
    {
        faceSet      f0;
    }
}

);

*****

```

G   MatLAB script para extração da velocidade

```
function simU = simulaU

timestep =0.03125:0.03125:70;

U = [];

for i=1:length(timestep)

    data=dlmread(strcat('/home/gulliver/vieir037/oscillatingbox3_b/',num2str(timestep(i))),1);
    U(i,:)=data(1,:);

end

for i=1:length(timestep)

    csvwrite('/home/gulliver/vieir037/oscillatingbox3_b/simU3.csv',U(i,:));

end
```

H   **MatLAB script para geração de dados e gráficos da ferramenta energia *wavelet***

```
function mainScript(p)

p = 0;

advValues = 3:3:27;

%cada linha eh uma medida da sonda
dataSonda = csvread('C:\Campbellsci\mem\CR10X_final_storage_1.dat');
dataSonda = dataSonda(:,5:end);

%salvando os arquivos da sonda separadamente
for i=1:size(dataSonda,1)
    csvwrite(strcat('C:\Users\user1\Desktop
        \doutorado_poty',int2str(advValues(i)),'.csv'),dataSonda(i,:));
end

velRes = [];
dir     = [];
velZ    = [];

for i=1:length(advValues)
    dataAdv = csvread(strcat('C:\SonData\adv',int2str(advValues(i)),'.csv'),1,0);
    velRes(i,:) = dataAdv(:,1)';
    dir(i,:)    = dataAdv(:,2)';
    velZ(i,:)   = decomposicao(velRes(i,:),dir(i,:),p);
end

%salvando os arquivos VelZ separadamente
```

```

%for i=1:size(VelZ,1)

%   csvwrite(strcat('C:\Users\user1\Desktop
\doutorado_poty',int2str(advValues(i)),'.csv'),VelZ(i,:));

%end


wPSonda = [];
wPADV   = [];


for i=1:length(advValues)

    wPSonda(i,:) = wavepacket(dataSonda(i,:));
    pie(wPSonda(i,:));
    saveas(gcf,strcat('C:\Users\user1\Desktop\doutorado_poty
\wpSonda',int2str(advValues(i))),'fig');


    wPADV(i,:) = wavepacket(velZ(i,:));
    pie(wPADV(i,:));
    saveas(gcf,strcat('C:\Users\user1\Desktop\doutorado_poty
\wpADV',int2str(advValues(i))),'fig');

    close all
end


cor = [];

for i=1:length(advValues)

    %1a linha eh pearson
    cor(1,i) = correlates(dataSonda(i,:)',velZ(i,:));


    %2a linha eh pearson
    cor(2,i) = correlacao(dataSonda(i,:)',velZ(i,:));

end

```

I MatLAB script para análise de Fourier

```
function [mifft] = mifft(x)

%%Para sinais complexos

fs=32;                % Taxa de amostragem
m = length(x);       % Comprimento da série
n = pow2(nextpow2(m)); % Transform length
y = fft(x,n);        % DFT
f = (0:n-1)*(fs/n);  % Frequency range
power = y.*conj(y)/n; % Power of the DFT

plot(f,power)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Power')
title('\bf Periodogram')

%%Para sinais de valores reais

periodogram(x,[],length(x),fs);

end
```

J MatLAB script para *wavelet coherence*

```
function cor = uswcoher(p)

p = 0;

advValues = 3:3:27;

%dataSonda=[];

%cada linha eh uma medida da sonda
for i=1:length(advValues)
dataSonda(i,:)= csvread(strcat('/home/amanara/Documents/docteste/
sonda',int2str(advValues(i)),'.csv'))
end

for i=1:length(advValues)
    dataAdv(i,:) = csvread(strcat('/home/amanara/Documents/docteste/
advz',int2str(advValues(i)),'.csv'));
end

for i=1:length(advValues)
    ntw = 21;
    normSonda(i,:) = dataSonda(i,:)/norm(dataSonda(i,:));
    normAdv(i,:) = dataAdv(i,:)/norm(dataAdv(i,:));
    wcoher(normSonda(i,:),normAdv(i,:),1:512,'cgau3','ntw',ntw,'plot');
    saveas(gcf,strcat('/home/amanara/Documents/docteste/
us_wcohergauss',int2str(advValues(i)),'fig'));
    saveas(gcf,strcat('/home/amanara/Documents/docteste/
us_wcohergauss',int2str(advValues(i)),'jpg'));
end
```


K   MatLAB script para janelamento dos sinais simulados

```
function window = rmswindow

step = 0:160:2240;

ofvalues = 3:3:9;


rmswindow=[];

for i=1:length(ofvalues)

    data=csvread(strcat('/home/amanara/Dropbox/doc_openfoam/
    oscillatingbox',int2str(ofvalues(i)),'/
    simU',int2str(ofvalues(i)),'.csv'));

    data=data(:,2);

    for j=1:14

        rmswindow(j,i)=rms(data(step(j)+1:step(j+1),:));

    end

end

end


csvwrite('/home/amanara/Dropbox/poty/doutorado/experimentos/openfoamresults/
rmswindow.csv',rmswindow);
```

L Medidas Sonda Ótica

(a) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 38 opm ou 0,633 Hz da grade

(b) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 57,25 opm ou 0,954 Hz da grade

(c) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 95,5 opm ou 1,591 Hz da grade

(d) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 118 opm ou 1,966 Hz da grade

(e) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 135,25 opm ou 2,254 Hz da grade

(f) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 154,25 opm ou 2,570 Hz da grade

(g) Sinal gerado pela sonda ótica na velocidade 175 opm ou 2,916 Hz da grade

M Medidas MicroADV

(a) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 38 opm ou 0,633 Hz)

(b) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 57,25 opm ou 0,954 Hz)

(c) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 95,5 opm ou 1,591 Hz)

(d) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 118 opm ou 1,966 Hz)

(e) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 135,25 opm ou 2,254 Hz)

(f) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 154,25 opm ou 2,570 Hz)

(g) Sinal de velocidades verticais gerado pelo microADV (velocidade da grade 175 opm ou 2,916 Hz)

N   Visualização das Simulações Numéricas

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 64: Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo OpenFOAM (38 opm ou 0,633 Hz da grade)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 65: Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo OpenFOAM (57,25 opm ou 0,954 Hz da grade)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 66: Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo OpenFOAM (95,5 opm ou 1,591 Hz da grade)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 67: Imagens geradas no Paraview da simulação numérica elaborada pelo OpenFOAM (118 opm ou 1,966 Hz da grade)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 68: Velocidade vertical simulada para frequência de oscilação da grade de 135,25 rpm ou 2,254 Hz

Figura 69: Velocidade vertical simulada para frequência de oscilação da grade de 154,255 opm ou 2,570 Hz

Figura 70: Imagens da simulação elaborada pelo OpenFOAM para 175 OPM da grade

O Simulação numérica-Sinais da componente vertical

(a) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 38 opm

(b) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 57,25 opm

(a) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 95,5 opm

(b) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 118 opm

(a) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 135,25 opm

(b) Sinal de velocidades verticais com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 154,25 opm

Figura 74: Velocidade vertical com corte dos primeiros 1000 pontos (ou 31,25 segundos) para frequência de oscilação da grade de 175 opm

P   Análise espectral (Fourier) para medidas dos ensaios de comparação entre o microADV com e sem dispositivo aux- iliar

(a)

(b)

Figura 75: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (38 opm ou 0,633 Hz)

(a)

(b)

Figura 76: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (57,25 opm ou 0,954 Hz)

(a)

(b)

Figura 77: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (95,5 opm ou 1,591 Hz)

(a)

(b)

Figura 78: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (118 opm ou 1,966 Hz)

(a)

(b)

Figura 79: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (135,25 opm ou 2,254 Hz)

(a)

(b)

Figura 80: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (154,25 opm ou 2,570 Hz)

(a)

(b)

Figura 81: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal do microADV com peça e (b) Análise espectral do sinal do microADV sem peça (175 opm ou 2,916 Hz)

Q *Wavelet coherence* comparação entre sinais de velocidade resultante do microADV com e sem dispositivo auxiliar

Figura 82: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 38 opm

Figura 83: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 57,25 opm

Figura 84: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 95,5 opm

Figura 85: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 118 opm

Figura 86: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 135,25 opm

Figura 87: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 154,25 opm

Figura 88: *Wavelet Coherence* MicroADV com e sem dispositivo 175 opm

R Comparações entre sinais da Sonda Ótica e MicroADV

R.0.1 38 oscilações por minuto da grade

(a)

(b)

Figura 89: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (38 opm ou 0,633 Hz)

Figura 90: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (38 opm ou 0,633 Hz)

Figura 91: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 38 opm ou 0,633 Hz

R.0.2 57,25 oscilações por minuto da grade

Figura 92: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (57,25 opm ou 0,954 Hz)

Figura 93: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (57,25 opm ou 0,954 Hz)

Figura 94: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 54,25 opm ou 0,954 Hz

R.0.3 95,5 oscilações por minuto da grade

Figura 95: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (95,5 opm ou 1,591 Hz)

Figura 96: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (95,5 opm ou 1,591 Hz)

Figura 97: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 95,5 opm ou 1,591 Hz

R.0.4 118 oscilações por minuto da grade

Figura 98: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (118 opm ou 1,966 Hz)

Figura 99: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (118 opm ou 1,966 Hz)

Figura 100: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 118 opm ou 1,966 Hz

R.0.5 135,25 oscilações por minuto da grade

Figura 101: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (135,25 opm ou 2,254 Hz)

Figura 102: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (135,25 opm ou 2,254 Hz)

Figura 103: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 135,25 opm ou 2,254 Hz

R.0.6 154,25 oscilações por minuto da grade

Figura 104: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (154,25 opm ou 2,570 Hz)

Figura 105: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (154,25 opm ou 2,570 Hz)

Figura 106: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 154,25 opm ou 2,570 Hz

R.0.7 175 oscilações por minuto da grade

Figura 107: Comparação entre (a) Análise espectral do sinal obtido pelo microADV e (b) Análise espectral do sinal obtido pela sonda ótica (175 opm ou 2,916 Hz)

Figura 108: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pelo microADV e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal obtido pela sonda ótica (175 opm ou 2,916 Hz)

Figura 109: *Wavelet Coherence* sonda ótica e microADV 175 opm ou 2,916 Hz

S Comparações entre sinais da Sonda Ótica e Simulação numérica

S.0.1 38 oscilações por minuto da grade

Figura 110: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (38 opm)

Figura 111: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (38 opm)

Figura 112: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 38 opm

S.0.2 57,25 oscilações por minuto da grade

(a)

(b)

Figura 113: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (57,25)

Figura 114: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (57,25 opm)

Figura 115: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 57,25 opm

S.0.3 95,5 oscilações por minuto da grade

Figura 116: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (95,5)

Isto também é observado nas figuras 117. Nos dois sinais a maior parte da informação está contida no intervalo de 0 a 2 Hz, porém no sinal da sonda ótica estas informações estão mais distribuídas entre as demais frequências.

Figura 117: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (95,5 opm)

Figura 118: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 95,5 opm

S.0.4 118 oscilações por minuto da grade

(a)

(b)

Figura 119: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (118 opm)

Figura 120: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (118 opm)

Figura 121: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 118 opm

S.0.5 135,25 oscilações por minuto da grade

Figura 122: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (135,25 opm)

Figura 123: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (135,25 opm)

Figura 124: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 135,25 opm

S.0.6 154,25 oscilações por minuto da grade

Figura 125: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho

Figura 126: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (154,25 opm)

Figura 127: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 154,25 opm

S.0.7 175 oscilações por minuto da grade

(a)

(b)

Figura 128: Comparação entre (a) Análise espectral da simulação numérica e (b) Análise espectral do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (175 opm)

Figura 129: Comparação entre (a) Distribuição da energia *Wavelet* da simulação numérica e (b) Distribuição da energia *Wavelet* do sinal da sonda cortado no mesmo trecho (175 opm)

Figura 130: *Wavelet Coherence* sonda ótica e simulação na velocidade 175 opm