

TURBINAS HIDROCINÉTICAS FLUVIAIS

Tecnologias, potencial hidrocínético
e impactos ambientais

ORGANIZADORES

Antonio C.P. Brasil Junior

Taygoara F. Oliveira

Claudio José C. Blanco

Rafael Castilho F. Mendes

Sergio O. Frontin



TURBINAS HIDROCINÉTICAS FLUVIAIS

Tecnologias, potencial hidrocínético
e impactos ambientais

ORGANIZADORES

Antonio C.P. Brasil Junior
Taygoara F. Oliveira
Claudio José C. Blanco
Rafael Castilho F. Mendes
Sergio O. Frontin



Proponente



Programa de Pesquisa e
Desenvolvimento - P&D



Executora



Fundação de Apoio

1ª Edição

Brasília
2022

Impressão: Athalaia Gráfica e Editora
Tiragem: 560 exemplares

TURBINAS HIDROcinÉTICAS FLUVIAIS

Tecnologias, Potencial Hidrocinético e Impactos Ambientais

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)

SGAN Quadra 603, Módulos I e J, Asa Norte.
CEP: 70830-030. Brasília (DF).
Sandoval de Araújo Feitosa Neto – Diretor-Geral

Serra do Facão Energia S.A.

Avenida 20 de Agosto, n.º 1293, 2º andar. Centro.
CEP 75701-010. Catalão (GO).

Luiz Antonio Gouvêa de Albuquerque – Diretor-Presidente e Técnico
Odair Batista Carvalho – Diretor Administrativo Financeiro
Pablo Henriques Salgado – Gerente Socioambiental e Jurídico
Jorge de Medeiros Pereira – Gerente de Operação e Manutenção

Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec)

Campus Universitário Darcy Ribeiro. Edifício Finatec,
Asa Norte. CEP: 70910-900. Brasília (DF).
Augusto César de Mendonça Brasil – Diretor-Presidente

Fundação Universidade de Brasília (UnB)

Campus Universitário Darcy Ribeiro. Prédio da Reitoria
Asa Norte. CEP 70910-900. Brasília (DF)
Márcia Abrahão Moura – Reitora

Capa e editoração

Casa 73

Revisão

Elaine Cristina

Catálogo na Fonte

Centro de Documentação – CEDOC

T931

Turbinas hidrocinéticas fluviais: tecnologias, potencial hidrocinético e impactos ambientais / Antonio Cesar Pinho Brasil Junior *et al.* (organizadores). - Brasília : Casa 73, 2022.

512 p. : il..

Inclui bibliografia e índice.

ISBN: 978-65-87779-19-5

1. Potencial Hidrocinético. 2. Fontes Renováveis de Energia. 3. Turbinas Hidrocinéticas. I. Título.
II. Antonio Cesar Pinho Brasil Junior.

CDU: 621.43.068.2:556.18

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do Programa de P&D da Aneel. Projeto: Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Potencial de Energia Hidrocinética em Usinas Hidroelétricas. Código ANEEL: PD-06899-2002/2020. Este livro reflete a opinião dos autores baseada nos relatórios produzidos pelas entidades executoras do projeto. As conclusões e opiniões apresentadas não necessariamente refletem o posicionamento da Aneel ou de qualquer das empresas e instituições desse projeto de pesquisa.

Os textos contidos nesta publicação podem ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que a fonte seja citada.

Todos os direitos estão reservados pelas empresas indicadas.

PARTICIPANTES DO PROJETO

I – Serra do Facão Energia S.A.

- Pablo Henriques Salgado – Gerente
- Jorge de Medeiros Pereira
- Rita de Cassia Maia Resende
- Patrícia Nogueira de Souza
- Bruno Ricardo Ferreira Lopes
- Bruno Silverio Ferreira
- Neucy Assunção de Almeida

II – Universidade de Brasília (UnB) e Universidade Federal do Pará (UFPA)

Pesquisadores e autores do livro em ordem alfabética

- Antonio Cesar Pinho Brasil Junior – Coordenador (UnB)
- Claudio José Cavalcante Blanco (UFPA)
- Cleidson da Silva Alves (UFPA)
- Felipe Ribeiro de Toledo Camargo (UnB)
- Isadora Montenegro Bugarin (UnB)
- Kaajal Rohini Gopie (UnB)
- Marianela Macias Machuca (UnB)
- Matheus Montenegro Nunes (UnB)
- Miguel Ángel García (UnB)
- Nelio Moura de Figueiredo (UFPA)
- Patrícia da Silva Holanda (UFPA)
- Rafael Castilho Faria Mendes (UnB)
- Rudi Henri Van Els (UnB)
- Sergio de Oliveira Frontin (UnB)
- Taygoara F. Oliveira (UnB)
- Yves Secretan (Universidade de Quebec – Canadá)

Demais membros da equipe de pesquisadores

- Adrielle da Silva O. Santos (UFPA)
- Felipe Carvalho Andrade (UnB)
- Guilherme Tabatinga Medeiros (UnB)
- Raysa Gomes dos Santos (UnB)

III – Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec)

- Debora Fernandes da Cunha
- Denise Valadão Santos

Sumário

Prefácio	7
Agradecimentos	11
1 Estado da arte da tecnologia	12
1.1 Considerações preliminares	12
1.2 Maturidade da tecnologia	15
1.3 Turbinas hidrocínéticas fluviais	29
1.4 Conclusão	33
2 Avaliação do custo nivelado da energia hidrocínética	39
2.1 Considerações gerais	39
2.2 Metodologia de estimativa de LCOE	41
2.2.1 Análise do sítio de instalação	41
2.2.2 Produção de energia anual - AEP	42
2.2.3 Despesas de capital - CAPEX	43
2.2.4 Despesas de operação - OPEX	44
2.3 Microturbina UnB - Geração 2	46
2.3.1 Sítio de instalação - Rio Maracá, AP-Brasil	47
2.3.2 Análise de desempenho e estimativa de AEP	48
2.3.3 Despesas de capital - CAPEX	50
2.3.4 Despesas de operação - OPEX	52
2.3.5 Custo nivelado de energia	52
2.4 Pequena turbina UnB - plataforma Hydro-K	54

2.4.1	Sítio previsto de instalação - Rio São Marcos, DF-Brasil	55
2.4.2	Análise de desempenho e estimativa de AEP	57
2.4.3	Despesas de capital - CAPEX	59
2.4.4	Despesas de operação - OPEX	60
2.4.5	Custo nivelado de energia	62
2.5	Perspectiva de custo	63
3	Sobre o potencial de energia hidrocínética	68
3.1	Introdução	68
3.2	Definições preliminares	71
3.3	Potencial hidrocínético remanescente em usinas hidroelétricas	75
3.4	Séries temporais e modelos estocásticos de previsão	79
3.4.1	Processos estacionários	83
3.4.2	Modelo de Box & Jenkins	87
3.4.3	Modelo de média móvel – MA	92
3.4.4	Modelo Autorregressivo — AR	95
3.4.5	Modelo autorregressivo e de média móvel – ARMA	100
3.4.6	Modelos não estacionários	102
3.4.7	Modelo autorregressivo integrado de média móvel — ARIMA	103
3.4.8	Modelos ARIMA de Previsão de Variáveis Hidrológicas	107
3.5	Modelos RNAs de Previsão de Variáveis Hidrológicas	125
3.5.1	Neurônio artificial	126
3.5.2	Perceptron Multicamada — MLP	131
3.5.3	Aprendizado — Algoritmo <i>Backpropagation</i>	134
3.5.4	Modelo de Previsão RNA-MLP/BP	143
3.5.5	Calibração e Validação do Modelo	149
3.6	Modelo de Previsão de Energia	149
3.6.1	Parametrização do Modelo	150
3.7	Ajustes de distribuições de probabilidades a variáveis hidrológicas	165
3.7.1	Distribuição Normal	167
3.7.2	Distribuição Log-Normal	168
3.7.3	Distribuição Gama	170
3.8	Conclusões	176

4	Metodologias experimentais	184
4.1	Considerações gerais	184
4.2	Medidas de velocidade por perfilamento acústico - ADCP	187
4.3	Velocimetria por imagens de partículas em grandes escalas - LSPIV	191
4.4	Estudo de caso: medidas <i>in situ</i> do reservatório do rio São Marcos a jusante da usina <i>SEFAC</i>	198
4.5	Conclusões	220
5	Metodologias de simulação de escoamentos	226
5.1	Considerações gerais	226
5.2	Modelo 2D - Equações de Saint-Venant	230
5.2.1	Considerações Gerais	230
5.2.2	Formulação do escoamento em águas rasas	233
5.2.3	Coefficiente de Chezy	236
5.2.4	Modelos de turbulência	240
5.2.5	Condições de Contorno	243
5.2.6	Plataforma de simulação H2D2	243
5.2.7	Parametrização Quasi-3D	246
6	Formulação tridimensional de escoamentos ambientais	255
6.1	Considerações gerais	255
6.2	Campos hidrodinâmicos turbulentos	258
6.3	Equações de conservação médias	259
6.4	Equação do tensor de Reynolds	261
6.5	Equação de energia cinética de turbulência	263
6.6	Considerações gerais sobre fechamento e modelagem	263
6.7	Modelo a duas equações $k - \varepsilon$	265
6.8	Correções no Modelo $k - \varepsilon$	267
6.9	Modelo $k - \varepsilon$ anisotrópico e não linear	269
6.10	Modelo de Tensões de Reynolds - <i>RSM</i>	271
6.11	Hidrodinâmica de fundo rugoso	274
6.12	Considerações sobre implementação numérica 3D	276

7	Estudo de caso UHE Serra do Facão - Simulação 3D	283
7.1	Visão geral da metodologia	283
7.2	Validação do método numérico	285
7.2.1	Descrição do <i>benchmark</i>	286
7.2.2	Condições de contorno do <i>benchmark</i>	289
7.2.3	Estudo de sensibilidade quanto ao refinamento de malha	290
7.3	Comparação entre resultados de modelos de turbulência	292
7.4	Simulação do escoamento no rio São Marcos	295
7.4.1	Modelo geométrico e condições de contorno	295
7.4.2	Estudo de convergência de malha	297
7.4.3	Determinação dos sítios para instalação de turbinas hidrocinéticas	298
7.4.4	Estimativa anual de geração hidrocínética	305
7.5	Conclusões	308
8	Estudo de caso UHE Serra do Facão - Modelo Quasi-3D	311
8.1	Introdução	311
8.2	Área de Estudo	314
8.2.1	Dados de Batimetria	315
8.2.2	Condições de Contorno	317
8.3	Resultados	317
8.3.1	Calibração do Modelo 2DH e Estudo de Malha	317
8.3.2	Modelo de Elevação do Terreno	318
8.3.3	Simulações 2D de velocidades e profundidades	320
8.3.4	Determinação de Densidade de Potência Hidrocínética e Velocidade de Projeto	322
8.3.5	Modelo Quasi-3D	329
8.3.6	Aplicação do Modelo Quasi-3D nas seções analisadas	331
8.3.7	Proposta de Parques Hidrocínéticos e Energia Gerada nas três seções analisadas	333
8.4	Conclusão	344
9	Impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna	349
9.1	Introdução	349
9.1.1	Contextualização	350

9.2	Estado da arte	354
9.2.1	Impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna	354
9.2.2	Nado de peixes em escoamentos não perturbados	357
9.2.3	Nado de peixes em escoamento perturbado	363
9.2.4	Turbinas hidrocínéticas	368
9.2.5	Tanques e túneis de água para estudos de impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas	370
9.3	Biomecânica do nado de peixes	373
9.3.1	Principais parâmetros adimensionais	373
9.3.2	Cinemática do nado de peixes	375
9.3.3	Forças hidrodinâmicas	377
9.3.4	Eficiência propulsiva	381
9.3.5	Estrutura da esteira hidrodinâmica	385
9.4	Hidrodinâmica de turbinas de eixo horizontal	389
9.4.1	Esteira hidrodinâmica de uma turbina de eixo horizontal	390
9.4.2	Métodos de descrição da esteira	393
9.4.3	Modelo da linha atuadora	398
9.5	Resultados	402
9.5.1	Estudo numérico de peixes nadando em escoamentos não perturbados	403
9.5.2	Estudo numérico de turbina hidrocínética	435
9.5.3	Estudo numérico do problema acoplado turbina-peixe	451
9.5.4	Estudo experimental de peixes em tanque de água	474
9.6	Conclusões	486

Prefácio

Sobre projetos e responsabilidade para com o futuro...

Certa vez aprendi com um velho professor algo que vim a descobrir que se aplica a muitas coisas na vida.

Dizia o antigo mestre que “a História não se deve interpretar sem um adequado contexto” e que a ausência de uma correta contextualização dos fatos envolvidos em qualquer acontecimento certamente produz a conclusões equivocadas, impedindo a correta percepção de erros e acertos, causas e conseqüências, vencidos e vencedores, etc.

Pior, afirmava meu velho professor: “simples informações, tomadas de *per si*, deixam de servir à construção de legítimo conhecimento, aquele que somente resulta da compreensão do todo”.

O projeto a que este livro se dedica provém da percepção de que o conhecimento que construiu o Setor Elétrico Brasileiro, na amplitude e significância que tem hoje para a nação, não surgiu do acaso, mas, ao contrário, foi composto pelo empenho e arrojo de muitos compatriotas que, no passado, dedicaram-se a reunir os conhecimentos então disponíveis, para transformá-los e aplicá-los ao contexto de um País destinado ao crescimento.

Passado o tempo, natural seria que houvesse um certo arrefecimento desse ímpeto, até porque o *Sistema Interligado Nacional* havia crescido e se evidenciava um significativo domínio das técnicas aplicáveis à geração hidroelétrica, principal fonte de nossa matriz.

Não obstante, o tempo, em seu passar sorrateiro, demanda uma certa malícia, aquela postura de se ter “*um olho no peixe e outro no gato*”.

Se assim não for, ficaremos presos no presente, no conforto da realidade conhecida, e não nos prepararemos para o futuro, ou melhor, não prepararemos o futuro, pois ele – o futuro – pertence àqueles que o constroem, com coragem e paixão pela inovação.

Segundo essa ótica, a *Serra do Facão Energia SA – SEFAC* tem encarado o programa de P&D+I conduzido pela *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*, como um compromisso para com o futuro.

Partindo dessa lógica e buscando não incorrer no equívoco de não oferecer à situação o adequado contexto, precisamos mencionar um breve histórico da empresa e do empreendimento que nos coube construir e, a partir de então, operar e manter.

Podemos adiantar que a *Serra do Facão Energia SA* é hoje uma composição de três importantes *players* do Setor Elétrico: *Furnas Centrais Elétricas SA, Alcoa Alumínio SA e DME Energética SA*.

A essas empresas, o Poder Concedente assegurou a possibilidade de construir a UHE *Serra do Facão*, empreendimento situado no rio São Marcos, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Goiás.

Trata-se de um empreendimento cuja concessão foi obtida por leilão, em 2001, e que entrou em operação comercial em julho de 2010, com a Unidade Geradora 01, e, em agosto de 2010, com a Unidade Geradora 02.

O reservatório da Usina abrangeu uma área de 218 km^2 , em sua cota máxima de operação, e alcançou os municípios de Catalão, Davinópolis, Campo Alegre de Goiás, Ipameri e Cristalina, em Goiás, além de Paracatu, em Minas Gerais.

A capacidade instalada da Usina é de 212,6 MW, produzida por 2 grupos geradores acionados por turbinas tipo *francis*.

A empresa deverá estar à frente da operação da Usina pelo menos até novembro de 2040, quando se encerra o Contrato de Concessão que regula o aproveitamento daquele potencial hidráulico.

Evidentemente, ao longo da operação da planta, muitos benefícios foram e ainda serão entregues ao país e à sociedade, não apenas na forma da energia gerada, a qual responde pela principal motivação da construção da Usina, mas também mediante os empregos diretos e indiretos que já produziu e que ainda irá produzir, pelos recursos repassados aos municípios alcançados por seu reservatório, pelas

ações socioambientais que executa nas comunidades lindeiras, pela regularização plurianual de vazões que assegura ao cumprir os despachos habilmente ordenados pelo *Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS*, assim como pela sua contribuição para com os esforços de se assegurar ao país uma condição de oferta de energia adequada e condizente com suas demandas por segurança energética.

Haverá algo mais, outras contribuições que ora me escapam?

Certamente que sim!

Basta lembrar que energia não é algo de que se dependa apenas para nosso conforto doméstico, nem tampouco para impulsionar um parque industrial.

Energia e sua adequada gestão têm intrínseca ligação com soberania e autodeterminação, com promoção de acesso social, com criação e manutenção de empregos, com custo-país e competitividade, com preservação ambiental, com matriz energética limpa e renovável, com saneamento básico, sustentabilidade e, conforme a situação, com a manutenção da própria vida.

Além disso, há um ponto, em particular, que me parece relevante destacar nesse tipo de projeto e que, com razoável frequência, passa despercebido por muitos.

Trata-se da nossa juventude e da capacidade de crescimento que nossa geração tem a responsabilidade de assegurar, mobilizando os jovens e direcionando-os para aquilo que mais os atrai: o desafio!

O desafio de estudar, de pesquisar, de duvidar, de questionar e de aprender.

O desafio de crescer em meio a adversidades, contra todas as probabilidades, contra todas as previsões.

O desafio de descobrir-se brasileiro, daquele tipo de gente que usualmente se diz que não desiste nunca!

Acreditamos que esse aspecto tenha sido amplamente materializado no engajamento observado ao longo do projeto, nas pesquisas realizadas, nas titulações acadêmicas em nível de mestrado e doutorado que foram obtidas e nas diversas publicações que foram produzidas.

Nossa ambição, nesse exato contexto, ao nos alinharmos aos pesquisadores que conduziram este e outros projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em que a SEFAC esteve presente, não se restringe a aplicar bem os recursos destinados a esse fim, pois isso é apenas o óbvio.

Queremos estar juntos na construção do futuro do Setor Elétrico, queremos ver essa nova realidade e, se possível, ter parte destacada na construção de um novo e

mais promissor contexto que permita, mais à frente, a todos os brasileiros, um olhar respeitoso e reconhecido por nossas contribuições ao não desistirmos de enfrentar os desafios do porvir, em face da tranquilidade do já existente.

Sabemos que isso não soa nada despretensioso, mas quem disse que o futuro se constrói de outra forma?

Por fim, gostaria de expressar o sincero reconhecimento da SEFAC aos nossos parceiros neste projeto, em particular às instituições que o viabilizaram, a começar pela ANEEL, seguindo-se a *Universidade de Brasília - UnB* e a *Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos - FINATEC*.

Registramos também a participação indireta, junto à UnB, da *Universidade Federal do Pará - UFPA* e da *École Nationale d'Arts et Metiers*.

Podemos assegurar que essas parcerias também não ocorreram ao acaso, mas, isto sim, com base em sólidas reputações e na grandeza de propósitos que todas evidenciam.

Naturalmente, feitas essas menções, não podemos esquecer as pessoas por trás dessas organizações, as quais, cada qual a seu modo, a seu tempo e de acordo com suas habilidades, como um time de primorosos artesãos, compuseram o resultado que hoje se busca consolidar nesta publicação.

Da mesma forma, não seria justo deixar de referirmo-nos à nossa equipe interna à SEFAC, em especial aos profissionais envolvidos na gestão de P&D da empresa, aos nossos funcionários que apoiaram as equipes em campo e aos colegas da Diretoria Administrativo-Financeira, que não mediram esforços para viabilização dos trabalhos e de todos os recursos logísticos que demandaram.

Esperamos que todos tenham clara noção de que atuaram valorosamente na construção do novo tempo a que nos referimos e que, por essa conta, têm parte reservada na história, seja como indivíduos determinados, seja como um grupo vitorioso e empreendedor.

Eng.^o Luiz Antonio Gouvêa de Albuquerque

Serra do Facão Energia S.A.

Diretor Presidente

Agradecimentos

O conteúdo deste livro é fruto do esforço das atividades do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado *Lambari*, que foi financiado pela carteira de projetos ANEEL da empresa *Serra do Facão Energia SA – SEFAC*. Com início em março de 2020, este projeto envolveu 20 pesquisadores entre professores universitários, alunos de pós-graduação e graduação, da Universidade de Brasília e da Universidade Federal do Pará.

Ao longo deste período de execução de atividades, o projeto enfrentou duas grandes crises: a epidemia de COVID-19 e a crise de depleção hídrica na Bacia do Rio São Marcos. Suplantamos todos os desafios técnicos e as dificuldades na contemporaneidade da situação.

Sob todas estas adversidades, o projeto superou as expectativas pelo bravo comprometimento de sua equipe e pelo sempre presente apoio institucional da financiadora e das universidades públicas envolvidas. O sucesso de evoluir os conhecimentos técnicos sobre as temáticas envolvidas no projeto fez crescer a esperança de que a ciência e tecnologia podem proporcionar o fortalecimento de nossa capacidade técnica no setor de energia, em prol da sociedade brasileira. Portanto, o agradecimento principal pelo presente trabalho vai ao encontro dessa janela de oportunidades que nos foi confiada.

Agradecemos, antes de tudo, aos diretores da *SEFAC* pela sempre presente confiança em nosso trabalho, bem como à administração da Universidade de Brasília em particular à nossa Reitora, Prof^{ca} Márcia Abrahão Moura, e nossa Decana de Pesquisa e Inovação, Prof^{ca} Maria Emília Machado Telles Walter, pelo importante suporte à equipe e a esse projeto como um todo.

Agradecemos também o fundamental apoio de todo grupo de técnicos e engenheiros da Usina Serra do Facão, que não mediram esforços para que as atividades de campo do projeto se realizassem, mesmo sob toda a adversidade do período de pandemia.

Agradecemos à FINATEC, nossa fundação de apoio, por intermédio de sua Diretoria, Superintendência e de sua equipe de analistas, pela gestão profissional e dedicada do projeto *Lambari*.

Prof^o Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília

Coordenador do Projeto *Lambari*

Capítulo 1

Estado da arte da tecnologia

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

1.1 Considerações preliminares

A energia hidrocínética é definida como a energia associada ao movimento de água em rios, zonas costeiras e oceanos, cujas fontes primárias têm origem gravitacional e são associadas à drenagem superficial sobre o relevo de uma bacia hidrográfica, aos efeitos de maré ou às correntes oceânicas de escala planetária e regional. Este movimento de massa de água em correntes aquáticas proporciona um potencial energético relevante, que pode ser aproveitado para conversão em eletricidade por meio de dispositivos eletromecânicos. Neste sentido, este viés de aproveitamento energético tem sido objeto de um importante eixo de desenvolvimento de tecnologias ao longo da última década (e.g. [36], [28], [12]). Isto pode representar em um futuro próximo uma importante alternativa para produção de energia elétrica renovável, limpa e sustentável.

Um número importante de tecnologias de turbinas hidrocínéticas para aproveitamentos energéticos em ambiente costeiro (correntes de marés) ou para aplicações fluviais vem sendo reportado na literatura. Tais dispositivos apresentam uma larga diversidade quanto à sua aplicabilidade, com potências típicas de alguns watts

até grandes máquinas da ordem de megawatt. Muitos dos sistemas apresentam um desenvolvimento tecnológico já em fase de comercialização, com operação de algumas unidades reportadas na literatura, em que se avaliam seus desempenhos assim dos desafios técnicos para a operação desse tipo de máquina (manutenção, questões ambientais, despacho energético, dentre outros).

Um número expressivo de artigos de revisão sobre o estado da arte compõe um farto acervo da literatura atual sobre a tecnologia (e.g. [28], [14], [37], [15], [16], [11], [13]).

No sentido de definir parâmetros típicos associados à conversão de energia, uma breve explanação sobre a quantificação energética em uma corrente aquática se faz necessária.

Seja, portanto, a densidade de potência quantificável (expressa em W/m^2) que é associada à energia cinética do escoamento de água que cruza uma área de seção transversal A . Tem-se que a densidade de energia hidrocínética pode ser quantificada por

$$e_{hk} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1.1)$$

Nesta equação, ρ é a massa específica da água e V é a velocidade de fluxo livre (ver Fig.1.1).

A partir desta disponibilidade energética contida na corrente aquática, a potência hidráulica que é efetivamente pode ser convertida por uma turbina é, em geral, quantificada por

$$P_{hk} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1.2)$$

Introduz-se, assim, C_p que é o coeficiente de potência da máquina. Este parâmetro adimensional, característico de uma dada turbina, representa o desempenho hidrodinâmico de conversão da energia hidrocínética em potência de eixo ¹. Em geral, tal como para turbinas eólicas, $C_p = C_p(\lambda, Re)$, onde λ é a velocidade relativa de ponta de pá, definida por

¹Pelo trabalho de Betz, esse coeficiente é limitado em um valor teórico máximo em 59,3 %.

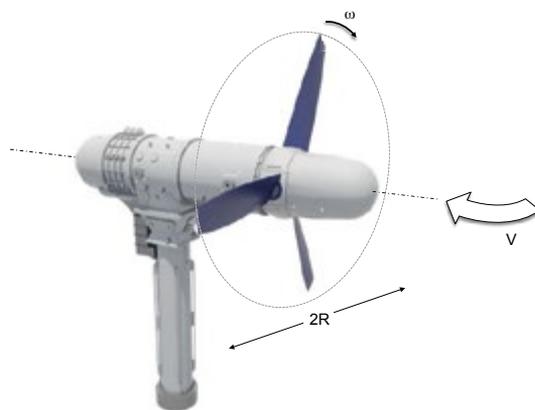


Figura 1.1: Conversão da Energia Hidrocínética

$$\lambda \equiv \frac{\omega R}{V} \quad (1.3)$$

sendo ω a velocidade de rotação da turbina e R o raio do rotor, e Re é o número de Reynolds dado por

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (1.4)$$

com μ sendo a viscosidade da água.

O aperfeiçoamento das tecnologias de turbinas hidrocínéticas está relacionado à busca de uma hidrodinâmica que apresente altos valores do coeficiente de potência, bem como ao desenvolvimento de sistemas da conversão da energia mecânica do eixo em eletricidade, a partir de sistemas eletromecânicos eficientes e confiáveis (sistemas de transmissão e multiplicação de rotação, geradores e sistemas de controle).

O desenvolvimento do conhecimento aplicado à engenharia de tais sistemas, bem como sua adequabilidade quanto ao uso em ambientes fluviais e oceânicos, compõem uma temática de pesquisa aplicada relevante no sentido de atingir uma maturidade tecnológica para as unidades hidrocínéticas.

1.2 Maturidade da tecnologia

A tecnologia de turbinas hidrocinéticas vem evoluindo em diferentes linhas conceituais, com inovações associadas a máquinas de grande, médio e pequeno porte. A Tabela 1.1 referencia alguns projetos importantes dentre uma centena de iniciativas internacionais de desenvolvimento de máquinas axiais de eixo horizontal (principal viés de desenvolvimento de projetos [16], [36]). A concepção desse tipo de máquina, aplicável em situações de correntes fluviais e oceânicas, é ilustrada pelos modelos apresentados nas Figuras 1.2-1.4. As máquinas aqui referenciadas existem de fato e encontram-se em fase de desenvolvimento pré-comercial (etapa na qual é possível instalar unidades experimentais) ou mesmo já comercializadas por empresas do setor. Esses modelos ilustrados compõem a base de desenvolvimento atual sob a qual a tecnologia evoluirá em suas concepções de inovação incremental.

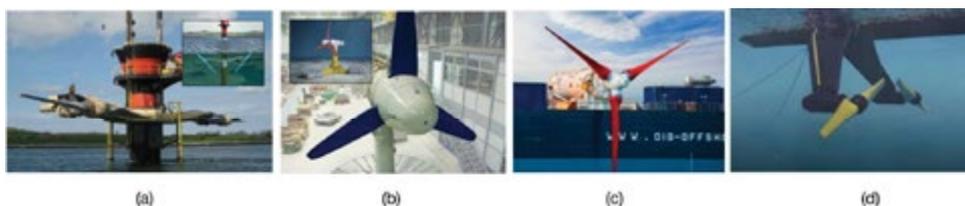


Figura 1.2: Turbinas hidrocinéticas de grande porte: (a) SeaGen $2 \times 500kW$, (b) GE-Hydro Oceade $1,4MW$, (c) Andritz HS1000 $1,0MW$ e (d) Scotrenewables O2 $2 \times 1,0MW$.



Figura 1.3: Turbinas hidrocinéticas de médio porte: (a) Verdant Power $35 kW$, (b) Tocardo T1 $55 kW$, (c) Schottel $70 kW$ e (d) Ocean Flow E35 $35 kW$.



Figura 1.4: Turbinas hidrocinéticas de pequeno porte: (a) Guinard 3,5 kW, (b) Small Hydro 5 kW, (c) Savoia Power 4 kW e (d) UnB G3 1 kW.

Uma tipologia geral das turbinas hidrocinéticas é apresentada na Fig. 1.5, em que se classificam máquinas hidrocinéticas existentes utilizando suas características de concepção e instalação. Tal como para as turbinas eólicas, a classificação quanto ao eixo da turbina envolve as seguintes concepções típicas:

- **Turbinas de eixo horizontal:** neste tipo de máquina, o eixo da turbina é alinhado horizontalmente ao escoamento com rotores de duas ou mais pás. O trem de potência axial, composto de gerador e engrenagens multiplicadoras, é instalado no interior do corpo estanque e submerso da máquina. Este tipo de concepção é majoritária nos projetos de turbinas existentes [36].
- **Turbinas de eixo vertical:** assim como em turbinas eólicas, máquinas de eixo vertical tipo *Darrieus* ou *Savonius* para instalações aquáticas são relatadas na literatura. O conceito de turbina com eixo vertical com pás helicoidais também é bastante difundido em projetos atuais, em particular para aplicações em correntes fluviais (e.g. [26]). Como ressaltado no estudo relatado em [10], esse tipo de geometria é capaz de quebrar o limite imposto de Betz. Casos de turbinas de eixo inclinado também são encontrados na literatura para aplicações em correntes de rio com profundidades baixa (e.g. [8]).
- **Turbinas com eixo horizontal transversal:** alguns modelos de máquinas posicionam seu eixo de potência transversalmente à velocidade de corrente. Neste tipo de concepção, o trem de potência pode ficar localizado fora do corpo d'água, facilitando a manutenção e o projeto mecânico do conjunto. Este tipo de concepção vem ganhando bastante espaço para a aplicação

fluvial, e, apesar do seu baixo desempenho, estas máquinas proporcionam uma efetiva melhoria de concepção das antigas rodas d'água [9].

Modelos de turbinas também podem ser caracterizados pela presença, ou não, do confinamento do rotor em carenagens (Fig. 1.6). Neste tipo de concepção, a carcaça pode eventualmente portar um gerador anelar (tipo *Straflow*) ou somente ser um confinamento funcional e de proteção da máquina, aplicável a situações em correntes com muitos detritos flutuantes. Em algumas situações, esta carcaça pode compor um difusor, cuja função hidrodinâmica está relacionada com o aumento do desempenho da turbina (ver [5], [21] ou [22]).

Tabela 1.1: Turbinas hidrocínéticas - Modelos de referência

Grandes Turbinas (≥ 100 kW)				
Fabricante	Potência (kW)	D (m)	Pás	Referência
MCT SeaGen-S	2×500 @2,5 m/s	20	2	www.marineturbines.com
GE-Hydro Oceade 1.4-18	1400 @2,8 m/s	18	3	www.gerenewableenergy.com
Andritz HS1000	1000 @2,7 m/s	NI	3	www.andritz.com
Scotrenewables O2	2×1000 @2,5 m/s	18	2	www.scotrenewables.com
Pequenas Turbinas (entre 10kW-100 kW)				
Fabricante	Potência (kW)	D (m)	Pás	Referência
Verdant Power Gen5	35 @2,2 m/s	5,0	3	www.verdantpower.com
Tocardo T1	55 @2,5 m/s	5,1	2	www.tocardo.com
Schottel SIT	70 @3,8 m/s	3,0	3	www.schottel.de
Ocean Flow E35	35 @2,3 m/s	4,5	3	www.oceanflowenergy.com
Guinard P154	20 @3,0 m/s	1,54	2	www.guinard-energies.bzh
Microturbinas (< 10 kW)				
Fabricante	Potência (kW)	D (m)	Pás	Referência
Guinard P66	3,5 @3,0 m/s	0,66	2	www.guinard-energies.bzh
Smart Hydro Monofolat	5 @3,1 m/s	1,0	3	www.smart-hydro.de
Savoia Power SHF1	4 @3,0 m/s	1,0	3	savoiapower.com

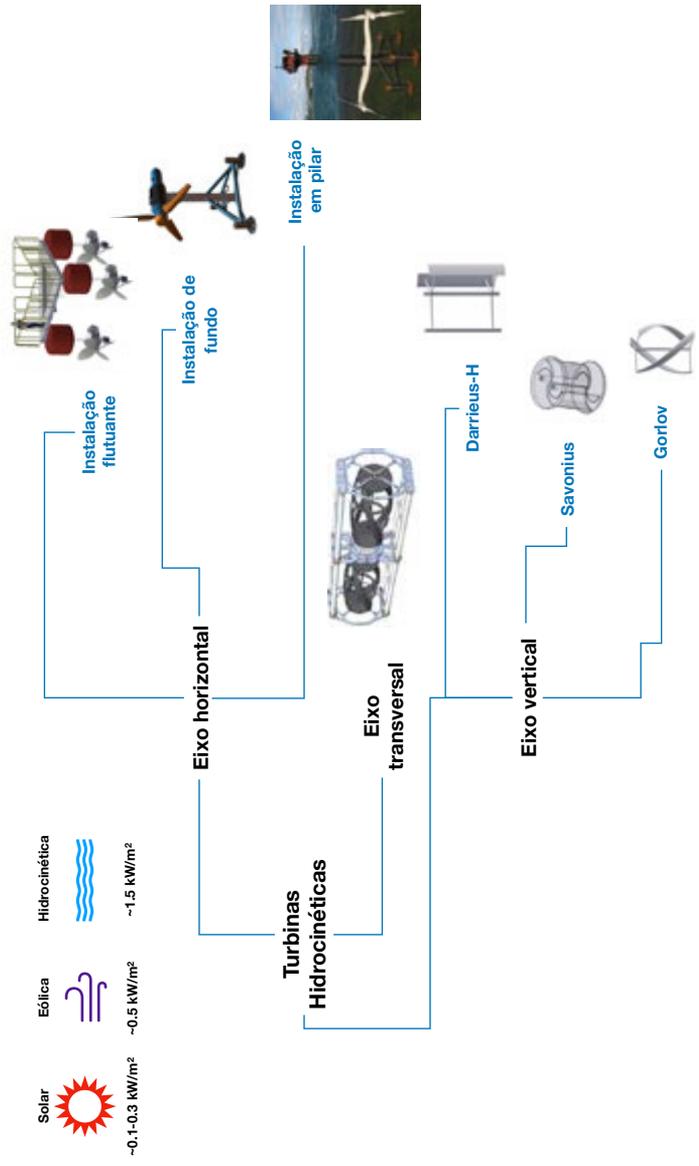


Figura 1.5: Tipologias de turbinas hidrocinéticas (adaptação de [13])



Figura 1.6: Turbinas hidrocinéticas carenadas: (a) Rotor livre, (b) Rotor carenado com gerador embutido *Straflow* e (c) Carcaça com difusor traseiro.

Por fim, como ressaltado na Fig. 1.5 e ilustrado na Fig. 1.7 as turbinas podem ser classificadas pelo tipo de instalação:

- **Instalações flutuantes:** neste tipo de instalação, um dispositivo de flutuação mantém uma ou mais turbinas em uma profundidade próxima à linha d'água. Os flutuadores proporcionam uma praticidade de posicionamento da máquina no corpo d'água e acompanham naturalmente a variação da cota da superfície livre, sem necessidade de mecanismos de posicionamento vertical (e. g. [3]). Algumas máquinas podem ser posicionadas verticalmente em cotas mais profundas utilizando dispositivos de flutuação parcial, que submergem o conjunto inteiro de máquinas hidrocinéticas como um submarino [37].
- **Instalações em fundo:** alguns projetos envolvem a instalação de turbinas em *parques* posicionados no fundo do corpo d'água (e.g. [37], [20]). Uma importante vantagem desse arranjo de instalação relaciona-se com a flexibilidade da navegação de superfície sobre as instalações posicionadas no fundo.
- **Instalações em pilar:** este tipo de instalação utiliza uma estrutura *offshore* tipo pilar para posicionar um conjunto de uma ou duas máquinas.
- **Instalações em pontes ou ancoradores:** este tipo de instalação utiliza uma obra civil existente no corpo d'água (e.g. pontes) para posicionar máquinas de forma integrada ao projeto da estrutura original [14].

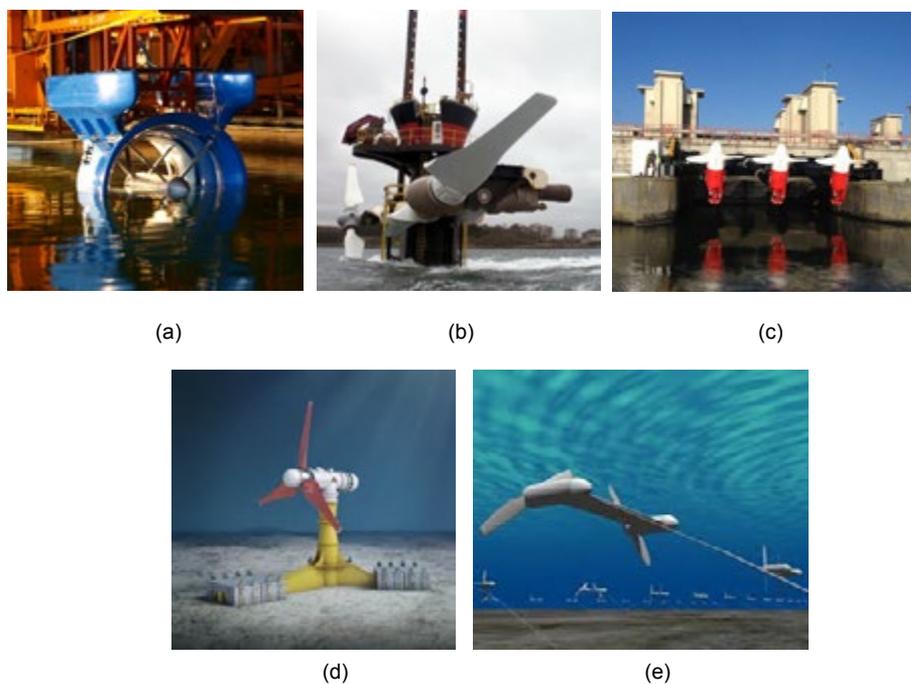


Figura 1.7: Instalação de turbinas hidrocínéticas: (a) Flutuantes, (b) Pilar, (c) Ancoradouros e pontes, (d) Fundo e (e) Semi-flutuantes.

Embora um bom número de iniciativas de pesquisa aplicada ao desenvolvimento de sistemas hidrocínéticos tenham sido relatadas na literatura (e.g. [36], [16]), pode-se considerar o *status* atual da tecnologia de turbinas hidrocínéticas ainda como *tecnologia emergente* ([25]), com níveis restritos de maturidade tecnológica e comercial observados. No entanto, relevantes interesses de investimento no desenvolvimento de pesquisa aplicada foram identificados, em particular por países que possuem potenciais para sua utilização em correntes de zonas costeiras ([18], [34]). Este investimento em pesquisa e desenvolvimento envolve grandes empresas do setor de hidroeletricidade e/ou engenharia de sistemas oceânicos, assim como incentivos a projetos cooperativos internacionais, com forte integração entre institutos de pesquisa e empresas. Isto certamente fortalece a rota de disponibilização da tecnologia, para que em um futuro breve parques de geração baseados em energia

hidrocinética comecem a florescer.

Os grandes desafios da consolidação da tecnologia relacionam-se com a viabilização técnica e econômica de unidades de geração, buscando competitividade comparativamente a outras alternativas de energias renováveis atualmente disponíveis.

No sentido de estabelecer um *status* quantificável de maturidade tecnológica dos modelos de turbinas hidrocinéticas, alguns estudos têm avaliado o desenvolvimento da tecnologia utilizando o indicador TRL-*Technology Readiness Level* ([38],[27], [35]). Este tipo de indicador vem sendo aplicado no processo de avaliação de diferentes tecnologias e tem origem em uma abordagem da implantação do programa espacial da NASA nos anos 70. Atualmente, este indicador vem sendo aplicado no setor de energia (e.g. [30]) no sentido de qualificar a evolução de uma dada tecnologia, utilizando nove níveis diferentes (ver Tab. 1.2 e Fig. 1.8).

Em face desta abordagem conceitual, nota-se que a maturidade tecnológica de sistemas hidrocinéticos tem aumentado ao longo da última década. Isto ocorre, em parte, pelos incentivos direcionados às alternativas de aproveitamento energético de recursos oceânicos ([23]). Neste sentido, a qualificação de sistemas vem sendo conduzida em laboratórios internacionais, que acompanham a operação e os testes de dispositivos hidrocinéticos em diferentes níveis de TRL, com fundos próprios de incentivo à inovação para o aproveitamento energético de áreas oceânicas. Convergem-se aí interesses dos importantes setores de petróleo & gás e da geração de eletricidade.

Complementarmente, todo um esforço de inserção comercial de sistemas vem ocorrendo no EMEC-Centro Europeu de Energia Marinha, no Reino Unido (Emec, na sigla em inglês - www.emec.org.uk), no sentido de proporcionar graus de maturidade comercial - *Commercial Readiness Index* (CRI) às inovações tecnológicas para o setor, fortalecendo iniciativas de instalação de sistemas que operem de forma plena tecnicamente e comercialmente. Neste sentido, a qualificação de sistemas e a promoção das tecnologias de aproveitamento de energia hidrocinética oceânica vem proporcionando um ambiente proativo para a tecnologia de máquinas hidrocinéticas.

Os atuais sistemas de conversão de energia hidrocinética, reportados neste capítulo, já apresentam graus de maturidade tecnológica elevados, com testes contínuos em situações de ambiente relevante. Algumas unidades apresentam um histórico operacional bastante avançado (casos, por exemplo, da unidade SeaGen,

no Reino Unido, e da Verdant Power, nos EUA). As plataformas internacionais de ensaios de sistemas hidrocínéticos, em particular para sistemas oceânicos, têm contribuindo com protocolos que permitem um real avanço dos níveis de TRL, seja para o sistema com um todo ou para diferentes subsistemas (unidades de flutuação, por exemplo). Associadas a este grande esforço engendrado ao desenvolvimento de sistemas oceânicos, as unidades fluviais, bem menores, são alimentadas pelo próprio avanço do conhecimento tecnológico sobre sistemas hidrocínéticos.

Tabela 1.2: Nível de Maturidade Tecnológica - TRL (*Technology readiness level*)

	Descrição	Aplicabilidade
TRL 1	Princípios Básicos observados e relatados	Conceito de conversão
TRL 2	Conceito tecnológico e/ou aplicação formulada	hidrocinética validado
TRL 3	Função crítica experimental analítica e/ou prova de conceito.	
TRL 4	Validação de sistema/componentes em laboratório	Teste em escala reduzida.
TRL 5	Demonstração de sistema/componentes (escala de laboratório)	Simulações (CFD, FEM, etc.)
TRL 6	Validação em escala piloto em ambiente relevante	Ensaio em campo
TRL 7	Demonstração em escala real em ambiente relevante	
TRL 8	Qualificação de sistema completo em escala e situações reais	Testes exaustivos em escala real
TRL 9	Operação de sistema completo em situações reais	Testes e operação em longo termo

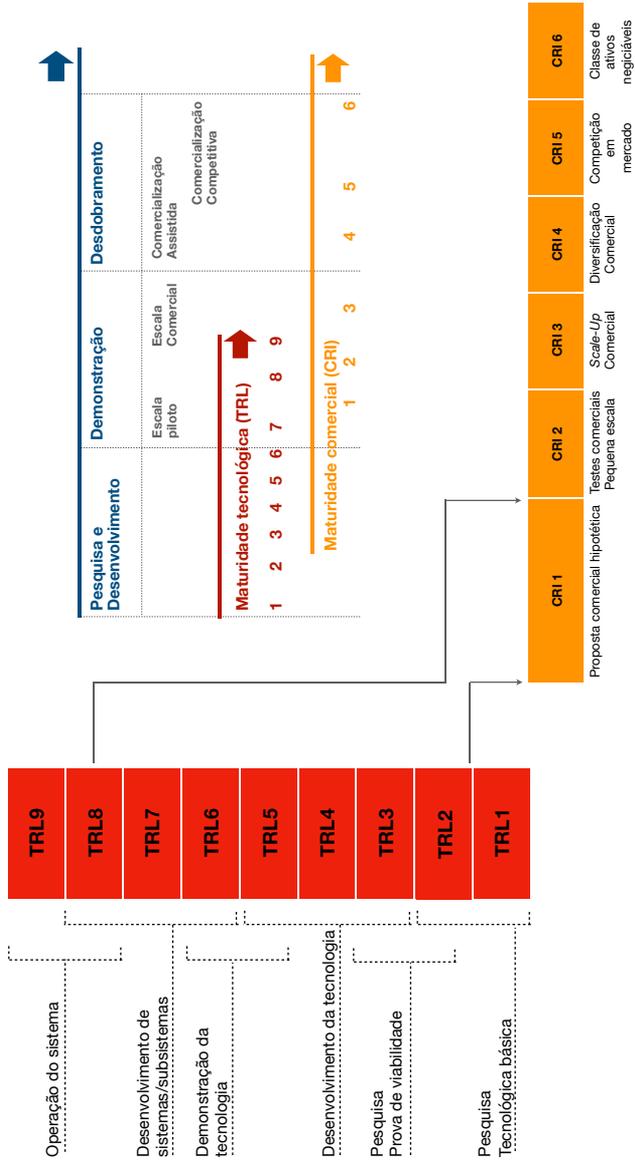


Figura 1.8: Maturidade Tecnológica (TRL) e Comercial (CRI)

A Tabela 1.3 apresenta valores típicos comparativos de densidade energética de algumas tecnologias existentes de conversão, comparativamente ao potencial associado de energia hidrocínética para dois diferentes níveis de velocidade de corrente. Nesta mesma Tabela apresenta-se também o índice de maturidade tecnológica (TRL) típicos para os diferentes tipos de aproveitamento. Observa-se que a densidade de energia típica contida em recursos de correntes de água promovem uma atratividade quanto ao uso deste recurso, no entanto, a maturidade tecnológica de sistemas ainda necessita de fortalecimentos para sua utilização plena. Comparativamente, por exemplo, à trajetória de implantação de sistemas eólicos *offshore*, as unidades de aproveitamento de correntes de maré e oceânicas/estuarinas deverão apresentar um crescimento de interesses similar, promovendo maturidade a partir de operação de sistemas robustos, ao longo da próxima década.

Os trabalhos de [35] e [38] qualificam a trajetória atual de desenvolvimento tecnológico de turbinas hidrocínéticas, avaliando as iniciativas atualmente em curso. No gráfico da Figura 1.9 observa-se a curva de custos de energia estimados comparativamente ao TRL. As duas tendências representam as curvas desejadas para o desenvolvimento tecnológico (em verde) e a real curva associada aos projetos efetivamente implantados no mundo. Nota-se que ainda é necessária uma adequação da curva, para que a trajetória evolutiva da tecnologia represente efetivamente uma alternativa de geração competitiva, fortalecendo assim as ações de comercialização e de mercado relativas ao seu uso.

Corroborando as avaliações gerais de maturidade tecnológica, a Tabela 1.4 apresenta algumas estimativas sobre o custo de energia estimado para dispositivos hidrocínéticos, comparando-o com tecnologias de turbinas eólicas. Os custos de energia são ainda quantificados em valores muito altos, o que reflete também a escolha inicial de desenvolvimento centrada em sistemas oceânicos. Tais sistemas, *per se*, envolvem custos em um patamar bastante elevado, tanto para instalação de sistemas (CAPEX) como também de sua operação e manutenção (OPEX). O trabalho de [19] apresenta algumas estimativas demonstrando que estes custos podem ser menores para sistemas fluviais ou onde as condições de locais de operação são mais favoráveis.

Tendo em vista o panorama geral apresentado para a tecnologia de turbinas hidrocínéticas, alguns desafios contemporâneos para seu desenvolvimento podem ser ressaltados:

Tabela 1.3: Densidade de energia e Maturidade Tecnológica Típicas ([38], [35], [6])

Tecnologia	TRL	Densidade Energética (kW/m²)
Solar	9	0,2-0,3
Eólica <i>onshore</i>	9	0,5-0,7
Eólica <i>offshore</i>	8	0,7
Hidrocinética @2 m/s	6-7	~1,6
Hidrocinética @3 m/s	6-7	~5,4

Tabela 1.4: Custos nivelados de energia LCOE ([17], [19])

Tecnologia	LCOE (US\$/MWh)	Custos de Capital (US\$/kW)
Eólica <i>onshore</i>	28 - 54	1100 - 1500
Eólica <i>offshore</i>	64 -115	2350 – 3550
Hidrocinética Oceânica	150 - 500	3100 - 4000

- **Necessidade de levantamento de recursos energéticos:** o mapeamento de recursos energético em países é uma estratégia que vem sendo engendrada em várias iniciativas nacionais. Estudos vêm sendo elaborados para a identificação de áreas prioritárias em zonas costeiras ou em rios (e.g. [34]). Verifica-se a necessidade de desenvolvimento de técnicas de mapeamento de potencial energético em longo termo que quantifique de forma sistemática e confiável variações sazonais do recurso (imagens de satélites, modelos, etc.). A viabilização de sítios para a instalação de sistemas proporciona uma real janela de oportunidade para investimentos na tecnologia.
- **Redução de custos de energia:** é necessária uma redução mais efetiva dos custos de energia (CAPEX e OPEX). A viabilização e competitividade da tecnologia só será possível com uma modificação da trajetória das maturidades tecnológica e comercial dos dispositivos (tal apresentado como na Fig. 1.9). Isso será possível reduzindo-se custos de subsistemas adjuntos que portam a turbina (estruturas flutuantes ou fixas), bem como integrando

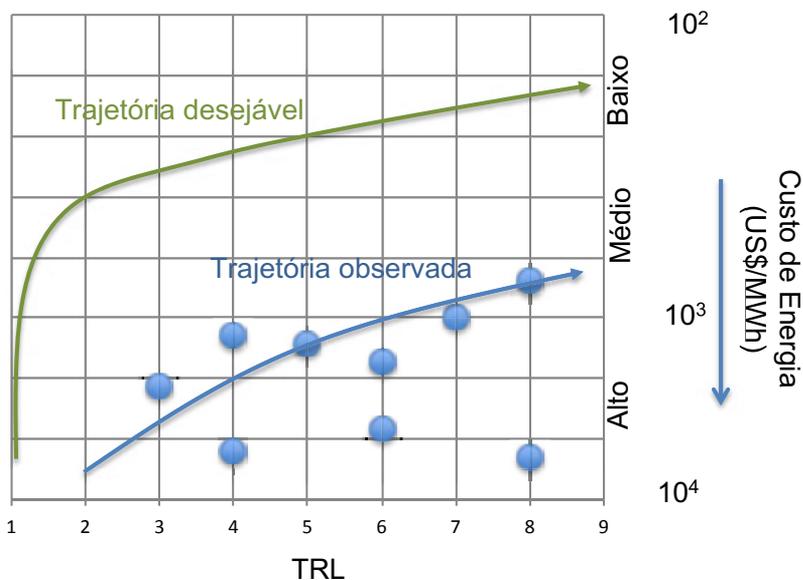


Figura 1.9: Trajetória Evolutiva de TRL [35]

sistemas compatíveis e já consolidados em outras tecnologias disponíveis (como turbinas eólicas ou hidráulicas, por exemplo).

- **Melhoria da confiabilidade de sistemas:** as condições de operação de sistemas hidrocínéticos representam uma desvantagem para a tecnologia. Condições típicas de operação oceânica e fluvial requerem utilização de componentes e montagens robustas e duráveis, submetidos a ambientes severos. Embora os sistemas de engenharia *offshore* para os setores de óleo & gás e naval tenham uma *expertise* consolidada e confiável, seus custos representam um outro patamar comparativamente à realidade dos sistemas de geração de energia. O desafio, portanto, repousa em garantir níveis de confiabilidade com custos compatíveis, herdando a base de conhecimento e de sistemas existentes nos referidos setores (ver [27] e [28]).
- **Identificação de impactos ambientais:** poucos estudos definitivos sobre

os impactos ambientais de sistemas hidrocínéticos ainda são disponíveis. Protocolos de Estudos de Impactos para a instalação de sistemas devem ser consolidados, de forma a garantir uma integral harmonia entre os dispositivos e ecossistemas.

- **Acessibilidade e despachabilidade:** o acesso ao *grid* e sua gestão técnica são um gargalo do uso da tecnologia. O equacionamento do cabeamento da eletricidade e do despacho de energia para uma instalação de sistemas é um forte desafio para a viabilização da tecnologia.
- **Otimização de práticas e sistemas de manutenção e operação:** a redução de custos de OPEX está relacionada à implantação de tecnologias diferenciadas para operar dispositivos hidrocínéticos (automação e monitoração), bem como em concepções de produtos que proporcionem pouca intervenção para sua manutenção, ampliando o tempo entre paradas.

Por fim, considera-se que os esforços atuais de pesquisa aplicada têm contribuído efetivamente para a melhoria da maturidade tecnológica de sistemas hidrocínéticos, e os diferentes desafios compõem uma agenda clara de desenvolvimento, que abre espaços para a inovação e parcerias no desenvolvimento de sistemas.

1.3 Turbinas hidrocínéticas fluviais

O uso de turbinas hidrocínéticas em rios é uma alternativa diferenciada para o pequeno atendimento a localidades ribeirinhas. Máquinas pequenas e médias podem suprir uma dada demanda local de eletricidade, a partir de uma estratégia de geração descentralizada, associada a outras fontes (solar, por exemplo). Neste sentido, esta tecnologia tem sido objeto de atenção, como forma a proporcionar soluções sustentáveis para comunidades ribeirinhas (e.g. [31], [33] ou [7], [29], [24]).

Para este tipo específico de aplicação, turbinas de eixo horizontal ([3]), com eixo vertical ou horizontal-transversal, tipo Darrieus/Gorlov (e.g. [12]), são disponíveis comercialmente. Em geral, nesta situação de uso, a tecnologia de turbinas hidrocínéticas dirige-se a demandas energéticas baixas (em torno de alguns *kW*)

ou ainda, para maiores potenciais, é necessário compor um arranjo em parque de turbinas ([16]).

Nota-se que algumas das importantes limitações às instalações de turbinas em rios devem ser ressaltadas:

- utilização de diâmetros de máquinas compatíveis com o calado do rio;
- compatibilidade em relação à navegação ribeirinha;
- proteção do rotor com grades, de forma a restringir o impacto com resíduos flutuantes ou mesmo reduzir o risco de impacto com cardumes de peixes;
- espaçamento conveniente do rotor da máquina em relação ao fundo do rio, de forma a reduzir os impactos sobre a dinâmica de sedimentos e biota subaquática;
- restrições quanto à perda de carga para arranjos em parque, de forma a não alterar significativamente o nível d'água à montante da instalação; e
- para rios estuarinos, onde o ciclo de maré estabelece fluxos de corrente bidirecionais, é necessária uma concepção hidrodinâmica da máquina compatível a este comportamento.

O histórico da pesquisa e desenvolvimento em turbinas hidrocínéticas na Universidade de Brasília (UnB), em particular no Departamento de Engenharia Mecânica e seu Laboratório de Energia e Ambiente, tem origem em projetos pioneiros no final da década de 80. Os objetivos originais das iniciativas de desenvolvimento na UnB tinham como foco a aplicação da tecnologia das pequenas turbinas fluviais para suporte a comunidades isoladas. Em 1995, o primeiro modelo de turbina (UnB-Geração 1) foi instalado na localidade de *Veredão*, estado da Bahia, para suporte de energia elétrica a um posto de saúde ([32]). Esta máquina de 1 kW operou durante 15 anos em um pequeno rio com 3 m/s de velocidade de corrente. Em 2004, uma atualização da tecnologia utilizando um projeto hidrodinâmico mais elaborado, com difusor cônico traseiro, foi desenvolvido para uma máquina de 2 kW e 1,2 m de diâmetro. Esta máquina (UnB-Geração 2) foi instalada na mesma localidade. Posteriormente, uma outra unidade operou no Amapá, município de Mazagão, no contexto de um financiamento de pesquisa aplicada do Ministério de

Minas e Energia, para busca de alternativas energéticas sustentáveis na Amazônia ([1]).

De 2004 a 2010, dois projetos de referência tecnológica foram financiados pela carteira de P&D ANEEL da Eletronorte com o objetivo de desenvolver a terceira geração de pequenas turbinas da UnB (UnB-Geração 3). Baseado em um elaborado projeto hidrodinâmico, o modelo UnB-G3 de 0,6 m de diâmetro, com difusor traseiro, caracterizou-se como uma máquina compacta de potência nominal de 1 kW ([2]).

Todas as pequenas máquinas da UnB foram concebidas para aplicações comunitárias de baixa potência. Procedimentos de proteção da propriedade industrial foram depositados, em particular para as turbinas UnB-G2 e UnB-G3 (Figuras 1.10 (a)-(c)).

Em 2010, um grupo de universidades lideradas pela UnB foi vencedor de uma chamada pública da Eletronorte para desenvolvimento de uma máquina de 11 m de diâmetro, com 500 kW de potência nominal, destinada à conversão de energia hidrocinética no reservatório de jusante da usina hidroelétrica de Tucuruí. De 2012 a 2015, uma equipe de 80 pesquisadores desenvolveram um projeto completo da máquina HTUC-01. Infelizmente, tal dispositivo nunca foi construído pela contratante. No entanto, o conhecimento de pesquisa aplicada sobre grandes turbinas forma um acervo valioso, que pode ser apropriado no futuro ([3]) (Figura 1.10 (d)).

Em 2015, a AES-Tietê associa-se à UnB, no contexto do projeto Hydro-K, para o desenvolvimento da série de turbinas HK-10 1.10(e) ([4]). O projeto então retoma estrategicamente os objetivos de desenvolvimento de tecnologias de turbinas hidrocinéticas, utilizando um conjunto de metodologias desenvolvidas pela UnB ao longo de mais de vinte anos de pesquisa tecnológica, avançando o conhecimento nesta área de desenvolvimento em prol da inovação de um produto para aplicações sustentáveis.

A experiência da UnB no desenvolvimento e uso de turbinas hidrocinéticas fluvi-ais permitiu uma forte compreensão sobre a inserção da tecnologia para provimento de eletricidade em comunidades remotas, bem como nos gargalos tecnológicos que devem ser suplantados para a disponibilidade de produtos e de integração sistêmica de unidades.

A instalação de pequenas unidades demonstrativas em comunidades, bem como

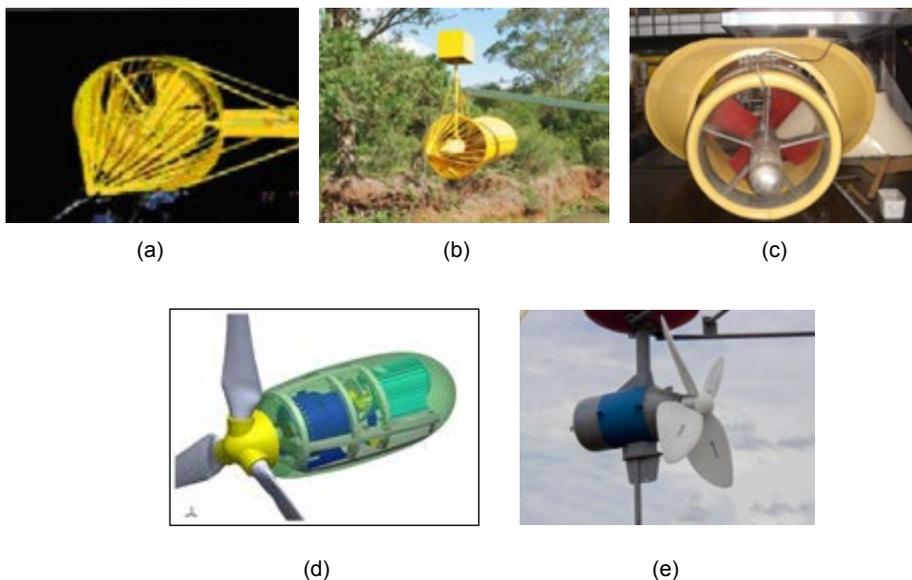


Figura 1.10: Turbinas projetadas pela UnB (a) UnB-G1 (1 kW) (b) UnB-G2 (2 kW) (c) UnB-G3 (1 kW) (d) UnB-HTUC-01 (500 kW) e (e) UnB-HK10 (10 kW)

o teste de componentes e alternativas de projetos, consolidaram um conhecimento pleno sobre a tecnologia por meio do estabelecimento de metodologias de projeto inovadoras, bem como a análise de desempenho de unidades utilizando experimentos em laboratório e simulação computacional.

As experiências acumuladas corroboram os gargalos de uso da tecnologia em ambiente fluvial, tal como reportado anteriormente, ressaltando-se a necessidade de evolução final da maturidade da tecnologia através da implementação de projetos de operação de médio e longo prazo de unidades em ambiente relevante. Para isso, a estruturação de uma cadeia de inovação robusta se faz necessária, tanto para a adequabilidade de suprimento de partes (gerador e demais sistemas eletromecânicos, por exemplo) como o fomento à produção de unidades por empresas de base tecnológica.

1.4 Conclusão

A tecnologia de turbinas hidrocinéticas para aplicações oceânicas e fluviais apresenta um bom nível de maturidade reportado em diferentes experiências internacionais para desenvolvimento e uso da tecnologia. Os gargalos atuais para difusão da tecnologia podem ser suplantados a partir de um fomento ao uso e adequação de sistemas. Trata-se de um esforço de desenvolvimento sobre o qual a promoção de iniciativas industriais de aprimoramento da tecnologia pode consolidar importantes soluções sustentáveis para a geração de eletricidade, seja para condições oceânicas ou costeiras, seja para situações de provimento de eletrificação em comunidades ribeirinhas.

Os sistemas hidrocinéticos podem em um futuro próximo proporcionar um confiável vetor de suprimento de eletrificação em situações, tais como:

- eletrificação de comunidades remotas ribeirinhas;
- disponibilização de energia para sistemas oceânicos para suporte da indústria de petróleo gás, pesca, dentre outras;
- eletrificação de comunidades costeiras em ilhas; e
- aproveitamento de potencial energético remanescente em usinas hidroelétricas, canais de irrigação, descarga de água de uso industrial, etc.

Certamente, esse tipo de tecnologia pode representar um eixo importante de complementariedade para atendimento de eletricidade em diferentes situações críticas para o Brasil. As metas nacionais de eficiência energética, fomento aos vetores renováveis de baixo impacto e de universalização do atendimento a comunidades, representam desafios para os quais a tecnologia de turbinas hidrocinéticas podem contribuir como uma solução inovadora e confiável.

Referências Bibliográficas

- [1] Barreto, E. J. F. [2008]. *Tecnologias de Energias Renováveis para a Amazônia*, BRASIL- MME.
- [2] Brasil-Junior, A. C. P., Els, R. V., Salomon, L. R. B., Oliveira, T. F., Rodrigues, A. P. and Ferreira, W. O. [2007]. Turbina hidrocínética geração 3, *Anais do CITENEL 2007*.
- [3] Brasil-Junior, A. C. P., Lavaquial, J., Viana, D. M., Oliveira, T. F., Mendes, R. C. F., Garcia, M. and Mesquita, A. L. A. [2017]. Conversão de energia hidrocínética com sistema modular flutuante, *Proc. of CITENEL 2017*.
- [4] Brasil-Junior, A. C. P., Mendes, R. C. F., Lacroix, J., Noguera, R. and Oliveira, T. F. [2017]. Hydrokinetic Propeller Turbines. How Many Blades?, *American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems* **2**: 16–23.
- [5] Brasil-Junior, A. C. P., Salomon, L. B. R., van Els, R. H. and de O. Ferreira, W. [2006]. A new conception of hydrokinetic turbine for isolated communities in amazon, *Proc. of IV Brazilian National Conference on Mechanical Engineering*.
- [6] CATAPULT [2015]. Floating wind: Technology assessment, *Technical report*, Offshore Renewable Energy.
- [7] Chaudhari, S., Brown, E., Quispe-Abad, R., Moran, E., Müller, N. and Pokhrel, Y. [2021]. In-stream turbines for rethinking hydropower development in the amazon basin, *Nature Sustainability* **4**(8): 680–687.

- [8] Contreras, L., Lopez, O. and Lain, S. [2018]. Computational fluid dynamics modelling and simulation of an inclined horizontal axis hydrokinetic turbine, *Energies* **11**(11): 3151.
- [9] Forbush, D., Polagye, B., Thomson, J., Kilcher, L., Donegan, J. and McEntee, J. [2016]. Performance characterization of a cross-flow hydrokinetic turbine in sheared inflow, *International Journal of Marine Energy* **16**: 150–161.
- [10] Gorlov, A. [1988]. Development of the helical reaction hydraulic turbine, *techreport DE-FG01-96EE 15669*, US Department of Energy.
- [11] Güneý, M. and Kaygusuz, K. [2010]. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**(9): 2996–3004.
- [12] Ibrahim, W., Mohamed, M., Ismail, R., Leung, P., Xing, W. and Shah, A. [2021]. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review, *Energy Reports* **7**: 2021–2042.
- [13] Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M. and Quaicoe, J. [2009]. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied Energy* **86**(10): 1823–1835.
- [14] Khan, M. H., Siddiqui, A. M., Sheikh, S. S. and Athar, S. O. [2018]. State of the art tidal energy systems: Issues, challenges, and possible solutions, *2018 IEEE International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies*, IEEE.
- [15] Kumar, D. and Sarkar, S. [2016]. A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **58**: 796–813.
- [16] Laws, N. D. and Epps, B. P. [2016]. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**: 1245–1259.

- [17] Lazard [2019]. Lazard's levelized cost of energy analysis - v13.0, *Technical report*.
- [18] Liu, Y., Li, Y., He, F. and Wang, H. [2017]. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between china and some western countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **76**: 701–716.
- [19] Neary, V. S., Kobos, P., Jenne, D. S. and Yu, Y.-H. [2016]. Levelized cost of energy for marine energy conversion (mec) technologies, *Technical Report SAND2016-8298C*, Sandia National Laboratory.
- [20] Niebuhr, C., van Dijk, M., Neary, V. and Bhagwan, J. [2019]. A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **113**: 109240.
- [21] Nunes, M. M., Mendes, R. C., Oliveira, T. F. and Junior, A. C. B. [2019]. An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines, *Renewable Energy* **133**: 840–848.
- [22] Nunes, M. M., Oliveira, T. F. and Junior, A. C. B. [2020]. Systematic review on diffuser-enhanced horizontal-axis turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . to appear.
- [23] OES [2019]. An overview of ocean energy activities - annual report, *Technical report*, Ocean Energy Systems.
- [24] Ridgill, M., Neill, S. P., Lewis, M. J., Robins, P. E. and Patil, S. D. [2021]. Global riverine theoretical hydrokinetic resource assessment, *Renewable Energy* **174**: 654–665.
- [25] Rotolo, D., Hicks, D. and Martin, B. R. [2015]. What is an emerging technology?, *Research Policy* **44**(10): 1827–1843.
- [26] Runge, S., Stoesser, T., Morris, E. and White, M. [2018]. Technology readiness of a vertical-axis hydro-kinetic turbine, *Journal of Power and Energy Engineering* **06**(08): 63–85.

- [27] Segura, E., Morales, R., Somolinos, J. and López, A. [2017]. Techno-economic challenges of tidal energy conversion systems: Current status and trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **77**: 536–550.
- [28] Sood, M. and Singal, S. K. [2019]. Development of hydrokinetic energy technology: A review, *International Journal of Energy Research* **43**(11): 5552–5571.
- [29] Tan, K. W., Kirke, B. and Anyi, M. [2021]. Small-scale hydrokinetic turbines for remote community electrification, *Energy for Sustainable Development* **63**: 41–50.
- [30] US-DOE [2009]. Technology readiness assessment guide, *Technical Report DOE G 413.3-4*, Department of Energy.
- [31] Van Els, R. H. and Brasil-Junior, A. C. P. [2015]. The brazilian experience with hydrokinetic turbines, *Energy Procedia* **75**: 259–264.
- [32] Van Els, R. H., Campos, C., Henriques, A. M. D. and Balduino, L. F. [2002]. Hydrokinetic propeller type turbine for the electrification of isolated households or community and social end-users, *17th COBEM 2002*.
- [33] Van Els, R. H., Miranda, A. R., Brasil-junior, A. C. P. and Echeverry, S. M. V. [2018]. Hydrokinetic energy conversion - state of the art and perspectives in brazil, *SDEWES - 1st Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental systems*.
- [34] Vogel, C. R., Taira, D. T., Carmo, B. S., Assi, G. R. S., Willden, R. H. J. and Meneghini, J. R. [2019]. Prospects for tidal stream energy in the UK and south america: A review of challenges and opportunities, *Polytechnica* **2**(1-2): 97–109.
- [35] Weber, J. [2012]. Wec technology readiness and performance matrix – finding the best research technology development trajectory, *Prof. of 4th International Conference on Ocean Energy*.
- [36] Yuce, M. I. and Muratoglu, A. [2015]. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **43**: 72–82.

- [37] Zhou, Z., Benbouzid, M., Charpentier, J.-F., Sculler, F. and Tang, T. [2017]. Developments in large marine current turbine technologies – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **71**: 852–858.
- [38] Zupone, G. L., Amelio, M., Barbarelli, S., Florio, G., Scornaienchi, N. M. and Cutrupi, A. [2017]. Lcoe evaluation for a tidal kinetic self balancing turbine: Case study and comparison, *Applied Energy* **185**: 1292–1302.

Capítulo 2

Avaliação do custo nivelado da energia hidrocínética

Matheus M. Nunes e Sergio de Oliveira Frontin

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

2.1 Considerações gerais

Como colocado no capítulo anterior, as maturidades tecnológica e comercial da tecnologia de turbinas hidrocínéticas serão ampliadas em eixos de desenvolvimento que visem o perfeiçoamento dos sistemas embarcados, na adequabilidade da tecnologia aos ambientes aquáticos severos e na redução de custos. A trajetória evolutiva de custos da energia (ilustrada na Figura 1.9) deve influenciar a escolha de opções tecnológicas que reduzam custos e mantenham confiabilidade sistêmica.

No presente momento, observa-se uma importante lacuna na literatura de turbinas hidrocínéticas quanto aos relatos de custos da tecnologia. Os poucos estudos existentes não permitem uma estimativa confiável para a implantação de projetos e seus riscos. Neste sentido, este capítulo visa estimar alguns valores de referência por meio das experiências de desenvolvimento de turbinas fluviais vivenciadas pelo Laboratório de Energia da UnB. Tendo em vista que os estudos realizados envolveram testes em ambiente relevante, estima-se que as tecnologias desenvolvidas

apresentam um TRL em torno de 5-6 (Turbinas G2 e HK-10, ilustradas na Figura 1.10). Desta maneira, os custos projetados para os cabeças de série destes modelos podem ser apropriados para uma estimativa do custo nivelado de energia (LCOE) no contexto brasileiro.

O custo nivelado de energia serve de base para comparação de custo entre diversas fontes de energia. Além disso, este parâmetro é útil para estimativas da viabilidade econômica da tecnologia. O custo nivelado de energia determina o quanto se gasta para gerar um kilowatt-hora de energia com determinada tecnologia. Como uma referência base, o custo de um kilowatt-hora de energia solar fotovoltaica e eólica é, atualmente, aproximadamente US\$ 0,03-0,041 e US\$ 0,026-0,050, respectivamente [8].

O custo nivelado de energia leva em conta a razão entre toda a energia produzida durante a vida útil da instalação e todos os gastos decorridos durante esse tempo. A ideia deste indicador é de corrigir tanto o fluxo de caixa quanto a energia convertida para valores presentes. Neste sentido, o cálculo é definido como

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX}{AEP}, \quad (2.1)$$

onde

- LCOE refere-se ao custo nivelado de energia;
- CAPEX são as despesas de capital e de instalação iniciais;
- OPEX são as despesas operacionais a longo termo;
- AEP é a produção de energia durante a vida útil da instalação.

As despesas de capital inicial e as despesas operacionais podem ser discriminadas em diversos subitens, assim como mostrado na Figura 2.1. Para determinar o custo nivelado de energia, devemos contabilizar cada um destes itens para a instalação de referência. Por fim, avaliamos a energia produzida durante a vida da turbina no sítio de referência para as condições de operação.

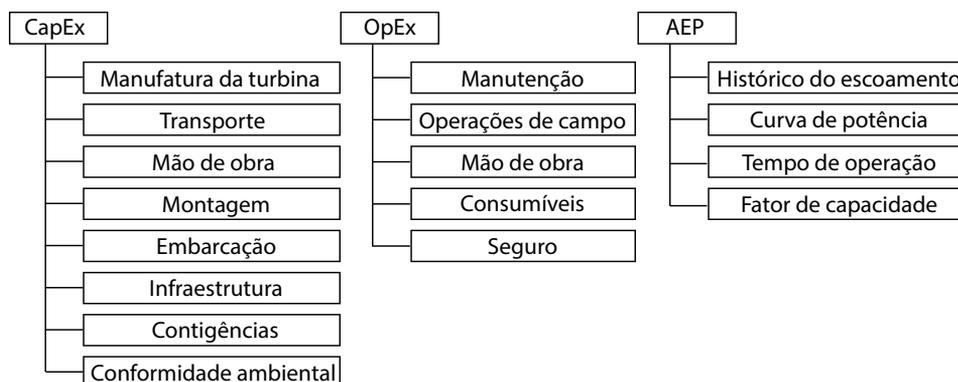


Figura 2.1: exemplificação dos custos envolvidos

2.2 Metodologia de estimativa de LCOE

Para a análise do custo nivelado de energia deve-se considerar os custos da tecnologia de referência e o local onde ela é instalada. Aos equipamentos para instalação de turbinas hidrocinéticas turbinas hidrocinéticas (unidades de geração), cada tipo de plataforma de instalação terá um padrão de custo a depender do tipo de equipamento empregado e do sítio de referência. Com a maturação da tecnologia, o padrão de custo começa a ser definido baseando-se nas instalações mais eficientes avaliadas.

Na análise deste capítulo, será feita uma avaliação para dois modelos de referência: a turbina Geração 2, com potência nominal 2 kW, e a plataforma Hydro-K, com potência nominal de 30 kW. Ambos os modelos foram produzidos pela Universidade de Brasília (UnB) e são ilustrados na Figura 2.2.

2.2.1 Análise do sítio de instalação

O primeiro ponto de análise do sítio de instalação é a investigação da topologia do terreno. Isso é feito para determinar se existem custos extras relacionados ao transporte, à acessibilidade do local e à forma como deve ser feita a instalação. Outro ponto importante é a batimetria do rio. A batimetria é utilizada para determinar os possíveis pontos de ancoramento e a profundidade do local de instalação. Por fim, deve ser feita uma avaliação da velocidade do escoamento em seções transversais



Figura 2.2: modelos de referência para análise. Turbina Geração 2 de 2kW em (a) e plataforma Hydro-K de 30kW em (b).

do rio. Na falta de equipamento para medição de velocidades, pode ser feita uma estimativa do perfil de velocidade usando uma lei de potência de $1/6^\circ$ [12]. Esta avaliação de velocidades deve ser representativa de uma distribuição anual de velocidade do escoamento.

2.2.2 Produção de energia anual - AEP

Para estimar a produção anual de energia, devemos inicialmente saber qual é o coeficiente de potência da turbina. Esse valor representa a razão entre a potência mecânica de eixo da turbina e a potência disponível na sua área de atuação. O coeficiente de potência é coletado através de experimentos ou análises numéricas de dinâmica dos fluidos.

O coeficiente de potência é utilizado juntamente com distribuição de velocidades previamente definida na análise de sítio para encontrar qual a potência média de eixo da turbina para aquele sítio de operação

$$P_m = \frac{1}{2} \rho U^3 A C_p, \quad (2.2)$$

onde ρ é a massa específica do escoamento, U é a velocidade do escoamento, A é a seção transversal do rotor, e C_p é o coeficiente de potência.

A potência média de eixo é então utilizada para calcular a potência média de operação da turbina

$$P_t = \eta_m \eta_T \eta_e P_m, \quad (2.3)$$

onde η_m é a eficiência dos mancais, η_T é a eficiência da transmissão e η_e é a eficiência do gerador.

A produção de energia anual é então estimada como

$$AEP_n = P_t t, \quad (2.4)$$

utilizando o tempo total anual de operação da turbina, t , e a potência média de operação da turbina.

O valor da produção total de energia durante toda a vida útil da turbina é uma estimativa sobre um custo futuro da produção de energia anual. Neste caso, é importante considerar a taxa de desconto, d , equivalente a 11,75% em 16 março de 2022, aplicada na produção de energia de cada ano de operação,

$$AEP = \sum_n^N \frac{AEP_n}{(1+d)^n}, \quad (2.5)$$

onde n representa o ano de operação e N é a vida útil da instalação.

2.2.3 Despesas de capital - CAPEX

As despesas de capital inicial levam em consideração os gastos decorridos durante o desenvolvimento do equipamento e no momento de instalação. Estas são as despesas que antecedem o funcionamento da plataforma e a geração de energia. As principais despesas de capital estão ilustradas na Figura 2.3.

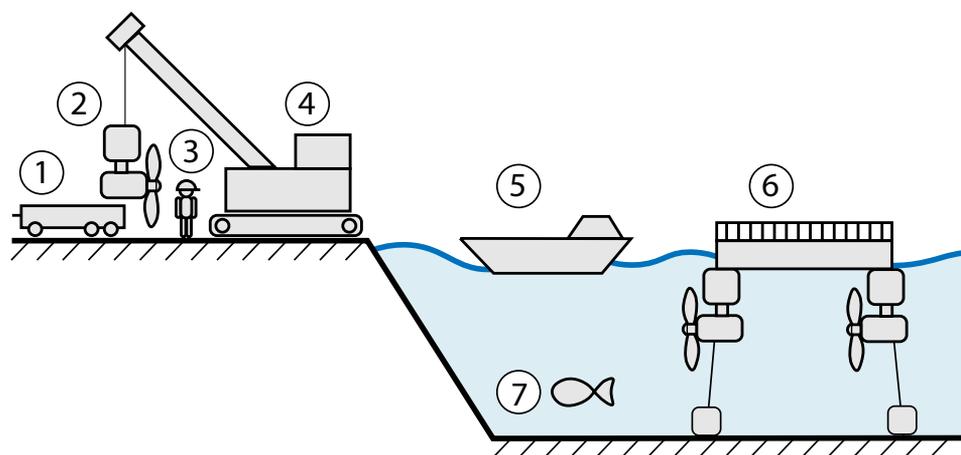


Figura 2.3: principais despesas de capital inicial organizadas durante a instalação da plataforma: 1 - Transporte, 2 - Turbina, 3 - Mão de obra, 4 - Montagem, 5 - Embarcação, 6 - Plataforma, 7 - Conformidade ambiental.

Muitas vezes, a tecnologia hidrocínética em rios é utilizada em comunidades isoladas e de difícil acesso. Os custos de transporte e montagem devem levar em consideração esse impedimento quando estimando-se com base em valores padrões. Caso necessárias estimativas, as despesas relacionadas à manufatura devem assumir o uso de componentes comerciáveis de prateleira (gerador) e materiais padrões (aço A36, cabos de sustentação, fechos, etc.) sempre que possível. Dependendo do local de instalação, o custo vinculado a uma embarcação de apoio, com operador, deve ser contabilizado. O planejamento da estrutura e do ancoramento, bem como da análise de conformidade ambiental requerem uma análise do sítio de referência, que deve ser incluída.

2.2.4 Despesas de operação - OPEX

Os custos de manutenção, apresentados na Tabela 2.1, são baseados no modelo de falha de partes de turbinas hidrocínéticas para rios, proposto por Neary et al. [12], em 2014. Este custo leva em consideração a chance de falha de equipamentos em um arranjo de turbinas hidrocínéticas durante uma operação de vinte anos. Os

custos apresentados são adequados à situação e data atual, 2022.

Tabela 2.1: chance de falha de componentes padrões de turbina hidrocínética durante uma vida útil de 20 anos. Custos relativos a uma turbina de 50 kW com diâmetro de 6,3m são ilustrados como referência. Dados adaptados de Neary et al. [12].

Componente	Chance de falha [%]	Referência [US\$]
Trem de força		
Gerador	0,95%	819,45
Caixa de câmbio	1,39%	621,61
Conversor	1,60%	247,91
Transformador	0,10%	36,64
Comutador	0,37%	45,19
Sistema de arrefecimento	2,44%	14,65
Sistema de controle	0,59%	59,84
Rotor		
Pás	0,26%	101,31
Eixo	0,05%	239,36
Rolamentos	0,44%	343,17

Além destes custos, como visto na Figura 2.1, deve ser levado em conta o custo do operador envolvido na manutenção, do transporte, de consumíveis necessários, e do seguro. Os custos de operações de campo devem ser planejados em torno do local de instalação de referência.

É importante ressaltar que as despesas operacionais acontecem anualmente. Elas são estimativas sobre um custo anual de operação futuro, que levam em conta a taxa de desconto, d , equivalente a 11,75% em 16 março de 2022. Essa taxa avalia o valor do custo monetário atual em um ano futuro. O custo de operação total, $OPEX$, é calculado por

$$OPEX = \sum_n^N \frac{OPEX_n}{(1+d)^n}, \quad (2.6)$$

com base no custo de operação anual, $OPEX_n$, onde n refere-se ao ano de operação, e N é a vida útil da instalação.

2.3 Microturbina UnB - Geração 2

O primeiro modelo de referência a ser avaliado é a turbina Geração 2, desenvolvida pela Universidade de Brasília, ilustrada na Figura 2.4. Essa turbina foi projetada para ser manufaturada de forma artesanal, visando à sua construção e ao seu uso por famílias do interior brasileiro. Devido à dimensão continental da região amazônica e à baixa densidade demográfica, muitas comunidades dificilmente serão interligadas com a rede rural de distribuição de energia elétrica. A turbina é capaz de produzir em uma potência média entre 300 W e 2000 W para essas famílias, apesar de requerer um rio com escoamento regular e variações de profundidade menores que um metro.



Figura 2.4: turbina geração 2 produzida pela Universidade de Brasília com potência nominal de 2 kW [2].

O esquemático com a descrição de cada uma das partes da turbina Geração 2 é ilustrado na Figura 2.5. A turbina conta com a adição de um difusor (carenagem cônica envolta do rotor) e grade. O difusor é utilizado para permitir a geração de energia em rios com um curso de baixa velocidade. A grade protege a turbina dos detritos prevalentes durante sua operação, mudando o foco da manutenção e da

limpeza das partes mais complexas do equipamento, como o rotor, para as mais simples, a grade.

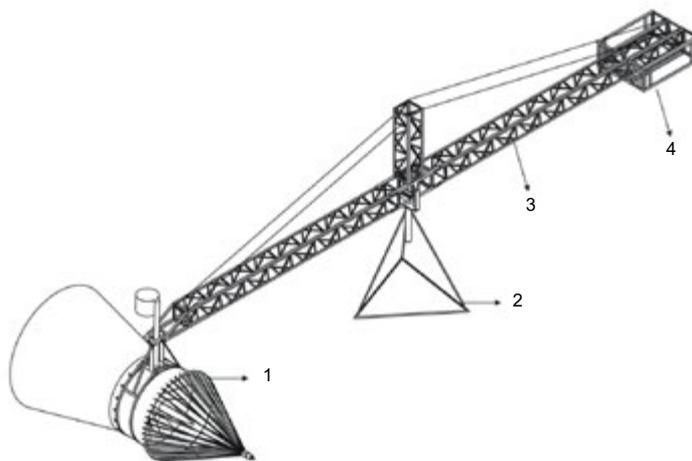


Figura 2.5: esquemático da turbina geração 2 em vista isométrica. Turbina ilustrada em (1), base de sustentação em (2), braço estrutural em (3) e contra-peso em (4).

As dimensões da microturbina Geração 2 estão apresentadas na Figura 2.6. O braço de sete metros e meio permite sua instalação na margem do rio. Todo o equipamento é pivotado em relação a base de fixação. Isso permite uma fácil remoção manual da turbina do rio. A turbina possui um rotor de seis pás e um metro de diâmetro [14]. Este deve ser estabilizado um pouco abaixo da superfície livre do rio, estando longe suficiente do leito, a fim de não causar tensões assimétricas nas pás devido à turbulência.

2.3.1 Sítio de instalação - Rio Maracá, AP-Brasil

A avaliação econômica de referência da microturbina ocorre no Rio Maracá, no estado do Amapá, Brasil. A instalação foi realizada nas proximidades da Vila Maracá [14], ilustrada na Figura 2.7. A seção de instalação conta com uma largura de dez metros e profundidade de quatro metros. Devido à fixação externa da base da plataforma, não é necessária uma avaliação de sedimentos e batimetria do local

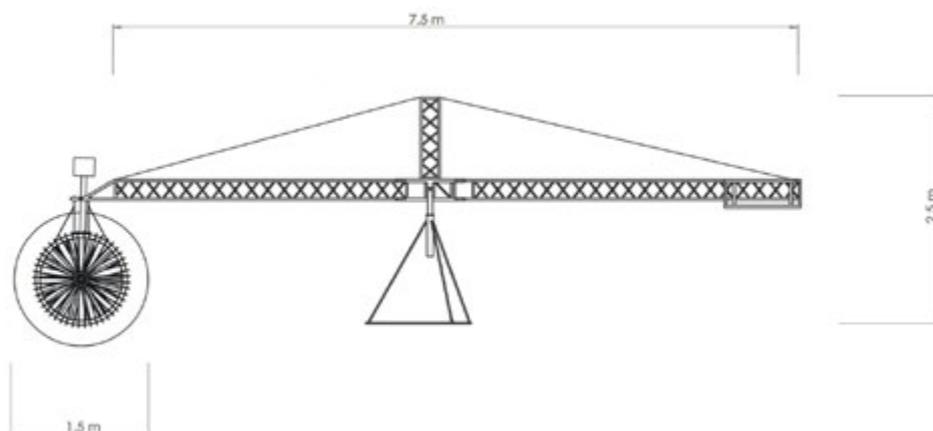


Figura 2.6: esquemático da turbina geração 2 em vista frontal com esboço geral de dimensões.

para especificações de fundação e ancoramento.

A distribuição de velocidade do rio, apresentada na Figura 2.8, foi desenvolvida a partir das medições locais e dos dados e modelos propostos por Neary et al. [11, 12]. A variação de velocidade não ultrapassa os limites de 1 m/s impostos pelo trem de força da máquina e o limite de 2 m/s de velocidade máxima do escoamento que a estrutura mecânica do rotor pode estar submetida [3]. A seção do Rio Maracá onde foi instalada a turbina possui uma velocidade média do escoamento de 1,39 m/s.

2.3.2 Análise de desempenho e estimativa de AEP

A curva de potência da turbina geração 2, Figura 2.9, foi produzida a partir do coeficiente de potência a turbina, 0,55, e averiguada com referências coletadas em campo [5]. Vale lembrar que esse alto coeficiente de potência dá-se pela presença do difusor. Este aumenta a velocidade do escoamento na entrada do rotor, logo as limitações impostas por turbinas livres não são válidas.

Utilizando a distribuição de velocidades apresentadas no Rio Maracá, apresentada na Figura 2.8, temos uma produção média de energia de 665W. Isso acarreta

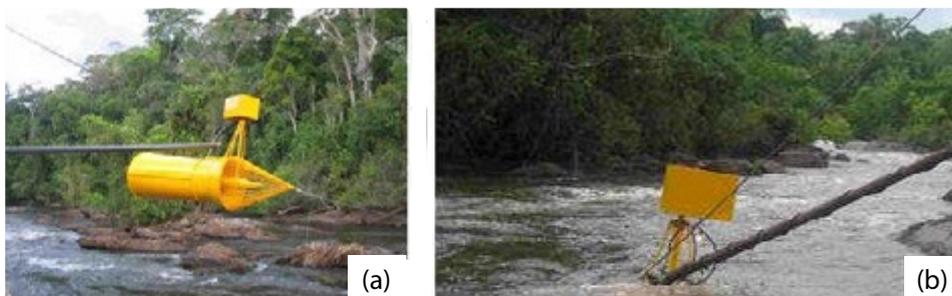


Figura 2.7: microturbina geração 2 instalada no Rio Maracá, AP-Brasil. Seção de instalação com largura de dez metros e profundidade de quatro metros. Turbina durante o processo de instalação em (a). Turbina submersa e em funcionamento em (b).

um fator de capacidade anual de 0,33 (33%). Como descrito na Seção 2.2.2, este fator de capacidade nos leva a uma produção anual aproximada de 5,8 MWh. Considerando a vida útil estimada do equipamento de 10 anos, temos uma produção esperada total de energia de 58 MWh [3]. Os parâmetros envolvidos na análise de desempenho e produção de energia são descritos na Tabela 2.2

Tabela 2.2: sumário dos parâmetros de operação da microturbina Geração 2 instalada no Rio Maracá, AP-Brasil.

Especificação	Por unidade
Potência nominal	2 kW
Potência média	665 W
Fator de capacidade	0,33
Produção anual	5,8 MWh
Vida útil	10 anos
Produção total	58 MWh

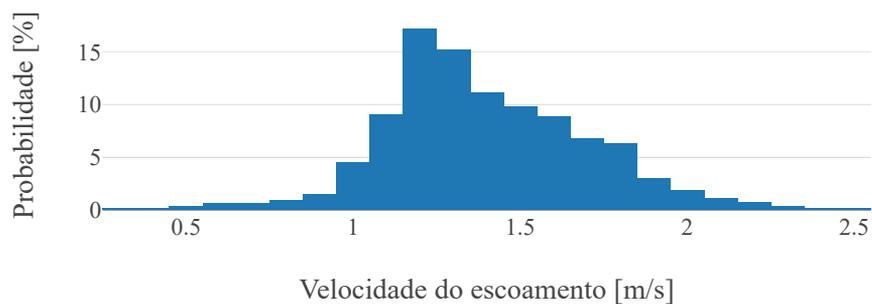


Figura 2.8: distribuição de velocidades estimada da seção de instalação no Rio Maracá.

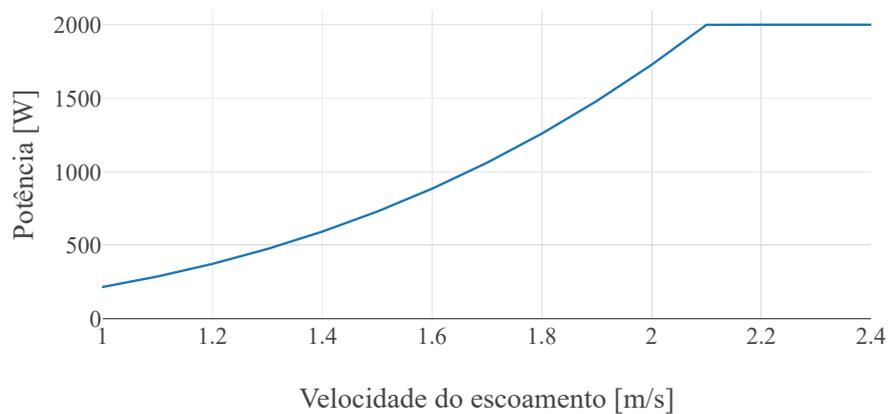


Figura 2.9: curva de potência da microturbina Geração 2.

2.3.3 Despesas de capital - CAPEX

Assim como descrito na Seção 2.2.3, as despesas relacionadas à manufatura assumem o uso de componentes comerciáveis de prateleira (gerador) e materiais padrões

(aço A36, cabos de sustentação, fechos, etc.) sempre que possível. A divisão dos custos iniciais é ilustrada na Figura 2.10. Os valores dessa seção que se referem a equipamentos desenvolvidos antes de 2022 são todos ajustados para o valor da moeda em 2022. Esses valores são registrados na Tabela 2.3. Não é necessário contrato com embarcações para operações de margem tendo em vista o tipo de instalação da turbina. O custo da avaliação de conformidade ambiental da turbina Geração 2 foi estimado usando a análise feita em sítios similares para turbinas na mesma faixa de potência nominal [7].

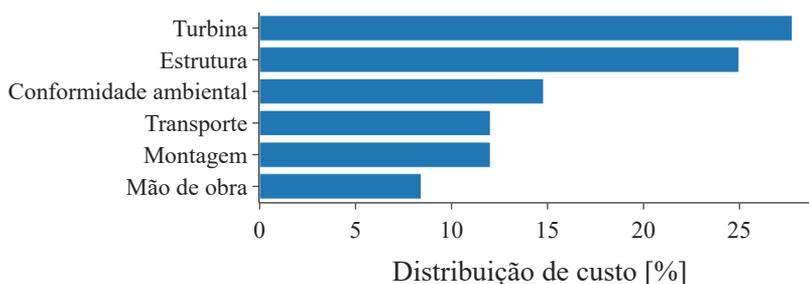


Figura 2.10: distribuição das despesas de capital da turbina Geração 2 - CAPEX.

Tabela 2.3: despesas de capital da turbina Geração 2 - CAPEX [3, 5]. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo [US\$]
Turbina	6.300,00
Estrutura	5.670,00
Conformidade ambiental	3.360,00
Transporte	2.725,00
Montagem	2.725,00
Mão de obra	1.900,00
Total CAPEX	22.680,00

2.3.4 Despesas de operação - OPEX

Seguindo as diretrizes da Seção 2.2.4, as despesas de operação são divididas em custos relacionados a manutenção, operações de campo, contrato do operador, consumíveis e seguro.

Os custos de manutenção são baseados no modelo de falha proposto na Seção 2.2.4 adaptado à situação de referência da turbina Geração 2. Esses valores associados a possíveis falhas são adicionados ao custo de manutenção padrão: substituição de lubrificante, correias, escovas, etc. Devido ao tipo de intervenção simplificada, assume-se um salário de operador local mensal para realizar a manutenção. Para operações de campo, não foi necessária embarcação, vista a instalação à margem do rio Maracá. Devido ao uso de mão de obra local, o custo de transporte é incluso no salário do operador. Todos os custos de operação são comparados na Figura 2.11 e registrados na Tabela 2.4.

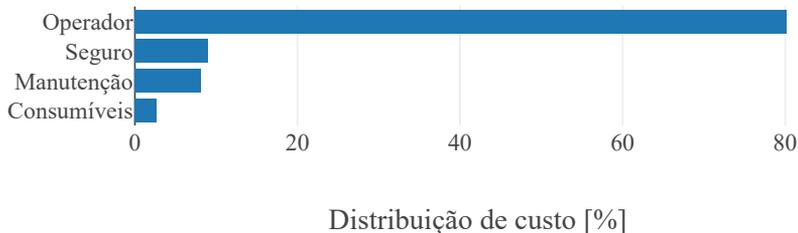


Figura 2.11: Distribuição das despesas de operação da turbina Geração 2.

2.3.5 Custo nivelado de energia

O custo nivelado de energia estimado para a turbina Geração 2 é de 1,29 US\$/kWh. Este valor foi calculado seguindo as diretrizes especificadas nas Seções 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4, considerando uma taxa de desconto de 11,75% ao ano no valor da moeda. A distribuição do impacto por categoria é ilustrada na Figura 2.12 e seus valores específicos registrados na Tabela 2.5. Vale ressaltar a inclusão da margem de

Tabela 2.4: Despesas anuais de operação da turbina Geração 2 - OPEX [5, 3]. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo anual [US\$]
Operador	3.113,83
Seguro	350,00
Partes para manutenção	315,12
Consumíveis	105,00
OPEX anual	3.883,95

contingência e lembrar que, devido à natureza social do projeto não existe uma margem de lucro envolvida. Devido a seu pequeno tamanho e capacidade, o custo de manutenção e operação é relativamente caro, pois este não escala com a potência da máquina.



Figura 2.12: distribuição do custo nivelado de energia para a turbina Geração 2.

Tabela 2.5: custo nivelado de energia para a turbina Geração 2 - LCOE. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo [US\$/kWh]
CAPEX	0,61
OPEX	0,68
Total	1,29

2.4 Pequena turbina UnB - plataforma Hydro-K

A plataforma Hydro-K, ilustrada na Figura 2.13, foi desenvolvida pela Universidade de Brasília em parceria com a empresa Hubz [6], no contexto da carteira P&D da AES-Tietê. Ela foi projetada para atuar na recuperação de energia remanescente a jusante de reservatórios de usinas hidrelétricas. Tais reservatórios tem uma eficiência média de 80% [4, 9]. O uso de turbinas hidrocínéticas é uma alternativa de baixo impacto ambiental para o aproveitamento dos 20% de energia remanescente. Esta plataforma é capaz de gerar 30 kW, contando com a geração de três turbinas de eixo horizontal.

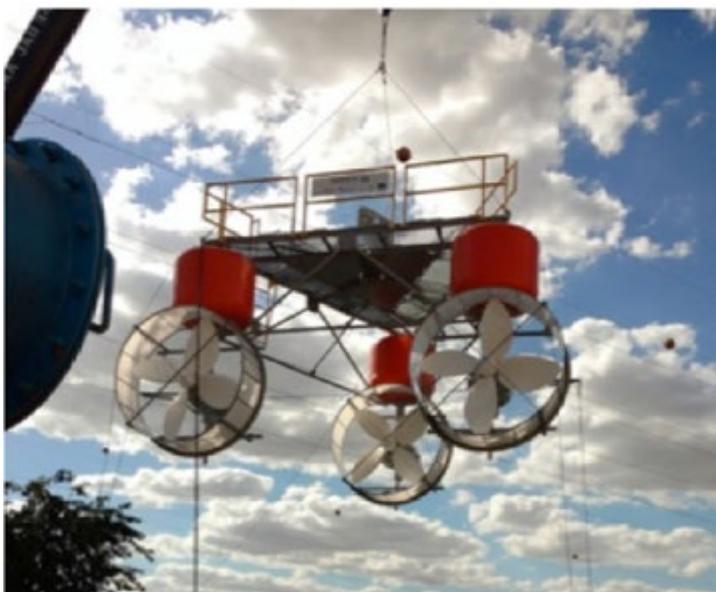


Figura 2.13: plataforma de turbinas Hydro-K produzida pela universidade de Brasília com potência nominal de 30 kW.

A plataforma superior permite o uso simultâneo de até dez pessoas para manutenção e monitoramento direto. A turbina conta também com uma grade de proteção para estabelecer a segurança da fauna local durante sua operação.

As dimensões gerais da plataforma Hydro-K são apresentadas na Figura 2.14.

Os lados da plataforma triangular possuem dimensões iguais. As turbinas são posicionadas de forma que as esteiras das turbinas frontais não afetam a velocidade do escoamento que chega na turbina traseira [10]. Este é o diferencial que possibilita o design compacto e modular da plataforma.

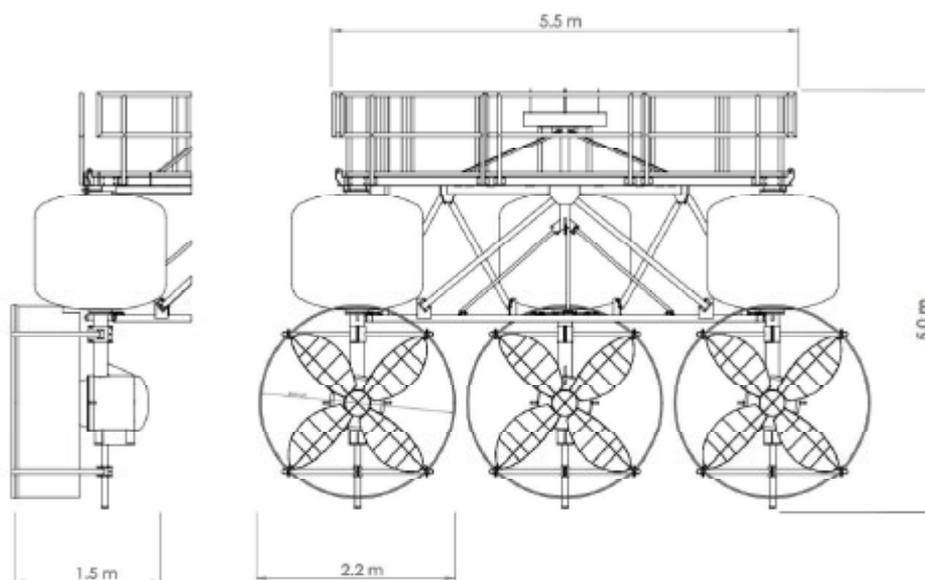


Figura 2.14: esquemático da plataforma Hydro-K em vista lateral e frontal com esboço geral de dimensões.

2.4.1 Sítio previsto de instalação - Rio São Marcos, GO-Brasil

O local de referência para análise econômica é o Rio São Marcos, no estado de Goiás, Brasil. A plataforma foi avaliada para uma instalação a jusante da Usina Hidrelétrica Serra do Facão. A batimetria do rio, Figura 2.15, é realizada nessa situação para determinar o local de instalação, averiguando-se profundidade, e possíveis locais para ancoramento da plataforma flutuante. Além da batimetria, seções transversais de velocidade do escoamento são coletadas para ajudar na escolha do local. A figura 2.16 representa a seção transversal de referência para a

análise com uma velocidade média de 1,25 m/s a uma vazão de 95 m³/s na área de instalação.

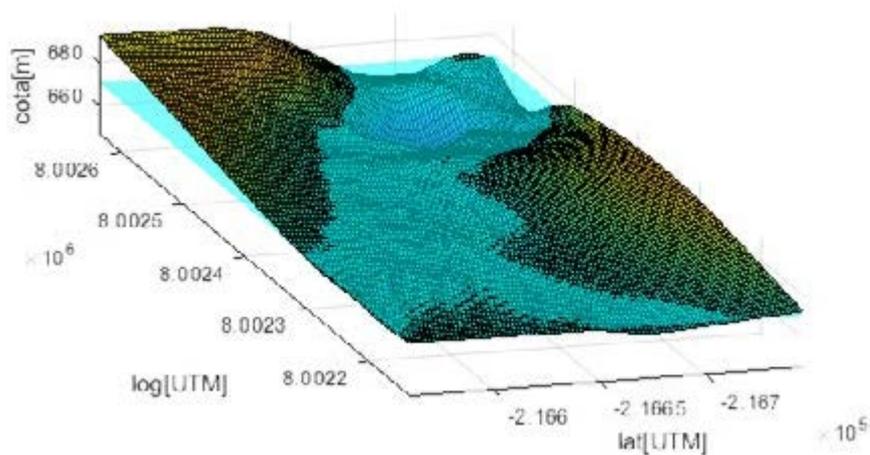


Figura 2.15: batimetria de seção do Rio São Marcos a jusante da UHE Serra do Facão.

O local de referência da análise de custo de energia da plataforma Hydro-K é uma usina hidrelétrica (UHE). Por causa disso, o histórico de velocidade do escoamento pode ser estimado utilizando dados de velocidade coletados em campo juntamente com o histórico de vazão a jusante da barragem. O histórico de vazão da UHE Serra do Facão está disponível no boletim diário de operação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [1]. A distribuição de velocidades apresentada na Figura 2.17 usa como referência os dados diários de defluência da usina de outubro de 2017 a outubro de 2020. Diferentemente de uma distribuição de escoamento padrão de um rio, o escoamento a jusante de uma usina é fixado pela vazão dessa usina. A UHE Serra do Facão passou a maior parte de sua operação durante estes anos na mesma vazão, como refletido na distribuição de velocidade do seu escoamento. A velocidade média anual do escoamento na região da turbina é de 1,59 m/s.

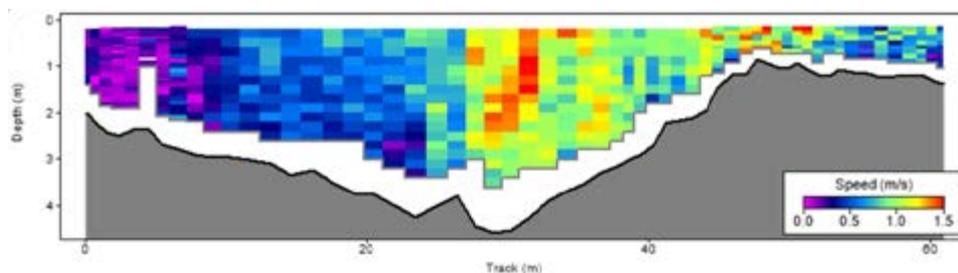


Figura 2.16: seção transversal de velocidade do escoamento no local de operação de referência. Velocidades média de 1.25 m/s na região da plataforma e profundidade de até 4 m. Vazão de referência de 95 m³/s.

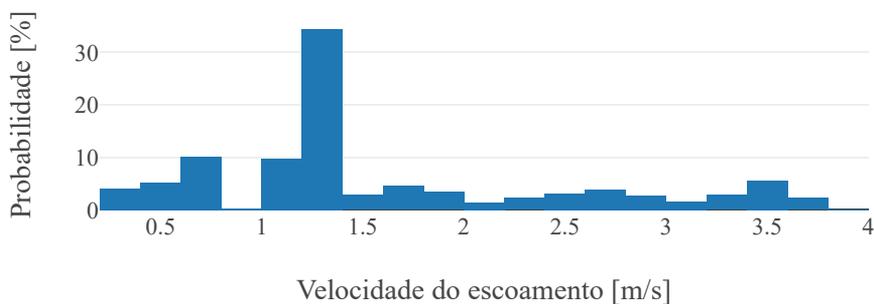


Figura 2.17: distribuição de velocidade na região de instalação da UHE Serra do Facão. Valores de referência fornecidos pela ONS através do boletim diário de operação, 2017-2020 [1].

2.4.2 Análise de desempenho e estimativa de AEP

A curva de potência da plataforma Hydro-K, Figura 2.18, foi produzida a partir do coeficiente de potência de cada turbina, 0,39, e averiguada com referências coletadas em campo [6].

Utilizando a distribuição de velocidades coletadas sobre o sítio de análise, Figura 2.17, e os valores de referência na curva de potência, Figura 2.18, temos uma

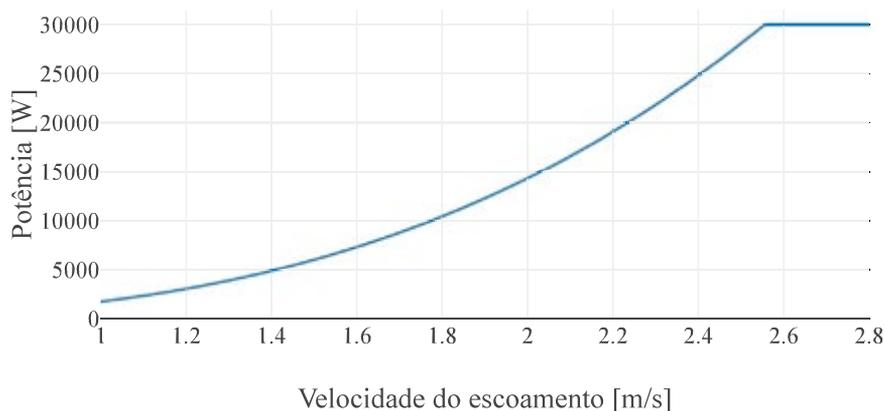


Figura 2.18: curva de potência de uma turbina da plataforma Hydro-K.

produção média de energia de aproximadamente 10 kW. Isso acarreta um fator de capacidade de 0,33 (33%). Como descrito na Seção 2.2.2, este fator de capacidade nos leva a uma produção anual aproximada de 84 MWh. Considerando a vida útil estimada do equipamento de 20 anos, a produção total de energia esperada é de 1.680MWh. Os parâmetros envolvidos na análise de desempenho e produção de energia são descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.6: sumário dos parâmetros de operação da plataforma Hydro-K no Rio São Marcos, GO-Brasil.

Especificação	Por unidade
Potência nominal	30 kW
Potência média	10 kW
Fator de capacidade	0,33
Produção anual	84 MWh
Vida útil	20 anos
Produção total	1680 MWh

2.4.3 Despesas de capital - CAPEX

As categorias das despesas de capital são descritas na Seção 2.2.3 e ilustradas na Figura 2.3. A plataforma Hydro-K é transportada em partes até o sítio de instalação. Devido a isso, sua montagem e instalação ocorrem em campo com o auxílio de um guindaste e embarcação, Figura 2.19. A fixação da plataforma é feita por cabos de aço tracionados na margem. O custo da avaliação de conformidade ambiental da plataforma Hydro-K foi estimado com base em avaliações prévias feitas para a turbina Geração 2 [7].

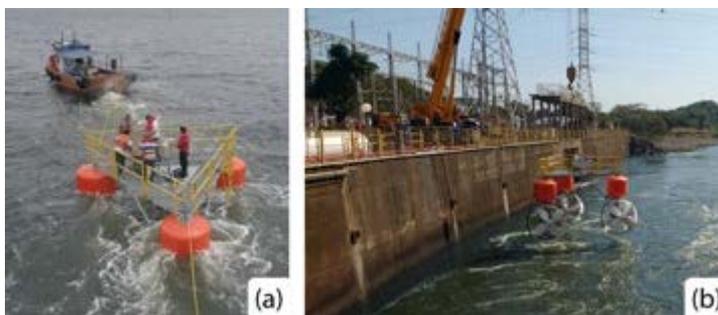


Figura 2.19: instalação da plataforma Hydro-K. Uso de embarcação, (a), e guindaste, (b), para auxílio em campo.

A divisão dos custos iniciais é ilustrada na Figura 2.20. Os valores desta seção que se referem a equipamentos desenvolvidos antes de 2022 são todos ajustados para o valor da moeda em 2022. Estes valores são registrados na Tabela 2.7. A plataforma Hydro-K tem um custo inicial de US\$50.745,54.

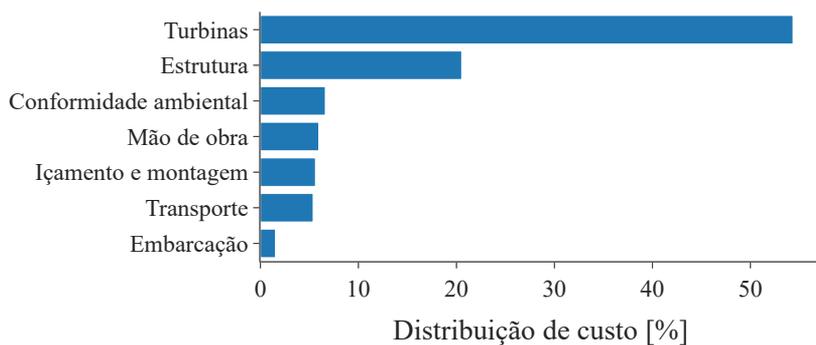


Figura 2.20: distribuição das despesas de capital da plataforma Hydro-K - CAPEX.

Tabela 2.7: despesas de capital da turbina Geração 2 - CAPEX [6]. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo [US\$]
Turbinas	27.579,00
Estrutura	10.423,25
Conformidade ambiental	3.360,00
Montagem	2.850,24
Transporte	2.731,05
Mão de obra	3.022,00
Embarcação	780,00
Total	50.745,54

2.4.4 Despesas de operação - OPEX

Seguindo as diretrizes da Seção 2.2.4, as despesas de operação são divididas em custos relacionados a manutenção, operações de campo, contrato do operador, consumíveis e seguro.

Os custos de manutenção são baseados no modelo de falha proposto na Seção 2.2.4 adaptado à situação de referência da Plataforma Hydro-K. Esses valores associados a possíveis falhas são adicionados ao custo de manutenção padrão: substituição de lubrificante, correias, escovas, etc. O custo de operação não escala no mesmo nível da potência produzida pela plataforma, pois o preço das peças para manutenção é consideravelmente menor do que o custo da mão de obra para manutenção. Porém, para manutenção da plataforma Hydro-K, também é necessário avaliar o custo da embarcação para acessar a plataforma. Todos os custos de operação são comparados na Figura 2.21 e registrados na Tabela 2.8.

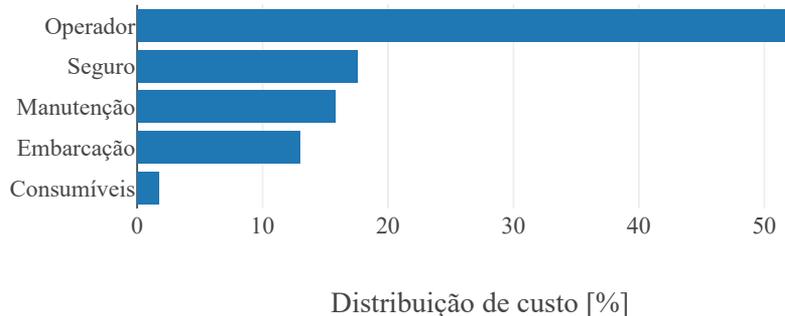


Figura 2.21: distribuição das despesas de operação da Plataforma Hydro-K.

Tabela 2.8: despesas anuais de operação da turbina Geração 2 - OPEX. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo anual [US\$]
Operador	3.113,83
Seguro	1.050,00
Manutenção	945,36
Embarcação	780,00
Consumíveis	105,00
OPEX anual	5.994,19

2.4.5 Custo nivelado de energia

O custo nivelado de energia estimado para a Plataforma Hydro-K é de 0,14 US\$/kWh. Este valor foi calculado seguindo as diretrizes especificadas nas Seções 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4, considerando uma taxa de desconto de 11,75% ao ano no valor da moeda. O custo da turbina Hydro-K é significativamente mais barato que a turbina Geração 2. Os fatores contribuintes para isso são a estabilidade do escoamento, a maior escala de potência de operação, a maior facilidade de acesso ao local de instalação e sua vida útil mais longa. A distribuição do impacto por categoria é ilustrada na Figura 2.22, e seus valores específicos registrados na Tabela 2.9. Comparando com a turbina Geração 2, o custo de operação tem um impacto mais significativo sobre o LCOE da plataforma Hydro-K devido a seu tempo de operação mais longo.

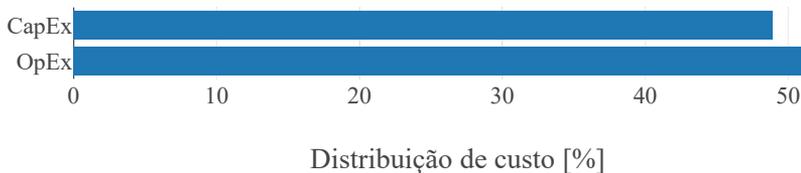


Figura 2.22: distribuição do custo nivelado de energia para a plataforma Hydro-K.

Tabela 2.9: custo nivelado de energia para a Plataforma Hydro-K - LCOE. Valores em dólares, 2022.

Categoria	Custo [US\$/kWh]
CAPEX	0,07
OPEX	0,07
Total	0,14

2.5 Perspectiva de custo

A Figura 2.23 apresenta alguns custos nivelados de energia atuais. Dentre as fontes de energia hidrocinética, estão incluídas as duas turbinas analisadas neste capítulo, a turbina *monofloat* da Smart Hydro e a instalação modular de dez plataformas hidrocinéticas da EnCurrent [12, 13]. O custo nivelado de energia do *monofloat* da Smart Hydro foi estimado com os preços comerciais disponíveis da turbina, a produção de energia proveniente das especificações e os custos de operação de referência da turbina Geração 2, tendo em vista sua implementação similar em comunidades isoladas. Por fim, a energia solar fotovoltaica e eólica são incluídas para estabelecer um padrão de referência, pois ambas tecnologias estão em um estágio avançado de desenvolvimento e implementação.

A plataforma Hydro-K destaca-se das outras fontes de energia hidrocinética devido a seu local de instalação e baixo custo de equipamento. Sua instalação a jusante de usinas hidrelétricas aproveita uma maior estabilidade e velocidade do escoamento. Esses fatores viabilizam seu design simples: uma plataforma flutuante ancorada, reduzindo o custo relacionado à estrutura significativamente. Adicionalmente, a plataforma Hydro-K é manufaturada completamente no Brasil, reduzindo ainda mais o custo envolvido. Atualmente ela projeta-se competitivamente com a energia solar fotovoltaica residencial a um custo de 140,00 US\$/MWh.

Em contrapartida, todas as três turbinas na Figura 2.23(b) tem a capacidade de implementação Off-Grid. Tanto o *monofloat* da Smart Hydro quanto a turbina Geração 2 foram desenvolvidas focando no uso da tecnologia para levar energia elétrica a comunidades isoladas da rede. O *monofloat* da Smart Hydro, foi comerciável em 2014, e apresenta um equipamento mais eficiente, com um custo Off-Grid aproxi-

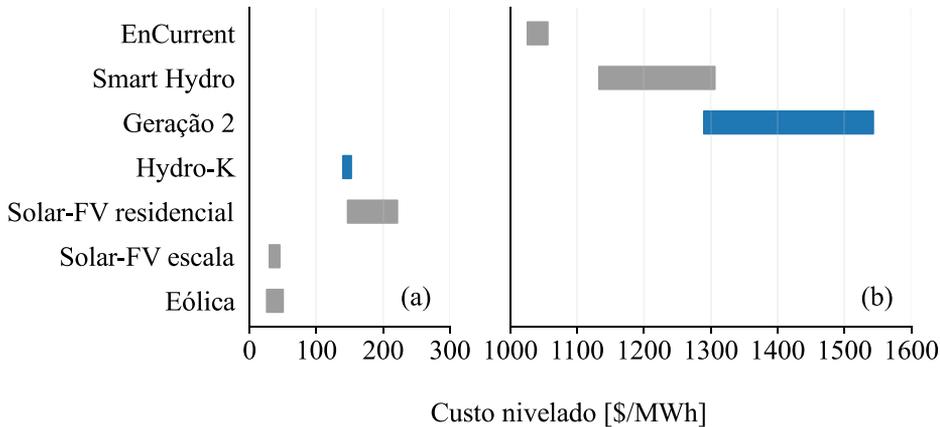


Figura 2.23: comparação de custo nivelado de energia entre diversas fontes de energia hidrocínética. Todas as instalações hidrocínéticas incluídas em (b) possuem capacidade de serem implementadas Off-Grid. Os custos apresentados em (a) assumem inclusão na rede elétrica.

mado de 1.306,00 US\$/MWh. Em contrapartida, a turbina Geração 2, projetada em 2007, apresenta uma manufatura e manutenção bem mais simplificadas, permitindo maior acessibilidade em regiões amazônicas do Brasil a um custo aproximado de 1.543,00 US\$/MWh. A instalação de turbinas EnCurrent apresenta o menor custo nivelado de energia, 1.056,00 US\$/MWh. Porém, esta instalação foi projetada para ser implementada em larga escala, com uma potência nominal de 1 MW. Isto reduz a praticidade e as possibilidades de implementação da instalação.

A plataforma Hydro-K, diferentemente de outras tecnologias de pequenas turbinas hidrocínéticas, insere-se no patamar competitivo de produção energética. Observando-se a Figura 1.9, na Seção 1.2, a plataforma Hydro-K encaixa-se na trajetória competitiva desejada. Atualmente no quinto nível de maturidade tecnológica, com protótipo desenvolvido e testado, esta tecnologia permite a geração de energia a um custo de 140,00 US\$/MWh. Valor este dentro da faixa de baixo custo, entre 100,00 e 500,00 US\$/MWh [15]. Porém, vale ressaltar novamente, que diferentemente de outras tecnologias, seu custo foi calculado visando uma implementação conjunta a rede elétrica nacional. A turbina Geração 2, projetada para

um contexto de fornecimento energético para comunidades isoladas, encaixa-se na trajetória observada atual de médio custo energético, entre 500,00 e 2000,00 US\$/MWh.

Referências Bibliográficas

- [1] do Sistema Elétrico, O. N. [2005]. Boletim diário de operação, <http://sdrons.org.br/SDRO/DIARIO/index.htm>. Online; accessed 21st july 2022.
- [2] Els, R. and Junior, A. [2015]. The Brazilian Experience with Hydrokinetic Turbines, *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 259–264.
- [3] Els, R. V., Junior, A. C. P. B. and de Souza Vianna, J. N. [2008]. Instalação de turbinas hidrocínéticas: viabilidade técnica e econômica, *Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, VI, Brasil.
- [4] Holanda, P. d. S., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Brasil Junior, A. C. P., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N. and Secretan, Y. [2017]. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants, *Renewable Energy* **101**: 1203–1214.
- [5] Junior, A. C. P. B., Els, R. V., Cunha, A. C. et al. [2007]. Projeto poraquê, energia renovável para o vale do rio maracá, Relatório Técnico do Ministério de Minas e Energia - Programa Luz para Todos.
- [6] Junior, A. C. P. B., Els, R. V., Cunha, A. C. et al. [2017]. Projeto hydro-k, sistema de turbinas hidrocínéticas em arranjo flutuante e modular, Relatório Técnico na na carteira de projetos de P&D-ANEEL.
- [7] Junior, A. C. P. B., Salomon, L. R. B. R., Mesquita, A. L. A., Els, R. V., Gueiroga, G. and Ferreira, W. O. [2009]. Turbina hidrocínética g3: Desenvolvimento de produto, Relatório Técnico.

- [8] Lazard [2019]. Lazard's leveled cost of energy analysis - v13.0, *Technical report*.
- [9] Liu, Y. and Packey, D. J. [2014]. Combined-cycle hydropower systems – The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations, *Renewable Energy* **66**: 228–231.
- [10] Mendes, R. C. F. [2020]. *Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos*, PhD thesis, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brazil.
- [11] Neary, V., Gunawan, B. and Sale, D. [2013]. Turbulent inflow characteristics for hydrokinetic energy conversion in rivers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **26**: 437–445.
- [12] Neary, V. S., Lawson, M., Previsic, M., Copping, A., Hallett, K. C., Labonte, A., Rieks, J., Murray, D. et al. [2014]. Methodology for design and economic analysis of marine energy conversion (mec) technologies.
- [13] Power, S. H. [2014]. SMART Village Hybrid Electrification in Akwanga, Nigeria, <https://www.smart-hydro.de/decentralized-rural-electrification-projects-worldwide/nigeria-rural-electrification/#project>. Online; accessed 19th July 2021.
- [14] van Els, R. H., de Oliveira Campos, C., Henriques, A. M. D. and Balduino, L. F. [2003]. Hydrokinetic turbine for isolated villages, Technical Paper in PCH Notícias & SHP News.
- [15] Weber, J. [2012]. Wec technology readiness and performance matrix – finding the best research technology development trajectory, *Prof. of 4th International Conference on Ocean Energy*.

Capítulo 3

Sobre o potencial de energia hidrocínética

Nelio Figueiredo

Universidade Federal do Pará. Departamento de Engenharia Naval.

Claudio Blanco

Universidade Federal do Pará. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

3.1 Introdução

Demandas globais por energia, impulsionadas por avanços tecnológicos, vêm crescendo em ritmo acelerado desde o século XIX. Pesquisar e implementar novas alternativas de geração de energia, dissociadas de gerações fósseis não renováveis, faz parte do direcionamento defendido pela Organização das Nações Unidas (ONU) de alcançar reduções absolutas de gases de efeito estufas em 25% até 2025 e 45% até 2030, em que a eletricidade adquirida a partir de energia renovável seria de 40% antes de 2025 e de 80% até 2030. Hoje, a necessidade de investimentos em estudos e pesquisas voltados à implementação de sistemas de geração de energia renovável e de redução das emissões de CO_2 é um processo irreversível, uma vez que a

energia é um ingrediente indispensável à vida e um indicador de desenvolvimento socioeconômico e de qualidade de vida da população. Transformações envolvendo energias estão presentes na história do universo, da vida e da humanidade [37]. No Brasil, apesar de sua grande potencialidade de geração de energia hidrelétrica, existem diversas localidades, distribuídas em sua área territorial, que ainda não recebem energia de fontes geradoras de energia do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Hoje, existem 251 localidades isoladas no Brasil, a maior parte está na região Norte, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. O consumo nessas localidades é baixo e representa menos de 1% da carga total do país. A demanda por energia dessas regiões é suprida, principalmente, por térmicas a óleo diesel (EPE, 2022).

O uso de tecnologia de conversão de sistemas hidrocinéticos fluviais é de particular interesse pois ela pode promover soluções locais sustentáveis para provimento de eletricidade em regiões ribeirinhas. Neste tipo de situação, pequenas e médias instalações, alinhadas com a corrente fluvial, podem proporcionar o aproveitamento de potenciais hidrocinéticos em várias seções de transversais de um rio. Tais dispositivos podem ser instalados com pouco impacto sobre o meio ambiente e com compatibilidade com a navegação fluvial.

Em muitas regiões brasileiras existe uma necessidade de expansão do parque energético, a fim de satisfazer a crescente procura de energia. Muitas comunidades próximas de aproveitamentos hidroenergéticos não são beneficiadas com a energia proveniente de centrais hidrelétricas localizadas no entorno. É comum se ver redes de transmissão de energia cortando cidades que dependem de geradores a diesel, mas esforços para melhorar a distribuição e a gestão eficiente dos recursos hídricos estão presentes em cenário mundial. Uma das maiores dificuldades na gestão da água é caracterizada por uma atenuação de conflitos relacionados a usos múltiplos, quando se visa a uma distribuição com equidade, qualidade e sustentabilidade entre todos os usos [58];[18, 57]. Neste sentido, a alternativa emergente para o uso de tecnologia de turbinas hidrocinéticas em pequenas e médias unidades de conversão em reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas existentes, podem contribuir com a solução de problemas de provimento local de eletricidade ([36, 32, 11]). A energia hidráulica remanescente de usinas é disponível no reservatório de jusante em forma de energia hidrocinética (ver Fig 3.1), onde a velocidade do escoamento é uma consequência da vazão de água que passa pelas turbinas e pela parcela vertida.

Esta energia pode ser convertida por instalações de turbinas hidrocínéticas na região do canal de fuga, compartilhando a mesma infraestrutura de despacho e gestão energética da usina principal.

É imprescindível reconhecer o valor dos recursos naturais para a criação de mecanismos de produção de energia, uma vez que o Brasil se destaca com ricas fontes naturais de energia, com um número abundante de cursos de água com correntezas que podem ser aproveitados para a geração de energia a partir da energia cinética dessas correntes. Nesta direção, constata-se que cada vez mais energias remanescentes a jusante de usinas hidrelétricas, em forma de energia hidrocínética, geradas através do aproveitamento do potencial hidráulico das defluências, vêm sendo vistas como fonte de geração de energia elétrica através da utilização de turbinas hidrocínéticas [27, 29, 28].

Logo, mensurar o potencial hidráulico a jusante de barramentos, com vistas à implantação de parques hidrocínéticos é condição primária na obtenção de potencialidades e viabilidades desses sistemas. Modelos hidrodinâmicos que permitam simular potencialidades de plantas de geração hidrocínética a jusante de aproveitamentos hidrelétricos deve estar sempre atrelados a modelos hidrológicos que gerem previsões de variáveis hidrológicas necessárias e suficientes à implementação dessas modelagens hidrodinâmicas [13].

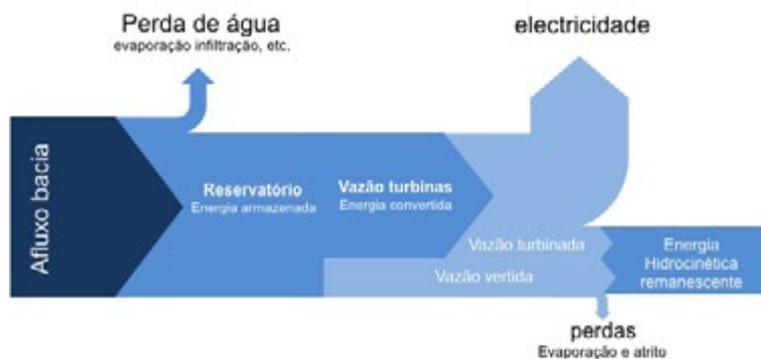


Figura 3.1: Potencial hidrocínético em reservatório de jusante de UHE's

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos básico sobre potencial energético hidrocínético, estabelecendo uma base descritiva para o desenvolvimento de mo-

delos e de levantamentos experimentais. Delineia-se também, de forma direta e fundamentada, todo o embasamento metodológico e teórico necessário a formulação de modelos estocásticos de previsão de níveis de água e de afluições e defluências, fundamentais para as estimativas dos recursos energéticos em um escoamento fluvial.

3.2 Definições preliminares

Seja um corpo d'água definido morfologicamente por uma superfície de relevo de fundo que compõe o volume de escoamento com o plano superior horizontal da superfície livre. O relevo de fundo é mapeado no espaço por $h(x, y)$ (*batimetria*), tal como ilustrado na figura 3.2. Esta superfície é definida em relação a um plano de referência cartográfica denominado de *Nível de Redução - NR*, de maneira a ser invariante à variação temporal da linha d'água.

Ao longo do tempo, a altura da linha d'água varia em resposta aos fenômenos hidrológicos associados ao fluxo de água e à maré. Logo, a *cota* do nível d'água varia ao longo do tempo, notada por $H(t)$ (também referenciada ao NR).

O levantamento batimétrico pode ser elaborado utilizando métodos diretos (medidas direta de profundidade com réguas ou prumos) ou métodos indiretos (sondas batimétricas com sonares ou imagens de satélite). Em geral, a profundidade do corpo d'água é levantada topograficamente ao longo de linhas transversais (*Transects*) para que posteriormente cartas batimétricas e modelos digitais de relevo de fundo sejam construídos.

Obs: A série histórica da cota $H(t)$ é utilizada para definição de um valor mínimo de profundidade do corpo d'água em uma dada posição, notada por $H_{min}(x, y) \equiv \min_t (H(t) - h(x, y))$. O aproveitamento do recurso hidrocínético deve considerar este indicador para que em uma dada posição uma turbina de diâmetro D possa ser instalada. Ou seja, $H_{min} \geq \alpha D$, onde α é uma constante maior que a unidade (ver discussões em [1] ou [30]).

Complementarmente ao mapeamento batimétrico, uma caracterização do fundo do corpo d'água relativo à sua rugosidade deve ser efetuada. Esta informação é necessária para a plena utilização de modelos do escoamento e sua influência com o atrito de fundo. A tabela 3.1 apresenta uma tipologia geral de rugosidades típicas

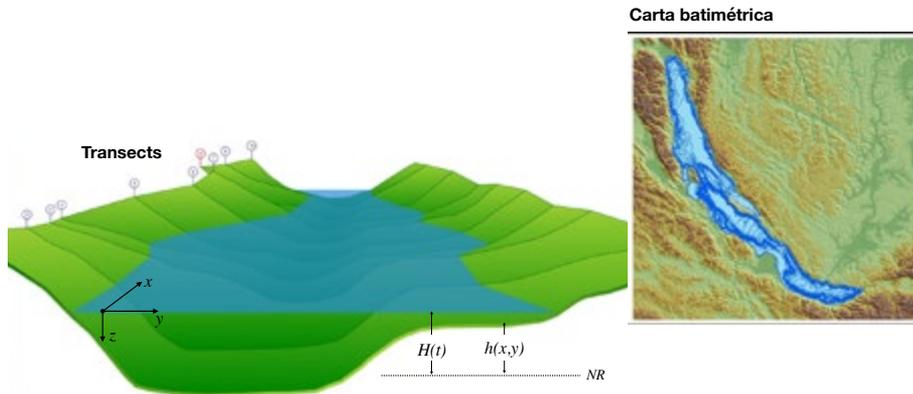


Figura 3.2: Parametrização morfológica

para escoamento em corpos d'água, que serão associadas aos modelos de tensão cisalhante de fundo.

Tabela 3.1: Tipologia de fundo

Característica do leito	Dimensões típicas (mm)
Areia fina	0.2 - 1.0
Terra firme	1.0 - 2.0
Areia Grossa	2.0 - 64
Cascalho	64 - 256
Pedras	> 256
Vegetação de fundo	-
Fundo arenoso ondulado	20 - 50

O potencial de energia hidrocínética disponível na corrente de água é quantificado pelo mapeamento da densidade de potência energética $e_{hk}(x, y, z, t)$, a qual é definida pela Equação 1.1. A partir do campo de velocidade tridimensional do

escoamento $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$ ¹, a velocidade absoluta do escoamento $V(x, y, z, t)$, que define o potencial energético, é calculada pela magnitude do vetor, i.e., $V = |\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{t})|$.

Obs: Em escoamentos em corpos d'água oceânicos, a direção da corrente pode variar de forma significativa o que exige um realinhamento do eixo principal das turbinas. Neste sentido, é importante qualificar as direções prioritárias da corrente no levantamento do potencial hidrocínético, tal como no levantamento estatístico para construção de *rosas de vento* em potenciais eólicos.

Obs: Em rios e canais, a velocidade associada ao potencial hidrocínético em geral está alinhada ao eixo principal do corpo d'água.

Obs: A Equação 1.1 envolve uma estimativa da massa específica da água, ρ . Neste sentido, o levantamento de potencial hidrocínético deve considerar valores locais da temperatura e salinidade da água, avaliando-se também suas variações sazonais.

Simulações numéricas ou medidas em campo permitem o levantamento do campo de velocidade e da variação da superfície livre. A figura 3.3 ilustra alguns resultados típicos, que podem ser apropriados para determinação de potencial hidrocínético.

Para rios e canais é necessário avaliar a série histórica de vazão que cruza a secção transversal, i.e., $Q(t)$. Em geral tais séries são disponibilizadas, junto com a cota, em bases de dados de serviços hidrológicos. No Brasil cabe a ANA-Agência Nacional de Águas gerenciar o acervo de informações hidrológicas mensuradas, também disponibilizadas pelo ONS no que concerne a infraestrutura de geração hidroenergética.

A vazão em conjunto com a distribuição de velocidade axial na secção, permitem o estabelecimento de potenciais hidrocínéticos em uma *transect* (ver Fig. 3.4). A vazão em rios também é uma importante variável a ser utilizada como condição de contorno para a simulação de escoamentos em rios.

Em rios, a velocidade associada ao potencial hidrocínético pode ser relacionada com a vazão na forma

¹Utiliza-se aqui as variáveis em negrito referidas às grandezas vetoriais

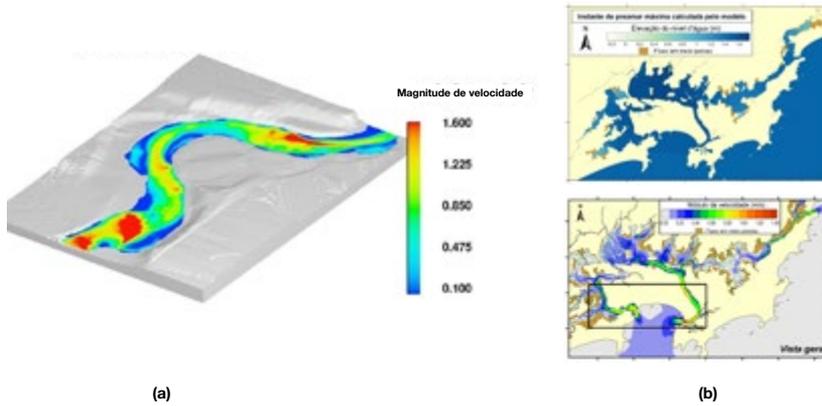


Figura 3.3: Exemplos de simulação 3D (a) Escoamento em Rio - Código Flow3D em www.flow3d.com e (b) Simulação de região estuarina - Código SisBaHiA ([52])

$$V(t) \sim Q(t)/A_c \quad (3.1)$$

onde A_c é a área da seção transversal. O valor da velocidade pode ser também relacionado com a vazão como proposto por [50] na forma

$$V(t) = k_1 \ln[Q(t)] - k_2 \quad (3.2)$$

onde k_1 e k_2 são constantes observadas por medidas locais.

Por fim, um resumo das variáveis associadas ao levantamento do potencial hidrocínético é apresentado na Tab. 3.2. Basicamente, o mapeamento de velocidade do escoamento em um determinado corpo d'água assim como um levantamento batimétrico conveniente, determinam a energia cinética das correntes. Para avaliar tais condições (para todo um ciclo hidrológico característico), modelagem e simulação numérica devem ser utilizados. Esta abordagem deve ser complementada por levantamento de campo, utilizando medidas adequadas da velocidade de corrente, com uma distribuição estatística que reflita o comportamento da dinâmica hidrológica do corpo d'água.

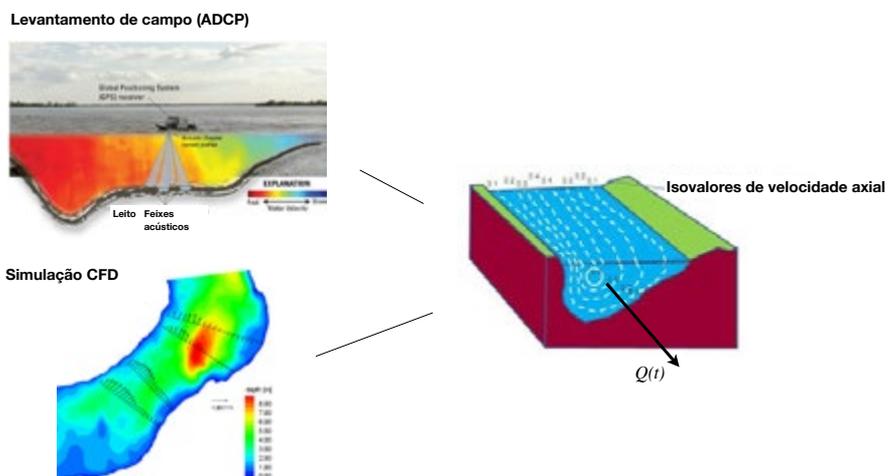


Figura 3.4: Avaliação de escoamento em uma seção transversal em rios

3.3 Potencial hidrocínético remanescente em usinas hidroelétricas

A energia remanescente em uma usina hidrelétrica é caracterizada pela disponibilidade energética na vazão no canal de jusante, a qual é quantificada pelas parcelas de vazões turbinada e vertida, tal como ilustrado na figura 3.5. Introduce-se também, nesta formulação, uma vazão de fundo, que em algumas barragens são necessárias para liberação de acúmulo de sedimentos no reservatório.

Em diferentes de rios naturais as séries de vazão e cotas são uma consequência somente do balanço hídrico na bacia. Em rios onde um barramento existe, os valores de vazão são relacionados principalmente ao regime de operação da usina (geração de eletricidade, vertimento e limpeza de fundo). Portanto, em um modelo completo a vazão total no canal de jusante pode ser quantificada por

$$Q = Q_T + Q_v + Q_f \quad (3.3)$$

Os valores de cada componente relacionam-se com o balanço global de volume

Tabela 3.2: Variáveis utilizadas para mapeamento de potencial hidrocínético

Variáveis morfológicas	
Batimetria	Caracterização do relevo de fundo relativo ao NR
Rugosidade de fundo	Caracterização do leito do corpo d'água
Variáveis Físicas	
Temperatura	Registro de temperatura da água
Salinidade	Caracterização da salinidade local
Turbidez	Registro de turbidez da água
Variáveis Hidrológicas	
Vazão	Séries temporais de vazões características tributárias aos corpos d'água
Cotas	Idem para séries temporais de cotas
Variáveis de potencial hidrocínético	
Velocidade	Velocidade de corrente (medições ou modelo)
Direção da corrente	Alinhamento da corrente aquática
Altura de onda	Altura de onda acima de referência

de água no reservatório principal da usina hidrelétrica, o qual é formulado por

$$f_v \frac{dH_r}{dt} = Q_{in} - Q_L - Q \quad (3.4)$$

Nestas equações H_r é o nível d'água no reservatório e f_v é a função volume \times cota, obtida pelo relevo de fundo do reservatório. As variáveis Q_{in} , Q_L , Q_T , Q_v e Q_f denotam respectivamente as vazões de afluxo, perdas (infiltração e evaporação), nas turbinas, no vertedouro e na comporta de fundo. Os dois primeiros termos do lado direito da equação podem ser estimados com base no comportamento hidrológico no reservatório, enquanto o últimos relaciona-se com a operação para a geração e controle de cota. Estes termos são quantificados como

$$Q_v = \begin{cases} Q_{in} - Q_L - Q, & \text{se } H_r > H_{max} \\ 0, & \text{se } H_r \leq H_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

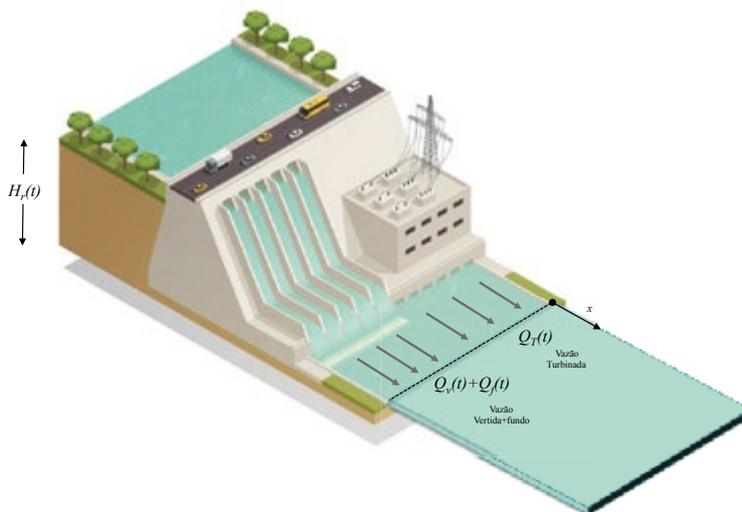


Figura 3.5: Energia remanescente em usinas hidrelétricas

$$Q_T = \frac{P_H}{\eta_h \rho g (H_r - H_0)} \quad (3.6)$$

Nestas equações, H_{max} e H_0 denotam respectivamente a cota máxima do reservatório principal e a cota do canal de jusante. As variáveis η_h , P_H , ρ e g denotam respectivamente a eficiência global do conjunto de turbinas, a potência nominal da instalação, a densidade da água e a aceleração da gravidade.

A partir do histórico das variáveis $\{Q_{in}, Q_L, Q_f, H_0, P_H\}$, registradas na base de dados da usina hidrelétrica, o modelo dinâmico dado pelas equações 3.4-3.6 permite a estimativa de todo o potencial energético da instalação (com base em $H_r(t)$), bem como a determinação do potencial hidrocínético disponível no reservatório de jusante. Isto pode ser formulado como:

$$P_{HK,0} = \rho g [Q_T(1 - \eta_h) + Q_v + Q_f] [H_r - H_0] \quad (3.7)$$

Este potencial pode ser aumentado pelo desnível do canal de jusante entre a posição de referência em $x = 0$ e uma posição mais à jusante em $x = L$, na forma:

$$P_{HK,L} = \rho g [Q_T(1 - \eta_h) + Q_v + Q_f] [H_r - H_0 + SL - H_L] \quad (3.8)$$

Onde S é o declive do reservatório entre 0 e L . H_L é a variação de nível devido às perdas de energia no escoamento pelo atrito de fundo.

A energia quantificada pela equação 3.8 é redistribuída no canal de jusante na forma de potencial hidrocínético. Este montante de energia remanescente é significativo em uma usina hidrelétrica, que em geral apresenta uma eficiência média da ordem de 80%. Infelizmente, por questões técnicas, muito pouco desta energia pode ser convertida por sistemas hidrocínéticos posicionados no reservatório de jusante.

Obs Em algumas usinas hidrelétricas as restrições ambientais determinam que a vazão no canal de jusante deve ser superior a um limite Q_{eco} , que é estabelecida pelos estudos ambientais do empreendimento (vazão ecológica). Logo, o controle do volume de água despachado ao rio é efetuado nos vertedouros e/ou na comporta de fundo. Desta maneira, a Eq. 3.3 deve ser modificada para

$$Q = \min\{(Q_T + Q_v + Q_f), Q_{eco}\} \quad (3.9)$$

A partir da vazão de jusante, modelos espacializados para o potencial de energia hidrocínética remanescente de uma usina hidroelétrica, devem mapear a densidade de energia e_{hk} , que é proporcional ao cubo da velocidade do fluxo em cada localização do canal. Pode-se assim representar valores de e_{hk} (médios ou máximos na profundidade), sobre a superfície livre média do corpo d'água, ou ainda, em seções transversais.

É importante observar que o potencial energético hidrocínético é dependente de condições hidrológicas e de operação da usina que definem o regime de vazão e cotas. Isto requer uma análise das séries estatísticas representativas das condições energéticas do corpo d'água. Neste sentido, a previsibilidade de vazões e cotas de jusante são fundamentais para a estimativa do valor global de energia remanescente, e, para a utilização de condições de contorno em modelos numéricos de simulação do escoamento fluvial e consequente mapeamento da densidade de energia hidrocínética.

3.4 Séries temporais e modelos estocásticos de previsão

Modelos estocásticos e autorregressivos são importantes ferramentas capazes de gerar previsões confiáveis de variáveis hidrológicas. Este tipo de abordagem tem sido utilizadas em um bom número de trabalhos, tais como Figueiredo e Blanco [15]; Johnston e Smakhtin [26]; Figueiredo e Blanco [16]; Nourani et al. [47]; Lohani et al. [39]; Wu e Chau [62]; Birinci e Akay [3]; e Koutroumanidis et al. [31]. A importância da utilização desses modelos em recursos hídricos é algo indiscutível, uma vez que são capazes de representar o comportamento variacional de campos de velocidades e de profundidades em cursos analisados no domínio do tempo e do espaço. Destacam-se as pesquisas de Blunden e Bahaj [4], Carballo et al. [8], Iglesias et al. [23], Petrie et al. [49], Iosub et al. [24] e Pampaniya e Tiwari [46], que tiveram suas pesquisas pautadas em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.

Os modelos hidrológicos utilizados neste projeto de pesquisa e desenvolvimento basearam-se em mecanismos estocásticos e dinâmicos que proporcionam a estruturação e a análise de sequências de observações; a descrição e a previsão de variáveis hidrológicas; e a conformação probabilística destas. Modelos hidrológicos estocásticos e autorregressivo, capazes de gerar previsões de variáveis hidrológicas, foram desenvolvidos e aplicados nas pesquisas de Figueiredo e Blanco [15]; Johnston e Smakhtin [26]; Figueiredo e Blanco [16]; Nourani et al. [47]; Lohani et al. [39]; Wu e Chau [62]; Birinci e Akay [3]; e Koutroumanidis et al. [31].

Será abordado aqui um conjunto de conceitos utilizados para a previsão do comportamento estatísticos das variáveis associadas ao potencial hidrocínético à jusante de usinas hidroelétricas. Neste sentido, uma apresentação sobre a abordagem de análise, processamento e modelagem de séries temporais hidrológicas será engendrada.

Uma série temporal é um conjunto de observações $Z(t)$, geradas sequencialmente no tempo. Ela é uma realização ou trajetória de um processo estocástico [6], baseada em uma sequência de observações de uma variável aleatória ou um processo controlado por leis probabilísticas [53].

Séries temporais fornecem ferramentas à seleção de modelos que poderão ser usados na previsão de eventos futuros, uma vez que modelos de séries temporais são processos estatísticos. As séries temporais em análise referem-se a dados de vazões e de níveis d'água. Ao reportar-se à variável $Z(t)$, refere-se a uma observação de

vazão ou de nível d'água em um dado instante t .

Modelos de séries temporais assumem que as observações variam de acordo com alguma distribuição de probabilidade sobre uma função subjacente de tempo. A construção de modelos de séries temporais depende de vários fatores, como o comportamento do fenômeno, o conhecimento de sua natureza e o objetivo da análise.

Modelos probabilísticos para séries temporais são genericamente chamados de processos estocásticos, ou seja, fenômenos estatísticos que evoluem no tempo de acordo com leis probabilísticas. A palavra estocástica, que é de origem grega, significa “pertencente ao acaso” e é usada como sinônimo de “processo aleatório”. Matematicamente, um processo estocástico pode ser definido como um conjunto de variáveis aleatórias ordenadas no tempo [9].

Um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias $\{Z(t), t \in T\}$ definidas em um espaço de probabilidades (Ω, A, P) , indexado por um parâmetro t , em que t varia no conjunto T . Sendo Ω um espaço amostral, A são os eventos, P é a medida de probabilidade e T é normalmente tomado como o conjunto dos inteiros $Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ou o conjunto dos reais \mathbb{R} .

Se uma variável aleatória é uma função definida em um espaço amostral Ω . Então, o processo estocástico $Z(t), t \in T$ é uma função de dois argumentos $\{Z(t, \omega), t \in T, \omega \in \Omega\}$. Para $t = t_0$, $Z(t_0, \omega) = Z_{(t_0)}(\omega)$ é uma variável aleatória denotada por $Z(t_0)$ já que ω varia em um espaço amostral Ω . Por outro lado, fixando $\omega = \omega_0$, $Z(t, \omega_0) = Z_{(\omega_0)}(t)$ é uma função que só depende de t , e é chamada de uma realização do processo. Se t e ω são fixos, $Z(t, \omega)$ é um número real. Assim sendo, para simplificar a notação $Z(t)$ denota um processo estocástico.

O conjunto T é chamado de espaço de parâmetro. Os valores assumidos por $Z(t)$ são chamados de estados, e o conjunto de todos os possíveis estados é chamado de espaço de estados do processo estocástico e é denotado por E .

Se o conjunto T for finito ou enumerável, como $T = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ou $T = Z$, o processo diz-se com parâmetro discreto. Se T for um intervalo de \mathbb{R} , obtém-se um processo com parâmetros contínuos. Se E é discreto, então o processo é dito ser um processo de estados discretos, e pode ser chamado também de uma cadeia. Se E é contínuo, então o processo é dito ser de espaço contínuo [42].

Para cada $t \in T$, temos uma variável aleatória $Z(t, \omega)$, como uma distribuição de probabilidades. Para cada $\omega \in \Omega$, tem-se uma função de t , ou seja, uma trajetória

do processo, ou ainda, uma série temporal. Processos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries, ou seja, as simulações são baseadas somente em observações passadas, não sendo fundamentados nos processos de formação das séries.

Se $Z(t)$ é um processo estocástico. Para um tempo fixo $t = t_1$, $Z(t_1) = Z_1$ é uma variável aleatória e a sua função de distribuição acumulada ou função de distribuição $F(z_1, t_1)$ é definida pela Equação (3.10).

$$F(z_1, t_1) = P \{Z(t_1) \leq z_1\} \quad (3.10)$$

$F(z_1, t_1)$ é uma função de distribuição de primeira ordem de $Z(t)$. Assim sendo, para dois tempos fixos t_1 e t_2 a função de distribuição de segunda ordem de $Z(t)$ é definida pela Equação (3.11).

$$F(z_1, z_2; t_1, t_2) = P \{Z(t_1) \leq z_1, Z(t_2) \leq z_2\} \quad (3.11)$$

De forma geral, uma função de distribuição acumulada de n -ésima ordem de $Z(t)$ é dada pela Equação (3.12).

$$F(z_1, \dots, z_n; t_1, \dots, t_n) = P \{Z(t_1) \leq z_1, \dots, Z(t_n) \leq z_n\} \quad (3.12)$$

Para uma caracterização completa de um processo estocástico $Z(t)$, é preciso se ter conhecimento das distribuições de todas as ordens ($n \rightarrow \infty$). Assim sendo, um processo estocástico, $Z = \{Z(t), t \in T\}$, só estará especificado quando se conhecer todas as distribuições de n -ésima ordem de $Z(t)$, dada pela Equação (3.13), para todo $n \geq 1$ e quando satisfizer as condições seguintes:

- **Condições de Simetria:**

Para qualquer permutação j_1, \dots, j_n , dos índices $1, 2, 3, \dots, n$, tem-se:

$$F(z_{j_1}, \dots, z_{j_n}; t_{j_1}, \dots, t_{j_n}) = F(z_1, \dots, z_n; t_1, \dots, t_n) \quad (3.13)$$

- **Condições de Compatibilidade:**

Para $m < n$, tem-se:

$$(z_1, \dots, z_m, +\infty, \dots, +\infty; t_1, \dots, t_m, t_{m+1}, \dots, t_n) = F(z_1, \dots, z_m; t_1, \dots, t_m) \quad (3.14)$$

A média de $Z(t)$, que é uma função do tempo, é definida pela Equação (3.15).

$$\mu(t) = E[Z(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} z f(z; t) dz \quad (3.15)$$

Onde $E[Z(t)]$ é o valor médio, a esperança ou a expectativa da variável aleatória $Z(t)$.

A medida de dependência entre as variáveis aleatórias de $Z(t)$ é dada pela função de autocorrelação (ACF), definida pela Equação (3.16).

$$\rho_k = \frac{E[(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad (3.16)$$

Onde $E[Z(t)]$ é o valor médio, a esperança ou a expectativa da variável aleatória $Z(t)$, k é o deslocamento no tempo e σ^2 é a variância da variável aleatória $Z(t)$. A função de auto covariância (FACV) da variável aleatória $Z(t)$ é dada pela Equação (3.17).

$$\gamma_k = Cov\{Z_t, Z_{t+k}\} = E\{(Z_t - \mu_t)(Z_{t+k} - \mu_{t+k})\} \quad (3.17)$$

Onde $E[Z(t)]$ é o valor médio, a esperança ou a expectativa da variável aleatória $Z(t)$, k é o deslocamento no tempo, $cov[Z(t)]$ é a covariância de $Z(t)$ e $\mu(t)$ é a função média da variável aleatória $Z(t)$. A variância da variável aleatória $Z(t)$ é dada pela Equação (3.18).

$$\sigma^2(t) = Var\{Z(t)\} = E\{(Z_t - \mu_t)^2\} \quad (3.18)$$

3.4.1 Processos estacionários

Se o processo estocástico que gerou a série de observações é invariante com respeito ao tempo, diz-se que o mesmo é estacionário. Se as características estatísticas do processo se alteram no decorrer do tempo, diz-se que é não estacionário.

Uma classe importante de modelos estocásticos para descrição de séries temporais é a dos modelos estacionários, que são baseados na hipótese de que o processo permanece em equilíbrio em torno de um nível médio constante. Em outras palavras, o processo evolui no tempo de modo que a escolha de uma origem dos tempos não é importante, ou seja, as características de Z_{t+k} , para todo k , são as mesmas de Z_t [42].

Para a utilização de modelos de séries temporais, faz-se necessária a introdução de suposições simplificadoras que possibilitem a análise de determinadas classes de processos estocásticos. Esses processos podem ser: a) processos estacionários ou não estacionários, de acordo com independência ou não em função do tempo; e b) processos normais (gaussianos) ou não normais, os quais são função da função densidade de probabilidade [42]. Os processos quanto à estacionariedade, podem ser classificados em:

- a) **Estritamente estacionário ou forte:** quando suas estatísticas não são afetadas por variações devido à escolha da origem dos tempos, ou seja, quando as séries Z_t e Z_{t+k} , estão distribuídas identicamente, qualquer que seja k ;
- b) **Estritamente estacionário de ordem finita:** diz-se que um processo é estritamente estacionário de ordem i se a estacionariedade do item a) é válida não para todo $(t_j) \in T$, mas somente para $j \leq i$;
- c) **Fracamente estacionário, de segunda ordem ou fraco:** quando a sua função valor médio é constante e sua função de covariância depende somente da diferença, em valor absoluto, de $t_s - t_j$.

O conhecimento da estacionariedade de uma série temporal é de grande e fundamental importância no sucesso das previsões geradas por um modelo estocástico, pois quando se trabalha com uma série estacionária, adota-se uma função amostral do processo que tem a mesma forma em todos os instantes de tempo $t \in T$. Tal hipótese proporciona possibilidades de obtenção de estimativas das características

de um processo de forma bastante simples, o que, em caso contrário, não seria tarefa fácil.

Um processo $Z(t)$ é dito estacionário se para todo n e para qualquer conjunto de instantes de tempo $\{t_i \in T, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$, a função de distribuição acumulada da variável aleatória $Z(t)$ para um instante t é a mesma para um instante $t + \tau$, para qualquer valor de τ , conforme a igualdade da Equação (3.19).

$$F(z_1, \dots, z_n; t_1, \dots, t_n) = F(z_1, \dots, z_n; t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau) \quad (3.19)$$

Em um processo estacionário, a distribuição da variável aleatória $Z(t)$ não é afetada por uma translação na origem do tempo. Os processos estacionários $Z(t)$ e $Z(t + \tau)$ têm a mesma função de distribuição, para qualquer valor de τ . Ou seja, a função de distribuição para t é igual à de $t + \tau$, conforme mostra a Equação (3.20).

$$F(z, t) = F(z, t + \tau) \quad (3.20)$$

As distribuições unidimensionais são invariantes com o tempo, logo, para todo $t \in T$, a média $\mu(t)$ e a variância $V(t)$ são constantes, conforme Equação (3.21).

$$\mu(t) = \mu = 0 \quad e \quad V(t) = \sigma^2 \quad (3.21)$$

A grande maioria dos modelos estocásticos de séries temporais pressupõe que a série seja estacionária, ou seja, que ela se desenvolva de forma aleatória no tempo, mas que reflita de alguma forma, um equilíbrio estável no decorrer do tempo.

Segundo Ross [51], como as séries temporais hidrológicas, em sua grande parte, apresentam alguma forma de não estacionariedade e de tendência, é necessário transformar as séries originais em séries estacionárias. A transformação mais comum consiste em tomar diferenças sucessivas da série original, até se obter uma série estacionária, sendo a primeira diferença de $Z(t)$ definida pela Equação (3.22).

$$\Delta Z(t) = Z(t) - Z(t - 1) \quad (3.22)$$

Assim, a n -ésima diferença da variável aleatória $Z(t)$ é dada pela Equação (3.23).

$$\Delta^n Z(t) = \Delta[\Delta^{n-1} Z(t)] \quad (3.23)$$

Onde Δ é o operador diferença, n é o número de diferenciações e $Z(t)$ é a variável aleatória em um instante t .

Segundo Cox e Miller [10], a classe de modelos ARIMA é capaz de descrever satisfatoriamente séries estacionárias e séries não estacionárias homogêneas, desde que essas não apresentem comportamento explosivo.

Conforme Chatfield [9], partindo-se da premissa de que $\{X_t, t \in Z\}$ seja um processo estacionário real e discreto, com $\mu(t) = \mu = 0$ e FACV $\gamma_\tau = E\{X_t X_{t+\tau}\}$, sendo $\tau = t_2 - t_1$ o lag (atraso), observa-se que a função de auto covariância (FACV) γ_k satisfaz as seguintes propriedades:

- i) $\gamma_0 > 0$;
- ii) $\gamma_{-\tau} = \gamma_\tau$;
- iii) $|\gamma_\tau| \leq \gamma_0$; e
- iv) γ_τ é não negativa no sentido de que

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_j a_k \gamma_{\tau_j - \tau_k} \geq 0, \quad \forall \text{ números reais } a_1, \dots, a_n \text{ e } \tau_1, \dots, \tau_n \in Z$$

Em função do número de parâmetros envolvidos, podemos classificar os modelos para séries temporais em duas classes: a) modelos paramétricos, para os quais o número de parâmetros é finito; e b) modelos não paramétricos, os quais envolvem um número infinito de parâmetros [9].

Para a classe de modelos paramétricos, na qual a análise é feita no domínio do tempo, os modelos mais usados são os modelos de erro ou de regressão; os modelos autorregressivos de médias móveis ARMA e os modelos autorregressivos integrados de médias móveis ARIMA.

Os modelos não paramétricos mais utilizados são os de função de auto covariância, ou autocorrelação, e sua transformada de Fourier, sendo estas funções pares

de Fourier. A vantagem de se escrever as funções no domínio das frequências está no fato de se eliminar o problema da correlação serial [42].

Três classes de processos podem ser descritas pelos modelos ARIMA:

- i) **Processos lineares estacionários**, os quais são representados na forma da Equação (3.24).

$$Z_t - \mu = a_t + \psi_1 a_{t-1} + \psi_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \psi_k a_{t-k}, \text{ sendo } \psi_0 = 1 \quad (3.24)$$

Onde, a_t é o ruído branco e $\mu = E(Z_t)$, ψ_1, ψ_2, \dots é uma sequência de parâmetros, tal que $\sum_k \psi_k^2 < \infty$.

Existem três casos particulares do modelo da equação (3.24), a saber:

- a) processo autorregressivo de ordem p : $AR(p)$;
- b) processo de médias móveis de ordem q : $MA(q)$;
- c) processo autorregressivo e de médias móveis de ordens p e q : $ARMA(p, q)$.
- ii) **Processos lineares não estacionários homogêneos**, que são uma generalização dos processos lineares estacionários que supõem que o mecanismo gerador da série produz erros auto correlacionados e que as séries sejam não estacionárias em nível e/ou inclinação. Estas séries podem tornar-se estacionárias por meio da aplicação do operador diferença de ordem $d=1$ ou $d=2$; e
- iii) **Processos de memória longa**, os quais são processos estacionários onde a função de autocorrelação apresenta um decaimento muito lento (hiperbólico) e cuja análise necessitará de uma diferença fracionária ($0 < d < 0,5$).

A adoção de um determinado tipo de modelo para representar uma série temporal, influencia diretamente nos resultados a serem alcançados, pois esses representarão de forma mais ou menos aproximada as sequências aleatórias de um fenômeno [42].

Embora a teoria mostre a conveniência prática do uso de séries estacionárias, no mundo real, infelizmente, poucas são as séries hidrológicas que podem ser classificadas como processos lineares puramente estacionários.

Para a grande maioria das séries hidrológicas, o tipo de não estacionariedade é caracterizado como homogêneo. Estas séries apresentam propriedades que, quando diferenciadas uma ou mais vezes, transformam-se em séries estacionárias.

3.4.2 Modelo de Box & Jenkins

A metodologia de Box & Jenkins [5] é, sem dúvida, o trabalho de maior importância e reconhecimento na área de previsão de séries temporais. O estudo feito pelos pesquisadores George Box e Gwilym Jenkins foi baseado no importante resultado de Wold [61], que provou que qualquer série temporal pode ser representada por uma estrutura de médias móveis infinitas. A metodologia proposta consiste em ajustar modelos autorregressivos e de médias móveis a séries temporais.

A justificativa para o uso do nome Box & Jenkins associado a esses processos está na contribuição representativa que os autores deram ao estudo de séries temporais, por meio de uma minuciosa e fundamentada integração desses processos, que lhes permitiu um tratamento analítico de inferência estatística nas previsões de valores futuros das variáveis dinâmicas [59, 38, 22].

A metodologia de Box e Jenkins, para a análise das séries estocásticas, está fundamentada na hipótese de que, embora os valores da série Z_t apresentem correlação serial, cada um deles pode ser considerado como gerado por uma sequência de choques a_t , $t \in T$, aleatórios e independentes entre si, cada um possuindo uma determinada distribuição, com média zero e variância σ_a^2 constante. A sequência de choques aleatórios a_t , $t \in T$, com as características acima mencionadas é denominada processo de ruído branco.

Na metodologia de Box & Jenkins, alguns operadores são amplamente utilizados. Estes operadores são:

- a) operador translação para o passado (*back*), denotado por \mathbf{B} e definido pela Equação (3.25).

$$BZ_t = Z_{t-1} \quad \therefore \quad B^m Z_t = Z_{t-m} \quad (3.25)$$

b) operador translação para o futuro (*future*), denotado por \mathbf{F} e definido pela Equação (3.26).

$$FZ_t = Z_{t+1} \quad \therefore \quad F^m Z_t = Z_{t+m} \quad (3.26)$$

c) operador diferença (*difference*), denotado por Δ e definido pela Equação (3.27).

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} = (1 - B)Z_t \implies \Delta = 1 - B \quad (3.27)$$

d) operador soma (*sum*), denotado por \mathbf{S} e definido pela Equação (3.28).

$$SZ_t = \sum_{j=0}^{\infty} Z_{t-j} = Z_t + Z_{t-1} + \dots (1 + B + B^2 + \dots) Z_t \quad (3.28)$$

$$SZ_t = (1 - B)^{-1} Z_t = \Delta^{-1} Z_t \implies S = \Delta^{-1} - 1$$

O alicerce da metodologia de Box & Jenkins, para a busca de uma classe geral de modelos capazes de representar o processo gerador da série estocástica, está assentado no teorema da decomposição de Wold para séries estacionárias [61]. Esse teorema demonstra que todo processo estocástico estacionário pode ser decomposto em um modelo linear do tipo média móvel, cuja formulação é dada pela Equação (3.29) ou pela Equação (3.30) [17, 59, 38, 22, 42].

$$Z_t = \mu + a_t + \psi_1 a_{t-1} + \psi_2 a_{t-2} + \psi_3 a_{t-3} + \dots + \psi_n a_{t-n} \quad (3.29)$$

$$Z_t = \mu + \psi(B) a_t \quad (3.30)$$

O valor estimado da variável aleatória $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$, é definido pela Equação (3.31) ou pela Equação (3.32).

$$\tilde{Z}_t = \psi(B) a_t \quad (3.31)$$

$$\tilde{Z}_t = (1 - \psi_1 B - \psi_2 B^2 - \dots - \psi_q B^q) a_t = \psi(B) a_t \quad (3.32)$$

Onde $\psi(B)$ é o operador linear ou filtro do sistema, dado pela Equação (3.33).

$$\psi(B) = 1 + \psi_1 B + \psi_2 B^2 + \dots + \psi_n B^n \quad (3.33)$$

Sendo a_t um ruído branco, tem-se que:

$$\begin{aligned} E(a_t) &= 0, \quad \forall t \\ \text{Var}(a_t) &= \sigma_a^2, \quad \forall t \\ E(a_t a_s) &= 0, \quad s \neq t \end{aligned}$$

Onde μ é a média do processo; ψ_j são parâmetros ou pesos estabelecidos pelos valores da série; a_t o ruído branco no período; $\psi(B)$ é chamado de operador linear, função de transferência ou filtro linear e Z_t é a observação no período t , sendo um processo linear discreto.

Box & Jenkins, ao observar a existência de uma relação dual entre os processos de média móvel e autorregressivo, direcionaram seus estudos em uma linha de pesquisa que tinha por base a proposição de que os dados eram gerados por processos lineares do tipo média móvel, do tipo autorregressivo ou por uma classe de processos mistos, compostos pela utilização conjunta dos dois processos, denominados modelo *autoregressive moving average* (ARMA)[17, 59, 38, 22, 41].

A adoção de processos autorregressivos e de médias móveis na caracterização de modelos de previsão de variáveis hidrológicas, tem por base o fato de que, muitas vezes, as características do processo estocástico não permitem uma descrição satisfatória através de um processo puramente autorregressivo ou puramente média móvel, de poucos parâmetros, pois a série original incorpora, em sua forma parcimoniosa, ambos os tipos de processos.

A existência da dualidade entre eles dá-se de forma que um processo de média móvel finito, de qualquer ordem, pode ser descrito como um processo autorregressivo infinito, e vice-versa. Isso implica, em termos práticos, que a obtenção

de estimativas de seus parâmetros, de forma parcimoniosa, muitas vezes requer a inclusão de ambos os processos no modelo [25, 6, 7].

A utilização de modelos autorregressivos e de médias móveis pode ampliar sua capacidade de ação para processos não estacionários homogêneos, bastando, para tanto, ser acrescida de um operador que seja capaz de transformar processos evolutivos homogêneos de ordem “d” em estacionários, o qual é o operador soma “S”, inverso do operador diferença de retardo, Δ . A essa classe de modelos não estacionários, que utilizam os princípios desenvolvidos no modelo ARMA, acrescidos de um operador de transformação de processos evolutivos homogêneos em estacionários, dá-se a denominação de modelo *autoregressive integrated moving average* (ARIMA). A palavra *integrated* compõe o modelo ARIMA pelo fato de que a existência de um processo não estacionário exige o operador somatório [17].

A especificação da proposta de Box & Jenkins, consiste em: enquanto o teorema da decomposição de Wold supõe que o processo de ruído branco é transformado na observação Z_t , através de um filtro linear $\psi(B)$, conforme esquema apresentado na Figura 3.6. A metodologia de Box & Jenkins supõe que o processo de filtragem do ruído branco pode ser decomposto em três etapas, conforme a Figura 3.7, ou seja, um processo de filtragem “média móvel”, através do qual o ruído branco é transformado em e_t ; um processo de filtragem “estacionário autorregressivo”, transformando e_t em w_t ; e, caso a série não seja estacionária, um processo de filtragem “somatório” transformando w_t na observação da série temporal Z_t [17].



Figura 3.6: diagrama do teorema de decomposição de Wold com filtro linear para séries temporais.



Figura 3.7: diagrama do processo ARIMA para modelagem de séries temporais.

Assim, tendo-se por base a Equação (3.29), então se pode obter o ruído branco através da Equação (3.34) e da Equação (3.35).

$$a_t = Z_t - \mu - \psi_1 a_{t-1} - \psi_2 a_{t-2} - \psi_3 a_{t-3} - \dots - \psi_n a_{t-n} \quad (3.34)$$

$$a_{t-1} = Z_{t-1} - \mu - \psi_1 a_{t-2} - \psi_2 a_{t-3} - \psi_3 a_{t-4} - \dots - \psi_n a_{t-n+1} \quad (3.35)$$

Substituindo a Equação (3.35) na Equação (3.34), obtêm-se as observações Z_t , através da Equação (3.36).

$$Z_t = \mu (1 - \psi_1) + \psi_1 Z_{t-1} + a_t + (\psi_2 - \psi_1^2) a_{t-2} + (\psi_3 - \psi_1 \psi_2) a_{t-3} \quad (3.36)$$

Continuando o mesmo processo de substituição para a_{t-2} , a_{t-3} , a_{t-4} , ... na Equação (3.36), obtêm-se a Equação linear composta pela soma ponderada de seus valores passados acrescida da variável aleatória a_t , conforme Equação (3.37).

$$Z_t = \theta_1 Z_{t-1} + \theta_2 Z_{t-2} + \dots + \theta_p Z_{t-p} - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} + \delta + a_t \quad (3.37)$$

Onde:

ϕ_n é o coeficiente autorregressivo;

θ_n é o coeficiente média móvel; e

$\delta = \frac{\mu}{(1 - \pi_1 - \pi_2 - \pi_3 - \dots)}$, sendo pesos π_j função de ϕ_j .

3.4.3 Modelo de média móvel – MA

Considerando a decomposição do teorema de Wold, dado através do processo linear estabelecido pelas Equação (3.31) e Equação (3.32) e que somente as primeiras “q” ponderações são diferentes de zero, então o processo da Equação (3.34) é chamado de processo média móvel de ordem “q”, simbolicamente definido por MA(q) (*moving average*) e pela Equação (3.38) [17, 41].

$$Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.38)$$

Sendo o filtro $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$, com base na Equação (3.38), obtém-se o filtro \tilde{Z}_t através da Equação (3.39).

$$Z_t - \mu = \tilde{Z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.39)$$

Sendo $\theta(B)$ o operador de médias móveis de ordem q, definido através da Equação (3.40).

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (3.40)$$

Considerando a Equação (3.39) e a Equação (3.40), obtém-se o filtro \tilde{Z}_t através da Equação (3.41), escrito em função do operador médias móveis.

$$\tilde{Z}_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) a_t = \theta(B) a_t \quad (3.41)$$

No processo média móvel de ordem “q”, cada observação da série é gerada por uma média ponderada da observação presente e “q” valores passados de um processo de ruído branco. Assim sendo, um processo média móvel é um processo de filtro linear dado pela Equação (3.42).

$$\tilde{Z}_t = a_t - \sum_{j=1}^q \theta_j a_{t-j} \quad (3.42)$$

Os processos de primeira e de segunda ordem MA (1) e MA (2), nos modelos de média móvel, adquirem particular importância em sua postulação parcimoniosa.

O processo média móvel de ordem "q", MA(q), apresenta as seguintes características:

- a) a média é independente do tempo, $E(a_t) = \mu$;
- b) como cada a_t é gerado pelo mesmo processo de ruído branco, $E(a_t) = 0$, $E(a_t^2) = \sigma_a^2$ e $E(a_t, a_{t-j}) = 0$, para $j \neq 0$, então o processo é descrito por $q + 2$ parâmetros que são a média μ , a variância do ruído σ_a^2 e os pesos $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_q$;
- c) a variância do processo é $\text{Var}(Z_t) = \text{Var}(\tilde{Z}_t) = \sigma_a^2 (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2)$;
- d) a função de autocorrelação (ACF) é dada por:

$$\rho_j = \begin{cases} \frac{-\theta_j + \theta_1\theta_{j+1} + \theta_2\theta_{j+2} + \dots + \theta_{q-j}\theta_q}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2}, & j = 1, \dots, q \\ 0, & j > q. \end{cases}$$

- e) A função de densidade espectral é dada por:

$$f(\lambda) = \frac{\sigma_a^2}{2\pi} \left| 1 - \theta_1 e^{-i\lambda} - \theta_2 e^{-2i\lambda} - \dots - \theta_q e^{-qi\lambda} \right|^2, \quad -\pi \leq \lambda \leq \pi$$

O caso mais simples de um modelo de Média Móvel MA(q) é o processo de primeira ordem MA (1), definido pela Equação (3.43).

$$Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (3.43)$$

Como o processo é de ordem finita, o MA (1) é sempre estacionário, apresentando as seguintes características:

Média

$$E(Z_t) = E(\mu + a_t - \theta_1 a_{t-1}) = E(\mu) + E(a_t) - E(\theta_1 a_{t-1}) = \mu + 0 - 0 = \mu$$

Variância

$$\begin{aligned}\text{Var}(Z_t) &= E(Z_t - \mu)^2 = E(a_t - \theta_1 a_{t-1})^2 = E(a_t^2 - 2a_t \theta_1 a_{t-1} + \theta_1^2 a_{t-1}^2) = \\ &= \sigma_a^2 - 0 + \theta_1^2 \sigma_a^2 = (1 - \theta_1^2) \sigma_a^2\end{aligned}$$

Autocovariância

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= \text{Var}(Z_t) = (1 - \theta_1^2) \sigma_a^2 \\ \gamma_1 &= E(a_t - \theta_1 a_{t-1})(a_{t-1} - \theta_1 a_{t-2}) = -\theta_1 \\ \gamma_j &= E(a_t - \theta_1 a_{t-1})(a_{t-j} - \theta_1 a_{t-j-1}) = \\ &= 0, \quad \forall j > 1.\end{aligned}$$

Autocorrelação

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{-\theta_1}{(1 + \theta_1^2)} \\ \rho_j &= 0, \quad \forall j > 1.\end{aligned}$$

Os processos de segunda ordem MA (2), nos modelos de média móvel, adquirem particular importância em sua postulação parcimoniosa. O processo é de ordem finita, sendo sempre estacionário. O segundo caso mais simples de um modelo de Média Móvel MA(q), é o processo de segunda ordem MA (2), definido pela Equação (3.44).

$$Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} \quad (3.44)$$

Como o processo é de ordem finita, o MA (2) é sempre estacionário, apresentando as seguintes características:

Média

$$\begin{aligned}E(Z_t) &= E(\mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2}) = \mu + E(a_t) - \theta_1 E(a_{t-1}) - \theta_2 E(a_{t-2}) = \\ &= \mu + 0 - 0 - 0 = \mu\end{aligned}$$

Variância

$$\begin{aligned}\text{Var}(Z_t) &= E(Z_t - \mu)^2 = E(a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2})^2 = \\ &= E(a_t^2 + \theta_1^2 a_{t-1}^2 + \theta_2^2 a_{t-2}^2 - 2a_1 \theta_1 a_{t-1} - 2a_2 \theta_2 a_{t-2} - 2\theta_1 \theta_2 a_{t-1} a_{t-2}) = \\ &= \sigma_a^2 + \theta_1^2 \sigma_a^2 + \theta_2^2 \sigma_a^2 - 0 - 0 + 0 = (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2) \sigma_a^2\end{aligned}$$

Autocovariância

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= \text{Var}(Z_t) = (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2) \sigma_a^2 \\ \gamma_1 &= E(a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2})(a_{t-1} - \theta_1 a_{t-2} - \theta_2 a_{t-3}) = \\ &= -\theta_1 \sigma_a^2 + \theta_1 \theta_2 \sigma_a^2 = -\theta_1 (1 - \theta_2) \sigma_a^2 \\ \gamma_2 &= E(a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2})(a_{t-2} - \theta_1 a_{t-3} - \theta_2 a_{t-4}) = -\theta_2 \sigma_a^2 \\ \gamma_j &= 0, \quad \forall j > 2.\end{aligned}$$

Autocorrelação

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{-\theta_1 (1 - \theta_2)}{(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2)} \\ \rho_2 &= \frac{-\theta_2}{(1 + \theta_1^2 + \theta_2^2)} \\ \rho_j &= 0, \quad \forall j > 2.\end{aligned}$$

3.4.4 Modelo Autorregressivo — AR

Considerando a decomposição do Teorema de Wold, obtido através do processo linear estabelecido pela Equação (3.36). Tendo por base apenas as primeiras “p” ponderações diferentes de zero, então a observação Z_t é gerada pela média ponderada de, somente, as “p” primeiras observações próximas passadas da variável, acrescidas de uma perturbação aleatória do período presente a_t . Então, o processo definido pela Equação (3.45) é chamado de processo autorregressivo de ordem “p”, simbolicamente definido por AR(p) [17, 41].

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \phi_3 Z_{t-3} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \delta + a_t \quad (3.45)$$

Em um modelo autorregressivo, a série de dados históricos Z_t é descrita por seus valores passados regredidos e pelo ruído aleatório a_t . θ_i é o parâmetro que descreve como Z_t se relaciona com o valor Z_{t-i} , para $i = 1, 2, 3, \dots, p$.

Na postulação parcimoniosa de modelos, adquirem especial importância os processos autorregressivos de primeira e segunda ordem, AR (1) e AR (2).

O modelo autorregressivo de ordem “p”, AR(p), apresenta as seguintes características:

- a) A média independente do tempo, se e somente se, o processo for estacionário. Nesse caso, como $E(Z_t) = E(Z_{t-1}) = E(Z_{t-2}) = \dots = E(Z_{t-p}) = \mu$, temos:

$$\begin{aligned} E(Z_t) &= E(\phi_1 Z_{t-1}) + E(\phi_2 Z_{t-2}) + \dots + E(\phi_p Z_{t-p}) + E(\delta) + E(a_t) \\ \mu &= \phi_1 \mu + \phi_2 \mu + \phi_3 \mu + \dots + \phi_p \mu + \delta + 0 \\ \mu &= \frac{\delta}{(1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p)} \end{aligned}$$

Se o processo é estacionário, a média $E(Z_t) = \mu$ deve ser uma constante. Portanto, uma condição necessária (porém não suficiente) para que o processo seja estacionário é que sua média seja finita e determinada. Ou seja, necessariamente deve ocorrer que:

$$\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p < 1$$

Consequentemente, se o processo autorregressivo for estacionário, a média será zero somente se o termo constante δ for igual a zero.

O caso mais simples de um modelo autorregressivo AR(q) é o processo de primeira ordem AR (1), definido pela Equação (3.46).

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \delta + a_t \quad (3.46)$$

Como o processo é de ordem finita, o AR (1) é sempre inversível, apresentando as seguintes características:

Média

$$E(Z_t) = E(\phi_1 Z_{t-1} + \delta + a_t) = \phi_1 \mu - \delta - E(a_t) = \frac{\delta}{(1 - \phi_1)}$$

Variância

$$\begin{aligned} E(Z_t - \mu)^2 &= E\left(\phi_1 Z_{t-1} + \delta + a_t - \frac{\delta}{(1 - \phi_1)}\right)^2 = \\ &= E(\phi_1 Z_{t-1} + a_t)^2 = \\ &= \phi_1^2 E(Z_{t-1})^2 + E(a_t^2) + 2\phi_1 E(Z_{t-1} a_t) = \\ &= \phi_1^2 \sigma_a^2 + \sigma_a^2 - 0 = \\ &= \frac{\sigma_a^2}{(1 - \phi_1^2)} \end{aligned}$$

Autocovariância

$$\begin{aligned} \gamma_j &= E(\tilde{Z}_t \cdot \tilde{Z}_{t-j}) = E\left[\left(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + a_t\right) \tilde{Z}_{t-j}\right] = \\ &= E\left(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-j} + a_t \tilde{Z}_{t-j}\right) = \phi_1 E(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-j}) + E(a_t \cdot \tilde{Z}_{t-j}) = \\ &= \phi_1 E(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-j}) + 0 = \\ &= \phi_1 \gamma_{j-1} \end{aligned}$$

Assim, para:

$$j = 1, \quad \gamma_1 = \phi_1 \gamma_0$$

$$j = 2, \quad \gamma_2 = \phi_1 \gamma_1 = \phi_1 (\phi_1 \gamma_0) = \phi_1^2 \gamma_0$$

$$j = 3, \quad \gamma_3 = \phi_1 \gamma_2 = \phi_1 (\phi_1^2 \gamma_0) = \phi_1^3 \gamma_0$$

Genericamente, tem-se:

$$\gamma_j = \phi_1^j \gamma_0$$

Autocorrelação

$$\rho_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_0} = \frac{\phi_1^j \gamma_0}{\gamma_0} = \phi_1^j, \quad \forall j$$

Como $\rho_j = \phi_1^j$, a observação presente depende de todos os valores passados, com o grau de dependência declinando com o tempo. Assim, observa-se que o processo autorregressivo estacionário de primeira ordem AR (1) tem memória curta.

O processo de segunda ordem AR (2) é definido pela Equação (3.47).

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \delta + a_t \quad (3.47)$$

Onde,

$$\phi_1 + \phi_2 < 1$$

$$\phi_2 - \phi_1 < 1$$

$$|\phi_2| < 1$$

Como o processo é de ordem finita, o AR (2) é sempre inversível, apresentando as seguintes características:

Média

$$E(Z_t) = E(\phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \delta + a_t) = \frac{\delta}{(1 - \phi_1 - \phi_2)}$$

Variância

$$\begin{aligned} E(Z_t - \mu)^2 &= E(\tilde{Z}_t)^2 = E(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t)^2 = \\ &= E(\phi_1^2 \tilde{Z}_{t-1}^2 + \phi_2^2 \tilde{Z}_{t-2}^2 + a_t^2 + 2\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + 2\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} a_t + 2\phi_2 \tilde{Z}_{t-2} a_t) = \\ &= \phi_1^2 E(\tilde{Z}_{t-1}^2) + \phi_2^2 E(\tilde{Z}_{t-2}^2) + E(a_t^2) + 2\phi_1 \phi_2 E(\tilde{Z}_{t-1} \tilde{Z}_{t-2}) = \\ &= \phi_1^2 \gamma_0 + \phi_2^2 \gamma_0 + 2\phi_1 \phi_2 \gamma_1 + \sigma_a^2 \end{aligned}$$

Autocovariância

$$\begin{aligned} \gamma_j &= E(\tilde{Z}_t \cdot \tilde{Z}_{t-j}) = E\left[(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t) Z_{t-j}\right] = \\ &= \phi_1 E(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-j}) + \phi_2 E(\tilde{Z}_{t-2} \cdot \tilde{Z}_{t-j}) + E(a_t \cdot Z_{t-j}) = \\ &= \phi_1 \gamma_{j-1} + \phi_2 \gamma_{j-2} \end{aligned}$$

Assim, para:

$$k = 0,$$

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= E\left(\tilde{Z}_t \cdot \tilde{Z}_{t-j}\right) = E\left[\left(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t\right) \tilde{Z}_t\right] = \\ &= \phi_1 E\left(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_t\right) + \phi_2 E\left(\tilde{Z}_{t-2} \cdot \tilde{Z}_t\right) + E\left(a_t \cdot \tilde{Z}_t\right) = \\ &= \phi_1 \gamma_1 + \phi_2 \gamma_2 + \sigma_a^2\end{aligned}$$

$$j = 1,$$

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= E\left(\tilde{Z}_t \cdot \tilde{Z}_{t-1}\right) = E\left[\left(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t\right) \tilde{Z}_{t-1}\right] = \\ &= \phi_1 E\left(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-1}\right) + \phi_2 E\left(\tilde{Z}_{t-2} \cdot \tilde{Z}_{t-1}\right) + E\left(a_t \cdot \tilde{Z}_{t-1}\right) = \\ &= \phi_1 \gamma_0 + \phi_2 \gamma_1 \text{ ou } \gamma_1 = \frac{\phi_1 \gamma_0}{1 - \phi_2}\end{aligned}$$

$$j = 2,$$

$$\begin{aligned}\gamma_2 &= E\left(\tilde{Z}_t \cdot \tilde{Z}_{t-2}\right) = E\left[\left(\phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t\right) \tilde{Z}_{t-2}\right] = \\ &= \phi_1 E\left(\tilde{Z}_{t-1} \cdot \tilde{Z}_{t-2}\right) + \phi_2 E\left(\tilde{Z}_{t-2} \cdot \tilde{Z}_{t-2}\right) + E\left(a_t \cdot \tilde{Z}_{t-2}\right) = \\ &= \phi_1 \gamma_1 + \phi_2 \gamma_0\end{aligned}$$

Genericamente, tem-se:

$$\gamma_j = \phi_1 \gamma_{j-1} + \phi_2 \gamma_{j-2} + \dots + \phi_p \gamma_{j-p}, \quad \forall j > 0$$

Autocorrelação

$$\rho_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_0}, \quad \forall j > 0$$

$$\rho_j = \phi_1 \rho_{j-1} + \phi_2 \rho_{j-2} + \dots + \phi_p \rho_{j-p}, \quad \forall j > 0$$

3.4.5 Modelo autorregressivo e de média móvel – ARMA

Quando um processo estocástico estacionário apresenta características que não permitem sua descrição através de uma parametrização parcimoniosa de um processo puramente autorregressivo ou puramente média móvel, pelo fato de seu comportamento incluir características dos dois tipos de processos, tem-se um processo misto autorregressivo e média móvel de ordem “p” e “q”, simbolicamente definido por ARMA (p, q) e pode ser expresso conforme a Equação (3.48) [17, 41].

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \delta + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.48)$$

Se $\varnothing(B)$ e $\theta(B)$ são os operadores autorregressivos e de médias móveis, respectivamente, tem-se a Equação (3.49).

$$\varnothing(B)Z_t = \delta + \theta(B)a_t \quad (3.49)$$

A Equação (3.48) e a Equação (3.49) podem ser expressas de forma simplificada, através do uso de variáveis centradas na média, conforme Equação (3.50).

$$\tilde{Z}_t = \varnothing_1 \tilde{Z}_{t-1} + \dots + \varnothing_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.50)$$

Ou em função do operador autorregressivo, através da Equação (3.51).

$$\varnothing(B)\tilde{Z}_t = \theta(B)a_t \quad (3.51)$$

Média

$$E(Z_t) = E(\phi_1 Z_{t-1}) + E(\phi_2 Z_{t-2}) + \dots + E(\phi_p Z_{t-p}) + E(\delta) + E(a_t)$$

$$\mu = \phi_1 \mu + \phi_2 \mu + \phi_3 \mu + \dots + \phi_p \mu + \delta + 0$$

$$\mu = \frac{\delta}{(1 - \phi_1 - \phi_2 - \dots - \phi_p)}$$

Autocovariância

$$\gamma_j = \phi_1 \gamma_{j-1} + \phi_2 \gamma_{j-2} + \dots + \phi_p \gamma_{j-p}, \quad \forall j > q$$

$$\gamma_j = \phi_1 \gamma_{j-1} + \phi_2 \gamma_{j-2} + \dots + \phi_p \gamma_{j-p}, \quad \forall j > q$$

Autocorrelação

$$\rho_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_0}, \quad \forall j > 0$$

$$\rho_j = \phi_1 \rho_{j-1} + \phi_2 \rho_{j-2} + \dots + \phi_p \rho_{j-p}, \quad \forall j > q$$

Para $j < q$, o processo misto autorregressivo estacionário-média móvel terá “q” coeficientes de autocorrelação, $\rho_q, \rho_{q-1}, \rho_{j-2} \dots \rho_1$ cujos valores dependerão tanto dos parâmetros do processo média móvel, $\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_p$ como dos “p” parâmetros autorregressivos $\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p$.

Na prática, os modelos ARMA (p, q) conseguem descrever satisfatoriamente as séries de tempo com um número bastante reduzido de parâmetros. Em geral, satisfazem a condição de $p + q \leq 2$.

O processo misto autorregressivo média móvel mais frequentemente encontrado é o ARMA (1,1), obtido através da Equação (3.52) e da Equação (3.53).

Modelo

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \delta + a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (3.52)$$

$$Z_t - \phi_1 Z_{t-1} = \delta + a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (1 - \phi_1 B) Z_t - \phi_1 Z_{t-1} = (1 - \theta_1 B) a_t + \delta \quad (3.53)$$

Média

$$E(Z_t) = \mu = \frac{\delta}{(1 - \phi_1)}$$

Autocovariância

$$\gamma_j = \phi_1 \gamma_{j-1} \quad \forall j \geq 2$$

Autocorrelação

$$\rho_j = \frac{\gamma_j}{\gamma_0}, \quad \forall j > 0$$

$$\rho_j = \phi_1 \rho_{j-1} \quad \forall j \geq 2$$

Observa-se que, pelo fato de se ter um processo misto autorregressivo e de média móvel, o modelo ARMA (1,1) é função de ϕ_1 e θ_1 .

A função de autocorrelação de um modelo ARMA (1,1) acumula características de processos MA (1) e AR (1). Seu gráfico apresenta decréscimo exponencial a partir de ρ_1 . Nesse modelo, o termo média móvel serve apenas para a determinação de ρ_1 . As autocorrelações restantes são determinadas pela parte autorregressiva do modelo [6].

3.4.6 Modelos não estacionários

Se o processo estocástico que gerou a série de observações é invariante com respeito ao tempo, diz-se que o mesmo é estacionário. Se as características do processo se alteram no decorrer do tempo, diz-se que é não estacionário.

Os modelos AR(p), MA(q) e ARMA (p, q) são apropriados para descrever séries estacionárias, isto é, séries que se desenvolvam no tempo ao redor de uma média constante. Muitas séries encontradas na prática não são estacionárias [17, 41].

Várias séries hidrológicas são não estacionárias, mas quando diferenciadas, tornam-se estacionárias. Por exemplo, a série Z_t pode ser não estacionária, mas a série da Equação (3.54) é estacionária.

$$Z_t - Z_{t-1} = (1 - B)Z_t = \Delta Z_t \quad (3.54)$$

Tendo por base um modelo AR (1) em que $(1 - \phi B)\tilde{Z}_t = a_t$, uma série pode apresentar várias formas de não estacionariedade.

A condição de estacionariedade é $|\phi| < 1$. Se $\phi = 1$ obtemos um processo não estacionário $\tilde{Z}_t = \tilde{Z}_{t-1} + a_t$ (passeio casual) e é fácil verificar que se $|\phi| > 1$ o processo “explode”, à medida que t aumenta.

Os modelos estudados são apropriados para representar séries cujo comportamento seja não explosivo, em particular séries que apresentam alguma homogeneidade em seu “comportamento não estacionário”. No caso acima, se $\phi = 1$, Z_t é não estacionário, mas $\Delta\tilde{Z}_t = a_t$ é estacionária.

Séries Z_t tais que, tomando-se um número finito de diferenças, d , tornam-se estacionárias, são chamadas não estacionárias homogêneas, ou ainda, são portadoras de raízes unitárias.

Outras séries não estacionárias, não explosivas, são aquelas que apresentam uma tendência determinística, definida pela Equação (3.55).

$$X_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t \quad (3.55)$$

3.4.7 Modelo autorregressivo integrado de média móvel — ARIMA

Seja um processo estocástico não estacionário, no qual sua não estacionariedade é do tipo homogêneo, isto é, que permite sua transformação em série estacionária pela aplicação do operador diferença. Então, o processo não estacionário homogêneo, descrito pela transformação da série em estacionária e, posteriormente, pela utilização de um processo misto autorregressivo e média móvel, é chamado de processo autorregressivo integrado média móvel de ordem (p,d,q) ou, simplesmente, definido por ARIMA (p, d, q). Representado pela Equação (3.56) [17, 41].

$$\varnothing(B)\Delta^d Z_t = \varnothing(B)W_t = \theta(B)a_t \quad (3.56)$$

A exigência para que o processo ARMA (p, q) seja estacionário está somente na parcela do modelo descrito pelo processo autorregressivo.

Define-se uma série não estacionária homogênea de ordem "d" como aquela onde "d" raízes da Equação característica $\varnothing(B) = 0$ caem sobre a fronteira do círculo unitário e as demais fora dele.

O operador diferença é tal que sua aplicação "d" vezes é capaz de transformar o processo homogêneo evolutivo em estacionário.

Considerando o modelo da Equação (3.57), onde $\theta(B)$ é um operador autorregressivo não estacionário homogêneo e que $W_t = \Delta^d Z_t$ é uma série não estacionária, podemos representar W_t por um modelo ARMA (p, q), através da Equação (3.58).

$$\varnothing(B)\tilde{Z}_t = \theta(B)a_t \quad (3.57)$$

$$\varnothing(B)W_t = \theta(B)a_t \quad (3.58)$$

Se W_t for uma diferença de Z_t , então Z_t é uma integral de W_t , logo Z_t segue um modelo autorregressivo, integrado, de médias móveis, ou modelo ARIMA (p, d, q) da Equação (3.56), onde p e q são as ordens de $\varnothing(B)$ e $\theta(B)$, respectivamente.

É possível descrever a série estacionária W_t unicamente por um processo autorregressivo ou unicamente por um processo média móvel. Assim, se W_t é somente um $AR(p)$, então o modelo $ARIMA(p, d, 0)$ torna-se somente um modelo Autoregressivo Integrado de ordem (p, d) , denotado por $ARI(p, d)$. Semelhantemente, se W_t é descrito somente por um $MA(q)$, então o modelo $ARIMA(0, d, q)$ torna-se um modelo Integrado Média Móvel de ordem (d, q) , definido sinteticamente por $IMA(d, q)$.

Se $d = 0$, o modelo $ARIMA(p, 0, q)$ representa um processo estacionário descrito por um $ARMA(p, q)$.

Em geral, o número de vezes "d" de diferenças que se deve obter para que a série $\Delta^d Z_t$ possa ser representada por um modelo estacionário inversível $ARMA(p, q)$ é, no máximo, igual a dois.

Os casos, nos quais, $d = 1$ e $d = 2$, caracterizam-se por descrever não estacionariedade, quanto ao nível ou quanto à inclinação, conforme Figura 3 e Figura 4 respectivamente, os quais abrangem a grande maioria dos comportamentos de séries hidrológicas.

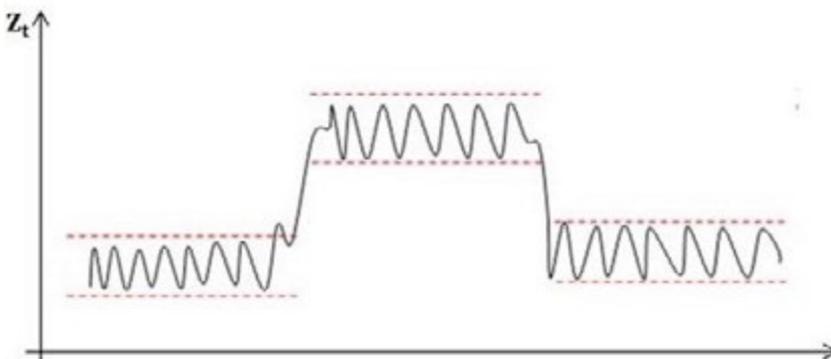


Figura 3.8: série não estacionária quanto ao nível.

Necessita-se de $d = 1$, quando a série não é estacionária, somente porque ocorrem trocas aleatórias em relação ao nível. Ou seja, quando o comportamento da série oscila ao redor de um nível durante certo período e, depois, passa para outro nível, sem que haja troca significativa de direção da série. Nesse caso, diz-se que a série é não estacionária homogênea de grau um ou que apresenta uma tendência

estocástica em relação ao nível da série. Essa situação é visualizada graficamente na Figura 3.8: série não estacionária quanto ao nível.

Utiliza-se $d = 2$, quando a série é não estacionária também quanto à inclinação, ou seja, quando o comportamento da série oscila em uma direção por certo período e, após, muda para outra direção, conforme mostra a Figura 3.9.

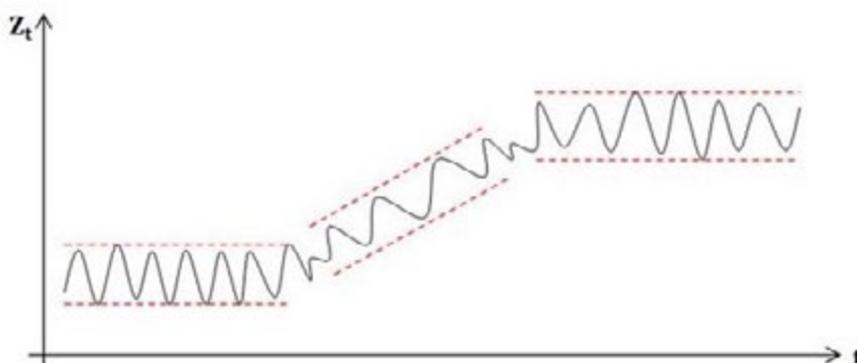


Figura 3.9: série não estacionária quanto ao nível e à inclinação.

Componente de tendência no modelo ARIMA

O modelo ARIMA, da Equação (3.56), é tal que a série não é influenciada pelo nível nem apresenta persistência em relação a alguma direção que possa caracterizar tendências determinísticas.

Significa que $W_t = \Delta^d Z_t$ e apresenta termo constante $\delta = 0$ e, conseqüentemente, possui $E(W_t) = \frac{\delta}{(1-\phi_1-\phi_2-\dots-\phi_p)} = 0$.

A inexistência do termo constante no modelo ARIMA significa que esse é capaz de representar somente aquelas tendências estocásticas que se caracterizam por oscilações com respeito ao nível e/ou à inclinação da série.

Se, no modelo ARIMA, o termo constante for diferente de zero, a média do processo $W_t = \Delta^d Z_t$ será dada por $E(W_t) = \frac{\delta}{(1-\phi_1-\phi_2-\dots-\phi_p)} \neq 0$.

Isso implica que a série Z_t pode possuir a componente tendencial embutida em seu modelo descritivo. Por exemplo, considerando $d = 1$ e $\delta > 0$, tem-se que $\Delta^d Z_t = \sum W_t \implies \sum \sum W_t$, cuja tendência possui uma taxa de crescimento cumulativa

constante no tempo. Se, ao contrário, $\delta < 0$, a tendência será decrescente.

Portanto, o modelo pode ser generalizado pela inclusão de um termo constante, o qual permite a descrição de possível tendência determinística, conforme Equação (3.59).

$$\varnothing(B)\Delta^d Z_t = \theta_0 + \theta(B)a_t. \quad (3.59)$$

Componente sazonal e o modelo ARIMA

Em grande número de séries temporais hidrológicas, é comum o aparecimento de algum comportamento cíclico de curto prazo (de até um ano), chamado de sazonalidade.

Em vista disso, para um tratamento completo sobre séries de tempo, torna-se necessário caracterizar e eliminar essa função cíclica do tempo para se obter a condição de estacionariedade.

Sazonalidade significa uma tendência de repetição de um determinado comportamento da variável que ocorre com certa regularidade no tempo. Séries sazonais são, então, aquelas séries que apresentam variações similares de um espaço de tempo a outro, caracterizando-se por mostrarem alta correlação serial entre observações da variável distanciadas pelo período da sazonalidade, além, é claro, da correlação serial existente entre observações próximas.

O ajuste sazonal necessário requer alguma forma de eliminação dessa componente cíclica de curto prazo, ou seja, de eliminar a correlação entre valores sazonais periodicamente defasados.

Box & Jenkins sugerem a aplicação de um modelo ARIMA sazonal para descrever a série possuidora de correlação serial nos períodos sazonalmente defasados, conforme Equação (3.60).

$$\varnothing(B^S)\Delta_S^D Z_t = \theta_0 + \theta(B^S)a_t \quad (3.60)$$

Onde,

$\varnothing(B^S) = 1 - \varnothing_1 B^S - \varnothing_2 B^{2S} - \dots - \varnothing_P B^{PS}$ é o operador autorregressivo sazonal de ordem "P", estacionário;

$\theta(B^S) = 1 - \theta_1 B^S - \theta_2 B^{2S} - \dots - \theta_P B^{PS}$ é o operador média móvel sazonal de ordem "Q", inversível;

$\Delta_S^D = (1 - B^S)^D$ é o operador diferença sazonal, tal que $\Delta^d Z_t = Z_t - Z_{t-s}$ e “D” indicam o número de diferenças sazonais.

A Equação (3.60) busca descrever somente o comportamento sazonal. Nessa Equação, a a_t não é um processo de ruído branco, pois ainda permanecem as correlações entre observações próximas.

Para descrever essas correlações para os a_t , cuja sazonalidade já está descrita pela Equação (3.60), usa-se o modelo ARIMA. Substituindo a Equação (3.56) na Equação (3.60), obtendo-se a Equação (3.61):

$$\varphi(B)\varphi(B^S)\Delta^d\Delta_S^D Z_t = \theta_0 + \theta(B)\theta(B^S)a_t \quad (3.61)$$

Box & Jenkins denominaram a Equação (51) de modelo ARIMA sazonal multiplicativo de ordem $(p, d, q) \times (P, D, Q)_S$, simbolicamente chamado de SARIMA $(p, d, q) \times (P, D, Q)_S$.

Para obter uma série estacionária, W_t , deve-se tomar “d” diferenças simples e “D” diferenças sazonais da variável Z_t , ou seja, $W_t = \Delta^d \Delta_S^D Z_t$.

O processo de modelagem para séries de tempo que apresentam variações cíclicas de curto prazo é bastante similar àqueles em que a sazonalidade é inexistente. Fundamentalmente, essas diferenças residem em se precisar estabelecer um número maior de parâmetros e identificar valores para a ordem $(p, d, q) \times (P, D, Q)$.

Assim, para se obter “d” e “D”, deve-se utilizar, conjuntamente, os operadores $\Delta^d = (1 - B)^d$ e $\Delta_S^D = (1 - B^S)^D$, de maneira a tornar $W_t = \Delta^d \Delta_S^D Z_t$ estacionária.

A obtenção das ordens “p”, “P”, “q”, “Q” é feita, como no modelo não sazonal, através das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial da série $W_t = \Delta^d \Delta_S^D Z_t$. As funções de autocorrelação e autocorrelação parcial do processo multiplicativo são geradas pelo produto das funções de seus componentes não sazonais e sazonais.

3.4.8 Modelos ARIMA de Previsão de Variáveis Hidrológicas

Modelos estocásticos do tipo ARIMA são muito utilizados na previsão de variáveis hidrológicas. Essa metodologia está assentada na suposição de que a série foi gerada por um processo estocástico que pode ser descrito e caracterizado com base no comportamento passado das observações de níveis de água. Modelos ARIMA

são utilizados na previsão de níveis de água e de vazões em postos fluviométricos de interesse.

Wu e Chau [62] empregaram modelos ARIMA e redes neurais na previsão de vazões em diferentes bacias hidrográficas na China. Lohani et al. [39] utilizaram modelos autorregressivos na previsão de vazões mensais. Nourani et al. [47] desenvolveram modelos autorregressivos de média móvel integrada ARIMA, com sazonalidade agregada, na previsão de séries temporais de variáveis hidrológicas.

No contexto de pesquisas semelhantes desenvolvidas [12, 33, 34, 64] realizaram a previsão de níveis d'água a partir da utilização de técnicas de inteligência artificial. Dentro da análise dos modelos de previsão de nível d'água, pode-se observar o uso constante de técnicas estatísticas aplicadas a utilização de machine learning nas séries temporais com o objetivo de encontrar relações ou obter previsões futuras [19, 48, 54, 63], sendo modelagem matemática baseada em inteligência artificial caracterizada como uma ferramenta computacional robusta e valiosa para uso na hidrologia [65]. No Brasil, Bayer et al. [2] apresentaram um modelo de previsão de vazões para a bacia do rio Potiribu, afluente do rio Ijuí, RS, obtendo resultados satisfatórios para uma antecedência de seis meses. Na Bacia Amazônica, Figueiredo e Blanco [15] desenvolveram um modelo estocástico para a previsão de níveis de água médios mensais, com antecedência de 24 meses, para a bacia do rio Tapajós, PA, utilizando modelos estocásticos do tipo ARIMA, e Figueiredo et al. [15] utilizaram um modelo estocástico do tipo ARIMA na previsão de níveis de água, de condições de navegabilidade e de capacidade de carga de comboios de empurra na bacia do rio Tapajós, PA.

Na aplicação de modelos estocásticos ARIMA, os processos de construção e de ajuste desses modelos está alicerçado no ciclo iterativo proposto na Figura 3.10, sendo composto pelos seguintes estágios [41]:

1. Especificação: uma classe geral de modelo é considerada para a análise dados. Análises gráficas e numéricas foram realizadas;
2. Identificação: o modelo é identificado com base nas funções de autocorrelação e de autocorrelação parcial;
3. Estimação: os parâmetros do modelo identificado são estimados;
4. Verificação: o modelo ajustado é analisado com base nos resíduos, para

verificar se o modelo é adequado aos estudos e se os objetivos propostos foram atingidos;

5. Calibração: o modelo é calibrado por meio da aferição dos critérios de desempenho da função objetivo. É verificado se o modelo é adequado ou não;
6. Validação: o modelo calibrado é validado com base em critérios de desempenho da função objetivo. É validada a verificação de adequabilidade do modelo obtida na fase de calibração.



Figura 3.10: fluxograma da metodologia de Box & Jenkins.

Essa metodologia propõe, quando os valores dos critérios de desempenho da função objetivo não sejam satisfatórios, que o ciclo seja repetido, voltando-se à fase de identificação e repetindo-se o processo quantas vezes forem necessárias até

que o alcance dos objetivos propostos. Um procedimento que é utilizado é o de identificar não só um único modelo, mas sim vários modelos que serão estimados e verificados, no sentido de fornecer o melhor ajuste dos dados e o menor erro quadrático médio na previsão [5].

Séries temporais hidrológicas apresentam comportamento cíclico de curto prazo, comumente de até um ano, chamado de sazonalidade. É necessário caracterizar e eliminar essa função cíclica de tempo para se obter condições de estacionariedade. O ajuste sazonal necessário requer alguma forma de eliminação da componente cíclica de curto prazo, ou seja, de eliminar a correlação entre valores sazonais periodicamente defasados.

Durante o processo de previsão de variáveis hidrológicas, utilizam-se modelos estocásticos do tipo ARIMA sazonal para descrever a série possuidora de correlação serial nos períodos sazonalmente defasados, conforme Equação (3.62).

$$\phi(B) \cdot \Phi(B^s) \cdot (1 - B^S)^D \cdot (1 - B)^d \cdot Y_t = \theta(B) \cdot \Theta(B^s) \cdot a_t \quad (3.62)$$

Em que:

B - é o operador translação, sendo $BZ_t = Z_{t-1}$ ou $B^m Z_t = Z_{t-m}$;

ϕ é o coeficiente autorregressivo não sazonal;

Φ é o coeficiente autorregressivo sazonal;

θ é o coeficiente média móvel não sazonal;

Θ é o coeficiente média móvel sazonal;

$\phi(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)$ é o operador de translação autorregressivo não sazonal de ordem “p”;

$\Phi(B^s) = (1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps})$ é o operador de translação autorregressivo sazonal de ordem “P”;

$\theta(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)$ é o operador de translação média móvel não sazonal de ordem “q”;

$\Theta(B^s) = (1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs})$ é o operador de translação média sazonal de ordem “Q”;

S é o período sazonal da série, geralmente igual a 12 meses ($S=12$);

$\Delta^d = (1 - B)^d$ é o operador diferença não sazonal;

$\Delta_S^D = (1 - B^S)^D$ é o operador diferença sazonal.

A Equação (3.62), após a substituição do operador de translação e do operador diferença, pode ser escrita conforme a Equação (3.64).

$$\begin{aligned} & (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \cdot (1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_P B^{Ps}) \quad (3.63) \\ & \cdot (1 - B^s)^D \cdot (1 - B)^d \cdot Y_t \\ & = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \cdot (1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}) \cdot a_t \end{aligned}$$

A equação característica (3.64), com a substituição e a operacionalização dos valores dos parâmetros p, d, q, P, D e Q de um modelo ARIMA, pode ser escrita em sua forma linear. A título de exemplo, para valores de p=1, d=0, q=0 e P=1, D=1, Q=1, a Equação (3.64) pode ser escrita conforme a Equação (3.64).

$$(1 - \phi_1 B) \cdot (1 - \Phi_1 B^{12}) \cdot (1 - B^{12}) \cdot Y_t = (1 - \Theta_1 B^{12}) \cdot a_t$$

$$(1 - \phi_1 B) \cdot (1 - \Phi_1 B^{12} - B^{12} + \Phi_1 B^{24}) \cdot Y_t = (1 - \Theta_1 B^{12}) \cdot a_t$$

$$(1 - \Phi_1 B^{12} - B^{12} + \Phi_1 B^{24} - \phi_1 B + \phi_1 \Phi_1 B^{13} + \phi_1 B^{13} - \phi_1 \Phi_1 B^{25}) \cdot Y_t =$$

$$= (1 - \Theta_1 B^{12}) \cdot a_t$$

$$Y_t - \Phi_1 Y_{t-12} - Y_{t-12} + \Phi_1 Y_{t-24} - \phi_1 Y_{t-1} + \phi_1 \Phi_1 Y_{t-13} + \phi_1 Y_{t-13} - \phi_1 \Phi_1 Y_{t-25} =$$

$$= a_t - \Theta_1 a_{t-12}$$

$$Y_t = \Phi_1 Y_{t-12} + Y_{t-12} - \Phi_1 Y_{t-24} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 \Phi_1 Y_{t-13} - \phi_1 Y_{t-13} + \phi_1 \Phi_1 Y_{t-25} + a_t -$$

$$-\Theta_1 a_{t-12}$$

$$Y_t - a_t = \Phi_1 Y_{t-12} + Y_{t-12} - \Phi_1 Y_{t-24} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 \Phi_1 Y_{t-13} - \phi_1 Y_{t-13} + \phi_1 \Phi_1 Y_{t-25} -$$

$$-\Theta_1 a_{t-12}$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & \Phi_1 Y_{t-12} + Y_{t-12} - \Phi_1 Y_{t-24} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 \Phi_1 Y_{t-13} \\ & - \phi_1 Y_{t-13} + \phi_1 \Phi_1 Y_{t-25} \\ & - \Theta_1 a_{t-12} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Em que:

$\hat{Y}_t = Y_t - a_t$ é a previsão das observações em um instante t ;

Y_t é a observação em um instante t ;

$a_t = \hat{Y}_t - Y_t$ é o resíduo entre a previsão e a observação em um dado instante t ;

ϕ é o coeficiente autorregressivo não sazonal;

Φ é o coeficiente autorregressivo sazonal;

θ é o coeficiente média móvel não sazonal;

Θ é o coeficiente média móvel sazonal.

Identificação do modelo

A identificação do modelo de previsão de variáveis hidrológicas consistiu na adoção de procedimentos que tiveram como objetivo o estabelecimento de características básicas das séries e a estimativa inicial dos parâmetros envolvidos, com a utilização de funções de autocorrelação e de autocorrelação parcial. Chatfield [9] pontua que a observância dos gráficos da função de autocorrelação ACF e da função de autocorrelação parcial PACF de cada série temporal auxilia na verificação da estacionariedade e na proposição do modelo.

O coeficiente de autocorrelação (ρ_k), definido pela Equação (3.65), tem a função de medir como estão relacionadas as observações de uma série temporal afastadas k períodos entre si.

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (Y_t - \bar{Y})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (3.65)$$

Em que \bar{Y} é a média das observações, k é o número de defasagens das observações e $\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2$ é a variância σ^2 .

Com o cálculo dos coeficientes de autocorrelação ρ_k para diversas defasagens, obteve-se uma série que permitiu construir a função de autocorrelação (*autocorrelation function* — *ACF*) e quando se transporta os valores de ρ_k para um gráfico, pode-se verificar a existência ou não de autocorrelação em uma *lag* k . A sequência de pares (k, ρ_k) é denominada função de autocorrelação (ACF).

O teste de existência de autocorrelação em uma dada *lag* k , utilizando um gráfico de ACF, deu-se com base nos limites críticos da função, com confiança de 95% e definido por $\pm \frac{1,96}{\sqrt{n}}$, onde n é o número de observações da série. Se o valor de ρ_k ultrapassasse esse limite, haveria forte indicação de existência de autocorrelação de defasagem k [60],

Gráficos de uma função de autocorrelação ACF indicam o comportamento e a estacionariedade de uma série temporal. A ACF de uma série estacionária tende a zero rapidamente, apresentando correlações significativas apenas para defasagens pequenas. Para as séries não estacionárias, a ACF tende a zero lentamente, com diversas correlações significativas. Se a série apresentar padrão de sazonalidade, o gráfico apresentará um formato senoidal, oscilando indefinidamente [41]. Para se obter os coeficientes de autocorrelação parcial \varnothing_{kk} , utilizou-se o sistema de equação de Yule-Walker, expresso em sua forma matricial na Equação (3.66).

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 & \dots & \rho_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \dots & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \varnothing_{k1} \\ \varnothing_{k2} \\ \vdots \\ \varnothing_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Em que \varnothing_{kj} é o j -ésimo coeficiente de um modelo autorregressivo AR (k), \varnothing_{kk} é o último coeficiente de autocorrelação parcial e ρ_k é o coeficiente de autocorrelação.

Resolvendo o sistema da Equação (3.66) para $k = 1, 2, 3, \dots, n$ obteve-se os coeficientes de autocorrelação parcial \varnothing_{kk} , conforme Equação (3.67).

$$\begin{aligned} \varnothing_{11} &= \rho_1 \\ \varnothing_{22} &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} \\ \varnothing_{33} &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} \\ \varnothing_{kk} &= \left(\rho_k - \sum_{j=1}^{k-1} \varnothing_{k-1j} \rho_{k-j} \right) \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} \varnothing_{k-1j} \rho_j \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.67)$$

As funções de autocorrelação parcial dos processos Autorregressivos - AR (p), Média Móvel - MA (q) e Modelo Autorregressivo e de Média Móvel - ARMA (p, q) possuem as seguintes características:

- para um processo autorregressivo AR (p), o coeficiente de autocorrelação parcial: $\varnothing_{kk} \neq 0$, para $k \leq p$ e $\varnothing_{kk} = 0$, para $k > p$;
- para um processo de médias móveis MA (q), o comportamento do coeficiente de autocorrelação parcial \varnothing_{kk} é similar ao comportamento de um processo AR (p), onde a PACF é determinada por funções exponenciais ou senoides amortecidas;

- c) para um processo ARMA (p, q), a PACF se comporta como a PACF de um processo MA (q) puro ou ARMA (0, q) ou ARIMA (0, 0, q).

Os gráficos das funções de autocorrelação parcial PACF auxiliaram na confirmação da existência ou não de autocorrelação nas séries temporais de dados de níveis de água. A verificação da existência de autocorrelações significativas de defasagem k deu-se quando os valores dos coeficientes de correlação parcial ϕ_{kk} ultrapassavam os limites críticos da função.

Analogamente aos critérios de análise da ACF, com o cálculo dos coeficientes de autocorrelação parcial ϕ_{kk} para diversas defasagens, a função de autocorrelação parcial (*partial autocorrelation function* – PACF) foi obtida. A sequência de pares (k, ϕ_{kk}) permitiu a construção de gráficos da função de autocorrelação parcial PACF, que evidenciaram a existência ou não de autocorrelação em uma *lag* k .

Estimação do modelo

Com base em Box et al. [5], para os modelos selecionados na fase de identificação e que melhor representaram cada série observada, os parâmetros de cada modelo foram estimados para posterior utilização. A fase de estimação do processo consistiu em encontrar e aferir parâmetros aos modelos, por meio de critérios que levaram em consideração funções de probabilidade condicional e estimadores estatísticos às observações.

Box e Jenkins e Reinsel [5] ressaltaram que, embora os parâmetros autorregressivos sejam lineares, permitindo o uso de métodos simples de estimação, como, por exemplo, o de mínimos quadrados ordinários, os parâmetros média móvel não são lineares, o que torna bastante mais complexos os processos de estimação. Por essa razão, a escolha da técnica usualmente utilizada recai no método de máxima verossimilhança.

A fundamentação do método de máxima verossimilhança consiste em se obter grandezas populacionais que gerem valores que mais se assemelhem aos da amostra observada. Esse método busca estabelecer os valores populacionais hipotéticos que maximizam a verossimilhança da amostra observada. O método consiste em selecionar estimadores que maximizam a probabilidade de se obter a amostra realmente observada [17].

A estimação dos parâmetros dos modelos ARIMA utilizados na previsão de níveis de água foi feita com base no método da máxima verossimilhança, por

meio dos critérios de Akaike Information Criterion (AIC) e de Akaike Information Criterion Corrected (AICC), propostos por Akaike (1974), e do critério de Bayesian Information Criteria (BIC), proposto por Schwarz [55]. Esses critérios são expressos através das Equações (3.68), (3.69) e (3.70).

$$AIC = -2\log\hat{L} + 2.k \quad (3.68)$$

$$AICC = -2\log\hat{L} + \frac{2(p+q)T}{T-p-q-1} \quad (3.69)$$

$$BIC = -2\log\hat{L} + (p+q)\log T \quad (3.70)$$

Em que T é o número de observações, $k = p + q + 1$, se o modelo tiver um termo constante e $k = p + q$ para os demais modelos. \hat{L} é a verossimilhança maximizada.

Segundo Granger e Newbold (1986), o AIC superestima assintoticamente a ordem do modelo, propondo, na maioria dos casos, modelos superparametrizados. O AICC é uma versão corrigida do AIC que incorpora uma correção de viés para amostras finitas, possuindo uma penalidade mais forte para modelos de ordem elevada. O BIC é um critério consistente, de forma que ele fornece estimativas de p e q que convergem em probabilidade para os valores verdadeiros à medida que T tende a infinito. O melhor modelo é aquele que apresentar o menor AIC, AICC e/ou o menor BIC [7].

Calibração e validação do modelo

A calibração de um modelo hidrológico é o processo através do qual seus parâmetros são ajustados, tendo como base a minimização ou maximização de coeficientes de desempenho de uma função objetivo. A calibração dos modelos ARIMA utilizados na previsão de variáveis hidrológicas consiste na utilização de parte das observações de uma série de dados para aferir os parâmetros de modelos pré-selecionados na fase de identificação.

Analogamente à calibração, a validação dos modelos consistiu no processo através do qual os parâmetros dos modelos, ajustado na calibração, foram aferidos com período de dados diferentes daqueles utilizados na calibração. Para a calibração

e validação do modelo de previsão de variáveis hidrológicas, a função objetivo teve como coeficientes de desempenho o coeficiente de determinação R^2 ou de Nash e Sutcliffe e o RMSE (*Root Mean Square Error*) ou raiz do erro relativo quadrático médio.

Os critérios de desempenho de Nash Sutcliffe — R^2 e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) são dados pelas Equações (3.71) e (3.72), respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (3.71)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right)^2}{n}} \quad (3.72)$$

Em que n é o número de observações, Y_t é a observação no instante t , \hat{Y}_t é a observação simulada e \bar{Y} é a média das n observações.

O coeficiente de determinação R^2 mede a qualidade do modelo em relação à sua capacidade de estimar corretamente valores da variável resposta \hat{Y}_t . Indica quanto da variância de \hat{Y}_t é explicada pela variância de Y_t , ou descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Quanto mais preciso for o modelo, mais próximo de 1 deverá ser o valor de R^2 .

O RMSE é uma indicação do quanto as observações simuladas \hat{Y}_t variam em relação às observações de referência Y_t . Tem sempre valor positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores simulados.

O RMSE fornece uma caracterização das estimativas em relação à dispersão dos valores, ou seja, mostra o grau de espalhamento entre valores preditos e observados. No presente estudo, para aferir o desempenho do modelo na calibração e na validação de forma não correlacionada, fez-se necessária a adoção do RMSE que é um critério de desempenho adimensional e independente da escala das vazões e dos níveis d'água observados.

Tendência e sazonalidade

Modelos de previsão de variáveis hidrológicas têm por base a utilização de séries temporais de variáveis hidrológicas homogêneas, cuja caracterização e comportamento temporal pressupôs a verificação de tendência nas séries. A análise das

séries teve por finalidade a identificação de fatores que influenciam a conformação da série, podendo revelar a presença de várias componentes, como: tendência, flutuação cíclica, variações sazonais e variações aleatórias ou irregulares.

A tendência é a componente que indica a disposição do movimento dos dados em vários períodos, ou seja, evidencia o comportamento da série em inúmeros períodos sazonais. A flutuação cíclica é a parte da série temporal que apresenta certo grau de regularidade nas variações ao longo do tempo. A sazonalidade se assemelha a fenômenos cíclicos, quando os dados são registrados em curto prazo. Variações irregulares são decorrentes de processos que variam de forma aleatória e referem-se a efeitos extremos como enchentes ou secas e a demais fatores que não ocorrem com regularidade [41].

Sendo $Z_t = \{Z(t), t \in T\}$ as observações de uma série temporal, pode-se escrever essas observações Z_t como sendo a soma das componentes de tendência, de sazonalidade e de aleatoriedade, conforme a Equação (3.73).

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (3.73)$$

Em que T_t representa a tendência e S_t a sazonalidade e a_t é uma componente aleatória. Podendo a_t ser um ruído branco se $E(a_t) = 0, \forall t, E(a_t^2) = \sigma_a^2, \forall t, E(a_t a_s) = 0, s \neq t$, ou seja, média zero e variância constante.

A variância σ_a^2 indica o grau de variabilidade das observações e dos resíduos das séries de vazões e de níveis d'água ao longo do tempo, ou seja, representa a dispersão estatística dos dados, indicando quão longe em geral seus valores se encontram do valor esperado.

A tendência pode ser entendida como aumento ou diminuição gradual das observações ao longo do período. A sazonalidade mostrou flutuações ocorridas em períodos menores ou iguais há doze meses e a componente aleatória mostrou oscilações aleatórias irregulares. A suposição usual é a de que a_t seja uma série puramente aleatória ou um ruído branco independente, isto é, tenha média igual a zero e variância constante.

A sazonalidade é interpretada como sendo a representação de movimentos sistemáticos causados por fenômenos não hidrológicos, como, por exemplo, mudanças climáticas. A componente irregular relaciona-se com movimentos imprevistos, gerados aleatoriamente dentro de uma série [56]. Em séries temporais que representam fenômenos hidrológicos, o principal interesse em considerar um modelo do tipo da

Equação (3.11) é o de se estimar S_t e de se construir uma série livre de sazonalidade ou sazonalmente ajustada. Se \widehat{S}_t for uma estimativa de S_t , $Z_t^{\text{SA}} = Z_t - \widehat{S}_t$ será a série sazonalmente ajustada.

Estima-se a tendência através de \widehat{T}_t . Pode-se obter uma série ajustada para tendência ou livre de tendência. A série ajustada será $Z_t^{\text{SA}} = Z_t - \widehat{T}_t$. Se a série temporal em análise tiver componentes de tendência e de sazonalidade, a série temporal ajustada será expressa por $Z_t^{\text{SA}} = Z_t - \widehat{T}_t - \widehat{S}_t$.

A análise e verificação de tendência na série temporal T_t foi ajustada com uma função polinomial, Equação (3.74).

$$T_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \dots + \beta_m t^m \quad (3.74)$$

Em que o grau do polinômio é bem menor que o número de observações N . Para se estimar os parâmetros β_j , usa-se o método dos mínimos quadrados [14].

Segundo Draper e Smith [14], na análise de modelos hidrológicos é muito utilizado o processo de médias móveis para suavização das séries temporais. A suavização com médias móveis consiste em usar um filtro linear, ou seja, uma operação que transforma a série Z_t na série Z_t^* através da Equação (3.75).

$$Z_t^* = \sum_{j=-n}^n c_j Z_{t+j} \quad (3.75)$$

Em que c_j é um conjunto de pesos.

A série transformada, após a aplicação do filtro linear, para $t = n + 1, \dots, N - n$ é da forma da Equação (3.76).

$$Z_t^* = \sum_{j=-n}^n c_j Z_{t+j} = \sum_{j=-n}^n c_j [T_{t+j} + a_{t+j}] = \sum_{j=-n}^n c_j T_{t+j} + \sum_{j=-n}^n c_j a_{t+j} \quad (3.76)$$

O caso mais simples é aquele em que $c_j = 1 / (2n + 1)$, $\forall j$, conforme Equação (3.77):

$$Z_t^* = \frac{1}{(2n + 1)} \sum_{j=-n}^n Z_{t+j} \quad (3.77)$$

Quando se trabalha com séries temporais não estacionárias homogêneas, como é o caso da grande maioria das séries de níveis d'água e de vazão, visando ao emprego

de modelos autorregressivos do tipo ARIMA, faz-se necessária a transformação da série não estacionária em estacionária.

O método das diferenças transforma uma tendência de crescimento ou decréscimo da série em constante, eliminando a tendência linear existente. Assim, considerando a tendência T_t da Equação (3.78), a qual é representada por um polinômio, e aplicando um número apropriado de diferenças para torná-la constante, obtém a Equação (3.79).

$$T_t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (3.78)$$

$$\Delta T_t = T_t - T_{t-1} = (\beta_0 + \beta_1 t) - [\beta_0 + \beta_1(t-1)] = \beta_1 \quad (3.79)$$

Tendo por base o modelo da Equação (64), com d diferenças obtém-se a diferenciação da Equação (3.80).

$$\Delta^d Z_t = \Delta^d T_t + \Delta^d a_t \quad (3.80)$$

Antes de aplicar qualquer procedimento para a estimação da tendência da série, deve-se, primeiramente, verificar se existe ou não componente de tendência T_t na série e se existem outras componentes, como a sazonalidade S_t . Se existir componente de sazonalidade S_t na série, além da componente de tendência T_t , esta deve ser eliminada antes de testar a presença T_t . Tal regra deve também ser empregada para o caso em que se quer testar a presença S_t , ou seja, tem-se que eliminar, antes, T_t , para poder estimar S_t [41].

Após a análise dos gráficos das séries, testes de hipóteses estatísticas devem ser aplicados para verificar a existência de tendência na série. Os testes de hipóteses a serem aplicados nas séries podem ser aplicados em dois momentos: antes da estimação de T_t ou depois que se obtém uma estimativa de T_t .

É aconselhável estabelecer se existe componente de tendência na série antes de aplicar qualquer procedimento para sua estimação. Igualmente, é importante ressaltar que se existe outra componente na série, como a sazonalidade S_t , além de T_t , tem-se de eliminá-la antes de testar a presença de T_t . Esta observação também vale para o caso em que se queira testar a presença S_t , ou seja, elimina-se primeiramente a tendência T_t , para, posteriormente, testar a presença S_t .

Segundo Morettin e Toloi [42], a verificação da componente de tendência nas séries temporais pode ser feita com a utilização de testes não paramétricos. Os principais testes propostos são:

i) Teste do sinal – Cox Stuart

Também conhecido como teste dos sinais, é aplicado para se verificar a presença da componente tendência T_t na série. Neste teste, os elementos da série temporal são agrupados em pares $(Z_1, Z_{1+c}), (Z_2, Z_{2+c}), \dots, (Z_{n-c}, Z_N)$, onde $c = \frac{N}{2}$, se N for par e $c = \frac{N+1}{2}$, se N for ímpar.

Para cada par (Z_i, Z_{i+c}) , é associado o sinal + (positivo) se $Z_i < Z_{i+c}$ e o sinal – (negativo) se $Z_i > Z_{i+c}$, eliminando-se os empates.

Seja n o número de pares onde $Z_i \neq Z_{i+c}$.

Para a verificação da existência ou não de tendência, são testadas as hipóteses H_0 e H_1 , conforme segue abaixo, sendo H_0 quando não existe tendência e H_1 quando existe tendência, onde P é a probabilidade de ocorrência de cada hipótese.

$$H_0 : P(Z_i < Z_{i+c}) = P(Z_i > Z_{i+c}), \forall_i : \text{não existe tendência};$$

$$H_1 : P(Z_i < Z_{i+c}) \neq P(Z_i > Z_{i+c}), \forall_i : \text{existe tendência}.$$

ii) Teste baseado no coeficiente de correlação de Spearman

O coeficiente de Spearman mede a intensidade da relação entre variáveis ordinais. Varia entre -1 e 1. Quanto mais próximo estiver destes extremos, maior será a associação entre as variáveis. O sinal negativo da correlação significa que as variáveis variam em sentido contrário, isto é, as categorias mais elevadas de uma variável estão associadas a categorias mais baixas da outra variável (CONOVER, 1980).

Este coeficiente é o mais antigo e o mais conhecido para variáveis mensuradas em nível ordinal, chamado também de Coeficiente de Correlação por Postos de *Spearman*, designado por ρ , através da Equação (3.81).

$$\rho = 1 - \frac{6T_3}{N(N^2 - 1)} \quad (3.81)$$

Onde T_3 , conforme Equação (3.82), é a diferença entre as ordenações e N é o número de pares de ordenações.

$$T_3 = \sum_{t=1}^N [R_t - t]^2 \quad (3.82)$$

Segundo Chatfield [9], empiricamente, a presença da componente de sazonalidade nas séries hidrológicas é uma constante, tal componente é entendida como sendo flutuações ocorridas ao longo de um determinado período, ou seja, observações que se repetem a cada k elementos, devido a fatores exógenos.

Nas séries hidrológicas, aquelas em que vazões, precipitações e variações fluviométricas são analisadas. Chatfield [9] ressalta que a componente sazonal capta características da série que ocorrem regularmente dentro do período de um ano, isto é, os fenômenos sazonais ocorrem regularmente em período de no máximo doze meses. Assim, observa-se, no período anual, que ocorrem relações entre meses sucessivos e entre observações para o mesmo mês, em anos consecutivos, ou seja, as séries sazonais apresentam alta correlação em *lags* sazonais.

A observação Z_t correspondente a um determinado mês de um dado ano é relacionada com os demais meses deste ano, bem como com o referido mês dos demais anos. Assim, Z_t é relacionada com Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots , mas também com Z_{t-s}, Z_{t-2s}, \dots . Isto implica que séries sazonais são caracterizadas por apresentarem correlação alta em *lags* sazonais, isto é, *lags* que são múltiplos do período s .

Segundo Morettin et al. [41], os procedimentos mais comuns para se estimar a sazonalidade são os métodos de regressão, que se caracterizam por uma sazonalidade determinística e os métodos estocásticos, que se fundamentam na análise de elementos pretéritos.

A base da análise de sazonalidade em séries temporais consiste em ajustar uma série para a componente sazonal, ou seja, estimar S_t e subtrair da série estimada Z_t da Equação (64).

O procedimento de ajustamento sazonal consiste nas etapas seguintes: obter estimativas \hat{S}_t de S_t ; e calcular.

Em modelos aditivos, a série subtraída da sazonalidade é dada pela Equação (3.83).

$$Z_t^{SA} = Z_t - \hat{S}_t \quad (3.83)$$

Em modelos multiplicativos, a série subtraída da sazonalidade é dada pela Equação (3.84).

$$Z_t = T_t \cdot S_t \cdot a_t \quad (3.84)$$

A série sazonalmente ajustada é dada pela Equação (3.84). Neste sentido, e importante se considerar procedimentos de ajustamento sazonal, o que é normalmente sugerido na literatura.

Houve, no passado, um interesse em se ter dados disponíveis sobre fenômenos importantes, para os quais a variação sazonal foi removida. As razões relacionam-se, geralmente, com a ideia de que nossa habilidade em reconhecer, interpretar ou reagir a movimentos importantes não sazonais, em uma série (tais como pontos de mudança e outros eventos cíclicos, novos padrões emergentes, ocorrências não esperadas para as quais causas possíveis são procuradas), é perturbada pela presença dos movimentos sazonais.

A tendência \hat{T}_t da Equação (3.85) é estimada por meio de um filtro linear.

$$\hat{T}_t = \sum_{j=-n}^n c_j Z_{t+j}, \quad t = n+1, \dots, N-n. \quad (3.85)$$

Assim sendo, a série $Z_t - \hat{T}_t$ estimará, então, a série residual a_t . Para estimar a componente sazonal, o procedimento utilizado é semelhante ao adotado para a estimação da tendência. Assim, tendo por base o modelo da equação (3.25) e a tendência sendo estimada através da equação (3.37), pode-se estimar a sazonalidade através da Equação (3.86).

$$Y_t = Z_t - \hat{T}_t \quad (3.86)$$

O método de médias móveis é apropriado quando se tem uma série temporal cuja componente sazonal varia com o tempo, ou seja, para séries cuja sazonalidade é estocástica, ou quando apresenta padrão sazonal constante.

Dado que a tendência é estimada pela equação (3.37), as componentes sazonais são estimadas num segundo estágio. A partir da equação (3.38), obtém-se a sazonalidade média mensal através da Equação (3.87).

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} Y_{ij} = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \bar{Y}_j, \quad j = 1, \dots, 12, \quad (3.87)$$

A série livre de sazonalidade, para o modelo aditivo, é dada pela Equação (3.88).

$$Z_t^{\text{SA}} = Z_t - \widehat{S}_t \quad (3.88)$$

Onde $\widehat{S}_j = \bar{Y}_j - \bar{Y}$ é a componente sazonal estimada.

Para o modelo multiplicativo, a série livre de sazonalidade é dada pela Equação (3.89).

$$Z_t^{\text{SA}} = Z_t / \widehat{S}_t \quad (3.89)$$

Em que $\widehat{S}_j = \frac{\bar{Y}_j}{\bar{Y}}$ é a componente sazonal estimada.

Para o modelo aditivo, não é necessário estimar T_t para obter os \widehat{S}_j . Ou seja, é possível obter as médias \widehat{Y}_j diretamente dos desvios das médias mensais da série em relação à média geral da série, mais um termo de correção dependendo somente do primeiro e últimos doze termos da série.

A componente sazonal também pode ser constatada pela análise visual do gráfico da série. Para se confirmar a existência desta, aplica-se um teste de sazonalidade. Dentre os testes de sazonalidade, destacam-se o teste de *Fridman*, o teste de *Kruskal-Wallis*, o teste F para análise de variância e o teste de Fisher. Uma forma de se detectar a existência da sazonalidade é por meio da análise do gráfico do periodograma, obtido através da Equação (3.90).

A análise espectral é fundamental em áreas onde o interesse básico é a procura de periodicidade dos dados. Essa análise é feita no domínio da frequência, portanto, é baseada em modelos não paramétricos. Pode-se definir o periodograma do processo estacionário a_t através da Equação (3.90).

$$I_p(f_i) = \frac{2}{n} \left[\left(\sum_{t=1}^n a_t \cos \frac{2\pi i}{n} t \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^n a_t \sin \frac{2\pi i}{n} t \right)^2 \right] \quad (3.90)$$

Com $0 < f_i < \frac{1}{2}$ e $t = 1, 2, \dots, n$ em que $I(f_i)$ indica a intensidade da frequência f_i . A periodicidade pode ser verificada observando-se a existência de picos na frequência $f_i = \frac{i}{n}$ o que indica uma periodicidade de $\frac{1}{f_i}$.

No gráfico do periodograma, a frequência f_i é representada no eixo das ordenadas e a intensidade da frequência $I(f_i)$ no das abscissas. Geralmente, o pico de maior intensidade é o componente periódico. Caso exista mais de um pico, aplica-se o teste de Fisher, para verificar se o pico é um componente periódico genuíno.

O teste de Fisher é utilizado para confirmar a existência de sazonalidade em uma série temporal. Esse teste utiliza os valores do periodograma e detecta grandes periodicidades.

O procedimento para aplicar o teste é o seguinte:

- i) traça-se o periodograma, por meio da frequência padrão dada pela Equação (81);
- ii) toma-se a maior periodicidade encontrada no periodograma, $\max(I_p)$;
- iii) calcula-se a estatística g através da Equação (3.91).

$$g = \frac{\max(I_p)}{\sum_{p=1}^{\frac{N}{2}} I_p} \quad (3.91)$$

Calcula-se a estatística do teste de Fisher, Z_α , dada pela Equação (3.92).

$$Z_\alpha = \left(\frac{\alpha}{n}\right)^{\frac{1}{(n-1)}} + 1 \quad (3.92)$$

Em que $n = \frac{N}{2}$ e α é o nível de significância.

- i) Testa-se a hipótese de nulidade:

$$H_0 : P(Z_i < Z_{i+c}) = P(Z_i > Z_{i+c}), \forall_i : \text{não existe tendência};$$

Se $g > Z_\alpha$, rejeita-se H_0 , isto é, existe sazonalidade no período analisado.

3.5 Modelos RNAs de Previsão de Variáveis Hidrológicas

Modelos estocásticos que utilizam Redes Neurais Artificiais (RNAs) do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), com algoritmos de treinamento do tipo *Backpropagation* (BP), são comumente utilizados em processos de transformação de chuva em

vazão e na previsão de variáveis hidrológicas, principalmente vazões em usinas hidrelétricas, com a utilização de dados singulares ou combinados. Modelos RNAs-MLP/BP vêm sendo sugeridos na previsão de vazões afluentes a aproveitamento hidroenergéticos (AHE) devido à sua capacidade de tratar relações de entrada e de saída de dados não lineares com precisão, pois a transformação de chuva em vazão é um dos mais complexos fenômenos hidrológicos característicos de uma bacia hidrográfica, em função da grande variação temporal e espacial dos elementos do ciclo hidrológico [44].

Modelos têm sido utilizados com bastante sucesso na previsão de vazões, a partir de dados de precipitação, conjugados, ou não, com outras variáveis hidrológicas [44, 44, 35]. Khan et al. [28] utilizaram modelos RNAs para prever vazões e níveis de água do rio Ramganga, Índia. Phan and Nguyen [45] analisaram o rio Vermelho, na Ásia, sob a ótica da estocástica a partir de modelos estatísticos para previsão do nível da água. Com a adoção do direcionamento da abordagem em questão, entender a estruturação e o mecanismos de previsão de modelos RNAs-MLP/BP faz-se necessário. Os delineamentos e itens seguintes apresentarão o detalhamento de parte da metodologia a ser utilizada no módulo de previsão de vazões.

Na análise e observância dos processos hidrológicos, modelos do tipo RNA-MLP/BP detectam tendências que são muito complexas para serem percebidas. Assim, em vez de usar abordagens algorítmicas, esses modelos RNAs processam informações de forma similar ao sistema nervoso biológico. Estas ferramentas aprendem por meio de exemplos selecionados cuidadosamente, tornando-se muito eficazes para a solução de sistemas não lineares e hay na adaptação a circunstâncias [21].

3.5.1 Neurônio artificial

Um neurônio artificial é um modelo simplificado e simulado do neurônio real. Suas características básicas são a adaptação e a representação de conhecimentos baseados em conexões. O neurônio artificial é o elemento principal de processamento de uma RNA, sendo composto de três elementos básicos:

- a) sinapses ou pesos sinápticos;
- b) somador ou junção somatória; e

c) função de ativação.

Na Figura 3.11, é apresentado um modelo genérico de um neurônio artificial e de sua unidade de processamento.

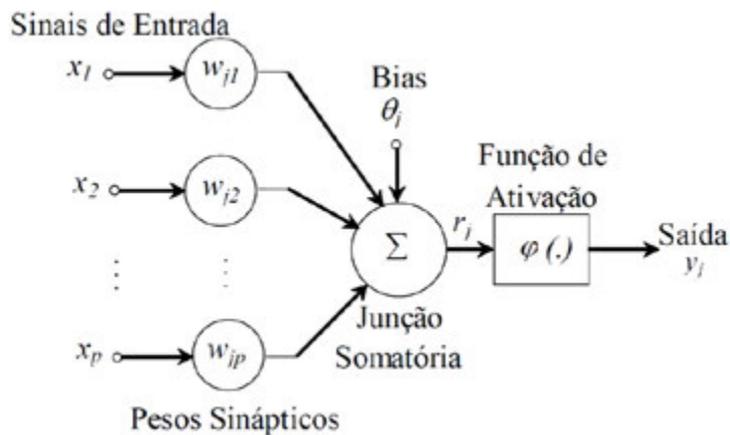


Figura 3.11: Neurônio artificial. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

A conectividade entre a fonte do sinal e o neurônio é estabelecida por pesos sinápticos, que amplificam, com a utilização de um fator de peso w_{ij} , um sinal de entrada x_i vindo de entradas externas ou de outros neurônios. A conexão sináptica ou peso sináptico w_{ij} será positivo se a sinapse pertinente for excitatória e negativo se ela for inibitória.

A junção somatória r_j executa o somatório dos sinais produzidos pelo produto entre os sinais de entrada x_i e os pesos de sinápticos de conexão w_{ij} de cada neurônio, conforme mostra a Equação (3.93).

$$r_j = \sum_{i=1}^p w_{ij}x_i + \theta_j \quad (3.93)$$

Em que θ_j é um *bias* aplicado externamente que tem o efeito de incrementar ou reduzir o sinal da junção somatória.

A função de ativação $\varphi()$ é uma função que determina o nível de ativação do neurônio artificial, limitando a amplitude do sinal de saída do neurônio para uma

faixa de valores finitos. Essa função recebe o sinal da junção somatória e calcula o estímulo interno ou nível de ativação do neurônio, produzindo uma saída, através de uma relação que pode ser linear ou não linear. A amplitude de saída, limitada pela função de ativação, encontra-se na faixa de [0 1], ou alternadamente [-1 1].

Tendo por base uma função de ativação $\varphi()$, a saída do neurônio y_j pode ser calculada pela Equação (3.94).

$$y_j = \varphi \left(\sum_{i=1}^p w_{ij} x_i + \theta_j \right) \quad (3.94)$$

Em que $\varphi()$ é a função de ativação, w_{ij} são os pesos de sinápticos, x_i são os sinais de entrada e θ_j é um *bias* aplicado externamente.

A função de ativação, geralmente utilizada com dois propósitos: limitar a saída do neurônio e introduzir não linearidade no modelo, é também conhecida como função de transferência e os quatro principais tipos são:

- a) Limiar: definida pela Equação (3.95) e representada graficamente pela Figura 3.12.

$$\varphi(r_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } r_j \geq 0 \\ 0, & \text{se } r_j < 0 \end{cases} \quad (3.95)$$

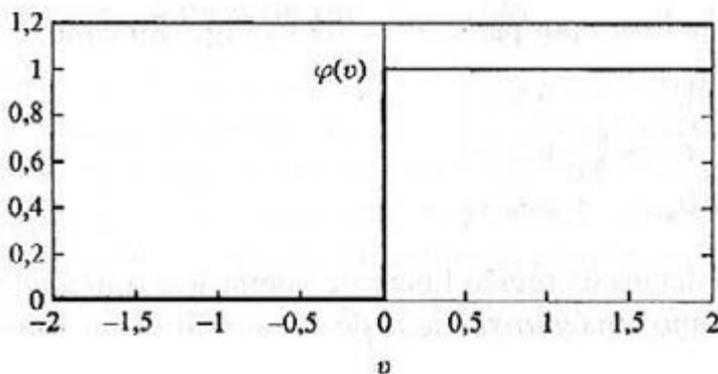


Figura 3.12: função de ativação Limiar. Fonte: Adaptado de Haykin (2005) [20]

- b) Linear por Partes: definida pela Equação (3.96) e representada graficamente pela Figura 3.13.

$$\varphi(r_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } r_j \geq \frac{1}{2} \\ r_j, & \text{se } \frac{1}{2} > r_j > -\frac{1}{2} \\ 0, & \text{se } r_j \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.96)$$

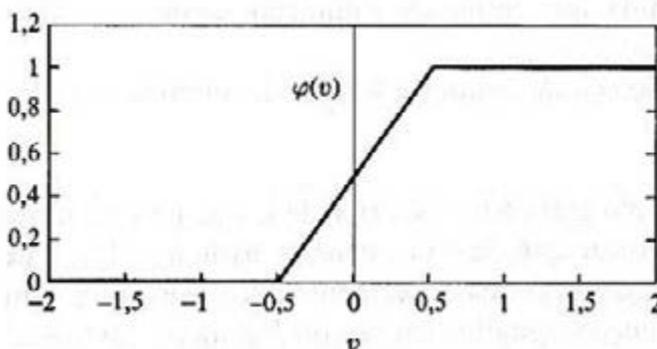


Figura 3.13: função de ativação Linear por Partes. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

- c) Sigmoides Logísticas: definida pela Equação (3.97) e representada graficamente pela Figura 3.14.

$$\varphi(r_j) = \frac{1}{1 + e^{-ar_j}} \quad (3.97)$$

Em que a é o parâmetro de declive da função e r_j é a junção somatória. A saída está limitada ao intervalo $[-1 \ 1]$.

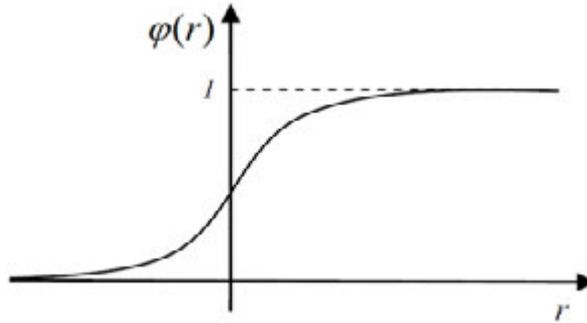


Figura 3.14: função de ativação Sigmoide Logística. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

- d) Sigmoide Tangente Hiperbólica: definida pela Equação (3.98) e representada graficamente pela Figura (3.15).

$$\varphi(r_j) = \frac{1 - e^{-ar_j}}{1 + e^{-ar_j}} \quad (3.98)$$

Em que a é o parâmetro de declive da função e r_j é a junção somatória. A saída está limitada ao intervalo $[-1 \ 1]$.

Segundo Haykin (2005)[20], em termos básicos, a diferenciabilidade é a única exigência que a função de ativação deve satisfazer. Um exemplo de uma função de ativação não linear, continuamente diferenciável, normalmente utilizada nos perceptrons de múltiplas camadas, é a função sigmoide, em função de sua diferenciabilidade, que é uma característica importante da teoria de aprendizado das redes neurais.

Uma função $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ é chamada de sigmoide positiva se o critério da Equação (90) for satisfeito. Logo, uma função sigmoide positiva é representada pela Equação (91) e representada graficamente pela Figura 11.

$$\begin{cases} \lim_{r \rightarrow \infty} g(r) = 0 \text{ (não simétrico)} \\ \lim_{r \rightarrow -\infty} g(r) = -1 \text{ (antissimétrico)} \\ \lim_{r \rightarrow \infty} g(r) = 1 \end{cases} \quad (3.99)$$

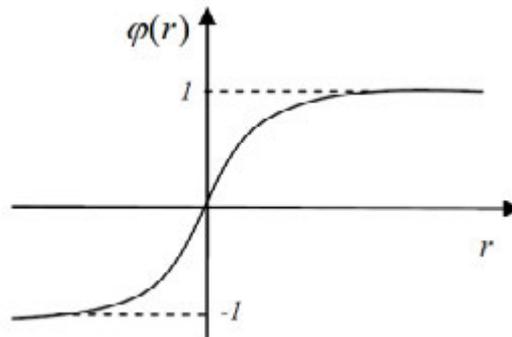


Figura 3.15: função de ativação Sigmoide Tangente. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

$$g(x) = \begin{cases} 1 - e^{-ax}, & \text{se } x \geq 0 \\ e^{ax} - 1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (3.100)$$

Em que a é o parâmetro de declive da função. A saída é limitada no intervalo $[-1 \ 1]$.

3.5.2 Perceptron Multicamada — MLP

Segundo Haykin (2005), os perceptrons de múltiplas camadas têm sido aplicados com sucesso para resolver diversos problemas, por meio do seu treinamento de forma supervisionada com um algoritmo muito popular conhecido como algoritmo de retropropagação de erro (*error back-propagation*). Este algoritmo é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro.

A aprendizagem por retropropagação de erro consiste em dois passos através de diferentes camadas da rede, sendo: a propagação, que é um passo para frente e a retropropagação, que é e um passo para trás.

A rede Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) sendo a rede neural mais comumente utilizada e sendo considerada uma aproximadora universal, apresenta como características um algoritmo de aprendizado supervisionado com retropropagação

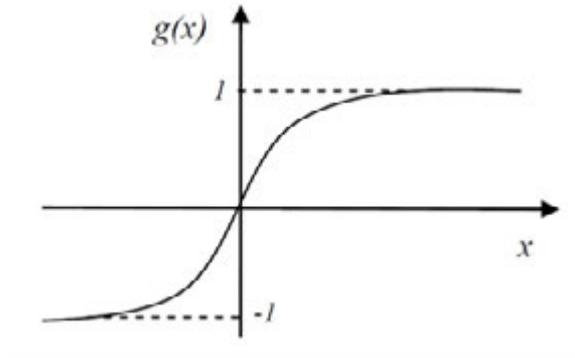


Figura 3.16: função de ativação Sigmoide Positiva. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

de erro (*back-propagation*), que é considerado um marco no desenvolvimento das redes neurais. Na Figura 3.17, é apresentada uma arquitetura básica de uma RNA do tipo MLP.

As RNAs do tipo MLP estão constituídas de três partes: a primeira parte é denominada camada de entrada (*input layer*), a qual é constituída de um conjunto de unidades sensoriais; a segunda parte é constituída de uma ou mais camadas escondidas (*hidden layers*); e a terceira parte é constituída de uma camada denominada camada de saída (*output layer*). Com exceção da camada de entrada, todas as outras camadas estão constituídas por neurônios, que implicam em um esforço computacional.

Tendo como referência a RNA do tipo MLP da Figura 3.17 com apenas uma camada escondida, cada neurônio na camada escondida é obtido através da Equação (3.101).

$$s_j = f \left(\sum_{i=1}^p w_{ij} x_i + \theta_j \right) \quad (3.101)$$

Em que x_i é a i -ésima entrada para a rede, w_{ij} é o peso da conexão do neurônio de entrada i para o neurônio escondido j , θ_j é o bias do j -ésimo neurônio escondido e $f(\cdot)$ é a função de ativação do neurônio.

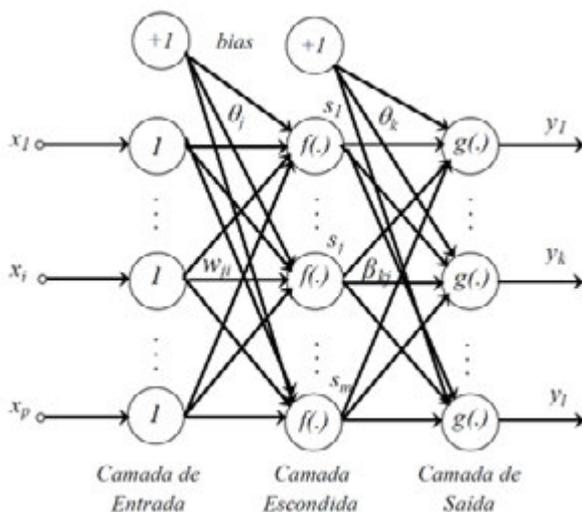


Figura 3.17: rede Perceptron Multicamadas — MLP. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

Para a RNA do tipo MLP da Figura 12, considerando a camada de saída, cada neurônio na camada de saída é obtido através da Equação (3.102).

$$y_k = g \left(\sum_{j=1}^m \beta_{kj} s_j + \theta_k \right) \quad (3.102)$$

Em que β_{kj} é o peso da conexão do neurônio escondido j com o neurônio de saída k , y_k é a k -ésima saída da rede, θ_k é o bias da k -ésima saída e $g(\cdot)$ é a função de ativação do neurônio.

A rede Perceptron Multicamadas da Figura 12 é uma generalização da rede Perceptron proposta por Rumelhart, com a adição de uma ou mais camadas intermediárias, também conhecidas como camadas escondidas. Desta forma, os neurônios da rede neural serão dispostos em camadas, a saber:

- a) Camada de Entrada: recebe os dados de entrada e não realiza

nenhum processamento, servindo apenas para distribuí-los na camada subsequente;

- b) Camada Escondida: onde os neurônios realizam o processamento dos dados, por meio de regras de propagação e funções de ativação sigmoideal (logística ou tangente hiperbólica), suas entradas e saídas permanecem dentro do sistema; e
- c) Camada de Saída: responsável pela resposta da rede e representa a variável desejada. Os neurônios também possuem uma função de ativação (logística ou tangente hiperbólica) ou uma simples função linear.

Ao se apresentar um determinado padrão de entrada e o respectivo padrão de saída a uma MLP não treinada, uma saída aleatória é produzida. A partir da saída produzida pela rede e calculado um erro, representando a diferença entre o valor obtido e o desejado. O objetivo do treinamento consiste em reduzir continuamente o erro até um determinado valor aceitável. Cada camada tem seus pesos ajustados de modo a minimizar o erro da rede.

3.5.3 Aprendizado — Algoritmo *Backpropagation*

Segundo Haykin (2005) [20] a propriedade que é de importância primordial para uma rede neural é a sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente e de melhorar o seu desempenho através da aprendizagem. A melhoria do desempenho ocorre com o tempo de acordo com alguma medida preestabelecida. Uma rede neural aprende acerca do seu ambiente através de um processo iterativo de ajustes aplicados a seus pesos sinápticos e níveis de bias. Idealmente, a rede se torna mais instruída sobre o seu ambiente após cada iteração do processo de aprendizagem. A aprendizagem de uma rede neural é um processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede neural são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente no qual a rede está inserida. O tipo de aprendizagem é determinado pela maneira pela qual a modificação dos parâmetros ocorre [40].

De acordo com Haykin (2005)[20], o processo de aprendizagem implica em uma sequência de eventos: a) a rede neural é estimulada por um ambiente; b) a rede neural sofre modificações nos seus parâmetros livres como resultado desta

estimulação; e c) a rede neural responde de uma maneira nova ao ambiente, devido às modificações ocorridas na sua estrutura interna.

A habilidade de aprender a partir de exemplos é a propriedade mais interessante de uma rede neural e é realizada através de um processo iterativo de ajustes aplicados aos seus pesos sinápticos e limiares.

Para realizar um processo de aprendizagem, é preciso se ter um modelo do ambiente no qual a rede neural vai operar, ou seja, precisa-se saber qual informação está disponível para a rede neural. Este modelo é conhecido como paradigma da aprendizagem. De forma geral, existem dois principais paradigmas de aprendizagem: supervisionado e não supervisionado.

Na aprendizagem supervisionada, a rede deverá possuir pares de entrada e saída. Toda vez que uma entrada for apresentada à RNA, uma saída será obtida e as saídas da rede neural são comparadas com as saídas desejadas, chamadas também de saídas-alvo, o que permite a obtenção do erro. Os pesos são então ajustados de forma a minimizar esse erro.

Na aprendizagem não supervisionada, os pesos são determinados como resultado de um processo de auto-organização. As conexões com os pesos da rede não são executadas por um agente externo. A rede por si só decide qual saída é a melhor para uma determinada entrada e a partir daí se reorganiza.

Dentre os algoritmos usados para executar aprendizado supervisionado, o *Backpropagation* emergiu como o mais largamente usado e bem-sucedido algoritmo para treinamento de redes MLP [20]. A aprendizagem de uma RNA do tipo MLP, com a implementação do Algoritmo Backpropagation, dá-se em duas fases:

- a) Fluxo da informação da entrada para saída da rede (para frente): nesta fase, a ativação dos neurônios escondidos é propagada para os neurônios de saída. Então, os erros entre as saídas desejadas e as saídas da rede são calculados; e
- b) Fluxo da informação da saída em direção aos neurônios escondidos (para trás): nesta fase, o erro é propagado para trás e os pesos, conectando diferentes níveis, são atualizados.

Considerando a Perceptron multicamadas da Figura 3.17, o sinal de erro na saída do neurônio j , na iteração n (isto é, na apresentação do n -ésimo padrão ou exemplo de treinamento) é definido pela Equação (94).

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.103)$$

Em que o neurônio j é um nó de saída, $e_j(n)$ é o sinal do erro na saída do neurônio j para a iteração n , $d_j(n)$ refere-se à resposta desejada para o neurônio j e $y_j(n)$ refere-se ao sinal funcional que aparece na saída do neurônio j na iteração n .

A soma dos erros quadráticos na iteração n , considerando todos os neurônios de saída da RNA pertencentes ao conjunto C (inclui todos os neurônios da camada de saída da rede), é dada pela Equação (3.104).

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (3.104)$$

Considerando que N represente o número total de padrões (exemplos) contidos no conjunto de treinamento. Para todos os N padrões apresentados para a RNA, o erro quadrático médio é definido pela Equação (3.105).

$$E_{\text{med}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n) \quad (3.105)$$

O erro quadrático médio E_{med} é uma função de todos os parâmetros livres da RNA e representa a função custo que deve ser minimizada durante o processo de aprendizagem.

O sinal funcional $y_j(n)$ que aparece na saída do neurônio j na iteração n é dada pela Equação (3.106).

$$(y_j(n) = g_j(v_j(n)) \quad (3.106)$$

O campo local induzido $v_j(n)$ produzido na entrada da função de ativação associada ao neurônio j é definido pelas Equações (3.107) e (3.108).

$$v(n) = \sum_{j=1}^m w_{ji}(n)y_i(n) + \theta_j \quad (3.107)$$

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^m w_{ji}(n)y_i(n) \quad (3.108)$$

O algoritmo *back-propagation* aplica uma correção ao peso sináptico $w_{ji}(n)$ que é proporcional à derivada parcial dada pela Equação (3.109).

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.109)$$

Para o cálculo da derivada parcial $\frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)}$ usa-se a Equação (3.104), obtendo-se a Equação (3.110).

$$\frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} = \frac{\partial \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n)}{\partial e_j(n)} = e_j(n) \quad (3.110)$$

Para o cálculo de $\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)}$ usa-se a Equação (3.103), obtendo-se a Equação (3.111).

$$\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} = \frac{\partial (d_j(n) - y_j(n))}{\partial y_j(n)} = -1 \quad (3.111)$$

Para o cálculo de $\frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)}$ usa-se a Equação (3.101), obtendo-se a Equação (3.112).

$$\frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = \frac{\partial g_j(v_j(n))}{\partial v_j(n)} = g'_j(v_j(n)) \quad (3.112)$$

Para o cálculo de $\frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)}$ usa-se a Equação (99), obtendo-se a Equação (3.113).

$$\frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial (\sum_{i=0}^m w_{ji}(n) y_i(n))}{\partial w_{ji}(n)} = y_i(n) \quad (3.113)$$

Substituindo as Equações (3.110), (3.111), (3.112) e (3.113) na Equação (3.109), obtém-se a Equação (3.114).

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n) g'_j(v_j(n)) y_i(n) \quad (3.114)$$

A correção $\Delta w_{ji}(n)$ aplicada a $w_{ji}(n)$ é definida pela Equação (3.115).

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (3.115)$$

Em que η é o parâmetro da taxa de aprendizagem do algoritmo de retropropagação. O uso do sinal negativo indica a descida do gradiente no espaço de pesos.

O gradiente local $\delta_j(n)$ do neurônio j na iteração n é dado pela Equação (3.116).

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = e_j(n) g'_j(v_j(n)) \quad (3.116)$$

De acordo com a Equação (3.116), pode-se definir o gradiente local $\delta_j(n)$ do neurônio j na iteração n , para o neurônio oculto j através da Equação (3.117).

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} = -\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = -\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} g'_j(v_j(n)) \quad (3.117)$$

Em função da localização do neurônio j na rede neural, ou seja, se esse neurônio é um nó de saída ou um nó oculto, dois distintos casos podem ocorrer:

- a) Caso 1: o neurônio j é um nó de saída. Este caso é simples de se tratar, porque cada nó de saída da rede é suprido com uma resposta desejada particular, fazendo com que o cálculo do sinal de erro associado seja direto; e
- b) Caso 2: o neurônio j é um nó oculto. Apesar de os neurônios ocultos não serem acessíveis diretamente, eles compartilham a responsabilidade por qualquer erro cometido na saída da rede. A questão, entretanto, é saber como penalizar ou recompensar os neurônios ocultos pela sua parcela de responsabilidade.

Conforme pode ser observado na Figura 3.18, quando o neurônio j está localizado na camada de saída da rede, ele é suprido com uma resposta desejada particular. Neste caso, utiliza-se a Equação (3.103) para calcular o sinal do erro $e_j(n)$ associado a esse neurônio. Tendo-se determinado $e_j(n)$, calcula-se diretamente o gradiente local $\delta_j(n)$, usando a Equação (3.116).

Quando um neurônio j está localizado em uma camada oculta da rede, não existe uma resposta desejada especificada para aquele neurônio. O sinal de erro para esse neurônio oculto deve ser determinado recursivamente em termos dos sinais de erro de todos os neurônios, aos quais o neurônio oculto está diretamente conectado.

Dessa forma, considerando a situação apresentada na Figura 3.19, que representa o neurônio j como um nó oculto da rede, e tendo por base a Equação (3.116), podemos redefinir o gradiente local $\delta_j(n)$ para um neurônio oculto j através da Equação (3.117).

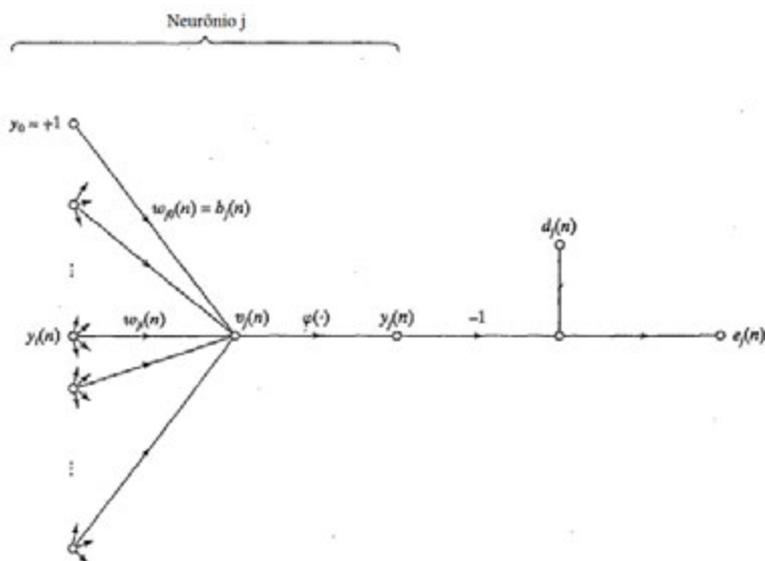


Figura 3.18: fluxo de sinal, sendo o neurônio j um nó de saída. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

Considerando a camada de saída k , a soma dos erros quadráticos na iteração n é dada pela Equação (3.118).

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{k \in C} e_k^2(n) \quad (3.118)$$

Para o cálculo de $\frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)}$ usa-se a Equação (3.118), obtendo-se a Equação (3.119).

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k \frac{\partial E(n)}{\partial e_k(n)} \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k e_k(n) \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k e_k(n) \frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} \quad (3.119)$$

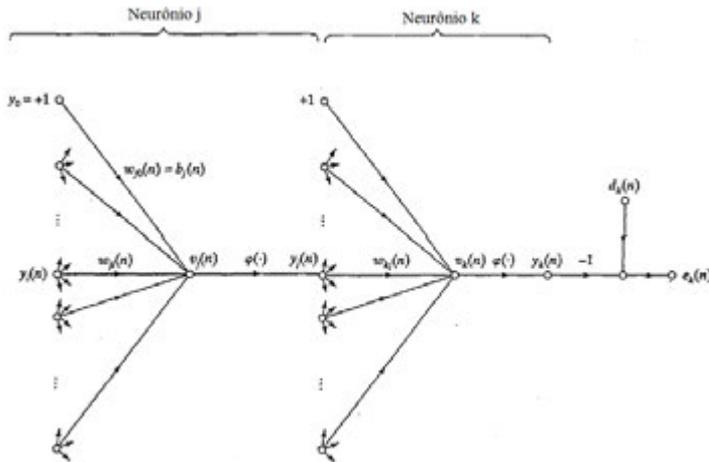


Figura 3.19: fluxo de sinal, sendo o neurônio j um nó oculto. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

Considerando o sinal funcional $y_k(n) = g_k(v_k(n))$ da Equação (3.106) aplicado ao neurônio de saída k na iteração n. Tendo por base a Figura 3.19, observa-se que:

$$e_k(n) = d(n) - y_k(n) = d_k(n) - g_k(v_k(n)) \quad (3.120)$$

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} = -g'_k(v_k(n)) \quad (3.121)$$

O campo local induzido $v_k(n)$ aplicado ao neurônio de saída k na iteração n é dado pela Equação (3.122) e sua derivada parcial pela Equação (3.123).

$$v_k(n) = \sum_{j=0}^m w_{kj}(n)y_j(n) \quad (3.122)$$

$$\frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} = w_{kj}(n) \quad (3.123)$$

Substituindo as Equações (3.121) e (3.123) na Equação (3.119), obtém-se:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} = -\sum_k e_k(n) g'_k(v_k(n)) w_{kj}(n) = -\sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (3.124)$$

Substituindo a Equação (3.124) na Equação (3.117), obtém-se a fórmula de retropropagação para o gradiente local $\delta_j(n)$ do neurônio oculto j na iteração n , através da Equação (3.125).

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial y_j(n)} g'_j(v_j(n)) = g'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (3.125)$$

Na Figura 15, é mostrada a representação por grafo de fluxo de sinal da Equação (3.125), assumindo que a camada de saída consista de neurônios m_L . O símbolo m_L representa o tamanho, isto é, o número de nós da camada l .

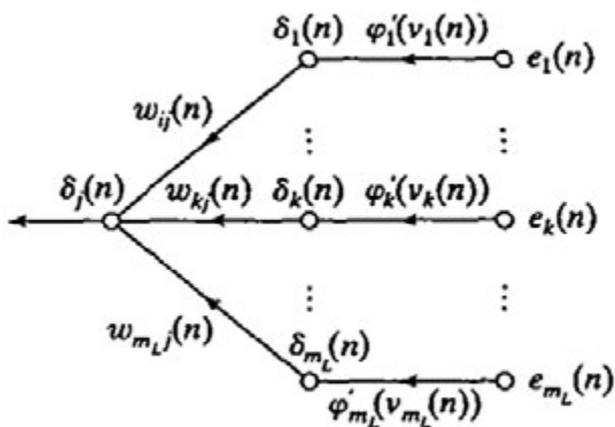


Figura 3.20: retropropagação dos sinais de erro. Fonte: Adaptado de Haykin (2005)[20]

O fator $g'_j(v_j(n))$ envolvido no cálculo do gradiente local $\delta_j(n)$ da Equação (116) depende unicamente da função de ativação associada ao neurônio oculto j . Se o neurônio j é um nó de saída, $\delta_j(n)$ é igual ao produto da derivada $g'_j(v_j(n))$

pelo sinal de erro $e_j(n)$, ambos sendo associados ao neurônio j , como mostra a Equação (107). Se o neurônio j é um nó oculto, $\delta_j(n)$ é igual ao produto da derivada associada $g'_j(v_j(n))$ pela soma ponderada dos $\delta_k(n)$ calculados para os neurônios na próxima camada oculta ou camada de saída que estão conectados ao neurônio j , de acordo com a Equação (3.125).

Segundo Haykin (2005), a correção $\Delta w_{ji}(n)$ aplicada ao peso sináptico conectando o neurônio i ao neurônio j é definida pela regra delta. O gradiente local $\delta_j(n)$ depende se o neurônio j é um nó de saída ou se é um nó oculto. A Equação (3.126) mostra a regra delta.

$$\begin{pmatrix} \text{correção} \\ \text{do peso} \\ \Delta w_{ji}(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{parâmetro} \\ \text{da taxa de} \\ \text{aprendizado} \eta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{gradiente} \\ \text{local} \\ \delta_j(n) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{sinal de entrada} \\ \text{do neurônio } j \\ y_i(n) \end{pmatrix} \quad (3.126)$$

O aprendizado da rede resulta de muitas apresentações de um determinado conjunto de exemplos de treinamento para o Perceptron de múltiplas camadas. A apresentação completa do conjunto de treinamento inteiro é denominada uma época. O processo de aprendizagem é mantido em uma base de época em época até que os pesos sinápticos e os níveis de bias se estabilizem e o erro médio quadrado sobre todo o conjunto de treinamento venha a convergir para um valor mínimo. É usual tornar aleatória a ordem de apresentação dos exemplos de treinamento, de uma época para a seguinte.

A aprendizagem por retropropagação, para um mesmo conjunto de treinamento, pode dar-se de dois modos: a) Modo Sequencial, em a atualização do peso é realizada após a apresentação de cada padrão de treinamento (exemplo), requerendo menos memória; e b) Modo por Lote, em a atualização do peso é realizada após a apresentação de todos os padrões de treinamento que constituem uma época, requerendo mais memória.

A abordagem por padrão pelo modo sequencial é geralmente mais rápida, principalmente se o conjunto de treinamento for grande. Uma outra vantagem desta técnica é que ela requer menos memória. Na abordagem por lote, o treinamento é menos influenciado pela ordem de apresentação dos padrões, mas ela pode ser lenta se o conjunto de treinamento for grande. Uma outra desvantagem é que ela requer mais memória.

Quanto menor for o valor da taxa de aprendizado, menor serão as variações dos pesos sinápticos de uma iteração para outra, e mais suave será a trajetória no espaço

de pesos – aprendizado lento. Quanto maior for o valor da taxa de aprendizado, maiores serão as variações dos pesos sinápticos de uma iteração para outra, o que torna a rede instável.

O critério de parada do treinamento da rede pode dar-se de três maneiras: pelo número de ciclos de treinamento, no qual o treinamento termina após a execução de um dado número de ciclos ou épocas de treinamento; pelo valor do erro, no qual o treinamento termina quando valor do erro é menor ou igual a um dado valor previamente definido; e pelo critério de validação, no qual o treinamento termina quando o erro, no conjunto de validação, para de decrescer.

3.5.4 Modelo de Previsão RNA-MLP/BP

Em etapa seguinte será feita a transformação de chuva em vazão, através de um modelo RNA tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP) com a utilização do algoritmo *Backpropagation* (MLP-BP). As RNA compunham-se de três camadas, sendo uma de entrada, uma escondida e uma de saída. Os neurônios da camada intermediária possuem função de transferência do tipo sigmoide e camada de saída com função linear.

A operacionalização da metodologia RNA foi feita com a utilização de algoritmos e funções implementados no *software* MATLAB® - 2014b, que é uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo para computação e programação, desenvolvida pela *MathWorks*.

As etapas do processo de modelagem, que possibilitará, nas estações de interesse da pesquisa, a transformação de chuva em vazão, através da utilização de cada uma das RNAs dos modelos da Tabela 3.4, são apresentadas na Figura 3.21.

Para a escolha da melhor arquitetura RNA, serão criados, a princípio, podendo mudar no desenvolvimento da pesquisa, em função das características das variáveis do vetor de entrada da RNA, cinco diferentes grupos de modelo. Esses grupos de modelo expressaram relações entre dados do vetor de entrada da rede e do vetor de saída, conforme é mostrado na Tabela 3.3. As variáveis adotadas para o vetor de entrada terão como critério de escolha a utilização de princípios comumente utilizados em hidrologia, que consistem em gerar vazões a partir de dados de precipitação e de evaporação.

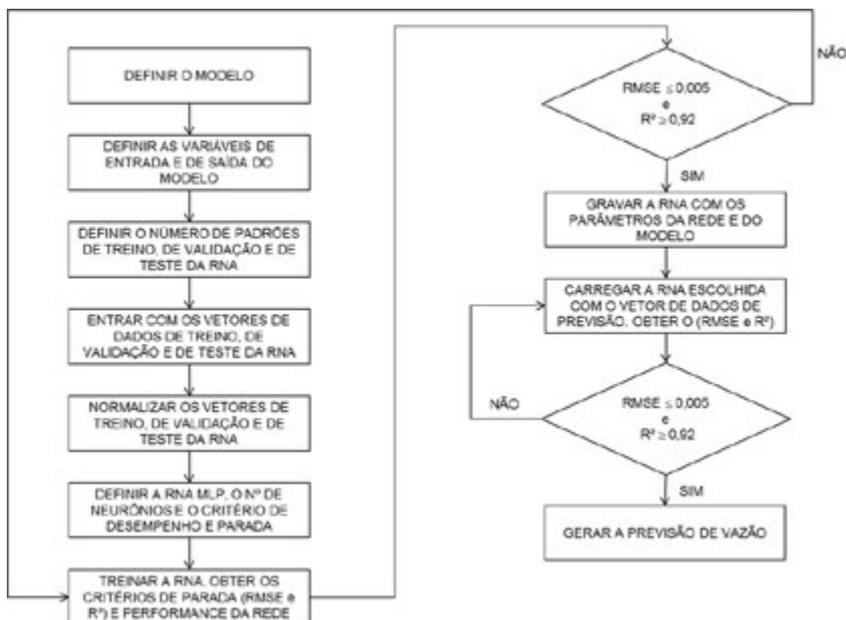


Figura 3.21: etapas do modelo RNA chuva-vazão

Tabela 3.3: entradas e saídas das RNAs do modelo chuva-vazão

Modelo	Variáveis do Vetor de Entrada	Saída
MCV1	$P_i(t), P_j(t) e P_k(t)$	$Q_1(t)$
MCV2	$P_i(t), P_j(t), P_k(t) e EV_m(t)$	$Q_2(t)$
MCV3	$P_i(t-1), P_j(t-1), P_k(t-1), (P_i(t) + P_j(t) + P_k(t)) e EV_m(t)$	$Q_3(t)$
MCV4	$P_i(t), P_j(t), P_k(t), (P_i(t) + P_j(t) + P_k(t)) e Q_i(t-1)$	$Q_4(t)$
MCV5	$P_i(t), P_j(t), P_k(t), (P_i(t) + P_j(t) + P_k(t)), EV_m(t) e Q_i(t-1)$	$Q_5(t)$

Em que:

- $P_i(t), P_j(t) e P_k(t)$: são as precipitações no mês t nas estações $i, j e k$;
- $EV_m(t)$: é a evapotranspiração média no mês t nas estações $i, j e k$;

- $P_i(t-1)$, $P_j(t-1)$ e $P_k(t-1)$: são as precipitações no mês $(t-1)$ nas estações i , j e k ;
- $(P_i(t) + P_j(t) + P_k(t))$: é o somatório das precipitações no mês t nas estações i , j e k ;
- $Q_i(t-1)$: é a vazão no mês $(t-1)$ na estação i ; e
- $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$, $Q_4(t)$ e $Q_5(t)$: são as vazões simuladas pelos modelos MCV1, MCV2, MCV3, MCV4 e MCV5, respectivamente, em um dado mês t .

Na Figura (3.22), é mostrada a arquitetura das RNAs que, a princípio, podendo mudar no desenvolvimento da pesquisa, comporá cada um dos grupos de modelo referenciados na Tabela 3.3. Em que n_1 é o número de variáveis do vetor de entrada; n_2 é o número de neurônios na camada escondida; n_3 é o número de neurônios na camada de saída; e n_4 é o número de variáveis do vetor de saída.

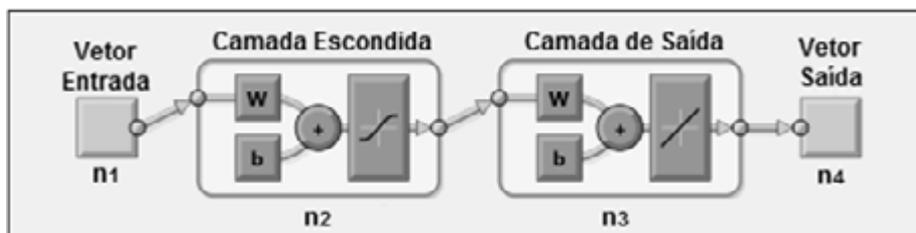


Figura 3.22: arquitetura da RNA dos modelos chuva-vazão

Tendo por base as características das variáveis do vetor de entrada de cada um dos grupos de modelo da Tabela 3.3, na Tabela 3.4 é apresentada, a princípio, podendo mudar no desenvolvimento da pesquisa, em função da variação do número de neurônios na camada escondida n_2 , a topologia de cada uma das 20 RNAs que serão treinadas e validadas, tendo como critério de parada um *Mean Square Error* (MSE) máximo de 0,004 e um *Regression Coefficient* (R^2) mínimo de 0,92, para a simulação das vazões nos postos fluviométricos de interesse à pesquisa.

As RNAs dos 20 modelos apresentados na Tabela 3.4 serão treinadas mediante a aplicação do algoritmo de otimização de *Levenberg-Maquardt*, que é uma variação

do algoritmo *backpropagation* e uma boa técnica de aproximação de relações não lineares. Durante o processo de treinamento das RNAs, seus pesos e vieses foram ajustados até que o algoritmo de treinamento alcance algum critério de parada.

No processo de treinamento das RNAs, será usado o método da validação cruzada, que utiliza um conjunto de dados independente para determinar o ponto de parada ótimo durante o treinamento, de forma a minimizar especialmente os riscos de superajustamento.

O conjunto de dados será dividido em três subconjuntos independentes, isto é, um conjunto para ajustar os pesos durante o treinamento, um conjunto para a validação e um conjunto para a verificação ou teste. Para cada modelo da Tabela 3.4, os dados utilizados na implementação algoritmo *backpropagation*, foram divididos em três subconjuntos:

- a) Treinamento: na fase de treinamento da RNA, serão utilizados 504 (quinhentos e quatro) padrões de entrada, tendo por base as características das variáveis dos vetores de entrada de cada modelo da Tabela 3.4;
- b) Validação: na validação da RNA, serão implementados 420 (quatrocentos e vinte) padrões de entrada, de acordo com as características dos vetores de entrada de cada modelo da Tabela 3.4; e
- c) Teste: no teste da RNA, serão aferidos 24 (vinte e quatro) padrões de entrada de vazão em estações fluviométricas de interesse. O detalhamento das fases de treino, validação e teste das RNAs, em função do número de padrões definidos para cada uma das fases, para as 20 arquiteturas RNAs definidas na Tabela 3.4, é apresentado na Figura 3.23.

Tabela 3.4: características das arquiteturas das RNAs dos modelos chuva-vazão.

Modelo	n_1	n_2	n_3	n_4	$Q_{simulada}$
MCV1-5N	3	5	1	1	Q_1 -MCV1-5N
MCV1-8N	3	8	1	1	Q_1 -MCV1-8N
MCV1-10N	3	10	1	1	Q_1 -MCV1-10N
MCV1-15N	3	15	1	1	Q_1 -MCV1-15N
MCV2-5N	4	5	1	1	Q_2 -MCV1-5N
MCV2-8N	4	8	1	1	Q_2 -MCV2-8N
MCV2-10N	4	10	1	1	Q_2 -MCV2-10N
MCV2-15N	4	15	1	1	Q_2 -MCV2-15N
MCV3-5N	5	5	1	1	Q_3 -MCV2-5N
MCV3-8N	5	8	1	1	Q_3 -MCV3-8N
MCV3-10N	5	10	1	1	Q_3 -MCV3-10N
MCV3-15N	5	15	1	1	Q_3 -MCV3-15N
MCV4-5N	5	5	1	1	Q_4 -MCV3-5N
MCV4-8N	5	8	1	1	Q_4 -MCV4-8N
MCV4-10N	5	10	1	1	Q_4 -MCV4-10N
MCV4-15N	5	15	1	1	Q_4 -MCV4-15N
MCV5-5N	6	5	1	1	Q_5 -MCV4-5N
MCV5-8N	6	8	1	1	Q_5 -MCV5-8N
MCV5-10N	6	10	1	1	Q_5 -MCV5-10N
MCV5-15N	6	15	1	1	Q_5 -MCV5-15N

O detalhamento, a princípio, podendo mudar no desenvolvimento da pesquisa, das fases de treino, validação e teste das RNAs, é apresentado na Figura 3.23, em função do número de padrões definidos para cada uma das fases, para as 20 arquiteturas RNAs que são apresentadas na Tabela 3.4.

Como na maior parte dos modelos chuva-vazão RNAs, observamos que os valores das variáveis dos vetores de entrada encontram-se fora dos limites máximo e mínimo do intervalo $[-1,1]$ das funções de transferência, uma transformação da escala real para uma escala compatível com a função de transferência utilizada será necessária. Essa transformação será obtida através da utilização de técnicas de normalização. O critério de normalização a ser aplicado aos valores de entrada das

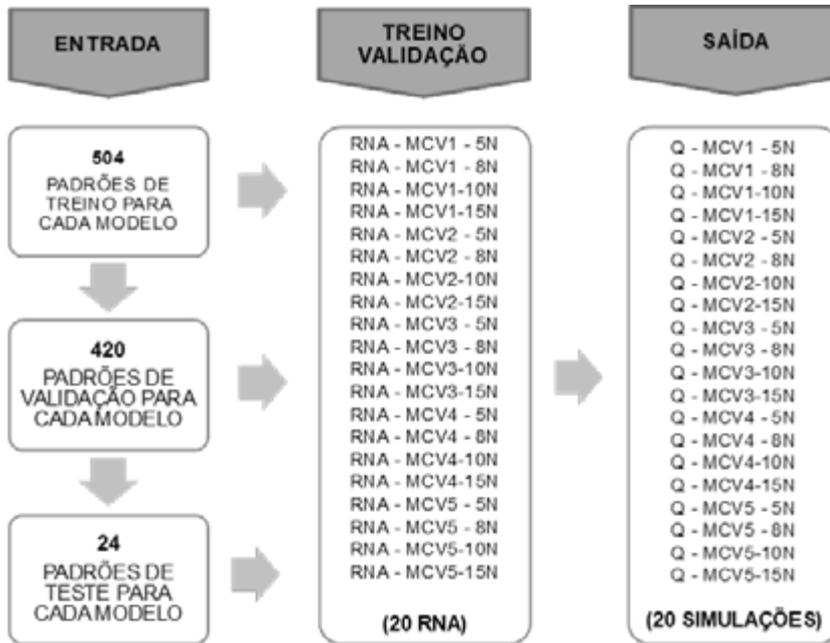


Figura 3.23: processo de treinamento e validação das RNAs

funções de transferência foi o apresentado na Equação (3.127).

$$x_{i \text{ norm}} = \frac{(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} (L_{\max} - L_{\min}) + L_{\min} \quad (3.127)$$

Em que x_i é o valor i do vetor de entrada da RNA a ser normalizado; $x_{i \text{ norm}}$ é o valor i do vetor de entrada já normalizado; x_{\max} é o valor máximo do vetor de entrada; x_{\min} é o valor mínimo do vetor de entrada; L_{\max} é o valor máximo da escala de normalização; e L_{\min} é o valor mínimo da escala de normalização.

No presente trabalho, as RNAs serão treinadas e validadas com valores normalizados, foi adotado o intervalo $[0, 1]$ como valor mínimo (L_{\min}) e valor máximo (L_{\max}) da escala de normalização utilizada.

Segundo Valença *et al.* (2005a, b), todas as variáveis de entrada devem ser normalizadas para assegurar que elas recebam igual atenção durante o processo

de treinamento. Neste estudo, os dados de treino, validação e teste da RNA serão normalizados tendo por base o intervalo $[0, 1]$ com a adoção de transformação linear.

3.5.5 Calibração e Validação do Modelo

Para a calibração e a validação de modelos RNAs, utilizados na previsão de variáveis hidrológicas e em processos de transformação de chuva em vazão, é comum a utilização de funções objetivos que se atrelam a coeficientes de desempenho, como o coeficiente de determinação R^2 ou de Nash e Sutcliffe e o *Root Mean Square Error* (RMSE) ou raiz do erro relativo quadrático médio.

Os critérios de desempenho de Nash Sutcliffe — R^2 e da raiz do erro quadrático médio — RMSE são dados pelas Equações (3.128) e (3.129), respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2} \quad (3.128)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{Q_t - \hat{Q}_t}{Q_t} \right)^2}{n}} \quad (3.129)$$

Em que n é o número de vazões observadas, Q_t é a vazão observação no mês t , \hat{Q}_t é a vazão simulada pelas RNAs no mês t e \bar{Q} é a média das n vazões observadas.

O coeficiente de determinação R^2 mede a qualidade do modelo de RNA em relação à sua capacidade de estimar corretamente valores da variável resposta \hat{Q}_t , indicando quanto da variância de \hat{Q}_t é explicada pela variância de Q_t . Quanto mais preciso for o modelo, mais próximo de 1 deverá ser o valor de R^2 .

O RMSE é uma indicação do quanto as vazões simuladas por cada modelo de RNA \hat{Q}_t variam em relação às vazões observadas de referência Q_t , onde quanto mais próximo de zero, maior é a qualidade das vazões simuladas pela RNA.

3.6 Modelo de Previsão de Energia

É importante que o gerenciamento da energia gerada em aproveitamentos hidrelétricos (AHE) e o consequente aproveitamento da vazão defluente à geração de energia

hidrocínética, seja realizada através de modelos de otimização e de minimização de conflitos de uso. Para tal, esses modelos demandam parâmetros de geração de energia e de despachos na consecução de cenários: de afluências hidrológicas; de defluências; de influências climáticas; de condições de hidrocínéticas; e de descargas ambientais.

Metodologias de otimização com programação não linear são comumente aplicadas no gerenciamento de usos múltiplos da água, em função da operação de reservatórios, com a maximização e/ou minimização de funções objetivo que contemplaram não apenas a geração de energia, como também o atendimento racional de demandas consuntivas e não consuntivas da água e a observância de regimes hidrocínéticos a jusante de AHE.

Hoje, o mundo com uma visão de aproveitamento energético e de geração de energia limpa, demandado, na maioria das vezes, pelo precário fornecimento de energia em comunidades assentadas a jusantes de AHE, começa a perceber a importância da energia hidrocínética, que é gerada pelos potenciais fluxos defluentes desses AHE (para aproveitamento do potencial remanescente da mesma).

Sistemas de reservatórios e parâmetros de geração de energia de AHE são condições necessárias e suficientes ao dimensionamento hidroenergético de usinas hidrelétricas, que, por sua vez, combinadas dados topobatimétricos e de velocidade a jusante, permitem a mensuração de ofertas de geração de energia hidrocínéticas.

Para a representação e modelagem de sistemas de geração de energia em AHE, um conjunto de equações matemáticas precisam ser definidas, com base em parâmetros associados à operação, de forma que funções de geração de energia sejam definidas através do balanceamento do sistema e da mensuração de variáveis como: cota, área e volume do reservatório; vazão defluente, turbinada e vertida; nível de jusante; queda bruta; e engolimento das turbinas (Figura 3.24).

3.6.1 Parametrização do Modelo

Na Figura 3.25, são mostradas, em uma seção hipotética de um AHE, variáveis que compõem a formulação de funções de geração de energia utilizadas em dimensionamentos energéticos de usinas hidrelétricas.

Em que:

- V_t é o volume armazenado no reservatório no intervalo t ;

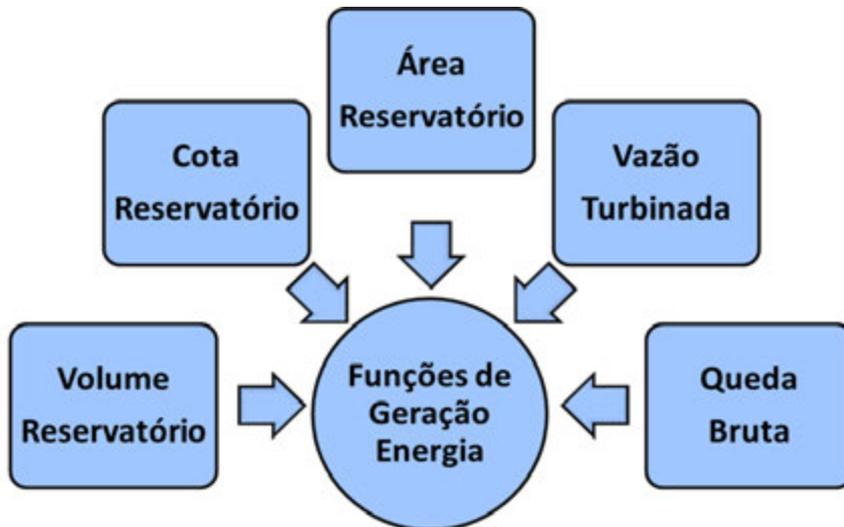


Figura 3.24: variáveis de funções de geração de energia em AHE.

- Q_{a_t} é a vazão afluyente ao reservatório do AHE no intervalo t ;
- E_{v_t} é a perda por evaporação no reservatório do AHE no intervalo t ;
- A_t é a área do reservatório no intervalo t ;
- H_{m_t} é o nível de água do reservatório a fio d'água no intervalo t ;
- H_{s_t} é o desnível entre a cota da soleira do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t ;
- H_{c_t} é o desnível entre a cota inferior da comporta do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t ;
- d_t é a abertura da comporta do vertedouro no intervalo t ;
- Q_{uc_t} é a vazão retirada para uso consuntivo no intervalo t ;
- Q_{t_t} é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t ;

- Qv_t é a vazão vertida pelo AHE no intervalo t ;
- Qd_t é a vazão defluente no AHE no intervalo t ;
- Hj_t é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t ;
- Hb_t é a queda bruta média do AHE no intervalo t ; e
- P_t é a energia gerada pelo AHE no intervalo t .

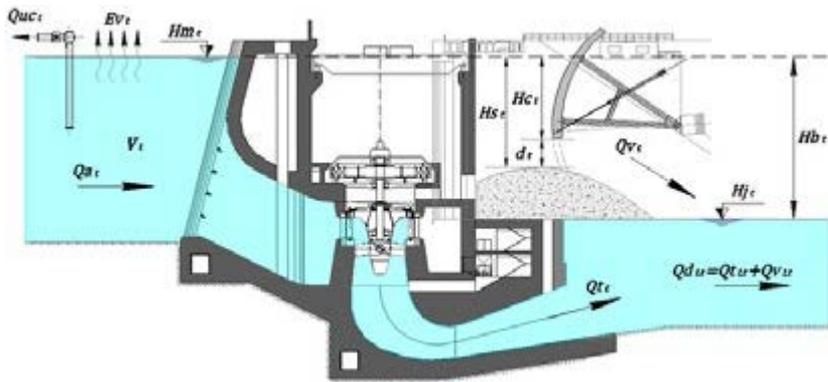


Figura 3.25: seção esquemática de uma unidade geradora de AHE.

A caracterização das defluências; dos turbinamentos; dos níveis de água a montante e a jusante do barramento e das áreas do reservatório foi feita através dos polinômios característicos do AHE de Serra do Facão, que definiram formulações paramétricas entre: cota e volume do reservatório; volume e área do reservatório; vazão defluente e cota do nível de água a jusante do AHE; e queda bruta e engolimento das turbinas. As Equações (3.130), (3.131), (3.132) e (3.133) apresentam as formulações adotadas aos polinômios.

$$Hm_t = \sum_{k=1}^n a_k \cdot V_t^k \quad (3.130)$$

$$Hj_t = \sum_{k=1}^n b_k \cdot Qd_t^k \quad (3.131)$$

$$Q_t = \sum_{k=1}^n c_k \cdot H_b^k \quad (3.132)$$

$$A_t = \sum_{k=1}^n d_k \cdot V_t^k \quad (3.133)$$

Em que:

- H_m é o nível de água a montante do AHE a fio d'água no intervalo t ; e
- V_t é o volume armazenado no reservatório no intervalo t ;
- A_t é a área do reservatório no intervalo t ;
- H_j é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t ;
- Q_a é a vazão afluyente ao reservatório do AHE no intervalo t ;
- Q_t é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t ; e
- H_b é a queda bruta média do AHE no intervalo t .
- k são os índices dos polinômios característicos do AHE;
- n são os valores máximos dos índices dos polinômios característicos do AHE;
- a_k são os coeficientes do polinômio da equação do nível de água do reservatório do AHE em função do volume armazenado;
- b_k são os coeficientes do polinômio da equação no nível de água no canal de fuga de jusante do AHE em função da vazão defluyente;
- c_k são os coeficientes do polinômio da curva de engolimento das turbinas, que relaciona a vazão turbinada em função da queda bruta do AHE; e
- d_k são os coeficientes do polinômio da área do reservatório do AHE em função do volume armazenado.

É importante ressaltar que, para o dimensionamento de usinas hidrelétricas, uma das variáveis de maior importância é a vazão afluyente ao reservatório de AHE. A fluuabilidade das afluências, determinada por variantes climáticas e hidrológicas, leva à construção de reservatórios que têm a função de regularizar e de manter vazões afluentes mínimas à geração de energia, mesmo em períodos severos de estiagem de anos secos.

A capacidade de armazenamento de reservatórios é limitada, pois, em sua grande maioria, esses não absorvem a manutenção de defluências médias a gerações significativas de energia por um longo período de tempo em anos secos. Logo, visando à conservação de taxas de geração de energia mínimas e capazes de viabilizar econômica e ambientalmente a construção de usinas hidrelétricas, o dimensionamento de AHE é realizado com base em afluências que permitam uma geração média de energia nos períodos críticos de operação do sistema.

Define-se como crítico o período em que reservatórios, partindo cheios e sem reenchimentos totais intermediários, sejam deplecionados ao máximo. A energia gerada dentro do período crítico é chamada de energia firme ou carga crítica do sistema. Para o dimensionamento de usinas hidrelétricas, deve ser utilizado o direcionamento proposto no Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas (MSUI) da Eletrobras. A energia firme do AHE deve ser considerada como sendo a média gerada no período crítico do Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual se inicia em junho de 1949 e termina em novembro de 1956 (MME, 2004).

Na Figura 3.26, é mostrado um exemplo, para um reservatório hipotético, de um período crítico adotado pelo SIN, em que se observa o intervalo compreendido entre armazenamento e deplecionamento máximos, no período de junho de 1949 a novembro de 1956.

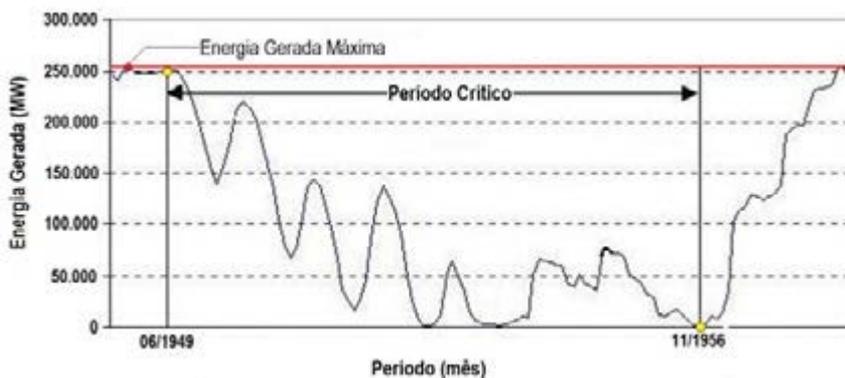


Figura 3.26: exemplo de período crítico — SIN.

No dimensionamento de usinas hidrelétricas, uma das principais grandezas a serem mensuradas é a energia firme ou carga crítica do sistema. Através da carga crítica do sistema a potência instalada, a energia secundária, a ponta garantida e a motorização do sistema podem ser dimensionadas. As etapas seguidas no cálculo da carga crítica foram: obtenção de vazões afluentes ao reservatório; obtenção de vazões afluentes no período crítico definido pelo SIN; cálculo da vazão média no período junho de 1949 a novembro de 1956; definição do nível de água máximo no reservatório; cálculo dos níveis de água a jusante para cada afluência do período junho de 1949 a novembro de 1956; cálculo das quedas brutas, em relação ao nível de água máximo do reservatório, para cada afluência do período junho de 1949 a novembro de 1956; cálculo da queda de referência, correspondente a queda bruta com permanência de 95% no período junho de 1949 a novembro de 1956; obtenção do fator de reserva do sistema ou índice de disponibilidade das máquinas; e cálculo da energia firme.

A energia firme ou carga crítica do sistema foi obtida através da Equação (3.134). A potência instalada de um sistema estabelece a quantidade de energia máxima que pode ser gerada e, conseqüentemente, o nível de motorização do AHE. A potência instalada do sistema foi definida através da Equação (3.135).

$$E_f = g \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{r95\%} \cdot Q_{am_{pc}} \cdot Id \cdot 10^{-6} \quad (3.134)$$

Em que:

- E_f é a energia firme ou carga crítica do sistema (MW);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- ρ é a massa específica da água (Kg/m^3);
- η é o rendimento do conjunto turbina-gerador;
- $H_{r95\%}$ é a queda bruta de referência, com permanência de 95% no período crítico do SIN (m);
- $Q_{am_{pc}}$ é a vazão afluente média no período crítico do SIN (m^3/s); e
- Id é o índice de disponibilidade das máquinas.

$$P_{inst} = \frac{g \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{r95\%} \cdot Q_{am_{pc}} \cdot Id \cdot 10^{-6}}{F_{cap_r}} \quad (3.135)$$

Em que:

- P_{inst} é a potência instalada do AHE (MW);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- ρ é o peso específico da água (Kg/m^3);
- η é o rendimento do conjunto turbina-gerador;
- $H_{r95\%}$ é a queda bruta de referência, com permanência de 95% no período crítico do SIN (m);
- $Q_{am_{pc}}$ é a vazão afluente média no período crítico do SIN (m^3/s);
- Id é o índice de disponibilidade das máquinas; e
- F_{cap_r} é o fator de capacidade de referência.

O fator de capacidade, em relação ao período crítico definido pelo SIN, corresponde à relação entre a energia firme e a capacidade de geração máxima de energia. Como valor inicialmente arbitrado, é comum em estudos de dimensionamento de aproveitamentos hidrelétricos, a adoção de um fator de capacidade de referência da ordem de 50% a 55% . É comum, em função de características metodológicas conservadoras empregadas no cálculo da energia firme, que a energia gerada em um dado instante seja superior à energia firme. A diferença entre a energia média gerada e a energia firme, quando essa é maior do que a energia firme, denomina-se energia secundária.

A energia secundária, sendo a energia gerada além da energia firme, a qual, em função de sua sazonalidade e não garantia de geração, pode variar sensivelmente ao longo do tempo. Em períodos de estiagem, em que praticamente não há sobras de energia, uma vez que as afluições se aproximam daquelas do período crítico, a energia secundária é quase nula. Já nos períodos úmidos, em que há excesso de água, os valores da energia secundária tendem a se maximizar.

Em função de variâncias sazonais de afluições, que suscitam incertezas em sua geração, a energia secundária apresenta um valor econômico inferior ao da energia firme. Para diminuir a caracterização de benefício marginal, imputado à energia secundária, é comum a implantação de parques termoeletrônicos que complementam déficits existentes na geração de energia secundária. A energia secundária de AHE de Serra do Facão, em um dado intervalo de tempo, foi obtida através da Equação (3.136).

$$Es_t = (Hb_t \cdot Qt_t - Hr_{95\%} \cdot Q_{am_{pc}}) \cdot g \cdot \rho \cdot \eta \cdot Id \cdot 10^{-6} \quad (3.136)$$

Em que:

- Es_t é a energia secundária gerada no AHE no intervalo t (MW);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- ρ é a massa específica da água (Kg/m^3);
- η é o rendimento do conjunto turbina-gerador;
- Hb_t é a queda bruta média do AHE no intervalo t (m);

- Q_t é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t (m^3/s);
- $H_{r95\%}$ é a queda bruta de referência, com permanência de 95% no período crítico do SIN (m);
- $Q_{am_{pc}}$ é a vazão afluyente média no período crítico do SIN (m^3/s); e
- Id é o índice de disponibilidade das máquinas.

A queda bruta ou estática do AHE foi determinada subtraindo a elevação do nível de água de jusante da elevação do nível de água do reservatório. Durante a operação da usina, os níveis de água do reservatório e de jusante variam e não permanecem constantes, logo a queda bruta instantânea do sistema também varia. O nível de água de jusante do AHE de Serra do Facão foi obtido em função da vazão defluente, da geometria do canal de fuga e de efeitos de remanso. Quando a queda líquida esteve superior à queda de referência, o gerador limitou a operação do conjunto turbina-gerador (Figura 3.27).

Após o cálculo da energia firme, da potência instalada e da energia secundária, em função das afluências e da queda de referência, as turbinas podem ser comparadas com parâmetros dimensionais. Para o dimensionamento das unidades geradoras do AHE, a rotação específica das turbinas foi de fundamental importância, pois, através dela e do conhecimento de sua curva-colina ou da curva característica da turbina empregada, foram obtidas a geometria do rotor, a rotação síncrona e as características e o número de polos do gerador.

O conhecimento da rotação do gerador, que compõe o conjunto turbina-gerador das 2 unidades geradoras do AHE de Serra do Facão, foi de fundamental importância na etapa de aferição da turbina. Como a frequência do sistema elétrico brasileiro é de 60 Hz, a rotação síncrona do gerador foi determinada pela Equação (3.137). A rotação específica da turbina a ser empregada foi definida pela Equação (3.138).

$$n = \frac{3600}{Z_p} \quad (3.137)$$

Em que:

- n é a rotação síncrona do gerador (rpm); e

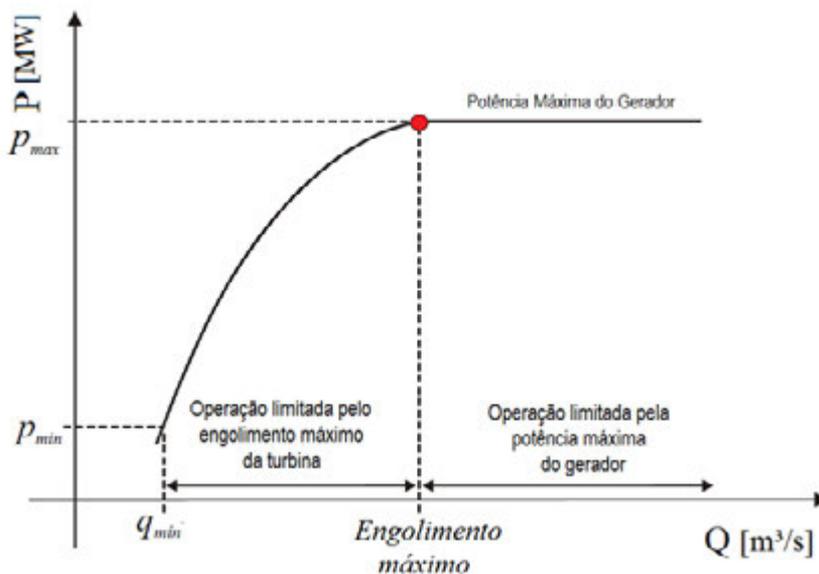


Figura 3.27: situações de operação do sistema em relação ao engolimento e potência máximos.

- Z_p é o número de par de polos do gerador.

$$n_{esp} = 3.n \cdot \frac{Qt_t^{\frac{1}{2}}}{Hb_t^{\frac{3}{4}}} \quad (3.138)$$

Em que:

- n é a rotação síncrona do gerador (rpm);
- Qt_t é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t (m^3/s); e
- Hb_t é a queda bruta média do AHE no intervalo t (m).

A análise operacional do AHE de Serra do Facão, a caracterização do reservatório e a imposição de restrições às funções foram desenvolvidas através da implementação das Equações (3.139) a (3.163) apresentadas a seguir:

a) Balanço do reservatório do AHE

a.1) Para reservatórios de armazenamento

$$\text{Se } V_t \neq V_{t-1} \Rightarrow \frac{dV_t}{dt} = \frac{dV_{t-1}}{dt} + [Qa_t - Qd_t - Quc_t] - \frac{dEv_t}{dt} = 0 \quad (3.139)$$

a.2) Para reservatórios operados a fio d'água

$$\text{Se } V_t = V_{t-1} \Rightarrow [Qa_t - Qd_t - Quc_t] - \frac{dEv_t}{dt} = 0 \quad (3.140)$$

b) Evaporação no reservatório do AHE

$$Ev_t = A_t \cdot Iev_t \quad (3.141)$$

c) Volume do reservatório do AHE (dam³)

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{dV_{t-1}}{dt} + \left[(Qa_t - Qt_t - Qv_t - Quc_t) - \frac{dEv_t}{dt} \cdot 10^{-3} \right] \cdot 10^{-6} \quad (3.142)$$

d) Nível de água do reservatório do AHE

$$Hm_t = \sum_{k=1}^n a_k \cdot V_t^k \quad (3.143)$$

e) Nível de água médio do reservatório do AHE

$$\overline{Hm}_t = \left[\left(\sum_{k=1}^n a_k \cdot V_t^k \right) + \left(\sum_{k=1}^n a_k \cdot V_{t-1}^k \right) \right] / 2 \quad (3.144)$$

f) Área do reservatório do AHE

$$A_t = \sum_{k=1}^n d_k \cdot V_t^k \quad (3.145)$$

g) Área média do reservatório do AHE

$$\bar{A}_t = \left[\left(\sum_{k=1}^n d_k \cdot V_t^k \right) + \left(\sum_{k=1}^n d_k \cdot V_{t-1}^k \right) \right] / 2 \quad (3.146)$$

h) Nível de água a jusante do AHE

$$Hj_t = \sum_{k=1}^n b_k \cdot Qd_t^k \quad (3.147)$$

i) Queda bruta do AHE

$$Hb_t = \left[\left(\sum_{k=1}^n a_k \cdot V_t^k \right) + \left(\sum_{k=1}^n a_k \cdot V_{t-1}^k \right) \right] / 2 - \sum_{k=1}^n b_k \cdot Qd_t^k \quad (3.148)$$

$$Hb_t = \bar{Hm}_t - Hj_{i,t} \quad (3.149)$$

j) Engolimento das turbinas do AHE

$$Qt_t = \sum_{k=1}^n c_k \cdot Hb_t^k \quad (3.150)$$

k) Vazão afluyente ao reservatório do AHE

$$Qa_t = Qt_t + Qv_t + Quc_t \quad (3.151)$$

l) Vazão defluente do reservatório do AHE

$$Qd_t = Qt_t + Qv_t \quad \therefore Qd^{\min} \leq Qd_t \leq Qd^{\max} \quad \therefore Qd^{\min} \geq Qda^{\min} \quad (3.152)$$

m) Vazão turbinada no AHE

$$Qt_t = Qa_t - Qv_t - Quc_t \quad (3.153)$$

$$\text{Se } (Qa_t - Quc_t) > Eng_{\max} \Rightarrow Qt_t = Qa_t - Quc_t - Qv_t \quad (3.154)$$

$$\text{Se } (Qa_t - Quc_t) \leq Eng_{\max} \Rightarrow Qt_t = Qa_t - Quc_t \quad (3.155)$$

$$Qt^{\min} \cdot Id_t \leq Qt_t \leq Qt^{\max} \cdot Id_t \quad (3.156)$$

n) Vazão vertida do reservatório do AHE

$$Qv_t = C_t \cdot l \cdot \left(Hs_t^{\frac{3}{2}} - Hc_t^{\frac{3}{2}} \right) = Qa_t - Qt_t - Quc_t \quad \therefore C = f\left(\frac{d_t}{Hs_t}\right) \quad (3.157)$$

$$\text{Se } (Qa_t - Quc_t) > Eng_{\max} \Rightarrow Qv_t \neq 0 \quad (3.158)$$

$$\text{Se } (Qa_t - Quc_t) \leq Eng_{\max} \Rightarrow Qv_t = 0 \quad (3.159)$$

o) Vazão de uso consuntivo retirada do reservatório do AHE

$$Quc_t = Qa_t - Qt_t - Qv_t \quad \therefore Duc_t^{\min} \leq Quc_{i,t} \leq Duc_t^{\max} \quad (3.160)$$

p) Energia gerada pelo AHE

$$P_t = g \cdot \rho \cdot \eta \cdot Hb_t \cdot Qt_t \quad (3.161)$$

$$P_t \leq P^{\max} \cdot Id \quad (3.162)$$

$$P_t \leq \left[Hb_t \cdot \left(\sum_{k=1}^n c_k \cdot Hb_t^k \right) \cdot Ku \right] \cdot Id \quad (3.163)$$

Em que:

- dt_t é o tempo de operação das turbinas do AHE no intervalo t ;
- A_t é a área do reservatório no intervalo t ;
- \bar{A}_t é a área média do reservatório no intervalo t ;
- Ev_t é a evaporação no reservatório do AHE no intervalo t ;
- Hb_t é a queda bruta média do AHE no intervalo t ;
- η é o rendimento médio do AHE;
- Hm_t é o nível de água do reservatório operado a fio d'água no intervalo t ;
- \bar{Hm}_t é o nível de água médio do reservatório operado a fio d'água no intervalo t ;
- Hs_t é o desnível entre a cota da soleira do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t ;
- Hc_t é o desnível entre a cota inferior da comporta do vertedouro e o nível de água do reservatório no intervalo t ;
- d_t é a abertura da comporta do vertedouro no intervalo t ;
- C_t é o coeficiente de descarga do vertedouro no intervalo t ;
- l é o comprimento do vertedouro;
- Hj_t é o nível de água a jusante do AHE no intervalo t ;
- Id é o índice de disponibilidade das máquinas do AHE no intervalo t ;
- Ku é o índice de produtividade gama da água;
- Iev_t é a evaporação líquida do reservatório no intervalo de tempo t ;
- P_t é a energia gerada pelo AHE no intervalo t ;
- Eng_{\max} é o engolimento máximo das turbinas do AHE;

- Qa_t é a vazão afluyente ao reservatório do AHE no intervalo t ;
- P^{\max} é a capacidade de geração máxima do AHE;
- Qv_t é a vazão vertida pelo AHE no intervalo t ;
- Qt_t é a vazão turbinada pelo AHE no intervalo t ;
- Quc_t é a vazão retirada para uso consuntivo no intervalo t ;
- Duc^{\min} é a demanda de uso consuntivo mínima;
- Duc^{\max} é a demanda de uso consuntivo máxima;
- Qt^{\min} é a vazão turbinada mínima no AHE;
- Qt^{\max} é a vazão turbinada máxima no AHE;
- Qd_t é a vazão defluente no AHE no intervalo t ;
- Qd^{\min} é a vazão defluente mínima no AHE;
- Qda^{\max} é a vazão defluente máxima no AHE;
- Qda^{\min} é a vazão ambiental mínima no AHE;
- V_t é o volume armazenado no reservatório no intervalo t ;
- V^{\max} é o volume armazenado máximo no reservatório;
- V^{\min} é o volume armazenado mínimo no reservatório;
- k são os índices dos polinômios característicos do AHE;
- n são os valores máximos dos índices dos polinômios característicos do AHE;
- a_k são os coeficientes do polinômio da equação do nível de água do reservatório do AHE em função do volume armazenado;
- b_i são os coeficientes do polinômio da equação no nível de água no canal de fuga de jusante do AHE em função da vazão defluente;

- c_i são os coeficientes do polinômio da curva de engolimento das turbinas, que relaciona a vazão turbinada em função da queda bruta do AHE; e
- d_i são os coeficientes do polinômio da área do reservatório do AHE em função do volume armazenado.

3.7 Ajustes de distribuições de probabilidades a variáveis hidrológicas

A análise de frequência de variáveis hidrológicas, definida como sendo a quantificação do número esperado de ocorrências de um evento de uma determinada magnitude, é talvez uma das aplicações mais antigas e mais frequentes na análise de eventos em recursos hídricos. Métodos de análise de frequência, aplicados a máximos, a partir de uma amostra de dados, estimam probabilidades com que uma variável aleatória será igual ou maior que um determinado valor ou intervalo. A magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência, uma vez que eventos muito severos ocorrem com menor frequência do que os mais moderados.

Análises de frequência de variáveis hidrológicas relacionam a magnitude de eventos com sua frequência de ocorrência por meio do uso de distribuições de probabilidades. Do ponto de vista da extensão espacial das variáveis, a análise de frequência pode ser local ou regional. A análise local utiliza uma única série de registros hidrométricos ou hidrometeorológicos, coletados de uma estação e na análise regional, são utilizados os dados de várias estações de uma região geográfica, que apresentam semelhanças fisiográficas, justificando a transferência de informações de um local para outro [43]. Argumentos a favor dos métodos regionais, em comparação com a análise de frequência local são geralmente ressaltados na literatura. Apesar desses argumentos, é plausível esperar que uma série de decisões sobre a ocorrência de eventos hidrológicos raros sejam tomadas ainda com base em uma única amostra de dados hidrológicos (Naghattini, 2017)[43]. Métodos utilizados na teoria de probabilidades e da estatística constituem conhecimentos indispensáveis para lidar com as incertezas e para as interpretar.

Variáveis hidrológicas como vazão e níveis de água têm como característica básica uma grande variabilidade no tempo. Para analisar a variação dessas variáveis,

incluindo a sua variabilidade temporal, é necessário lançar mão de processos estatísticos que representam o comportamento hidrológico do rio ou da bacia.

O principal objetivo da análise estatística em hidrologia é o de extrair informações significativas de uma dada massa de dados. As técnicas utilizadas em estatística aplicadas à hidrologia permitem avaliar a probabilidade de ocorrência de um fenômeno hidrológico com determinada magnitude.

Em hidrologia, análises probabilísticas baseiam-se em métodos de previsão associados a períodos de recorrência, tendo por base registros de séries históricas passadas. Na aplicação de modelos probabilísticos, quanto maior é a série, maior a segurança do modelo, uma vez que os eventos extremos estão diretamente relacionados ao período de retorno.

Em estirões de jusante se usinas hidrelétricas o dimensionamento de aproveitamentos hidrocínéticos é, dentre outros parâmetros, função da flutuabilidade dos níveis de água, junto ao local de instalação das turbinas, a da variabilidade da vazão afluente às turbinas. Tanto a variabilidade dos níveis de água, quanto a quantificação dos fluxos afluentes às turbinas estão diretamente relacionadas a geração de energia, ou seja, dependem da vazão defluente do aproveitamento hidroenergético (AHE).

Para a adoção de cenários de níveis de água e de vazões defluentes de referência, não somente o conhecimento e o tratamento de séries históricas dessas variáveis fazem-se necessários, como também precisa-se analisar a distribuição de frequência de ocorrências dos eventos, por meio de um conjunto de técnicas numéricas que permitem que se obtenha a distribuição de frequências da variável em questão. Ressalta-se que medidas de dispersão, assimetria e curtose são meras estimativas de quantidades populacionais desconhecidas, enquanto as frequências calculadas são das probabilidades de ocorrência de um dado evento.

Para extrair conclusões de uma amostra de uma variável hidrológica, que sejam úteis ao dimensionamento de aproveitamentos hidrocínéticos, é necessário estabelecer um modelo matemático que contenha os principais elementos do processo hidrológico que determinou a ocorrência temporal dessa variável. Nesta ótica, modelos de distribuição de probabilidades devem ser convenientemente utilizados na aferição dos níveis de referência necessários às análises hidrocínéticas, pois esses associam uma probabilidade a cada resultado numérico de um evento, ou seja, fornecem a probabilidade de ocorrência de cada evento.

No processo de análise de frequência de uma variável hidrológica, procura-se

selecionar, dentre diversas distribuições de probabilidades candidatas, aquela que parece ser mais capaz de sintetizar as principais características estatísticas amostrais da variável e de predizer quantis hipotéticos com confiabilidade razoável.

É usual séries de dados de níveis de água e vazões serem ajustadas a distribuições de probabilidades, de forma a serem adotadas distribuições que mais se ajustassem as características das séries em análise. Para ajustes de funções de densidade de probabilidade a histogramas das séries de dados hidrológicos, geralmente são testadas, analisadas e categorizadas distribuições de probabilidades como: Distribuição Normal; Distribuição Log-Normal; Distribuição Gama; e Distribuição Gumbel.

3.7.1 Distribuição Normal

A distribuição de probabilidade normal é uma das mais importantes distribuições contínuas de probabilidade, uma vez que se ajusta razoavelmente bem a muitas variáveis hidrológicas, sendo utilizada para descrever o comportamento de uma variável aleatória contínua que flutua de maneira simétrica em torno de um valor central. Além disso, a distribuição normal é a base da construção de intervalos de confiança, teste de hipóteses estatísticas e análise de correlação e regressão, que são tópicos abordados em capítulos posteriores [43].

A distribuição Normal é um modelo a dois parâmetros, cujas funções densidade de probabilidade e de probabilidades acumuladas são expressas, respectivamente, pela Equação (3.164) e pela (3.165).

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)}, \quad -\infty < z < \infty \quad (3.164)$$

Em que:

- Z é a variável reduzida definida por $z = \frac{(x-\mu_x)}{\sigma_x}$;
- μ_x é a média aritmética da série de longo período da variável hidrológica;
- σ_x é o desvio padrão da série de longo período da variável hidrológica; e
- x é uma variável contínua representativa da variável hidrológica.

$$F_z(z) = \Phi(z) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3.165)$$

Em que:

- Z é a variável reduzida definida por $z = \frac{(x-\mu_x)}{\sigma_x}$;
- μ_x é a média aritmética da série de longo período da variável hidrológica;
- σ_x é o desvio padrão da série de longo período da variável hidrológica; e
- x é o valor em referência.

Na Figura 3.28, pode-se observar o ajuste de uma distribuição de probabilidade normal a uma série temporal de longo período de vazão afluente a usina hidrelétrica de Serra do Facão. O eixo vertical esquerdo representa os valores da densidade de probabilidade; o eixo vertical direito representa os valores das probabilidades acumuladas; e o eixo horizontal representa os valores das vazões afluentes.

Na Figura 3.28, pode-se observar, por exemplo, o histograma representativo da série representado em vermelho; a função de densidade de probabilidade normal em azul claro; a função de probabilidades acumuladas ascendente da distribuição normal em azul escuro; a função de probabilidades acumuladas ascendente dos *inputs* das vazões afluentes em vermelho escuro; e, nas caixas amarelas, os valores extremos da vazão afluente das séries, sendo $X1$ o menor e $X2$ o maior.

3.7.2 Distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal é uma generalização da distribuição normal, tornada assimétrica por uma mudança da variável, $Y = \ln X$. Se uma variável aleatória Y , tem distribuição normal, então a variável X , diz-se Log-Normal. Sua função densidade é expressa pela Equação (3.166).

$$f_x(x) = \frac{1}{X\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)}, X > 0 \quad (3.166)$$

Em que:

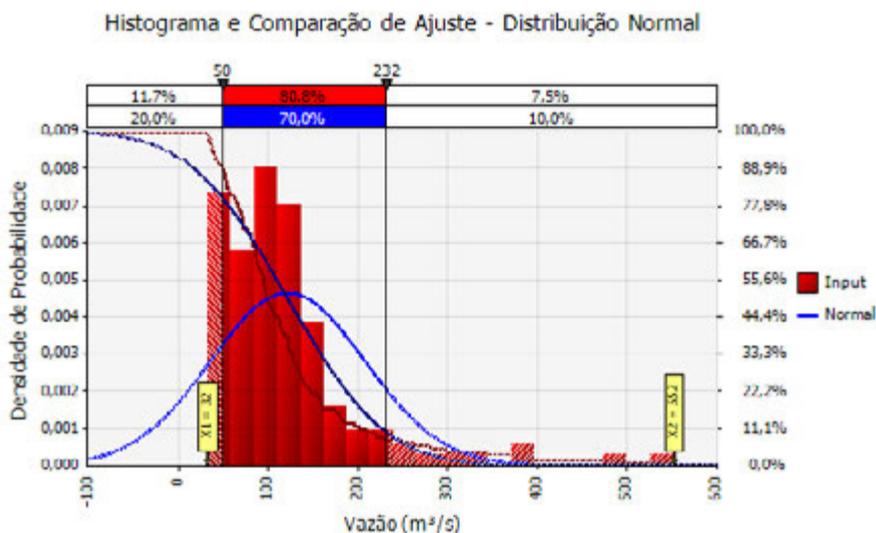


Figura 3.28: histograma e funções de densidade e probabilidades acumuladas da distribuição normal da série temporal de dados de vazão.

- μ_y é a média aritmética da série de longo período da variável hidrológica $Y = \ln X$;
- σ_y é o desvio padrão da série de longo período da variável hidrológica $Y = \ln X$; e
- X é o valor em referência.

Na Figura 3.29, pode-se observar o ajuste de uma distribuição de probabilidade normal a uma série temporal de longo período de vazão afluente a usina hidrelétrica de Serra do Facão. O eixo vertical esquerdo representa os valores da densidade de probabilidade; o eixo vertical direito representa os valores das probabilidades acumuladas; e o eixo horizontal representa os valores das vazões afluentes.

Na Figura 3.29, pode-se observar que o histograma representativo da série se encontra representado em vermelho; a função de densidade de probabilidade log-normal em azul claro; a função de probabilidades acumuladas ascendente da

distribuição log-normal em azul escuro; a função de probabilidades acumuladas ascendente dos *inputs* das vazões afluentes em vermelho escuro; e, nas caixas amarelas, os valores extremos da vazão afluente das séries, sendo X_1 o menor e X_2 o maior.

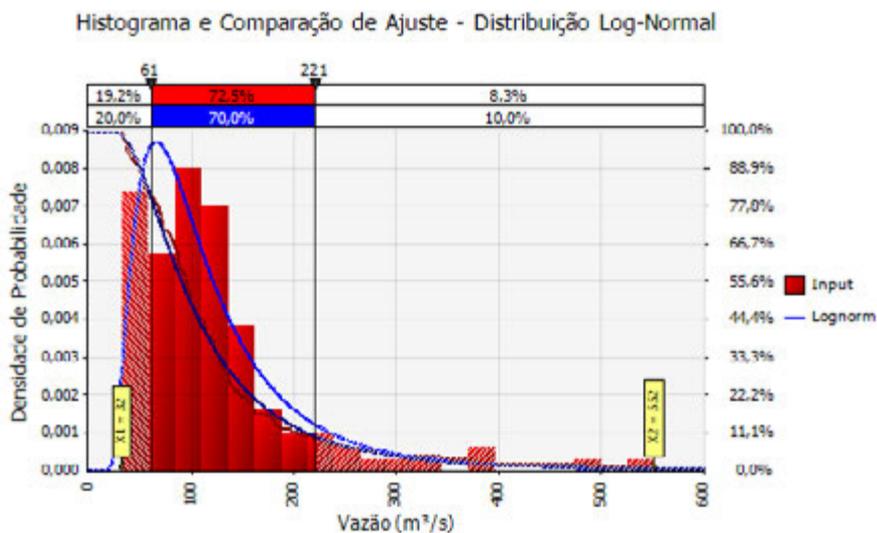


Figura 3.29: histograma e funções de densidade e probabilidades acumuladas da distribuição log-normal da série temporal de dados de vazão.

3.7.3 Distribuição Gama

Diz-se que uma variável aleatória X , tem distribuição gama com parâmetros β e λ , simbolicamente, $G(\beta, \lambda)$, quando a respectiva função densidade de probabilidade é da forma da Equação (3.167).

$$f_x(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} e^{-\lambda x}, \quad X, \beta, \lambda > 0 \quad (3.167)$$

Em que:

- $\Gamma(\beta)$ é a função gama dada por $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$, para $\beta > 0$;

- β e λ , são parâmetros da função e definidos por: $\beta = \frac{\bar{X}^2}{S_x^2}$ e $\lambda = \frac{\bar{X}}{S_x^2}$;
- S_x é o desvio-padrão da série de longo período da variável hidrológica; e
- \bar{X} é a média aritmética da amostra.

Na Figura (3.30), pode-se observar o ajuste de uma distribuição de probabilidade gama a uma série temporal de longo período de vazão afluente a usina hidrelétrica de Serra do Facão. O eixo vertical esquerdo representa os valores da densidade de probabilidade; o eixo vertical direito representa os valores das probabilidades acumuladas; e o eixo horizontal representa os valores das vazões afluentes.

Na Figura (3.30), pode-se observar que o histograma representativo da série se encontra representado em vermelho; a função de densidade de probabilidade gama em azul claro; a função de probabilidades acumuladas ascendente da distribuição gama em azul escuro; a função de probabilidades acumuladas ascendente dos *inputs* das vazões afluentes em vermelho escuro; e, nas caixas amarelas, os valores extremos da vazão afluente das séries, sendo X_1 o menor e X_2 o maior.

A distribuição de Gumbel é bastante aplicada a acontecimentos máximos, por exemplo, à distribuição de vazões máximas anuais, ou na distribuição de precipitações máximas anuais. Uma variável aleatória X , tem distribuição de Gumbel, com parâmetros α , e β , quando a respectiva função densidade de probabilidade é da forma da Equação (3.168).

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - e^{\left(-\frac{x-\beta}{\alpha} \right)} \right]}, \quad -\infty < X < +\infty \quad (3.168)$$

Em que:

- α e β , são parâmetros da função e definidos por: $\alpha = \frac{\sqrt{6}S_x}{\pi}$ e $\beta = \bar{X} - 0,5772\alpha$
- S_x é o desvio-padrão da série de longo período da variável hidrológica; e
- \bar{X} é a média aritmética da amostra.

Na Figura 3.31, pode-se observar o ajuste de uma distribuição de probabilidade Gumbel a uma série temporal de longo período de vazão afluente a usina hidrelétrica

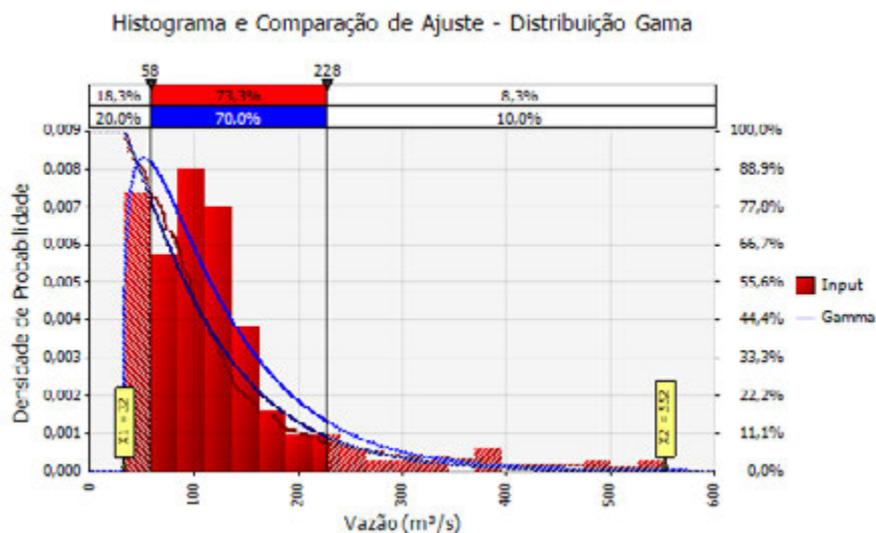


Figura 3.30: histograma e funções de densidade e probabilidades acumuladas da distribuição gama da série temporal de dados de vazão.

de Serra do Facão. O eixo vertical esquerdo representa os valores da densidade de probabilidade; o eixo vertical direito representa os valores das probabilidades acumuladas; e o eixo horizontal representa os valores das vazões afluentes.

Na Figura 3.31, pode-se observar que o histograma representativo da série se encontra representado em vermelho; a função de densidade de probabilidade Gumbel em azul claro; a função de probabilidades acumuladas ascendente da distribuição Gumbel em azul escuro; a função de probabilidades acumuladas ascendente dos *inputs* das vazões afluentes em vermelho escuro; e, nas caixas amarelas, os valores extremos da vazão afluente das séries, sendo X_1 o menor e X_2 o maior.

Na Figura 3.32, pode-se observar o histograma representativo do *input* da série de dados de vazão afluente em vermelho e a plotagem das funções de densidade de probabilidades das distribuições de probabilidade normal, log-normal, gama e Gumbel. Observa-se que a função de densidade de probabilidade de cada uma das distribuições de probabilidade conforma-se ao histograma de *input* de forma diferente, ou seja, dependendo do tipo de distribuição de probabilidade, maior ou

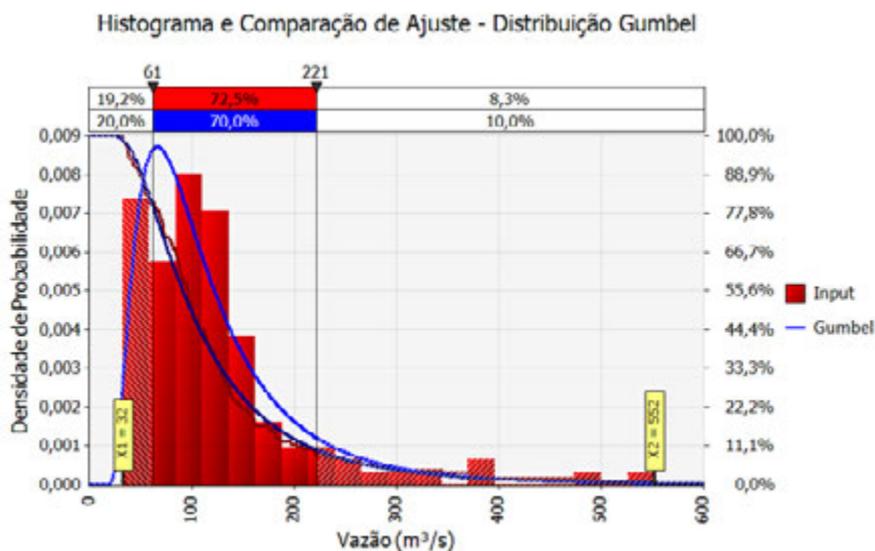


Figura 3.31: histograma e funções de densidade e probabilidades acumuladas da distribuição Gumbel da série temporal de dados de vazão.

menor será a área de encaixe do histograma na função de densidade de probabilidade de cada distribuição.

Conforme pode-se observar na Figura 3.32, aparentemente, a função de densidade de probabilidade da distribuição gama apresentou melhor ajuste ao histograma da série temporal de vazão afluente ao reservatório da UHE de Serra do Facão. No entanto, a escolha do melhor ajuste de uma distribuição de probabilidade a um dado histograma de *input* não pode se dar, apenas, de forma visual em seus gráficos de plotagem de suas funções de densidade.

Precisam ser adotados critérios para a escolha do melhor ou do pior ajuste de uma função de densidade de probabilidade a um respectivo histograma. Na presente pesquisa, a estimação do melhor ajuste foi realizada feita com base no método da máxima verossimilhança, através dos critérios de AIC (*Akaike Information Criterion*) e de AICC (*Akaike Information Criterion Corrected*) e do critério de BIC (*Bayesian Information Criteria*). Esses critérios são expressos através das



Figura 3.32: histograma e funções de densidade e probabilidades acumuladas das distribuições normal, log-normal, gama e Gumbel da série temporal de dados de vazão.

Equações (3.68), (3.69) e (3.70).

Geralmente, o AIC superestima assintoticamente a ordem do ajuste, propondo, na maioria dos casos, ajustes parametrizados. O AICC é uma versão corrigida do AIC que incorpora uma correção de viés para amostras finitas. O BIC é um critério consistente, de forma que ele fornece estimativas de p e q que convergem em probabilidade para os valores verdadeiros à medida que T tende a infinito. O melhor ajuste é aquele que apresentar o menor AIC, AICC e/ou o menor BIC [7].

Considerando os resultados após a aplicação dos critérios AIC e BIC, quanto menores os valores encontrados para essas medidas, melhores são os ajustes realizados pelas distribuições. Ressalta-se que o teste estatístico de Anderson-Darling também pode ser adotado na definição do melhor ajuste da função de densidade de probabilidade.

Séries de vazão e de níveis de água, quando observadas ao longo do tempo, apresentam sempre variações sazonais e não regulares. A observância de séries de longo período revela, sempre, eventos extremos, máximos e mínimos, e comportamentos sazonais cíclicos. A ocorrência de uma dada vazão ou nível de água

está sempre associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Obras hidráulicas e aproveitamentos hidrocínéticos em trechos de jusante de barramentos devem sempre ser dimensionadas para condições operacionais e altimétricas que atendam a padrões de probabilidade e de recorrência previamente definidos.

Análises estatísticas e probabilísticas de aproveitamentos hidrocínéticos devem ser desenvolvidas para períodos de retorno específicos que representem a certeza e a confiança das análises. Define-se período de retorno como sendo o intervalo médio de tempo, em anos, que decorre entre duas ocorrências iguais e subsequentes. Corresponde ao número médio de anos necessários para que um acontecimento ocorra em um ano qualquer de um dado período. É igual ao inverso da probabilidade anual de ocorrência desse acontecimento, conforme Equação (3.169).

$$T_r = \frac{1}{P} \quad (3.169)$$

Em que: - T_r é o período de retorno; e

- P é a probabilidade de ocorrência de um determinado evento hidrológico.

Tendo por base uma série de longo período de uma determinada variável hidrológica, a estimativa de um valor dessa variável, associada a um dado período de retorno, é função da média aritmética (\bar{Y}) e do desvio-padrão (S) da série e da variável reduzida que depende da distribuição de probabilidade (Z), que é função do período de retorno adotado na análise. A Equação (3.170) mostra a expressão utilizada na estimativa de valor de uma variável hidrológica a partir de um T_r .

$$\hat{Y} = \bar{Y} \pm Z.S \quad (3.170)$$

Em que:

- \hat{Y} é o valor estimado da variável hidrológica associado a um dado período de retorno;
- \bar{Y} é a média aritmética da série de longo período da variável hidrológica;
- S é o desvio padrão da série de longo período da variável hidrológica; e
- Z é a variável reduzida que depende da distribuição de probabilidade, da probabilidade de excedência e do período de retorno.

Da observância da Equação (3.170), constata-se que o produto da variável reduzida com o desvio-padrão pode assumir valores positivos ou negativos. Quando o objetivo da estimativa de valor da variável hidrológica requer projeções ao ano úmido, utiliza-se o sinal positivo; e, quando ao ano seco, usa-se o sinal negativo.

Diagnósticos de fluatuabilidade de níveis de água e de vazão, sob a ótica do aproveitamento hidrocínético, são realizados considerando-se o ano seco, uma vez que, dessa forma, aumenta-se a segurança na constância do aproveitamento com a estimativa de níveis de água e de vazões mais baixos. Quando as análises são efetuadas visando, por exemplo, ao controle de enchentes ou a definição de elevações de estruturas hidráulicas, emprega-se o ano úmido, pois, com maiores estimativas de níveis de água ou de vazões, aumenta-se a segurança quanto a ocorrência de inundações.

3.8 Conclusões

Modelos estocásticos ARIMA, de previsão de níveis de água e vazões e modelos RNAs, ambos utilizados na gestão de sistemas de reservatórios, são de fundamental importância na operacionalização do Sistema Interligado Nacional. Os resultados de aplicação desses modelos evidenciam que esses modelos estocásticos são ferramentas eficientes.

Com base nas discussões e nos resultados alcançados pelo *Work Package 1-3*, conclui-se que os modelos de previsão desenvolvidos e aplicados são uma plataforma de suporte ao dimensionamento de parques hidrocínéticos e a modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas em aproveitamentos hidrelétricos e, ainda, geram dados necessários à minimização de conflitos entre usos múltiplos da água.

Nessa ótica, os modelos de base estocástica desenvolvidos, de previsão de níveis de água, do tipo *Auto Regressive Integrated Moving Average*, e de vazões, do tipo e o RNA do tipo *Multi-Layer Perceptron*, foram de fundamental importância na operacionalização e no *input* de dados nos sistemas de geração de energia hidrocínética, constituindo-se em importantes ferramentas de modelagem hidrológica e de parametrização de variáveis hidroclimáticas a serem adotadas na consecução e operacionalização de processos de minoração do número de comunidades constituintes dos sistemas isolados do Brasil.

Referências Bibliográficas

- [1] Barbosa, P. A. V., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A. and Secretan, Y. [2018]. A simplified methodology for the analysis of the establishment of hydrokinetic parks downstream from hydroelectric plants, *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* **13**(3): 1.
- [2] Bayer, D. M., Castro, N. M. d. R. and Bayer, F. M. [2012]. Modelagem e previsão de vazões médias mensais do rio potiribu utilizando modelos de séries temporais, *Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 17, n. 2 (abr./jun. 2012), p. 229-239* .
- [3] Birinci, V. and Akay, O. [2010]. A study on modeling daily mean flow with mlr, arima and rbfnn, *Proceedings of BALWOIS: Water observation and information system for decision support. Ohrid, Republic of Macedonia* pp. 25–29.
- [4] Blunden, L. and Bahaj, A. [2006]. Initial evaluation of tidal stream energy resources at portland bill, uk, *Renewable Energy* **31**(2): 121–132.
- [5] Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. and Ljung, G. M. [1976]. *Time series analysis: forecasting and control*, John Wiley & Sons.
- [6] Box, G., Jenkins, G. and Reinsel, G. [1976]. *Time series analysis: Forecasting and control*. 2nd ed., *San Francisco: Holden-Day* pp. 21–43.
- [7] Brockwell, P. J. and Davis, R. A. [2002]. *Introduction to time series and forecasting*, Springer.

- [8] Carballo, R., Iglesias, G. and Castro, A. [2009]. Numerical model evaluation of tidal stream energy resources in the ría de muros (nw spain), *Renewable Energy* **34**(6): 1517–1524.
- [9] Chatfield, C. [2003]. *The analysis of time series: an introduction*, Chapman and hall/CRC.
- [10] Cox, D. R. and Miller, H. D. [2017]. *The theory of stochastic processes*, Routledge.
- [11] da Silva Holanda, P., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N. and Secretan, Y. [2017]. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants, *Renewable Energy* **101**: 1203–1214.
- [12] Dadashi, A., Dulebenets, M. A., Golias, M. M. and Sheikholeslami, A. [2017]. A novel continuous berth scheduling model at multiple marine container terminals with tidal considerations, *Maritime Business Review* .
- [13] de Figueiredo, N. M., Blanco, C. J. C., Campos Filho, L. C. P. and Mesquita, A. L. A. [2022]. Muwos-multiple use water optimization system for the power generation and navigation trade-offs analysis, *Available at SSRN 4042079* .
- [14] Draper, N. R. and Smith, H. [1998]. *Applied regression analysis*, Vol. 326, John Wiley & Sons.
- [15] Figueiredo, N., Blanco, C. and Moraes, H. [2014]. Forecasting navigability conditions of the tapajós waterway—amazon—brazil, *Maritime Technology and Engineering* **1**: 129.
- [16] Figueiredo, N. M. and Blanco, C. J. C. [2014]. Simulação de vazões e níveis de água médios mensais para o rio tapajós usando modelos arima, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* **19**(3): 111–126.
- [17] FISCHER, S. [1982]. *Séries univariantes de tempo: metodologia de box & jenkins. porto alegre, fee, 1982 186 p*, Master's thesis.

- [18] Geressu, R. T. and Harou, J. J. [2019]. Reservoir system expansion scheduling under conflicting interests, *Environmental Modelling & Software* **118**: 201–210.
- [19] Gjika, E., Ferrja, A. and Kamberi, A. [2019]. A study on the efficiency of hybrid models in forecasting precipitations and water inflow albania case study, *Advances in Sciences, Technology and Engineering System Journals* **4**(1): 302–310.
- [20] Haykin, S. [2005]. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall.
- [21] Haykin, S. and Network, N. [2004]. A comprehensive foundation, *Neural networks* **2**(2004): 41.
- [22] Hofmann, H., Lorke, A. and Peeters, F. [2008]. Temporal scales of water-level fluctuations in lakes and their ecological implications, *Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes*, Springer, pp. 85–96.
- [23] Iglesias, G., Sánchez, M., Carballo, R. and Fernández, H. [2012]. The tse index—a new tool for selecting tidal stream sites in depth-limited regions, *Renewable Energy* **48**: 350–357.
- [24] Iosub, M., Minea, I., Hapciuc, O. and Romanescu, G. [2015]. The use of hecras modelling in flood risk analysis, *Aerul si Apa. Componente ale Mediului* p. 315.
- [25] Jenkins, G. M. [1979]. Practical experiences with modelling and forecasting time series.
- [26] Johnston, R. and Smakhtin, V. [2014]. Hydrological modeling of large river basins: how much is enough?, *Water resources management* **28**(10): 2695–2730.
- [27] Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M. and Quaicoe, J. [2009]. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied Energy* **86**(10): 1823–1835.

- [28] Khan, M., Hasan, F., Panwar, S. and Chakrapani, G. J. [2016]. Neural network model for discharge and water-level prediction for ramganga river catchment of ganga basin, india, *Hydrological Sciences Journal* **61**(11): 2084–2095.
- [29] Khan, M., Iqbal, M. and Quaicoe, J. [2008]. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges, *Renewable and sustainable energy reviews* **12**(8): 2177–2193.
- [30] Kilcher, L., Thresher, R. and Tinnesand, H. [2016]. Marine hydrokinetic energy site identification and ranking methodology part ii: Tidal energy, *Technical Report NREL/TP-5000-66079*, NREL.
- [31] Koutroumanidis, T., Sylaios, G., Zafeiriou, E. and Tsihrintzis, V. A. [2009]. Genetic modeling for the optimal forecasting of hydrologic time-series: Application in nestos river, *Journal of Hydrology* **368**(1-4): 156–164.
- [32] Lalander, E. and Leijon, M. [2011]. In-stream energy converters in a river – effects on upstream hydropower station, *Renewable Energy* **36**(1): 399–404.
- [33] Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C., Melián-Batista, B. and Moreno-Vega, J. M. [2016]. A set-partitioning-based model for the berth allocation problem under time-dependent limitations, *European Journal of Operational Research* **250**(3): 1001–1012.
- [34] Le Carrer, N., Ferson, S. and Green, P. L. [2020]. Optimising cargo loading and ship scheduling in tidal areas, *European Journal of Operational Research* **280**(3): 1082–1094.
- [35] Li, Z.-j., Kan, G.-y., Yao, C., Liu, Z.-y., Li, Q.-l. and Yu, S. [2014]. Improved neural network model and its application in hydrological simulation, *Journal of Hydrologic Engineering* **19**(10): 04014019.
- [36] Liu, Y. and Packey, D. J. [2014]. Combined-cycle hydropower systems – the potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations, *Renewable Energy* **66**: 228–231.
- [37] Lloyd, P. J. [2017]. The role of energy in development, *Journal of Energy in Southern Africa* **28**(1): 54–62.

- [38] Logez, M., Roy, R., Tissot, L. and Argillier, C. [2016]. Effects of water-level fluctuations on the environmental characteristics and fish-environment relationships in the littoral zone of a reservoir, *Fundamental and Applied Limnology* **189**(1): 37–49.
- [39] Lohani, A., Kumar, R. and Singh, R. [2012]. Hydrological time series modeling: A comparison between adaptive neuro-fuzzy, neural network and autoregressive techniques, *Journal of Hydrology* **442**: 23–35.
- [40] Mendel, J. and McLaren, R. [1970]. 8 reinforcement-learning control and pattern recognition systems, *Mathematics in science and engineering*, Vol. 66, Elsevier, pp. 287–318.
- [41] Morettin, P. A., Toloi, C. M., Chiann, C. and de Miranda, J. C. [2011]. Wavelet estimation of copulas for time series, *Journal of Time Series Econometrics* **3**(3).
- [42] Morettin, P. A. and Toloi, C. M. d. C. [2006]. *Previsão de séries temporais*, São Paulo: Atual.
- [43] Naghettini, M. [2017]. *Fundamentals of statistical hydrology*, Springer.
- [44] Nasserri, M., Asghari, K. and Abedini, M. [2008]. Optimized scenario for rainfall forecasting using genetic algorithm coupled with artificial neural network, *Expert systems with applications* **35**(3): 1415–1421.
- [45] Nguyen, X. H. et al. [2020]. Combining statistical machine learning models with arima for water level forecasting: The case of the red river, *Advances in Water Resources* **142**: 103656.
- [46] Nirav Kumar K. Pampaniya, D. M. K. T. [2017]. Rainfall runoff modeling using remote sensing, gis and hec-hms model, *Journal of Water Resources and Pollution Studies* **69**.
- [47] Nourani, V., Baghanam, A. H., Adamowski, J. and Gebremichael, M. [2013]. Using self-organizing maps and wavelet transforms for space–time pre-processing of satellite precipitation and runoff data in neural network based rainfall–runoff modeling, *Journal of hydrology* **476**: 228–243.

- [48] Peng, T., Zhou, J., Zhang, C. and Fu, W. [2017]. Streamflow forecasting using empirical wavelet transform and artificial neural networks, *Water* **9**(6): 406.
- [49] Petrie, J., Diplas, P., Gutierrez, M. and Nam, S. [2014]. Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites, *Renewable energy* **69**: 393–401.
- [50] Previsic, M. and Bedard, R. [2008]. River in-stream energy conversion (risc) characterization of alaska sites, *Technical Report EPRI-RP-003-Alaska*, EPRI.
- [51] Ross, S. M. [2006]. *Introduction to Probability Models*, ISE, Academic press.
- [52] Roversi, F., Rosman, P. C. C. and Harari, J. [2016]. Análise da renovação das águas do sistema estuarino de santos usando modelagem computacional, *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* **11**(3): 566.
- [53] Salas, J. D. [1980]. *Applied modeling of hydrologic time series*, Water Resources Publication.
- [54] Sanikhani, H., Kisi, O., Maroufpoor, E. and Yaseen, Z. M. [2019]. Temperature-based modeling of reference evapotranspiration using several artificial intelligence models: application of different modeling scenarios, *Theoretical and applied climatology* **135**(1): 449–462.
- [55] Schwarz, G. [1978]. Estimating the dimension of a model, *The annals of statistics* pp. 461–464.
- [56] Thomas, J. J. and Wallis, K. F. [1971]. Seasonal variation in regression analysis, *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)* **134**(1): 57–72.
- [57] Tilmant, A., Pina, J., Salman, M., Casarotto, C., Ledbi, F. and Pek, E. [2020]. Probabilistic trade-off assessment between competing and vulnerable water users—the case of the senegal river basin, *Journal of Hydrology* **587**: 124915.
- [58] UN [2015]. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. sustainable development knowledge platform.
URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

- [59] Wantzen, K. M., Rothhaupt, K.-O., Mörtl, M., Cantonati, M., Tóth, L. G. and Fischer, P. [2008]. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue, *Ecological effects of water-level fluctuations in lakes*, Springer, pp. 1–4.
- [60] Wheelwright, S., Makridakis, S. and Hyndman, R. J. [1998]. *Forecasting: methods and applications*, John Wiley & Sons.
- [61] Wold, H. [1938]. *A study in the analysis of stationary time series*, PhD thesis, Almqvist & Wiksell.
- [62] Wu, C. and Chau, K.-W. [2010]. Data-driven models for monthly streamflow time series prediction, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **23**(8): 1350–1367.
- [63] Yaseen, Z. M., Fu, M., Wang, C., Mohtar, W. H. M. W., Deo, R. C. and El-Shafie, A. [2018]. Application of the hybrid artificial neural network coupled with rolling mechanism and grey model algorithms for streamflow forecasting over multiple time horizons, *Water Resources Management* **32**(5): 1883–1899.
- [64] Zhen, L., Liang, Z., Zhuge, D., Lee, L. H. and Chew, E. P. [2017]. Daily berth planning in a tidal port with channel flow control, *Transportation Research Part B: Methodological* **106**: 193–217.
- [65] Zhu, S., Hrnjica, B., Ptak, M., Choiński, A. and Sivakumar, B. [2020]. Forecasting of water level in multiple temperate lakes using machine learning models, *Journal of Hydrology* **585**: 124819.

Capítulo 4

Metodologias experimentais

Rafael C. F. Mendes, Matheus M. Nunes, Rudi Van Els, Felipe R. T. Camargo e Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

4.1 Considerações gerais

Os recursos hídricos sempre foram um insumo vital para a humanidade ao longo de toda a sua existência, estando fortemente atrelados com a capacidade de progresso humano. Com isso, o interesse da compreensão dos fenômenos naturais e dos parâmetros hidrológicos de cursos d'água sempre instigaram a evolução do conhecimento de técnicas em diversas épocas, levando, como consequência o desenvolvimento de metodologias e instrumentos para levantamento de dados experimentais *in situ* [28, 35]. É possível citar incontáveis exemplos para ilustrar tal fato, tendo como referência relatos desde a civilização egípcia [4] até os mais modernos recursos que recorrem ao emprego de imagens de satélites para aferir diversos parâmetros hidrológicos [27].

Inúmeros parâmetros físico-químicos de cursos d'água são constantemente investigados *in situ*, em uma importante rede de estações hidrométricas, no sentido de caracterizar sistematicamente os recursos hídricos no Brasil e no mundo. Banco de dados são compostos por medidas cotidianas de vazão, nível, temperatura e

velocidades, até algumas mais complexas, como batimetria do canal, níveis de concentração de poluentes, turbidez, acidez, etc. Assim, é possível agrupá-los em diversas escalas de comprimento, em que estuda-se sua região de influência, e escalas temporais, correlacionando a natureza dos fenômenos em permanentes e transientes, assim como, a caracterização e os efeitos de seus ciclos hídricos [36].

No caso específico do potencial hidrocinético, cujas as variáveis de interesse são listadas na tabela 3.2, são necessários levantamentos complementares em campo no sentido de compor um banco de dados para um determinado curso d'água que agregue variáveis em termos de séries temporais e mapeamentos georreferenciados. Tais dados, complementados com resultados de modelos numéricos, permitem uma disponibilização confiável do recurso energético a ser aproveitado. Deve-se considerar a temporalidade quanto aos ciclos hidrológicos e de maré, em face da sazonalidade típica do corpo d'água, bem como escalas mais rápidas associadas à turbulência local. Essas são informações importantes para o dimensionamento de sistema e de viabilização de projetos energéticos. Neste sentido, destacam-se aqui como as principais variáveis a serem aferidas em campo a velocidade do rio, a batimetria e sua cota [8, 38, 13].

As figuras 4.1-4.2 apresentam as diferentes linhas de abordagem de medição *in-situ*. Em sistemas de medição pontual, sensores são instalados em estações de margem ou flutuante. Em sistemas de perfilamento, sensores acústicos tipo ADCP (*Acoustic-Doppler Current Profiler*) são embarcados em uma embarcação rastreada por GPS. Desta maneira, o levantamento do campo de velocidade tridimensional e da profundidade em diversas posições do rio pode ser efetuada. Além disso, sistemas flutuantes, equipados com dispositivos de telemetria e também conhecidos como (*Drifters*), são opções de medições lagrangeanas para caracterização de correntes,

Por fim, um conjunto de metodologias atuais que utilizam processamento de imagens (satélite ou drones aéreos) vem sendo utilizadas para caracterização de velocidade de corrente e altura de onda (altimetria). Estas metodologias tem se representado como muito promissoras no sentido de promover avaliações de grandes áreas de estudo por meio de técnicas de processamento de imagens, estimando informações da superfície livre, tanto a velocidade de correntes (PIV) quanto a altura de onda local (altimetria) (ver [15], [19], [29], [14], por exemplo).

A estratégia metodológica para a caracterização de energia disponível em cor-

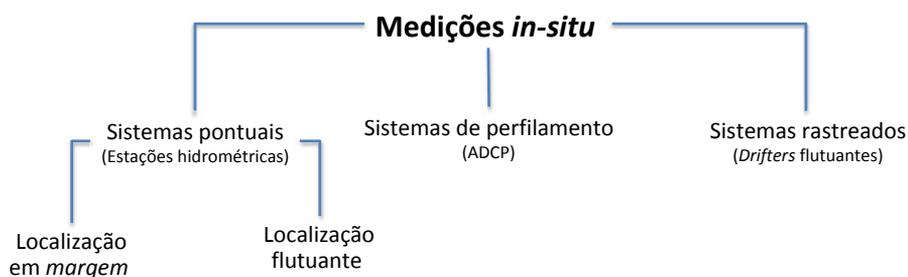


Figura 4.1: Tipologia de sistemas de medição em campo.

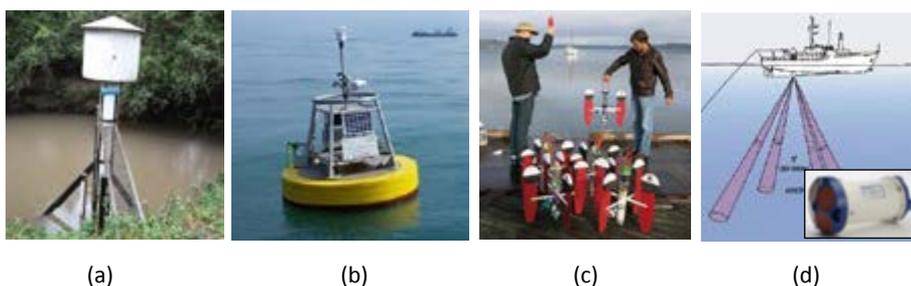


Figura 4.2: Sistemas de medição hidrométrica (a) Estação em margem (b) Estação flutuante (c) *Drifters* rastreados (d) Perfilamento ADCP.

rentes fluviais e oceânicas utilizam amplamente uma diversidade de enfoques de medição, seja por sensores fixos, *Drifters*, perfilamentos ADCP e processamento de imagens. Uma vasta fonte de informações, complementadas por modelos de simulação, compõem de forma robusta um banco de dados de informações hidroenergéticas, com confiabilidade suficiente para a instalação adequada de sistemas hidrocinéticos. Deste modo, a continuação deste capítulo apresentará o funcionamento das metodologias experimentais empregadas para a caracterização do potencial energético disponível em um curso d'água, tendo como principal exemplo o reservatório jusante da UHE *SEFAC*.

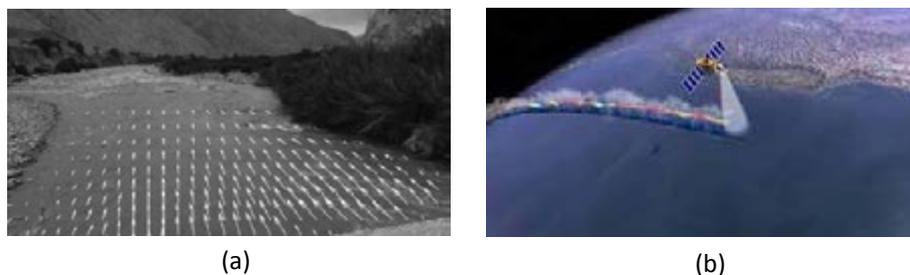


Figura 4.3: Sistemas de medição por imagem (a) Técnica PIV [26] (b) Altimetria por satélite [20].

4.2 Medidas de velocidade por perfilamento acústico - ADCP

A técnica de perfilamento acústico do tipo ADCP é empregada para medição dos componentes da velocidade em cursos d'água explicada pela física do efeito Doppler. Seu princípio de funcionamento é baseado na medição da mudança da frequência entre a emissão e recepção de ondas sonoras incidentes em uma coluna d'água. O sinal acústico, geralmente operando em uma banda de frequência de $0,5 - 3 \text{ MHz}$ [31], é gerado pelo emissor e se desloca pelo meio contínuo até atingir qualquer partícula suspensa no fluido, refletindo-o na direção do receptor [25], como ilustrado na figura 4.4. Considerando que tais particulados dispõem da mesma velocidade da correnteza e que devido ao efeito Doppler, a frequência entre o sinal emitido e o sinal recebido irá mudar em razão da velocidade do meio de propagação, podendo, assim, correlacionar a mudança da frequência emitida/recebida com a velocidades da correnteza.

Instrumentos acústicos não intrusivos usando o efeito Doppler têm se tornado cada vez mais populares na comunidade de engenharia para medições de velocidade em condições de laboratório e de campo [6]. Entre esses instrumentos, o ADCP tornou-se amplamente utilizado para medições de vazão em condições de campo, destacando-se pela sua elevada eficiência operacional e em sua robustez.

A primeira geração de ADCPs, utilizando sistemas acústicos de largura de banda estreita e pulsos simples, foi inicialmente aplicada a medições de correntes

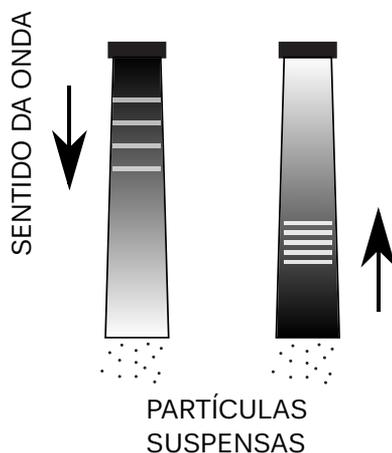


Figura 4.4: Princípio de funcionamento de um sensor de perfilamento do tipo ADCP.

oceânicas e estuarinas, havendo uma vasta literatura descrevendo as medições deste tipo de ADCP para estudar a estruturas do escoamento de navios em movimento [37]. Entretanto, sistemas mais modernos são tomados por sensores de diversos pulsos, sendo acrescidos de múltiplos pares de emissores e receptores aumentando a capacidade espacial de realizações de medidas e sua precisão.

Os ADCPs que são usados para medir a descarga em um rio são como aqueles empregados em pesquisas oceanográficas, exceto pelo fato de os oceanógrafos normalmente requererem medições a maiores profundidades. Por outro lado, as medições de profundidade são frequentemente feitas com o fundo do rio próximo e dentro do alcance de um ADCP [12].

Atualmente, as medidas de ADCPs são mais frequentemente realizadas a partir de embarcações em movimento nos rios, como apresentado na figura 4.5, com o intuito de estimar a vazão de cursos d'água. A cálculo da vazão é efetuado por meio de múltiplas medidas de velocidades em várias posições dentro de uma mesma seção transversal do rio, também chamada de *transec* do rio. Neste ponto, a vazão é calculada pela integral da velocidade dentro da área da *transec* medida, sendo a área da *transec* também efetuada pela ADCP.

Ainda em relação às medidas de de vazão com o sensor ADCP embarcado, é

indispensável levar em conta todas as velocidades envolvidas durante o processo translação durante a medição da *transec*, necessitando descontar a velocidade da embarcação em relação ao leito e ao fundo do rio. Para isso, sistemas ADCP são geralmente acompanhados por mecanismos de determinação de posição global via satélites, GPS, para conseguir medir o deslocamento durante a medição e efetuar todas as correções necessárias durante as medições de velocidade. Deste modo, apesar da dispersão das medições das velocidades e profundidades por feixes simples ou múltiplos, a precisão da vazão estimada é relativamente boa em comparação com procedimentos alternativos de medição por instrumentos analógicos [24].

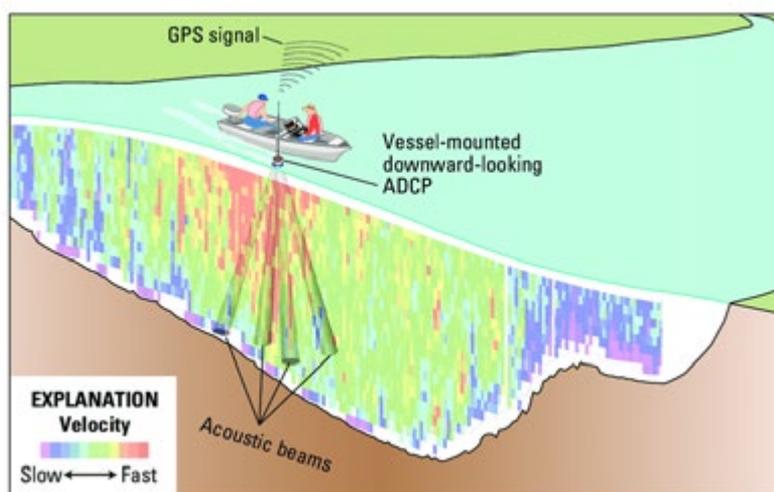


Figura 4.5: Medição de uma *transec* com um ADCP embarcado [21].

Recentemente, os sistemas de ADCP evoluíram muito, de forma que todas as suas medições são efetuadas de maneira remota e com todos os seus componentes interligados. Somado a isso, o uso de GPS de alta precisão do tipo RTK (*Real-time kinematic*) agregam muita qualidade na medição, pois os mesmos são capazes de realizarem medidas com precisão de centímetros. Deste modo, os sistemas de ADCP moderno são compostos de dois conjuntos, um que vai embarcado realizando as medições no rio, figura 4.6 (a), e outro que fica montado em solo para medição das

medidas do GPS-RTK, também responsável pelo cálculo e desconto da velocidade do barco, figura 4.6 (b). Para a comunicação entre eles e um computador, ambos os sistemas possuem um módulo de telemetria remoto sem fio, que são as duas caixas brancas na figura 4.6 (a) e (b) .



(a)

(b)



(c)

Figura 4.6: Sistema de medição ADCP vista geral dos equipamentos. (a) Sistema embarcado composto pelo emissor/receptor de ondas sonoras, sistema de telemetria e GPS. (b) Base da margem GPS-RTK para medições mais precisas. (c) Sistema montado no barco.

4.3 Velocimetria por imagens de partículas em grandes escalas - LSPIV

O método de velocimetria por imagem de partículas, comumente conhecido pela sigla inglesa LSPIV para *Large Scale Particle Image Velocimetry*, é uma técnica experimental derivada originalmente do método padrão de *Particle Image Velocimetry*, PIV. Historicamente, a investigação de um escoamento através da imagem retoma aos esboços do tempo de Leonardo da Vinci. Se o olho humano consegue perceber aspectos qualitativos importantes do fluxo de um corpo de água, a transfiguração destas impressões visuais em informação quantitativa sobre o fluxo tornou-se recentemente possível [22]. O início desta transfiguração quantitativa pode ser dado aos investigadores Barker and Fourney, que utilizaram o método de *Laser Speckle*, que era originalmente um método de medição de deslocamento via fotografias, implementado para a mecânica dos sólidos, mas que provaram a sua aplicabilidade na medição de campos de velocidade em fluidos.

O princípio de funcionamento do PIV pode ser compreendido logo na observação do nome da técnica, que descreve metodologia para medição de velocidade usando imagens de partículas. A ferramenta em si, consiste na comparação de um conjunto de fotos, tomadas em sequência, de partículas suspensas em um fluido qualquer, de tal forma que o tamanho das partículas seja muito menor que as outras dimensões do escoamento. Deste modo, pode-se considerar que o movimento do particulado suspenso será muito próximo ao do fluido. Logo, com a captura de imagens consecutivas é possível estimar parâmetros do escoamento, tais como o campo de velocidade, imperceptíveis ao olho nu.

A figura 4.7 apresenta os principais elementos de um sistema PIV moderno, possuindo uma câmera, um laser e um conjunto ótico para para geração de um plano laser, usado para iluminação das partículas, que estão em um escoamento de ar dentro de um túnel de vento. A ideia é que a câmera consiga capturar a imagem somente das partículas contidas em um único plano bidimensional, aqui delimitado pelo plano laser. Desta maneira, a luz do plano será refletida somente pelas partículas que cruzam o plano, excluindo quaisquer outras áreas do escoamento, facilitando assim a interpretação das imagens obtidas.

Para o cálculo da velocidade no plano em que as partículas foram fotografadas, a técnica PIV usa um algoritmo capaz de correlacionar a posição de conjuntos de

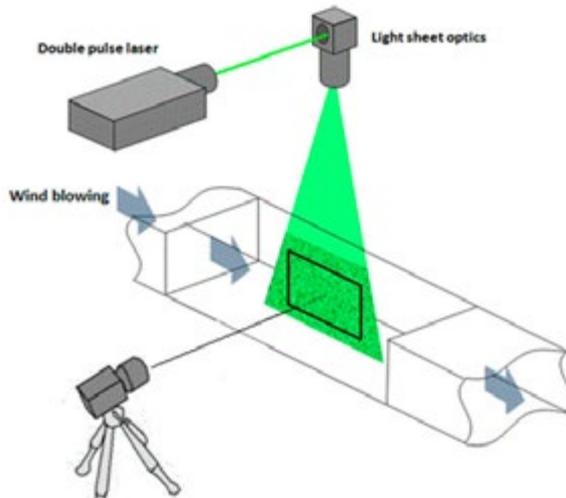


Figura 4.7: Principais itens do sistema de PIV [5].

partículas em um par de imagens consecutivas. Sendo assim, encontra-se o vetor da velocidade por meio do cálculo da correlação espacial entre subdivisões das imagens e, conseqüentemente, o campo de velocidades, limitado pela iluminação do laser, é obtido.

A implementação de câmeras digitais foi, talvez, o maior avanço no método PIV, aumentando a capacidade da obtenção de fotos em curtíssimos espaços de tempo e, conseqüentemente, ampliando a capacidade do cálculo das correlações cruzadas [1]. Para além dos avanços da câmera digital, o avanço da tecnologia nas últimas décadas tem sido extraordinário, permitindo descobertas e utilizações para o método PIV.

No início dos anos 90, os cientistas começaram a aplicar o método PIV em medições em larga escala de comprimento [30], sendo denominado como *Large Scale Particle Image Velocimetry*, LSPIV. Tal técnica emprega os conceitos já mencionados do método PIV tradicional para escoamentos com dimensões reais, e.g. rios, canais, sistemas de irrigação e correntes marítimas.

A lógica por trás do LSPIV é substituir o plano laser diretamente pela foto da superfície livre, considerando que o escoamento limitaria o movimento das

partículas, de maneira análoga a um plano. Desta forma, quando efetuamos diversas fotos da superfície livre do escoamento, podemos considerar que estamos fotografando as partículas de forma similar ao PIV tradicional, sendo possível a aplicação dos demais passos da metodologia PIV. Por fim, se a qualidade das imagens for o suficiente grande para captura das partículas, pode-se computar o campo vetorial de velocidades na superfície do escoamento.

Os primeiros testes desse novo modelo foram realizados em rios japoneses, por Fujita and Komura e Aya et al.. A partir destes trabalhos, surge o nome , para a aplicação do método PIV em grande escala.

O algoritmo de processamento de imagem do método PIV é muito semelhante ao método LSPIV. No entanto, deve ser dado um tratamento especial à iluminação de fluxo, ao seguimento de fluxo e ao redirecionamento de distorções em imagens gravadas devido à lente da câmera e aos seus ângulos oblíquos [11]

Fujita et al. avaliou três experiências com o método LSPIV: a primeira foi o estudo de um modelo hidráulico para analisar os processos de aeração a jusante de um vertedouro de uma barragem de energia e a sua relação com as alterações na concepção e condições de funcionamento do vertedouro; a segunda aplicação foi em um laboratório para estudar o movimento do gelo em rios e a terceira para medir a velocidade do rio Yodo, no Japão, em escala real, durante uma inundação. Todas as experiências foram realizadas em situações em que os métodos tradicionais de medição da velocidade levariam muito tempo para se realizar ou não seriam possíveis de realizar com tais métodos.

Creutin et al. realizou medições utilizando o método LSPIV no rio Iowa, nos Estados Unidos da América, e obteve resultados semelhantes aos recolhidos pela curvas de medição padrão do rio. A experiência também apontou dificuldades com o processamento de imagens que apareciam sombreadas nas imagens registradas.

Fujita and Hino registraram imagens de um helicóptero durante uma cheia no rio Shin, no Japão, para aplicar o método LSPIV e chegaram à conclusões importantes: a necessidade de pontos de controle para poder ortocorretificar as imagens recolhidas, e a turbidez do rio para identificar traçadores naturais no processamento de imagens. Jodeau, Hauet, Paquier, Le Coz and Dramais empregou o método para medir a velocidade de um rio a jusante de uma barragem após a abertura das comportas, salientando a importância do método LSPIV, que é único entre os métodos tradicionais, tais como medições por um dispositivo Doppler, que

não coloca em risco o operador ou o equipamento durante a coleta de dados.

Foram realizadas várias medições de velocidade de rios em todo o mundo, como em [32], [18], [23], [17], [7] e [34]. Todos salientando a importância da iluminação, dos traçadores no corpo de água, e da ortorretificação das imagens obtidas para alcançar bons resultados para a velocidade de superfície do rio.

Com o avanço da tecnologia e o barateamento de vários tipos de equipamento, tornou-se acessível a obtenção de uma câmera com uma excelente resolução e a utilização de drones para captar imagens para o método LSPIV. Tauro et al. construíram um drone e utilizaram-no para medir um curso de água no Prospect Park, em Brooklyn, avaliando a estabilidade do drone e a forma como este afetaria as imagens por ele registradas no método LSPIV.

Desta maneira, o método LSPIV provou ser eficiente, de baixo custo e de fácil traquejo. E, assim como PIV tradicional, as dificuldades dessa ferramenta estão associadas a boa execução das fotos a serem analisadas, sendo vital para obtenção de resultados corretos a escolha adequada de bons traçadores/partículas, de sua iluminação e do posicionamento da câmera.

Os benefícios de se utilizar um drone para realizar o registro das imagens do rio são abundantes. Torna possível aceder à localização do rio que seria perigosa ou de difícil acesso com um equipamento ADCP tradicional. É muito mais leve do que o equipamento tradicional ADCP. Também permite extrair dados diferentes da identificação do local, como um modelo digital do terreno.

Tomando as devidas precauções para descolar e sobrevoar a área de interesse, o zangão é fiável, fácil de operar, e equipamento barato de usar. O ideal é descolar o drone em uma superfície plana a pelo menos 1 metro de distância de qualquer objeto ou vegetação.

O drone é posicionado estacionário sobre o fluxo do rio, ver figura 4.8. Outra vantagem do Drone é que tem uma suspensão cardam que permite ao controlador ter um alcance controlável a partir da câmera. Assim, é possível ajustar a câmera ortogonal ao rio.

O drone deve voar a uma altitude específica acima do rio, longe o suficiente para que o vento criado a partir de suas hélices não afete o movimento do rio. Porque isso causaria interferência na nossa medição. Como mencionado anteriormente, os quatro componentes principais para as técnicas LSPIV são a visualização do fluxo, a iluminação, o registro de imagens e o processamento de imagens.

Definir e inspecionar o local é uma tarefa muito importante a realizar em qualquer caracterização do rio, pois a clara visualização do escoamento para o procedimento LSPIV é crucial. É necessário saber se é possível registrar o rio com a câmera, também se não há demasiada vegetação à volta que possa prejudicar as filmagens. Para melhorar a visualização do escoamento, é comum acrescentar algum tipo de traçador natural ao rio. Este traçador natural é adicionado a montante à região de interesse onde a análise irá ocorrer com intuito de aumentar as correlações entre as fotos

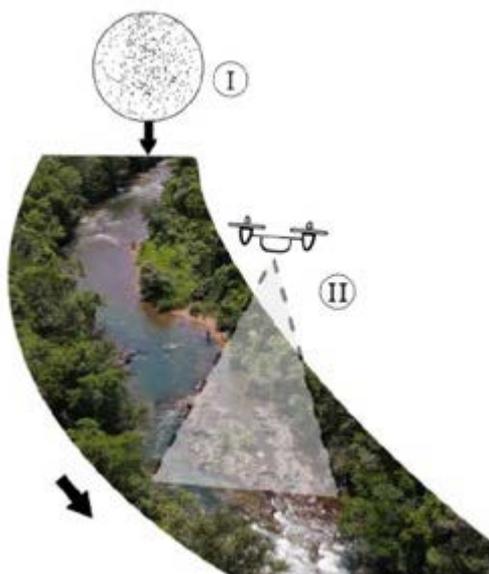


Figura 4.8: Metodologia LSPIV aplicada com partículas marcadoras.

Nas experiências tradicionalmente PIV, a iluminação é gerada por um laser ou por um artificial no laboratório. Nas experiências LSPIV, embora tenha algum exemplo utilizando luz artificial em locais de laboratório, o dispositivo de iluminação padrão é a luz solar, uma vez que é extremamente importante que as medidas sejam realizadas em um dia de luz solar homogênea, claro ou nublado, porém com constância, evitando picos de luz na área registrada.

Decidido a localização do experimento, o dispositivo de gravação, prestando

especial atenção à condição natural em torno do escoamento do rio e também à iluminação que está presente no local, resumem o procedimento de campo necessário para a aplicação da LSPIV, ver figura 4.9.

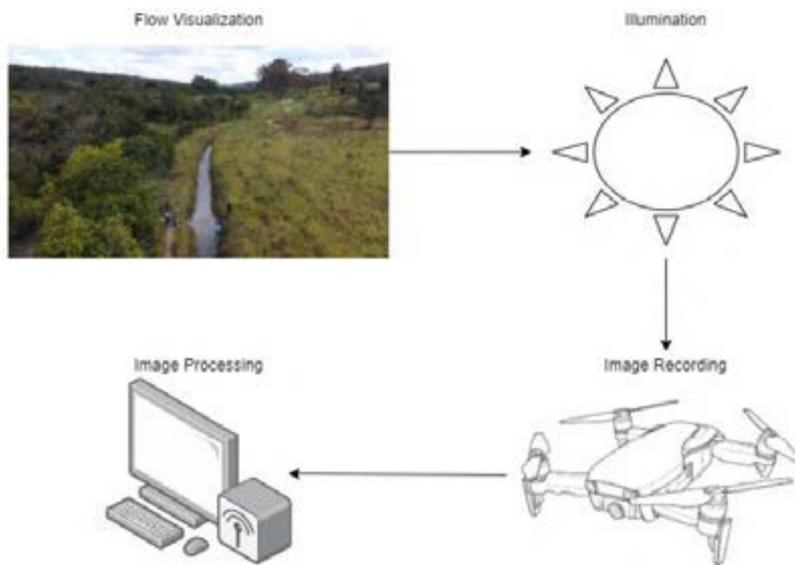


Figura 4.9: Fluxo de atividades tradicional do LSPIV.

Antes do início da fase de processamento da imagem, é necessário destacar um passo importante para garantir uma boa execução da técnica. Está dentro da fase de processamento de imagem, mas tem de ser ajustada no local do campo. A análise da velocimetria é feita comparando pares de fotogramas a partir de imagens gravadas no campo, a saída dessas análises é em unidade de medida de fotogramas/tempo, visto que é indispensável conhecer uma medida física do campo que aparece no registro para ser possível calibrar as análises e obter a velocidade em um sistema de medição tradicional, como metros/segundo.

Essa medida pode ser qualquer coisa no registro que seja possível conhecer com precisão o seu tamanho. Normalmente, alguns pontos de controle do solo (*ground control points* - GPA, do inglês) são adicionados ao campo, para que possam ser utilizados como um objeto para calibrar o procedimento. O GCP tem outro fator

importante na LSPIV. Quando as câmeras não são posicionadas ortogonalmente para o rio, é necessário realizar uma etapa extra na fase de processamento da imagem, chamada ortoretificação. As vistas ortogonais das câmeras requerem uma retificação geométrica de velocidade, ou resultados de velocidade, para superar as distorções apreciáveis produzidas pelo ângulo de visão da câmera. Em uma câmera fixa são necessárias pelo menos 4 GCP e a medida da sua posição georreferenciada entre si para ortoretificar a imagem.

Após o registro das imagens do rio desejado, inicia-se a fase de processamento da imagem. Nos últimos anos, foram desenvolvidos novos instrumentos computacionais gratuitos para a análise PIV, por exemplo, OpenPIV, PIVlab e RIVeR.

4.4 Estudo de caso: medidas *in situ* do reservatório do rio São Marcos a jusante da usina SEFAC

Sob a ótica dos procedimentos de caracterização da velocidade do escoamento, que também visam caracterizar o potencial hidrocínético disponíveis, a continuação do presente capítulo irá apresentar a aplicação das metodologias para o reservatório a jusante da usina hidroelétrica Serra do Fação.

- **Medidas de profundidade com o ADCP**

A metodologia experimentada baseou-se na translação do barco dentro do reservatório a jusante com o ADCP SONTEK modelo M9 embarcada, ver figura 4.10, e realizando medições de coluna de maneira contínua. Desta forma, a ADCP é capaz de aferir a profundidade de todo trajeto percorrido pelo barco. Partindo dessa metodologia, foram tomados 14829 pontos de profundidade e o percurso total mostrado na figura 4.11.

Tabela 4.1: Especificações do ADCP M9 da Sontek

Capacidade de medição do perfil	0,06 to 40m
Alcance de velocidade	±20 m/s
Velocidade — Acurácia	±0,25% da velocidade medida
	±0.2cm/s
Velocidade — Resolução	0,001 m/s
Número de células	Até to 128
Tamanho da célula	0,02 to 4m
Configurações do transdutor	Nove Transdutores
	4 pares de feixes laser de 3.0 MHz
	1.0 MHz inclinados em 25°
	1 feixes laser vertical
Alcance de profundidade	0,20 to 80m
Profundidade — Acurácia	1%
Profundidade Resolução	0,001 m



Figura 4.10: ADCP instalada na embarcação para realização de medições *in situ*.

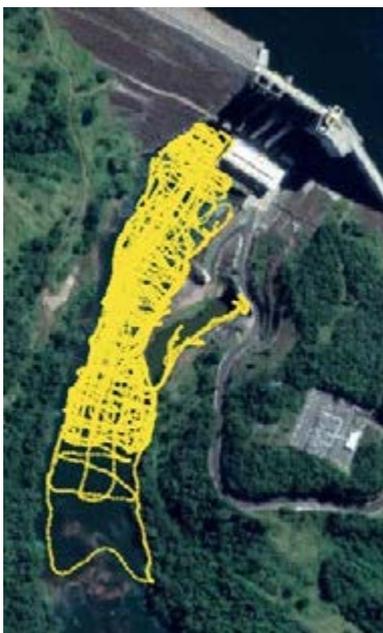


Figura 4.11: Trajetória da embarcação durante a realização de medições com ADCP.

A figura 4.12 ilustra o mapa de velocidades oriundos dos pontos de medições mencionados. Este resultado foi obtido por meio da interpolação de uma malha regular de dimensões de $2m \times 2m$. O mapa foi desenvolvido com o uso de um programa de código livre empregado para análise de dados geoespaciais, o *Qgis*. A lógica deste programa é alinhar informações oriundas de base de dados distintas conforme uma única referência geográfica. Deste modo, como cada valor de velocidade aferido com o ADCP é acompanhado de uma medida das coordenadas obtidas por um GPS, o *Qgis* é uma excelente ferramenta para realização do pós processamento de dados, sendo empregado principalmente para adição do mapa da base de dados do *Google Maps* e o cálculo da interpolação dos resultados entre os locais medidos.

Assim, nota-se que o reservatório da *SEFAC* apresenta duas grandes zonas. A primeira é marcada pela região em que a profundidade é maior que $4,5m$, localizado logo após o canal de fuga das máquinas. A segunda parte, condiz com profundidades menores que $4,5m$ e representa o canal com o potencial para instalação de máquinas hidrocínéticas, devido a sua maior distância do fluxo turbilhonado da saída barragem e, conseqüentemente, a maior uniformidade do escoamento.

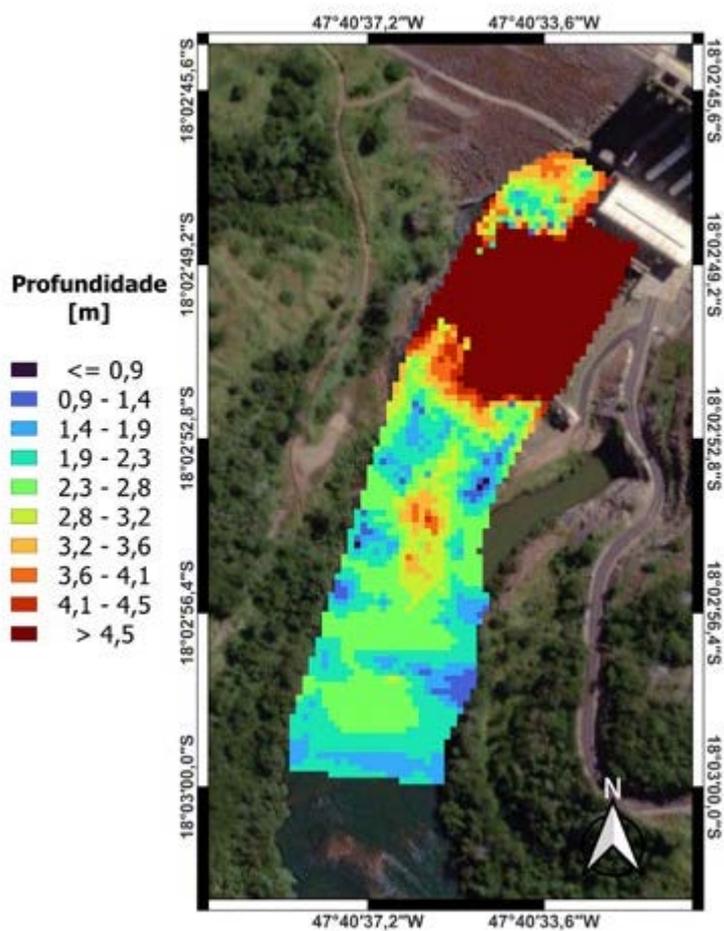


Figura 4.12: Resultados de profundidade do reservatório interpolados em uma malha regular de $2m \times 2m$.

Partindo dos pontos aferidos, a construção do modelo digital de elevação e, conseqüentemente, uma geometria de relevo para estudos via simulação numérica do reservatório. A figura 4.13 apresenta este modelo digital, sendo possível observar as vistas superiores e isométricas da geometria, assim como o detalhe da malha gerada para a descrição do relevo do fundo do rio.

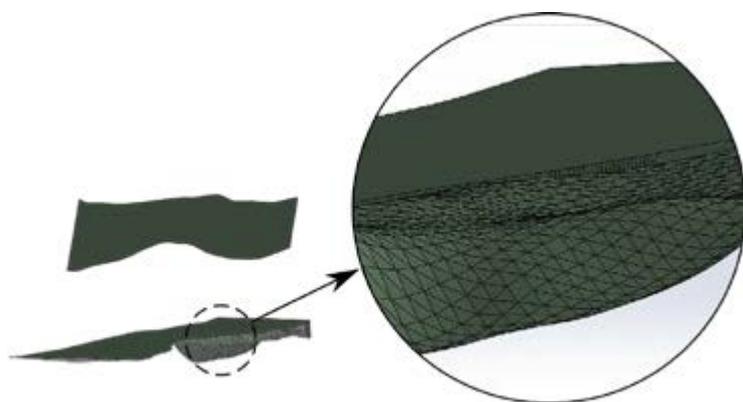


Figura 4.13: Geometria do canal obtida por meio dos pontos experimentais extraídos do ADCP.

Assim como a geração dos mapas da figura 4.12, essa geometria também é formada por um processo de interpolação dos dados de profundidade. O processo para criação de um sólido é realizado em um programa de desenho assistido por computador, e.g. *Solidworks*, *Catia*, *OpenCad*, *Blender*, entre outros. O processo de interpolação nesses programas acontecem com implementação de diversos algoritmos, porém todos eles passam pela mesma sequência lógica que é: importação das pontos em coordenadas geoespaciais; conversão para um sistema de equações cartesianas, em que as coordenadas x , y e z se são a latitude, longitude e profundidade; criação de uma plano- xy com os mesmos limites dos dados importados; e interpolação dos pontos em z .

• **Medidas de velocidade e vazão com o ADCP**

Partido do sistema da metodologia descrita para medições de velocidade com o ADCP, foram realizadas as medidas para 18 perfis de velocidade distintos, apresentados na figura 4.14, para as condições de operação da usina apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados obtidos na sala de controle durante as medidas de ADCP.

Potência Gerada	50 MW
Cota jusante	174,6 m
Vazão	94 m ³ /s
Máquinas em operação	1

Logo após, as figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os respectivos resultados para cada uma das seções. Ainda a respeito destas imagens, nota-se que foram efetuadas 3 medidas para cada uma das seções, sendo cada seção enumerada de 1 a 6 e os subíndices (a), (b) e (c) referente à cada medida, respectivamente. Cada gráfico apresenta o perfil o campo de velocidade medido na seção, sendo os elementos coloridos a magnitude das três componentes da velocidade, i.e. $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$, representadas pela escala de cor de suas respectivas seções. Além disso, cada imagem apresenta um contorno cinza, que é a representação gráfica do relevo do fundo do rio, retratado com a mesma proporção de escala nas coordenadas da abscissa e ordenada. Os locais de realização de medidas foram escolhidos de forma que as medidas ficassem com o mesmo afastamento entre as seções e para agregar todas as áreas possíveis do reservatório. E, em cada uma das seções, foram realizadas mais de uma medição visando evitar qualquer medida incerta ao longo do trabalho. Porém, como pode-se observar nos resultados a seguir, as medidas repetidas mostram coerência entre si, salve um leve translação no eixo x dos gráficos, que ocorre naturalmente tendo em vista que o processo de movimentação do barco não é exatamente preciso.

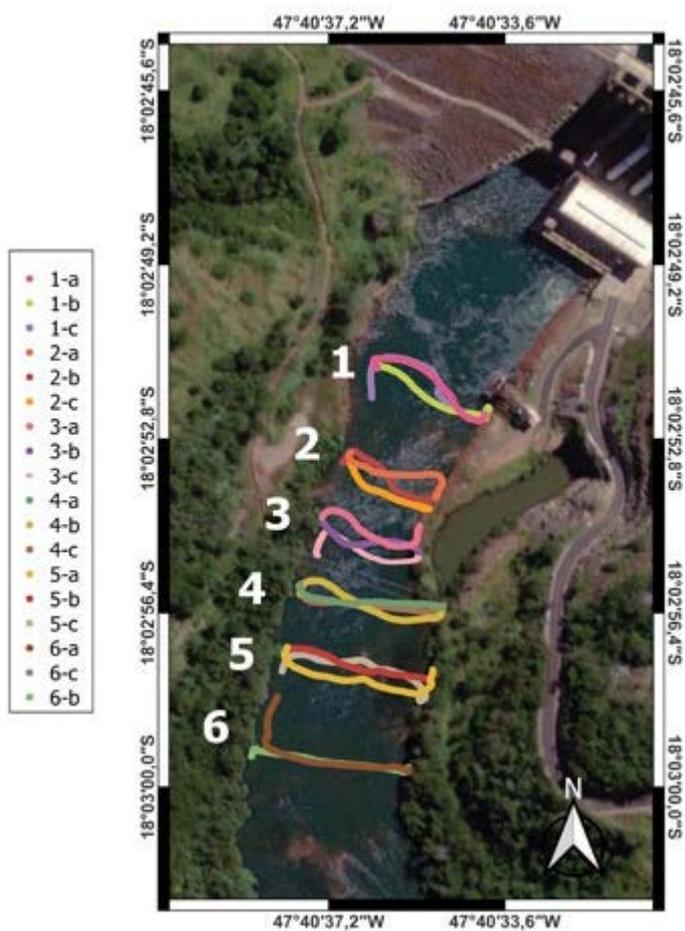


Figura 4.14: Trajetória empregada para medir perfis de velocidade.

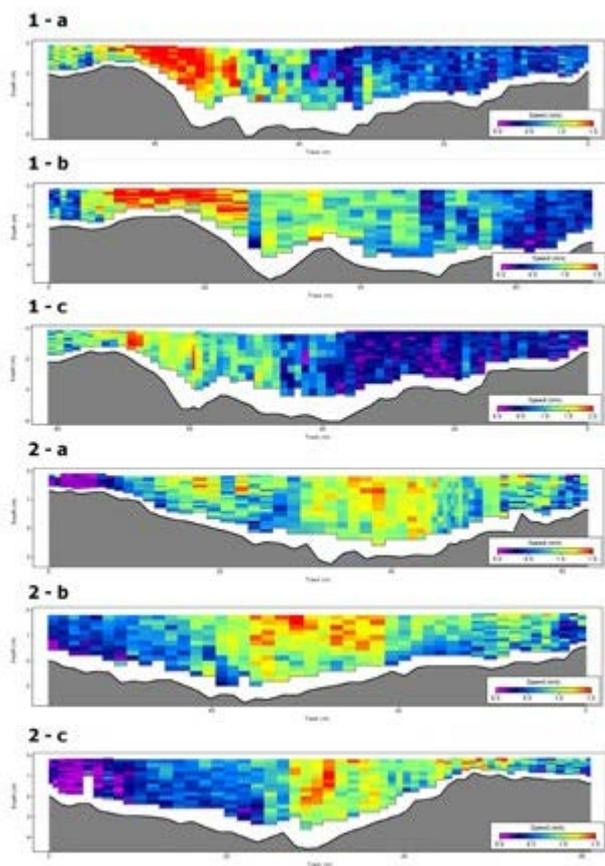


Figura 4.15: Campos de velocidades das seções aferidas com o ADCP (seções 1-2).

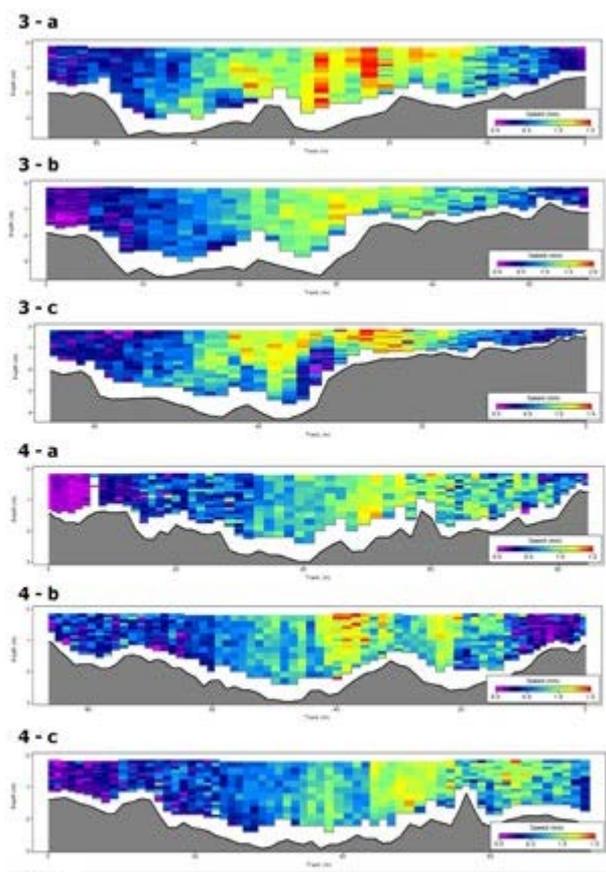


Figura 4.16: Campos de velocidades das seções aferidas com o ADCP (seções 3-4).

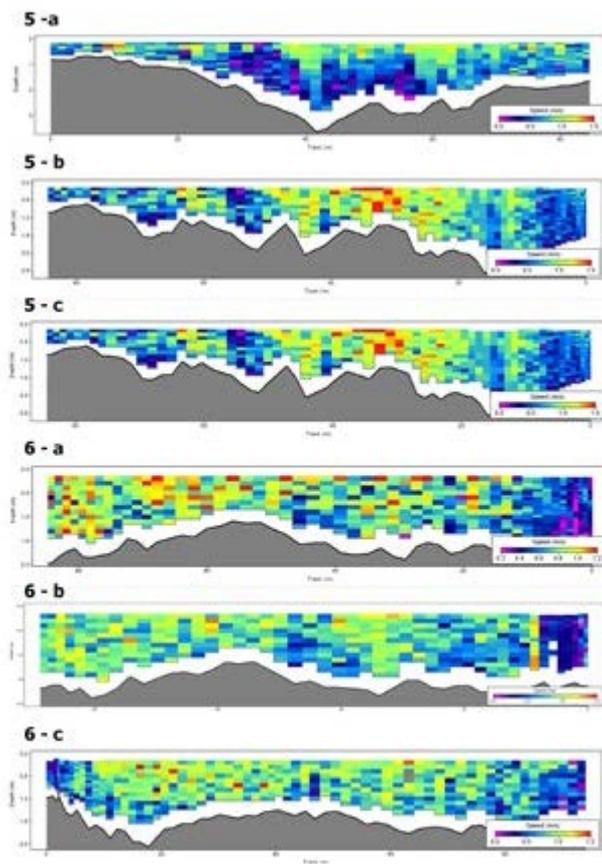


Figura 4.17: Campos de velocidades das seções aferidas com o ADCP (seções 5-6).

Pelas medições apresentadas, pôde-se calcular a vazão média igual a $93,2 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa uma diferença menor que 1% em relação ao valor aferido na sala de operação da usina hidrelétrica, anteriormente apresentado na Tabela 4.2, assegurando, assim, a qualidade das medidas realizadas com o ADCP.

Ainda a respeito dos valores de velocidade obtidos pelo ADCP, a figura 4.18 ilustra o mapa contendo a interpolação dos resultados em uma malha regular de $2\text{m} \times 2\text{m}$, novamente obtido pelo com os dados pós-processados no programa *Qgis*. Nesta imagem, observar-se que o valor de velocidade máxima encontrada foi de $1,4\text{m}/\text{s}$ e que a maior parte do reservatório possui um escoamento com o intervalo de velocidade entre $0,5$ e $0,9\text{m}/\text{s}$.

Tomando tais medições e as medições de profundidade, anteriormente apresentadas, e por meio da equação que descreve o potencial hidrocínético disponível, computa-se o mapa da figura 4.19, que apresenta os locais em que se é possível a instalação de máquinas hidrocínéticas. Cabe ressaltar que, para este cálculo, o coeficiente de potência (também descrito com eficiência da turbina) não foi levado em conta, portanto a figura 4.19 somente ilustra o potencia hidrocínético disponível e não o potencial elétrico a ser convertido por uma turbina. A região circunscrita pela zona vermelha representa a localidade de maior potencial disponível, cerca de 3kW para as condições de operação da usina (por volta de 25% do potencial total). Pode-se observar outra região, mais próxima à barragem, com um potencial parecido, porém não se pode considerar essa área, pois o escoamento ainda é bastante influenciado pela saída das máquinas da *SEFAC*.

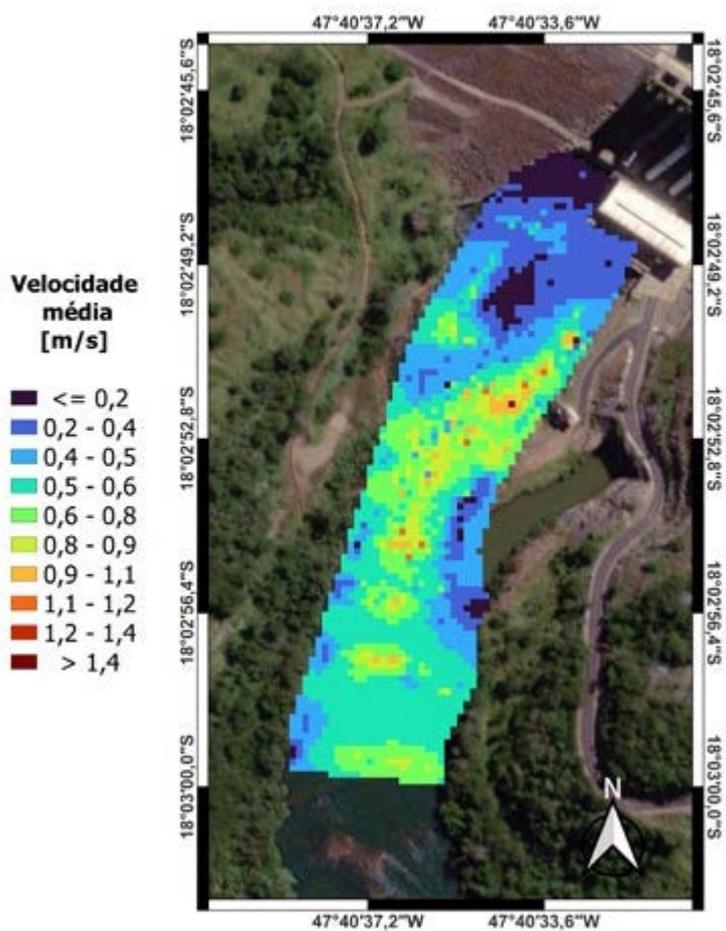


Figura 4.18: Interpolação das medidas de velocidades com ADCP.

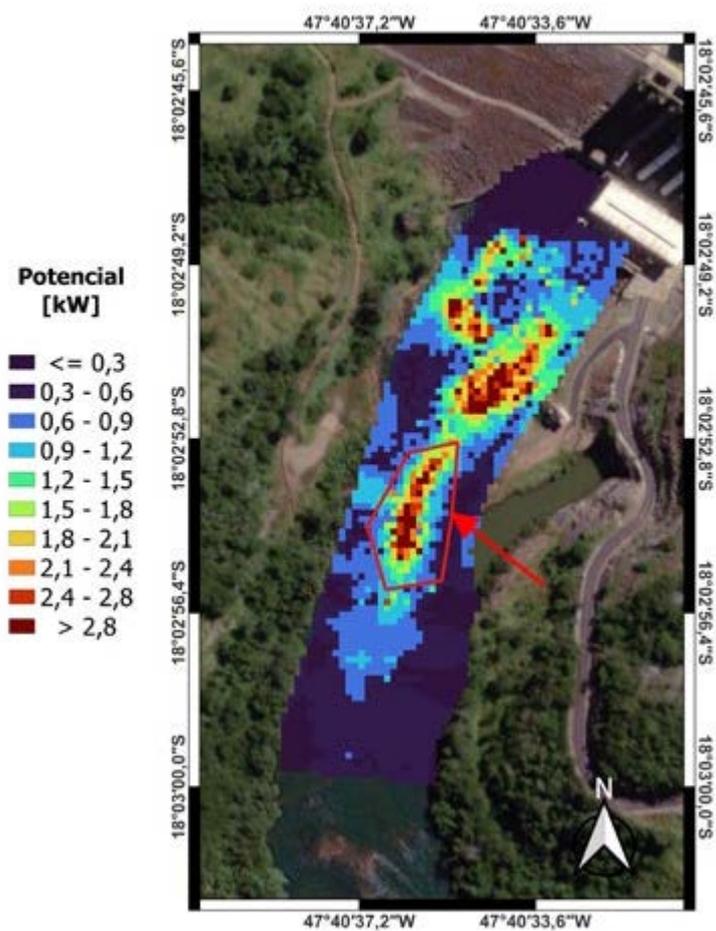


Figura 4.19: Potencial hidrocínético disponível.

• **Medidas de velocidade de superfície com a técnica LSPIV**

Duas metodologias de campo foram realizadas neste trabalho, LSPIV, e ADCP, e, nesta seção, ambas serão discutidas. Mesmo que sejam duas técnicas completamente diferentes, partilham um caminho semelhante para recolher os dados. Primeiro medir no campo; e, depois analisar e avaliar utilizando um programa ou *software* específico. Primeiro, a técnica LSPIV será explicada, como os dados foram recolhidos, e como foram tratados, depois a análise com os dados provenientes do ADCP.

Nesta metodologia, a câmera utilizada foi da DJI Mavic Air 2. Uma parte da especificação do drone utilizado está presente na tabela 4.3 Toda a especificação do drone pode ser acessada a partir do seu website.

Tabela 4.3: Especificações drone.

Peso	570g
Dimensões	183mm × 253mm × 77mm
Tempo de voo	33 min
Distância máxima	18,5 m
Precisão em voos estacionários	
Vertical (posicionamento visual)	± 0,1m
Vertical (posicionamento pelo GPS)	±0,5 m
Horizontal (posicionamento visual)	±0,1m
Horizontal (posicionamento pelo GPS)	±1,5m
Resolução da câmera	
Máxima resolução para fotos	48 MP 8000x6000 pixels
Vídeo 4K Ultra HD	3840x2160 24 à 60 fps
Vídeo 2.7K	2688×1512 24 à 60 fps

A área medida pela M9 e registrada pela câmera do drone está presente na figura 4.20. A ideia de três seções para comparar o método foi mantida e os resultados estarão presentes a seguir. A batimetria e o perfil de velocidade coletado pela M9 estão presentes na figura 4.21. A medida de largura pela M9 é diferente da técnica LSPIV, pois o nível da água era tão baixo na margem do rio que não era seguro medir com o barco devido ao número de rochas que estavam no local.

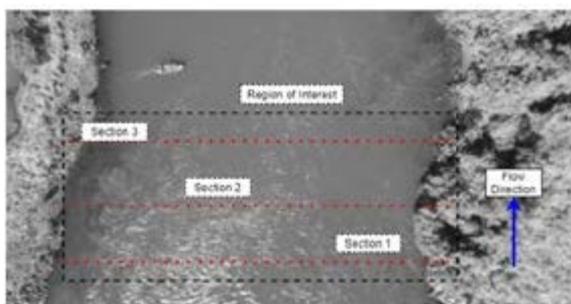


Figura 4.20: Região de interesse São Marcos.

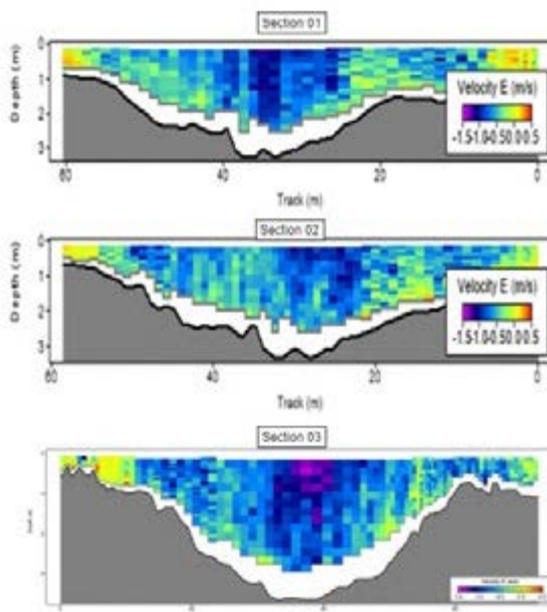


Figura 4.21: Batimetria e velocidade oriundos da medição ADCP.

Três seções foram extraídas do campo vetorial e traçadas para serem comparadas com os resultados da M9. O campo vetorial de velocidade superficial medido pela técnica LSPIV é mostrado na figura 4.22. Como mencionado, nesta experiência não foi possível adicionar um traçador ao rio, portanto, somente uma comparação da técnica LSPIV sem nenhum traçador adicionado com os resultados do ADCP estará presente.

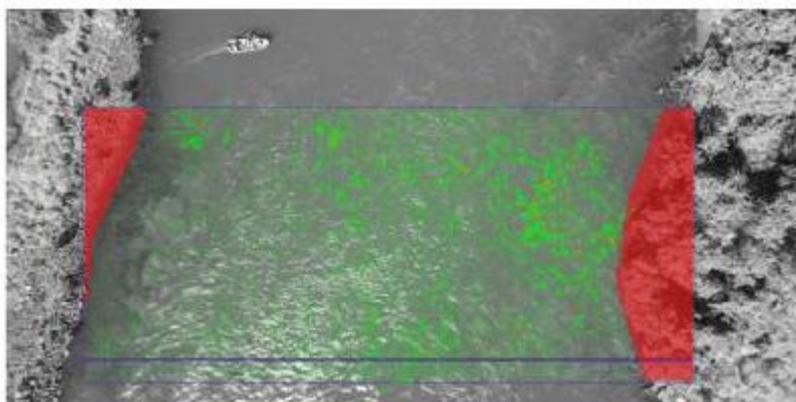


Figura 4.22: Vetores de velocidade LSPIV.

Todos os resultados foram plotados juntos para que fosse fácil visualizar os resultados por meio de cada seção, ver figura 4.23. Os resultados não foram tão bons devido à discrepância entre as curvas apresentadas. O tamanho do rio influencia o tamanho da região de interesse que foi analisada. Infelizmente, devido ao tamanho do reservatório não foi possível adicionar serragem para realizar uma análise com um traçador natural, o que traria melhores resultados em comparação com a M9. No entanto, nas seções 1 e 3, o comportamento da velocidade de ambos os métodos foi semelhante.

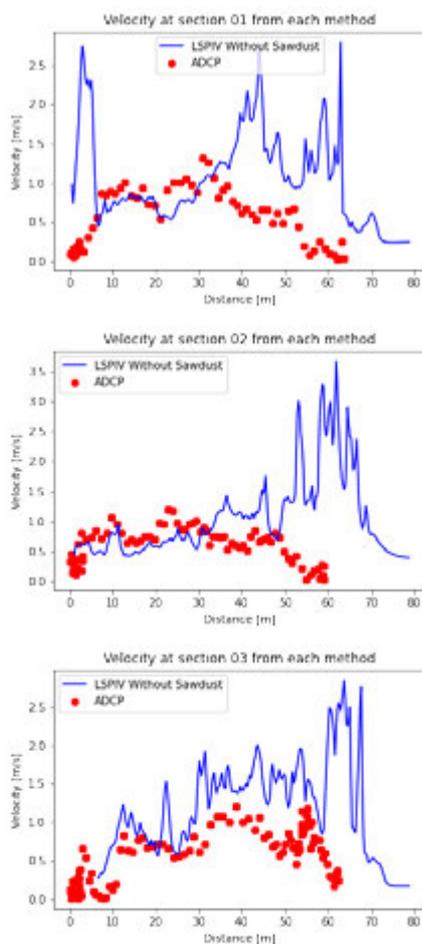


Figura 4.23: Velocidade para cada seção. Comparação de métodos LSPIV e ADCP.

- **Boia telemétrica para medidas de velocidade**

O sistema de telemetria foi desenvolvido em uma plataforma aberta e modular, com módulo com sensores inteligentes na ponta embarcada em flutuantes no rio, apoiada por estações rádio bases que fazem a comunicação entre os sensores inteligentes embarcados e o sistema supervisorio com a base de dados central. Este supervisorio foi desenvolvido em uma plataforma de monitoramento chamada SCADA BR, que é brasileira de código-fonte aberto e que permite vários tipos canais de comunicação. As estações rádio base foram desenvolvidas em um hardware bastante enxuto, num microcomputador em um chip (SoC) que aproveita todo o potencial do sistema operacional Linux para implementar de um lado a comunicação com os sensores por meio de Wi-Fi ou rádio enlaces dedicados. Do outro lado, essa estação pode implementar a comunicação com o SCADA por meio de rede IP usando protocolos modbus-ip, http, ftp, mqtt, aproveitando o suporte nato do Linux.

O módulo com sensor inteligente desenvolvido foi pensado para ter uma versão simples a ser usada como equipamento de campo autônomo e uma versão completa para ser integrada no sistema de telemetria. A versão simples surgiu da necessidade de se ter um instrumento de baixo custo de medição de velocidade da água para dar apoio às expedições de campo, e preenche uma lacuna no mercado brasileiro. A versão completa foi desenvolvida para ter como opção de gravação de dados local em memória SD, implementando assim uma redundância de dados. O módulo comunica-se com a estação radio base por meio de rádio enlace dedicado. Este rádio enlace pode ser por meio de LoRa (Long Range Radio) WAN e ou por WiFi.

A primeira proposta de boia sinalização tem a seguinte configuração, boia, microcontrolador, Sensores, Sistema de comunicação, ancoragem, baterias e painel solar.

O ScadaBR está recebendo dados 24 horas do computador embarcado na estação rádio base que está acessando a internet por meio de um serviço comercial de internet via Wi-Fi para testar a robustez da estabilidade da configuração

O ScadaBR foi instalado de tal forma que registra a data e hora, cada vez quando há uma interrupção ou falha no programa de comunicação, inclusive quando há um boot no computador remoto da estação base. Quanto à estabilidade do ScadaBR rodando no servidor Linux não foi detectado algum problema.

Partindo da concepção inicial, a 4.25 apresenta os componentes eletrônicos aplicados para o correto funcionamento da boia, sendo eles:

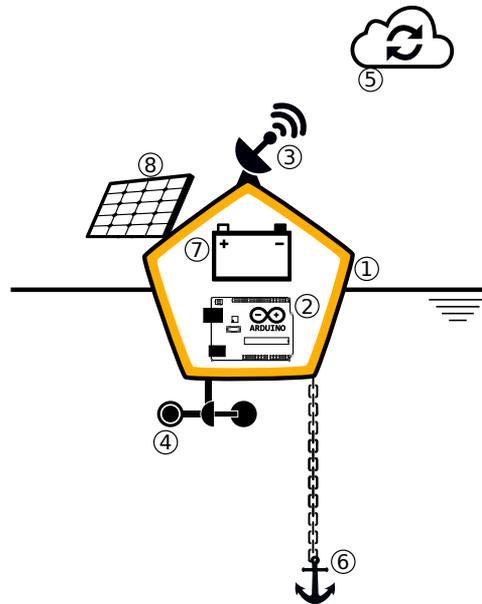


Figura 4.24: Conceito da boia de instrumentos.

1. Conjunto de alimentação solar acrescidos de uma bateria e um carregador empregado com fonte de energia autônoma do sistema;
2. Microcontrolador Arduino Mega para processamento e envio de todos os dados coletados;
3. Antena de rádio (*Link LoRa*) para envio de dados a uma estação de margem;
4. GPS para medir o posicionamento da boia;
5. Entrada USB para controle local por fio;
6. Um relógio real, RTC (*real-time-clock*), para marcação do tempo de aquisição;
7. E os sensores de temperatura e velocidade do rio;

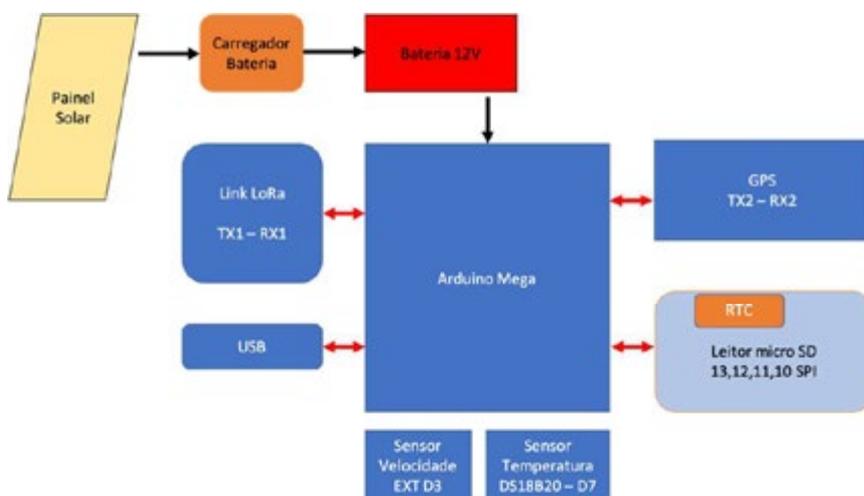


Figura 4.25: Diagrama dos componentes elétricos da boia.

Como não existe no mercado brasileiro um sensor para as aplicações de medição de velocidade de rio, optou-se pelo desenvolvimento de um novo transdutor, por meio da adaptação de um sensor de vazão utilizado em tubos do modelo Sea Water flow, Model YF-DN50, conforme mostrada na figura 4.26. O transdutor foi feito para medir a vazão interna da tubulação e neste sentido já vem todo vedado e preparado para a vedação interno do sensor de medição. Entretanto a parte externa do medidor e a instrumentação não foram desenvolvidos para serem inseridas na água e por isso foi desenvolvida uma adaptação de fixação e vedação do instrumento.



Figura 4.26: Foto do sensor utilizado para medir velocidade. Dimensões: 92 x 59mm (L x diâmetro).

O transdutor do equipamento foi calibrado no canal de água do laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da UnB e a figura 4.27 mostra a curva de calibração. Nota-se que o equipamento tem uma curva bastante linear na faixa que interesse para o funcionamento de turbinas hidrocinéticas. Velocidades do fluxo de água menor que 0,6 m/s não são interessantes para um aproveitamento hidrocinética.

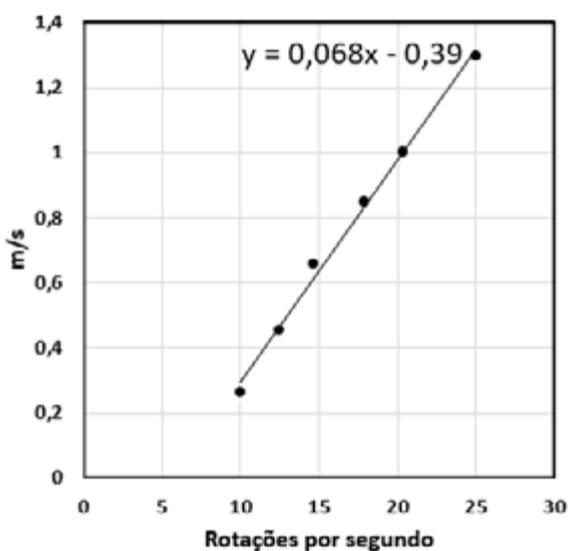


Figura 4.27: Curva de calibração do sensor de velocidade para número de rotações da pá.

Projetou-se um sistema de flutuação do tipo *Catamaram* com flutuadores com tubo de PVC de 25 cm de diâmetro e estrutura metálica de suporte que possa ser desmontada para facilitar seu transporte, apresentado na foto do ensaio da boia na figura 4.28.



Figura 4.28: Conceito da boia de instrumentos em testes.

O sistema de flutuação funcionou de acordo, assim como o sensor de velocidade e sua proteção. Há necessidade de melhorar a proa dos flutuadores do *Catamaram* para permitir uma operação mais segura e estável em trechos do rio com velocidades maiores. Avaliou-se que o tamanho dos flutuadores está atendendo as necessidades de estabilidade e que a escolha do centro de gravidade não influenciou muito no seu funcionamento.

Os testes no equipamento indicaram que as especificações do sistema foram adequadas para as aplicações de medição de velocidade do rio. Entretanto, devido ao prazo finito do presente projeto, não houveram oportunidades de se realizar testes de longa duração para aferição das séries temporais de velocidade local, de acordo o objetivo final do protótipo de boia. Por fim, ressalta-se que a perspectiva de desenvolvimento deste tipo de tecnologia é um campo amplo, pois não há no mercado nenhuma tecnologia para levantamento de potencial hidrocínético que apresente a mesma comodidade de instalação e monitoramento como a boia apresentada neste capítulo.

4.5 Conclusões

Assim, conclui-se que as metodologias aqui apresentadas se mostraram úteis para a construção do banco de dados capaz de caracterizar *in situ* o potencial hidrocínético do reservatório a jusante da usina hidrelétrica SEFAC. Dentre os resultados obtidos, ressalta-se a importância da medição dos campos de velocidade e do relevo de fundo, principalmente aqueles aferidos com o equipamento o ADCP, pois o mesmo conseguiu atribuir confiabilidade ao processo devido a qualidade e robustez do aparelho. Além disso, as outras técnicas aplicadas serviram para o desenvolvimento de dois métodos inovadores: o LSPIV e a boia telemétrica para medição de potencial hidrocínético, que são tecnologias ainda não muito difundidas, seja no campo acadêmico, seja no ramo industrial. Por fim, os dados obtidos neste capítulo ainda serão mencionados nas próximas seções, pois eles serviram como elementos de entrada para as metodologias de simulação numéricas aplicadas no mesmo reservatório.

Referências Bibliográficas

- [1] Adrian, R. J. [2005]. Twenty years of particle image velocimetry, *Experiments in Fluids* **39**(2): 159–169.
- [2] Aya, S., Fujita, I. and YAGYU, M. [1995]. Field-Observation of Flood in a River by Video Image Analysis, *Proceedings of Hydraulic Engineering* **39**: 447–452.
- [3] Barker, D. B. and Fourney, M. E. [1977]. Measuring fluid velocities with speckle patterns, *Optics Letters* **1**(4): 135.
- [4] Boiten, W. [2005]. *Hydrometry*, 3 edn.
- [5] Correia, L. P., Rafael, S., Sorte, S., Rodrigues, V., Borrego, C. and Monteiro, A. [2021]. High-resolution analysis of wind flow behavior on ship stacks configuration: A portuguese case study, *Atmosphere* **12**(3).
URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/303>
- [6] Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C. and Kruger, A. [2003]. River gauging using PIV techniques: A proof of concept experiment on the Iowa River, *Journal of Hydrology* **277**(3-4): 182–194.
- [7] Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B. and Hauet, A. [2011]. Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves, *Journal of Hydro-Environment Research* **5**(4): 301–312.
- [8] Fairley, I., Evans, P., Wooldridge, C., Willis, M. and Masters, I. [2013]. Evaluation of tidal stream resource in a potential array area via direct measurements,

- Renewable Energy* **57**: 70–78.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.024>
- [9] Fujita, I. and Hino, T. [2003]. Unseeded and Seeded PIV Measurements of River Flows Videotaped from a Helicopter, *Journal of Visualization* **6**(3): 245–252.
- [10] Fujita, I. and Komura, S. [1994]. Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows, *Proceedings of Hydraulic Engineering* **38**: 733–738.
- [11] Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. [1998]. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research* **36**(3): 397–414.
- [12] Gordon, B. R. L. [1989]. Acoustic Measurement of River Discharge, **115**(7): 925–936.
- [13] Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J. and Suarez, L. [2017]. International Journal of Marine Energy Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile, *International Journal of Marine Energy* **20**: 1–16.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.11.002>
- [14] Jin, T. and Liao, Q. [2019]. Application of large scale PIV in river surface turbulence measurements and water depth estimation, *Flow Measurement and Instrumentation* **67**: 142–152.
- [15] Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Coz, J. L. and Dramais, G. [2008]. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions, *Flow Measurement and Instrumentation* **19**(2): 117–127.
- [16] Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J. and Dramais, G. [2008]. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions, *Flow Measurement and Instrumentation* **19**(2): 117–127.

- [17] Kantoush, S. A., De Cesare, G., Boillat, J. L. and Schleiss, A. J. [2008]. Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling, *Flow Measurement and Instrumentation* **19**(3-4): 139–144.
- [18] Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G. and Camenen, B. [2010]. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers, *Journal of Hydrology* **394**(1-2): 42–52.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>
- [19] Legleiter, C. J., Kinzel, P. J. and Nelson, J. M. [2017]. Remote measurement of river discharge using thermal particle image velocimetry (PIV) and various sources of bathymetric information, *Journal of Hydrology* **554**: 490–506.
- [20] LI, Y. [2011]. *Satellite altimetry for hydrological purpose*, Master's thesis, Universitat Stuttgart.
- [21] Mueller, D. S. and Wagner, C. R. [2009]. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat, *U. S. Geological Survey Techniques and Methods* (December): 72.
- [22] Muste, M., Hauet, A., Fujita, I., Legout, C. and Ho, H. C. [2014]. Capabilities of large-scale particle image velocimetry to characterize shallow free-surface flows, *Advances in Water Resources* **70**: 160–171.
- [23] Muste, M., Ho, H. C. and Kim, D. [2011]. Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs, *Journal of Hydro-Environment Research* **5**(4): 289–300.
- [24] Muste, M., Yu, K., Pratt, T. and Abraham, D. [2004]. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: Fixed-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation* **15**(1): 17–28.
- [25] Parsons, D. R., Jackson, P. R., Czuba, J. A., Engel, F. L., Rhoads, B. L., Oberg, K. A., Best, J. L., Mueller, D. S., Johnson, K. K. and Riley, J. D. [2013].

- Velocity Mapping Toolbox (VMT): A processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements, *Earth Surface Processes and Landforms* **38**(11): 1244–1260.
- [26] Patalano, A., García, C. M. and Rodríguez, A. [2017]. Rectification of image velocity results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface particle image velocimetry (PIV) and particle tracking velocimetry (PTV), *Computers & Geosciences* **109**: 323–330.
- [27] Robert Brakenridge, G., Cohen, S., Kettner, A. J., De Groeve, T., Nghiem, S. V., Syvitski, J. P. and Fekete, B. M. [2012]. Calibration of satellite measurements of river discharge using a global hydrology model, *Journal of Hydrology* **475**: 123–136.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.035>
- [28] Rouse, H. and Ince, S. [1957]. *History of Hydraulics*, Dover Pub.
- [29] Russmeier, N., Hahn, A. and Zielinski, O. [2017]. Ocean surface water currents by large-scale particle image velocimetry technique.
- [30] Santinello, M. [2019]. Estimativa de velocidades superficiais e vazão em canais usando velocimetria por imagem.
- [31] SonTek [2015]. RiverSurveyor S5 and M9, *SonTek Manuals* (858): 4.
- [32] Sun, X., Shiono, K., Chandler, J. H., Rameshwaran, P., Sellin, R. H. and Fujita, I. [2010]. Discharge estimation in small irregular river using LS-PIV, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management* **163**(5): 247–254.
- [33] Tauro, F., Pagano, C., Phamduy, P., Grimaldi, S. and Porfiri, M. [2015]. Large-Scale Particle Image Velocimetry from an Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **20**(6): 3269–3275.
- [34] *The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows* [2012]. **24**: 1–12.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001>

- [35] Tokaty, G. A. [1994]. *A history and philosophy of fluid mechanics*, Dover, New York.
- [36] Tomsett, C. and Leyland, J. [2019]. Remote sensing of river corridors: A review of current trends and future directions, *River Research and Applications* **35**(7): 779–803.
- [37] Williams, E. and Simpson, J. H. [2004]. Uncertainties in estimates of Reynolds stress and TKE production rate using the ADCP variance method, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **21**(2): 347–357.
- [38] Zdankus, N., Punys, P. and Zdankus, T. [2014]. Conversion of lowland river flow kinetic energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **38**: 121–130.

Capítulo 5

Metodologias de simulação de escoamentos

Claudio J. C. Blanco e Cleidson Alves da Silva

Universidade Federal do Pará. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Taygoara F. Oliveira e Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

Yves Secretan

Université du Quebec. INRS-ETE

5.1 Considerações gerais

A simulação de escoamentos em corpos d'água certamente pode ser considerada como a abordagem metodológica com melhor custo benefício no contexto da caracterização de potenciais hidrocinéticos. O uso de modelos numéricos realísticos para a simulação de escoamentos, complementados e validados por medições *in situ*, tem sido empregado para a estimativa confiável de potenciais de correntes de maré ou fluviais ([15], [13]). Isto se justifica principalmente devido ao alto custo

da elaboração sistemática de levantamento de potenciais por meio de dispositivos experimentais e campanhas de campo. Neste sentido, modelos e simulações de escoamento em corpos d'água permitem sua utilização plena e confiável para a composição de banco de dados de potencial energético, estabelecendo-se assim uma estrutura integrada de informações que utiliza conjuntamente dados de modelos, medições em campo e processamento de imagens de satélite ou drones.

Portanto, o uso da simulação numérica em estudos sobre potenciais hidrocineéticos em corpos d'água contribuem para estabelecer informações relativas aos seguintes aspectos:

- **Mapeamento do potencial hidrocineético:** O contexto do mapeamento georreferenciado é de definir locais de instalação adequados para turbinas. Estes locais preferenciais relacionam-se com os níveis de velocidade da corrente e da profundidade local. Neste sentido, a simulação numérica do escoamento proporciona informações sobre a variação de cota e do campo de velocidade ao longo de condições típicas do ciclo hidrológico e/ou de maré, em toda uma área geográfica de estudo.
- **Composição de séries temporais:** A simulação numérica proporciona o levantamento de séries temporais de densidade de energia hidrocineética utilizando a variação de condições de contorno. Isto complementa medições experimentais, de forma a estabelecer curvas de permanência e de densidade de probabilidade da energia para diferentes locais da área de estudo.
- **Identificação de impactos ambientais:** O mapeamento de campos hidrodinâmicos permite a verificação de regiões críticas quanto ao impacto ambiental sobre ecossistemas locais (peixes e vegetações aquáticas), assim como possibilidade de modificação física de ecossistemas pela instalação de conjunto de turbinas hidrocineéticas (e.g. influência erosiva sobre leitos).

Os desafios para a simulação numérica de escoamentos em corpos d'água relacionam-se ao estabelecimento de modelos mecânicos que formulem de forma consistente as características hidrodinâmicas deste tipo de problema. Tais modelos tem sido implementados utilizando-se métodos numéricos adequados em termos de precisão e desempenho computacional. O atual estágio de desenvolvimento de métodos de simulações de escoamentos com superfície livre, no contexto da CFD

(*Computational Fluid Dynamics*), permitem uma confiabilidade na descrição de campos hidrodinâmicos, o que vai ao encontro das necessidades elencadas. Técnicas numéricas e modelos físicos robustos tem sido implementados em vários códigos comerciais (e.g. ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT ou FLOW3D, por exemplo) ou em plataformas de código livre (e.g. OpenFOAM, DELFT3D, TELEMAC, MOLDELEUR) com aplicações para a simulação de escoamentos fluviais ou em regiões costeiras e oceânicas (e.g. [30], [17], [27])

As principais complexidades no processamento deste tipo de escoamento relacionam-se com:

- **Tratamento dos efeitos de superfície livre:** Modelos 3D completos devem considerar uma variação local das cotas de superfície livre. Modelagens específicas para a altura de onda utilizando uma formulação cinemática local da altura de onda ou mesmo considerando modelos de dois fluidos, são as estratégias de modelagem atualmente abordadas na literatura (e.g. [29] , [8]))
- **Modelos de turbulência adequados:** O uso de modelos de turbulência tipo RANS ou LES devem representar a capacidade de descrição de fenômenos complexos associados às interações próprias entre o escoamento médio e as tensões aparentes de turbulência ([23]).
- **Modelos de atrito de fundo:** Modelos de fundo devem ser providos como forma a considerar rugosidades de fundo ou regiões de vegetação aquática ([21], [22], [25]). Os termos de tensão cisalhante de fundo é formulado como termo de fonte, em modelos 2D, ou como condições de contorno de fundo, em formulações 3D.

De forma geral, os campos hidrodinâmicos que compõem dados para o potencial hidrocínético estão associados à distribuição do campo de velocidade no escoamento ($\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$), às variáveis de associadas ao nível de turbulência (tensões e energia cinética de turbulência) e à cota da superfície livre ($h(\mathbf{x}, t)$).

As abordagens numéricas geralmente utilizadas são ilustradas na figura 5.1, e serão objeto de descrição detalhada nos próximos capítulos. Observa-se que os diferentes níveis de descrição do problema, desde métodos de parametrização simplificados até simulações completas 3D, proporcionam estimativas de potencial com diferentes graus de acurácia de resultados.

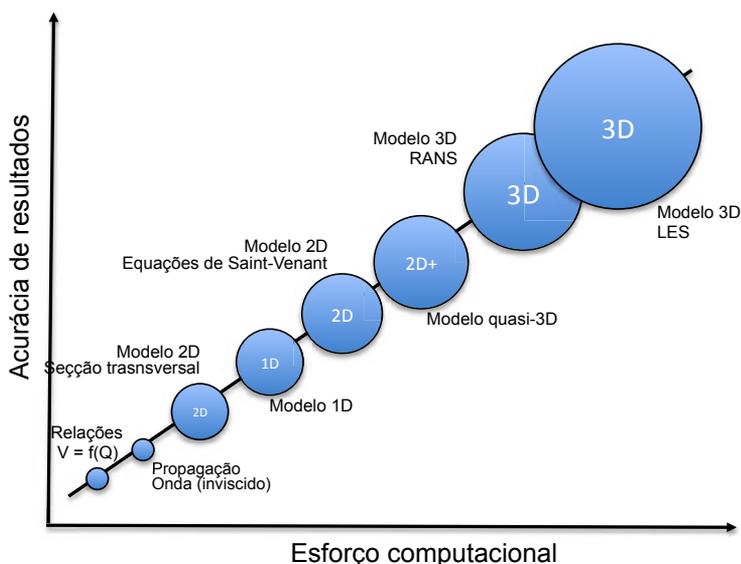


Figura 5.1: Níveis de descrição numérica

Os métodos numéricos em geral utilizados refletem um esforço computacional necessário para a descrição de domínios e para evolução do cálculo. As abordagens de simulação descritas na figura 5.1 envolvem as seguintes estratégias

- **Métodos paramétricos (0D):** Neste tipo de metodologia utiliza-se parame-trizações não-lineares para a determinação da velocidade do escoamento através de relações $V(Q)$ ou ainda por modelos de propagação de onda $h(\mathbf{x}, t)$ (semi-empíricos). O potencial energético é estimado por uma velocidade tí-pica em uma posição \mathbf{x} de uma linha de corrente característica do escoamento (na direção axial do rio, para escoamentos fluviais)
- **Métodos integrais em seção transversal 2Ds:** Neste tipo de metodologia, aplicada principalmente em escoamentos de canais, a distribuição de escoamento em uma secção transversal é obtida por métodos integrais, utilizando o teorema de Biot-Savard ([19]).
- **Modelos 1D transientes:** Estes modelos utilizam a equação de escoamento

em canal baseado na formulação das equações da continuidade e de conservação da quantidade de movimento em canais, obtendo para isso a velocidade média da seção e a altura da superfície livre como função da posição e do tempo ([27])

- **Modelos 2D de águas rasas (*Shallow-Water*):** Este modelos determinam o campo de velocidade 2D no plano superior do corpo d'água, a partir das solução das equações de Saint-Venant (equações médias na profundidade) ([27],).
- **Modelo Quasi-3D:** Neste tipo de abordagem o campo de velocidade calculado por um modelo de Saint-Venant 2D, é complementado por uma parametrização na direção da profundidade, z , resolvendo problemas locais 1D para a determinação de variação de componentes de velocidade.
- **Modelo 3D - RANS:** Neste tipo de modelo o problema de escoamento é formulado de forma completa tridimensionalmente, utilizando modelos de turbulência com fechamento médio (RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) ([23]). Os campos hidrodinâmicos médios são utilizados para a determinação do potencial hidrocínético.
- **Modelo 3D - LES:** O modelo LES de simulação de grandes escalas (*Large Eddy Simulation*), formula o comportamento turbulento em um processo de filtragem espacial de pequenas escalas, utilizando modelos locais para tal nível de descrição. Estes modelos requerem bastante esforço computacional, no sentido de descrever convenientemente gradientes de campos hidrodinâmicos de forma adequada, bem com utilizam passos de tempo de evolução do cálculo bastante reduzidos.

5.2 Modelo 2D - Equações de Saint-Venant

5.2.1 Considerações Gerais

Adhémar Barré de Saint-Venant publicou, em 1871, o modelo mais usado para análise de escoamentos à superfície livre e profundidade pequena quando comparadas ao comprimento e à largura de corpos de água, tais como: rios, riachos,

canais, lagos, lagoas, baías e estuários. O modelo é mais comumente chamado de equações de Saint-Venant ou, do inglês, equações de águas rasas (*shallow water equations*). Suas aplicações, em hidráulica, são as mais variadas, por exemplo, para determinação de: ressalto hidráulico, inundação e propagação de ondas (inclusive tsunamis, pororocas e rompimento de barragens), escoamento superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas, erosão costeira, além do ponto central do presente trabalho, avaliação energética de projetos hidrocinéticos em reservatórios de jusante de UHEs.

A simulação de escoamentos em corpos d'água através do modelo 2D de águas rasas (*Shallow-Water*) é uma abordagem que envolve um esforço computacional relativamente reduzido, e proporciona um resultado rápido sobre a estimativa do campo médio de velocidade no plano d'água. A limitação de uma descrição 2D pode ser re-adequada por uma parametrização de perfis de velocidade em uma dada seção de rio ([19]), ou ainda ser acoplada em uma modelo quasi-3D. Neste sentido, este tipo de abordagem 2D vem sendo utilizada com sucesso para a estimativa de potenciais hidrocinéticos, tais como referenciado no trabalho de [10] ou [1], por exemplo.

No sentido de descrever o escoamento de água em canais de jusante de usinas hidrelétricas e em rios em geral, o modelo 2D no plano superficial do corpo d'água é empregado. Este tipo de modelo, que considera que o escoamento é descrito convenientemente por uma hipótese de águas rasas e é formulado pelas Equações de Saint-Venant.

O modelo de escoamentos hídricos proposto por Saint-Venant consiste, em sua essência, em reduzir o problema 3D para um problema 2D descrito no plano de referência do corpo d'água. Esta formulação, conhecida também como equações de *Shallow-Water* ou equações para águas rasas, baseia-se nas seguintes hipóteses:

- As variações dos componentes u e v do campo de velocidade na direção z é muito pequena (considera-se a coordenada z alinhada com a direção da profundidade do corpo d'água, tal como ilustrado na figura 5.2.
- A componente w é praticamente nula, bem como suas derivadas.
- As variações espaciais da superfície livre são bem suaves (hipótese de ondas longas). Em geral considera-se que:

Portanto escolhendo valores adequados para k_s pode-se facilmente estimar valores para C . Com base nestes argumentos, [12] sugere para lagos

$$C = 15 \ln(0.9H) \quad (5.29)$$

5.2.4 Modelos de turbulência

O uso de modelos de turbulência em escoamentos ambientais direcionam o fechamento do problema em primeira ordem utilizando a hipótese de Boussinesq, envolvendo no termo difusivo a viscosidade de turbulência ν_T . As formulações 2D e quasi-3D elaboram de forma bastante simplificada as estimativas dos modelos de viscosidade de turbulência utilizando formulações algébricas ou modelos de uma ou duas equações ([23], [24]). A complexidade da aproximação por médias verticais em modelos 2D não requerem uma descrição detalhada da turbulência local, permitindo assim o uso de modelos simples para a descrição do fenômeno de difusão devido a um estado de agitação global do escoamento.

Modelos algébricos

Dhatt [12] propõe um conjunto de equações simplificadas para a viscosidade, baseada em modelos de comprimento de mistura ou em modelo local de fricção. Em uma primeira proposta o autor utiliza

$$\nu_T = \alpha \|\mathbf{u}\| (h + H) \quad (5.30)$$

onde α é um coeficiente de fricção associado ao coeficiente de Chezy por

$$\alpha = \sqrt{g} C^{-1} \quad (5.31)$$

Um modelo algébrico mais abrangente e adequado é proposto por [6], considerando tanto a influência da taxa de deformação no plano do escoamento quanto o fator de mistura vertical, na forma

$$\bar{\phi}(x, y, z) = \hat{\phi}(x, y) + \phi''(z) \quad (5.3)$$

Para este caso também a flutuação espacial $\phi''(z)$ tem média zero.

Para integrais de derivadas espaciais, a regra de Liebnitz é sempre utilizada nos procedimentos de médias verticalizadas dos termos das equações. Logo:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right\rangle = \frac{\partial \langle \bar{\phi} \rangle}{\partial x} + \left(\bar{\phi} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{z=-H} - \left(\bar{\phi} \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{z=h} \quad (5.4)$$

O operador de média verticalizada será aplicado as equações de conservação, de forma análoga ao desenvolvimento das equações médias para o escoamento turbulento (conservação da massa e quantidade de movimento).

5.2.2 Formulação do escoamento em águas rasas

Equação da Continuidade integrada verticalmente

Integrando a equação da continuidade na direção z :

$$\left\langle \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right\rangle = 0 \quad (5.5)$$

Utilizando a regra de Liebnitz 5.4 obtem-se:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial y} + \left(\bar{u} \frac{\partial z}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial z}{\partial y} + \bar{w} \right)_{z=-H}^{z=h} = 0 \quad (5.6)$$

Utilizando as condições de não deslizamento para $z = -H$ e a condição cinemática de superfície livre, esta equação se reduz à:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h+H)\hat{u} + \frac{\partial}{\partial y}(h+H)\hat{v} = 0 \quad (5.7)$$

Equação de Conservação de Quantidade de Movimento integrada verticalmente

Vejam os a integral de cada termo da equação de quantidade de movimento para a direção x , utilizando para suas simplificações as relações 5.4 e condições de contorno:

- Termo Transiente :

$$\left\langle \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} - \left(\bar{u} \frac{\partial h}{\partial t} \right)_{z=h} \quad (5.8)$$

- Termo Convectivo :

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right\rangle = & \frac{\partial \langle \bar{u}\bar{u} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \bar{u}\bar{v} \rangle}{\partial y} + \left(\bar{u}\bar{u} \frac{\partial z}{\partial x} \right)_{z=-H}^{z=h} + \\ & + \left(\bar{u}\bar{v} \frac{\partial z}{\partial y} \right)_{z=-H}^{z=h} + \left(\bar{u}\bar{w} \right)_{z=-H}^{z=h} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Todos os termos avaliados no fundo e na superfície livre se anulam devido as condições cinemática e de não deslizamento. A integral do produto recairá em um termo de tensão adicional devido ao procedimento de média vertical. Este termo é analogo as tensões de Reynolds para a decomposição em torno da média no escoamento turbulento. Desta maneira:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right\rangle = & \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle}{\partial y} + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} [(h+H) \tau_{xx}^v] + \frac{\partial}{\partial y} [(h+H) \tau_{xy}^v] \end{aligned} \quad (5.10)$$

- Gradiente de Pressão : O termo de gradiente de pressão reduz-se ao gradiente de h , através da hipótese de pressão hidrostática, formulada no ítem 2.4. Considera-se também que o escoamento é isotérmico e portanto utilizando a equação 2.36 obtém-se:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right\rangle = (h+H) \frac{\partial p_a}{\partial x} + \rho g (h+H) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.11)$$

Para pequenos corpos d'água pode-se desprezar a variação da pressão atmosférica reduzindo esta equação a:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right\rangle = \rho g(h+H) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.12)$$

- Tensões Viscosas e Turbulentas : Integrando os termos de tensão, obtém-se:

$$\left\langle \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right\rangle = \frac{\partial \langle \tau_{xx} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle \tau_{xy} \rangle}{\partial y} + \tau_{fx} - \tau_{wx} \quad (5.13)$$

Onde τ_{fx} e τ_{wx} são os termos de tensão cizalhante no fundo e na superfície livre, já discutidos no capítulo anterior. Novamente os termos avaliados no fundo e na superfície se anulam.

Utilizando os termos integrais descritos pelas equações 5.8 - 5.13, a componente x da equação de conservação de quantidade de movimento, integrada verticalmente, pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h+H) \hat{u} + \frac{\partial}{\partial x} [(h+H) \hat{u} \hat{u}] + \frac{\partial}{\partial y} [(h+H) \hat{v} \hat{u}] = & g(h+H) \frac{\partial h}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} (h+H) \hat{\tau}_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} (h+H) \hat{\tau}_{xy} + \tau_{fx} - \tau_{wx} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Nesta equação $\hat{\tau}_{ij}$ são tensões totais incluindo as parcelas viscosas, turbulentas e verticais. Utilizando ainda a equação da continuidade para reduzir os termos transiente e convectivo, explicitando o termo de fricção no fundo e propondo um fechamento para as tensões verticais através da introdução de uma viscosidade vertical, pode-se obter:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{g|\mathbf{u}|}{C^2(h+H)} u + F_{wx} \quad (5.15)$$

De maneira análoga para a direção y tem-se:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_T \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{g|\mathbf{u}|}{C^2(h+H)} v + F_{wy} \quad (5.16)$$

Observa-se que para simplificar a notação os termos de velocidade média são notados como u e v . ν_T é a viscosidade equivalente incluindo as influências devido a turbulência e a média vertical. A viscosidade laminar é então negligenciada. Os termos F_{wx} e F_{wy} são as tensões induzidas pelo vento, decompostas nas direções x e y respectivamente. Introduce-se também nesta equação o coeficiente de Chezy, C , para a quantificação do atrito de fundo.

5.2.3 Coeficiente de Chezy

O atrito de fundo associado ao modelo proposto nos termos τ_{fx} da Eq. 5.13. introduzem o termo de fricção quantificado pelo coeficiente de Chezy, oriundo pelos estudos históricos de escoamentos em canais. Este coeficiente empírico depende da rugosidade de fundo e da cota/geometria do canal, e, diversas parametrizações são encontradas na literatura (ver [12] ou [7], por exemplo).

Aqui utilizaremos uma parametrização na forma

$$C = \frac{87}{1 + aR_h^{-1/2}} \quad (5.17)$$

Nesta equação R_h é o raio hidráulico dado por

$$R_h = \frac{2A}{P} \quad (5.18)$$

Onde A é a área da seção transversal e P o perímetro molhado. Ainda na equação 5.17, a é o coeficiente relacionado com a rugosidade, expresso na Tab. 5.1.

Tabela 5.1: Tipologia de fundo - Termo do Coeficiente de Chezy

Característica do leito	a
Superfície Lisa (cimento, madeira, etc.)	0.06
Superfícies com descontinuidade (tijolos, pedras, etc.)	0.16
Superfícies irregulares de pedra	0.46
Areia fina	0.30
Vegetação de fundo	1.75
Fundo arenoso ondulado	0.85

Obs.: A parametrização proposta por Chezy para atrito de fundo relaciona-se diretamente com a Equação de Manning, e seu coeficiente n , na forma

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (5.19)$$

Neste sentido, todo o extenso levantamento de coeficientes de fricção para diferentes rugosidades pode ser utilizado para estimativa de C ([7]).

Relação entre o coeficiente de Chezy e leis de parede

O equilíbrio de forças de atrito na camada limite turbulenta próxima ao fundo pode ser quantificada por

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5.20)$$

Considerando ρ a densidade da água e u a velocidade na direção da função corrente próxima a superfície de fundo. A viscosidade de turbulência pode ser determinada pela hipótese de Prandtl para o comprimento de mistura, na forma

$$\nu_T = \ell^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (5.21)$$

O comprimento de mistura pode ser parametrizado por

$$\ell = \kappa(z+H) \quad (5.22)$$

Onde $\kappa = 0.41$ é a constante de Von Karman. Definindo velocidade de fricção por

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (5.23)$$

as seguintes adimensionalizações são consequentes

$$u^+ = u/u_f ; y^+ = \frac{(z+H)u_f}{\nu} \quad (5.24)$$

de onde se obtém pela integração das equações anteriores a clássica lei logarítmica para o perfil de velocidade próxima a uma parede lisa, dada por

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+ \quad (5.25)$$

com $C^+ = 5.0$.

Para superfícies rugosas, a lei-log clássica dada pela Eq. 5.25 é modificada para

$$u = \frac{u_f}{\kappa} \ln \frac{(z+H)}{y_0} \quad (5.26)$$

onde se introduz uma nova escala de comprimento associada à rugosidade do leito de maneira que

- $y_0 = \frac{v}{9u_f}$, para escoamentos hidraulicamente com superfícies lisas
- $y_0 = \frac{k_s}{30}$, para escoamentos hidraulicamente com superfícies rugosas

onde k_s é uma escala de comprimento associada à rugosidade da superfície. Nota-se que a equação 5.26 recupera a lei-log tradicional para escoamentos com superfícies lisas.

Obs: O limite sugerido para que um escoamento seja considerado hidraulicamente liso pode ser definido por $Re_f < 3.0$, onde $Re_f \equiv k_s u_f / v$.

Lembrando que o coeficiente de Chezy relaciona-se com o atrito de fundo na forma

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{g|u|u}{C^2} \quad (5.27)$$

obtem-se da equação 5.26

$$C = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \frac{z+H}{y_0} = 7.6 \ln \frac{z+H}{y_0} \quad (5.28)$$

Portanto escolhendo valores adequados para k_s pode-se facilmente estimar valores para C . Com base nestes argumentos, [12] sugere para lagos

$$C = 15 \ln(0.9H) \quad (5.29)$$

5.2.4 Modelos de turbulência

O uso de modelos de turbulência em escoamentos ambientais direcionam o fechamento do problema em primeira ordem utilizando a hipótese de Boussinesq, envolvendo no termo difusivo a viscosidade de turbulência ν_T . As formulações 2D e quasi-3D elaboram de forma bastante simplificada as estimativas dos modelos de viscosidade de turbulência utilizando formulações algébricas ou modelos de uma ou duas equações ([23], [24]). A complexidade da aproximação por médias verticais em modelos 2D não requerem uma descrição detalhada da turbulência local, permitindo assim o uso de modelos simples para a descrição do fenômeno de difusão devido a um estado de agitação global do escoamento.

Modelos algébricos

Dhatt [12] propõe um conjunto de equações simplificadas para a viscosidade, baseada em modelos de comprimento de mistura ou em modelo local de fricção. Em uma primeira proposta o autor utiliza

$$\nu_T = \alpha \|\mathbf{u}\| (h + H) \quad (5.30)$$

onde α é um coeficiente de fricção associado ao coeficiente de Chezy por

$$\alpha = \sqrt{g} C^{-1} \quad (5.31)$$

Um modelo algébrico mais abrangente e adequado é proposto por [6], considerando tanto a influência da taxa de deformação no plano do escoamento quanto o fator de mistura vertical, na forma

$$v_T = \ell^2 \sqrt{4S_{ij}S_{ij} + \left(\frac{2.34u_f}{\kappa(h+H)} \right)^2} \quad (5.32)$$

onde

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.33)$$

Os autores sugerem um valor para o comprimento de mistura calculados por

$$\ell = \min[0.267\kappa(h+H); \kappa d_{wall}] \quad (5.34)$$

onde d_{wall} é a distância para a margem.

Modelos de fechamento em primeira ordem - duas equações

Uma abordagem bastante empregada em escoamentos em corpos d'água é a utilização do modelo clássico de turbulência tipo k - ε , originalmente proposto por [2]. Neste tipo de modelagem, a viscosidade de turbulência é dada pela aproximação de Boussinesq (introduzida na Eq 5.13), a qual expressa o tensor aparente de correlações turbulentas por

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2v_T S_{ij} \quad (5.35)$$

A formulação utiliza a hipótese de Prandtl-Kolmogorov na forma

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.36)$$

com equações de transporte adicionais para a energia cinética de turbulência ($k \equiv \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$) e para a taxa de dissipação são dadas por

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P + P_{kv} - \varepsilon \quad (5.37)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} P \frac{\varepsilon}{k} + P_{\varepsilon v} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.38)$$

Nessas equações o termo de produção horizontal é escrito como

$$P = 2v_T S_{ij} S_{ij} \quad (5.39)$$

com termos adicionais de produção na direção vertical parametrizados por

$$P_{kv} = \frac{c_k u_f^3}{(h+H)} ; P_{\varepsilon v} = \frac{c_\varepsilon u_f^4}{(h+H)^2} \quad (5.40)$$

Os valores das constantes originais são dadas por

$$C_\mu = 0.09 ; C_{\varepsilon 1} = 1.44 ; C_{\varepsilon 2} = 1.92 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

com valores adicionais para a influência da turbulência na direção vertical estimadas como

$$c_k = c_f^{-1/2} ; c_\varepsilon = 3.6 \frac{C_{\varepsilon 2} C_\mu^{1/2}}{c_f^{3/4}}$$

onde o coeficiente de atrito é dado por

$$c_f = \frac{u_f^2}{|u|^2}$$

Obs: Neste tipo de modelo as condições de contorno na margem utilizam funções de parede semi-empíricas, para tensões cisalhantes e para valores de k e ε (ver [24] por exemplo).

Obs: Os modelos apresentados envolvem geralmente uma aproximação de efeito de proximidade de fundo ou parede, quantificados pela velocidade de atrito u_f .

Conforme apresentado no item 3.2.3, esta variável pode ser quantificada pelo coeficiente de Chezy, C .

Modelos de fechamento em primeira ordem - equação para v_T .

A energia cinética de turbulência é uma medida do estado de "agitação" média do campo turbulento. Alguns modelos contornam o uso da equação (5.36) propondo diretamente uma equação de transporte para a viscosidade de turbulência ([26], [28] ou [14]). Neste tipo de modelo o problema é fechado utilizando uma equação na forma

$$\frac{Dv_T}{Dt} = \frac{\partial v_T}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial v_T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(v + v_T) \frac{\partial v_T}{\partial x_k} \right] + P_v - C_v \frac{v_T^2}{L_v^2} \quad (5.41)$$

Esta equação envolve um termo de produção, P_v e um último termo de dissipação da viscosidade de turbulência, onde C_v é uma constante e L_v uma escala característica.

Uma descrição completa deste modelo para aplicações de escoamentos em corpos d'água pode ser explorada em [4].

5.2.5 Condições de Contorno

Para as equações de Saint-Venant, as condições de contorno ou de fronteiras apropriadas são valores de nível de água (NA) e vazão (Q) nas fronteiras abertas e condições de impermeabilidade nas fronteiras fechadas. As fronteiras abertas são seções transversais escolhidas dos corpos de água para início e fim dos domínios de solução. As fronteiras fechadas são as margens e os fundos dos corpos de água (Figura 5.3).

5.2.6 Plataforma de simulação H2D2

A plataforma H2D2 (GRE-EHN 2020), que aplica as equações de Saint-Venant 2D, foi usada para as simulações de velocidade e profundidade em reservatórios de jusante da Usinas Hidroelétricas. A plataforma é baseada na discretização das equações de Saint-Venant pelo método de elementos finitos e foi desenvolvida para

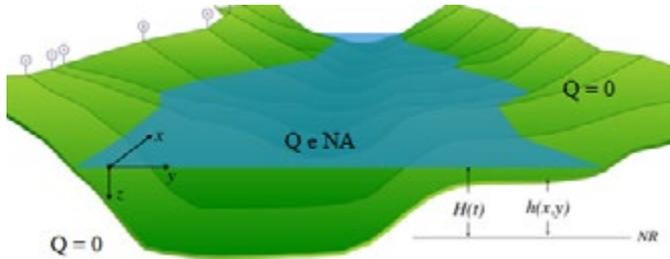


Figura 5.3: desenho esquemático da especificação das condições de contorno nas fronteiras fechadas e abertas dos domínios de solução das equações de Saint-Venant.

a simulação da hidráulica de corpos d'água, proporcionando resultados confiáveis dos campos de velocidade e nível da superfície livre no plano da linha d'água. O código é composta de pré e pós-processador de Elementos Finitos e um SIG especialista em Hidráulica Fluvial – o Modeleur, possuindo partições para: topografia, malha hidrodinâmica, substrato, vento e condições de contorno. A plataforma realiza todas as etapas de integração dos diversos dados de campo para a concepção do Modelo de Elevação do Terreno (MET) suportado por uma malha de Elementos Finitos. Também, através do Método de Elementos Finitos (MEF), as simulações hidrodinâmicas são executadas com base nas equações de Saint-Venant 2D. Na Figura 2.3, é mostrada, como exemplo, a malha hidrodinâmica em Elementos Finitos triangulares do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão projetada em uma imagem de satélite da região de estudo. As coordenadas X e Y dos dados de batimetria e topografia estão georreferenciados em coordenadas UTM, em WGS84 zona 23S para que a plataforma H2D2 possa realizar as simulações hidrodinâmicas com esses dados.

O MEF faz uma interpolação quadrática em cada elemento da malha triangular, isto significa que a malha é formada por triângulos constituídos por seis nós, denominados de T6 (Figura 5.3). Assim, o MEF permite não somente representar os valores médios em um campo variável, mas também resolve as equações da mecânica do contínuo aplicáveis ao problema físico analisado. Na Figura 5.4, as variáveis h (altura d'água), H (profundidade), z_f (cota de fundo) e o coeficiente de rugosidade (pontos 1, 3, 6) são interpolados linearmente, pois seus gradientes são menos acentuados que os gradientes das velocidades e vazões específicas (pontos

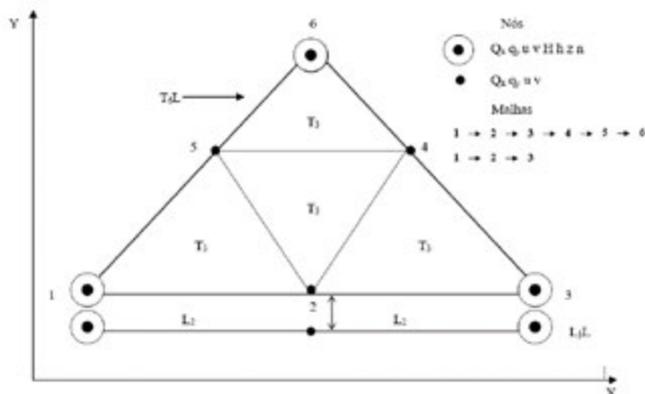


Figura 5.4: triangularização utilizada pelo MEF na Malha Hidrodinâmica. Fonte: Heniche et al. [16]

2, 4, 5), os quais são interpolados quadraticamente, por, geralmente, possuírem gradientes mais acentuados. Assim, a malha em elementos finitos é gerada na plataforma H2D2 (GRE-EHN 2020) e estoca todas as grandezas de entrada necessárias à resolução das equações de águas rasas, bem como as grandezas resultantes da simulação do escoamento bidimensional (velocidades x e y , profundidade e nível d'água). As grandezas de entrada consideradas no modelo são: as coordenadas x , y e z , interpoladas via MEF e transferidas para a malha hidrodinâmica, o coeficiente de Manning e as condições de contorno, que foram discutidos anteriormente. A malha é gerada a partir de um algoritmo isotrópico frontal, que utiliza um só parâmetro de espaçamento e tenta gerar triângulos os mais regulares (Heniche et al. [16]).

O H2D2 tem saídas de campos escalares, tais como: velocidades, profundidades, níveis de água, tensões de cisalhamento, coeficiente de Manning, etc. O H2D2 é desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-Hidráulica Numérica (GRE-EHN) do INRS-ETE da Universidade do Quebec (Canadá). Alguns trabalhos têm demonstrado o potencial de aplicação do modelo H2D2 (Blanco et al. [3]; Bittencourt et al. [11]; Holanda et al. [10]).

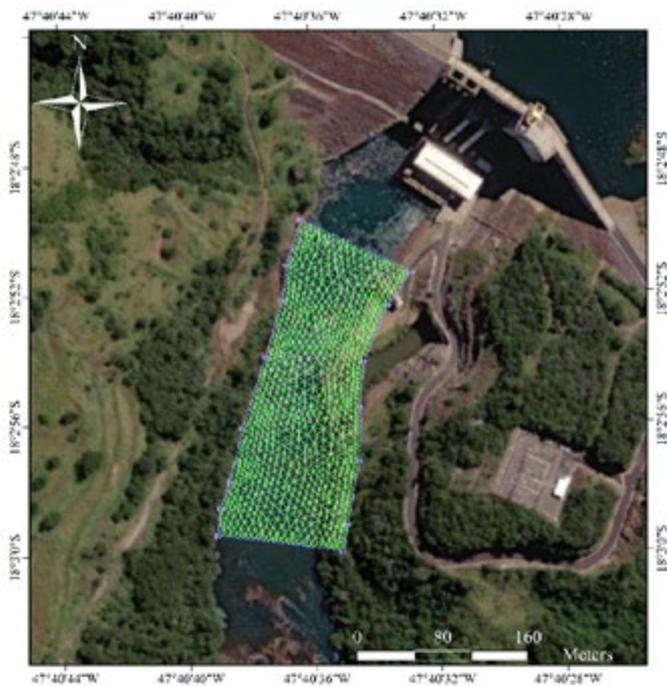


Figura 5.5: malha hidrodinâmica em elementos finitos triangulares com refinamento de 5 m, 1943 elementos e 4058 nós projetada sobre a imagem de satélite do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

5.2.7 Parametrização Quasi-3D

A solução do problema 2D, equacionado pelas equações de Saint-Venant, proporcionam de forma eficaz a distribuição do campo de velocidade média na profundidade ($u(x,y), v(x,y)$), bem como a altura de onda loca ($h(x,y)$). No contexto da determinação de potencial hidrocínético, é necessário uma distribuição de velocidade na direção da profundidade do corpo d'água, z , tendo em vista que a instalação de máquinas é efetuada em profundidades abaixo da linha d'água.

Os modelos *Quasi-3D* proporcionam uma estimativa da velocidade distribuídas na seção transversal de um corpo d'água, ilustradas na Fig. 5.6. Portanto, dado o campo de velocidade calculado no plano de referência do corpo d'água $\mathbf{u}(x,y)$,

deseja-se determinar um campo adjunto de velocidade axial na seção transversal de área A , mapeando-o na forma $U(y, z)$.

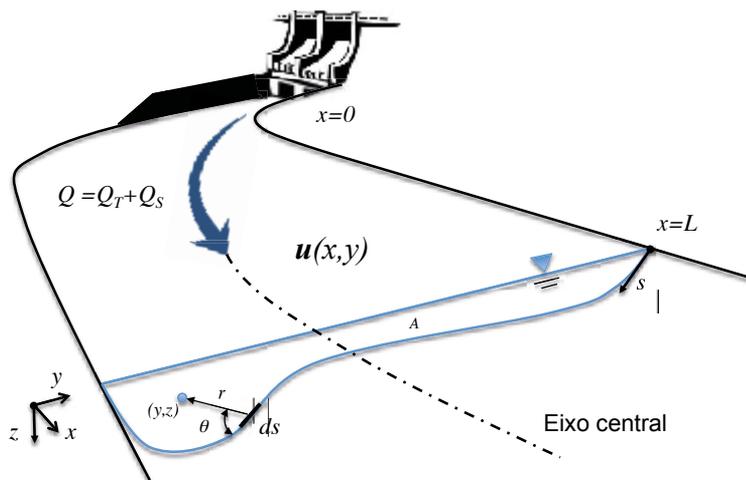


Figura 5.6: Modelo Quasi-3D - Seção transversal

Dois abordagens são propostas:

1. **Perfilamento Vertical:** neste tipo de abordagem utiliza-se uma parametrização de perfis verticais, considerando o valor médio do perfil estabelecido pelo cálculo 2D (adequado à reservatórios e estudos oceânicos).
2. **Distribuição 2D na seção:** O campo 2D de velocidade axial $U(y, z)$ é determinado por um equacionamento hidrodinâmico na seção, utilizando um modelo diferencial ou integral (modelo adequado a rios e canais).

Seja uma perfil vertical de um corpo d'água, traçado a partir do ponto (x, y) , variando em $z \in [-H, h]$.

A direção principal onde o perfil de velocidade será obtido é determinado pelo cálculo 2D, na forma que

$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5.42)$$

Alinhada na direção $\mathbf{e}_U = (u/\bar{U})\mathbf{e}_x + (v/\bar{U})\mathbf{e}_y$. O perfil deve ser obtido na direção vertical z , tal como ilustrado na Fig. 5.7.

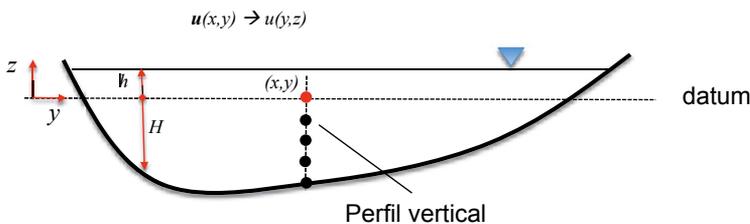


Figura 5.7: Modelo Quasi-3D - Perfilamento Vertical

Utilizando uma parametrização vertical semi-empírica qualquer $U(z) = f(z)$, os ajustes de parâmetros devem ser tal que

$$\int_{-H}^h f(z) dz = \bar{U} \quad (5.43)$$

compatibilizando-se também com o balanço de tensões de atrito no fundo, o qual é discutido no item 3.2.3.

Naturalmente a lei-log para paredes rugosas é utilizando (Eq. 5.26). A forma de implementação numérica desta abordagem é discutida em [9]. Este tipo de abordagem é adequada a corpos d'água cuja a largura do canal é muito superior à profundidade característica.

Em situações de canais mais compactos, a velocidade de cada ponto é influenciada também para as paredes laterais, próximas à margem. Desta maneira, um problema diferencial elíptico na seção pode ser formulado a partir da Equação de Navier-Stokes para a direção axial, considerando o fechamento dos modelos de turbulência baseados em gradientes nas direções (y, z) . Modelos hidrodinamicamente desenvolvidos são propostos em vários trabalhos na literature (e.g. [5]).

Alternativamente, um modelo integral tipo Biot-Savart pode ser utilizado, tal como proposto por [19] ou [18]. Neste tipo de abordagem para um dado ponto da seção transversal uma função de intercorrelação integral com pontos na parede sólida do canal é calculada. A normalização se dá pela velocidade média na seção (obtida pela vazão) ou ainda, pelo relação ponderada da velocidade média em uma coluna, obtida pela solução do problema 2D Shallow-Water.

O modelo Quasi-3D, desenvolvido aqui, segue o trabalho de Martin e Mc Cutcheon [20], no qual a velocidade na vertical pode ser estimada através de uma distribuição logarítmica. Nesse caso, a velocidade na superfície livre da água é igual a 6/5 da velocidade média na profundidade (Figura 5.8). Barbosa et al. [1] utilizaram essa mesma distribuição para extrapolar perfis 3D de velocidade a jusante da UHE de Tucuruí. As velocidades médias foram simuladas através da plataforma H2D2. Assim, partindo-se de simulações 2D, pode-se realizar a extrapolação do perfil de velocidade vertical e a criação de perfis Quasi-3D ao longo da seção transversal do canal.

A distribuição logarítmica de velocidades é determinada através da Equação 5.44.

$$U(z) = A \cdot \ln z + B \quad (5.44)$$

Onde $U(z)$ é a velocidade em m/s e z é a profundidade em m. Para que o perfil de velocidades na vertical seja gerado, são necessários três pares ordenados $(z, U(z))$. O primeiro par é a velocidade do leito do rio, que é igual a zero por conta da condição

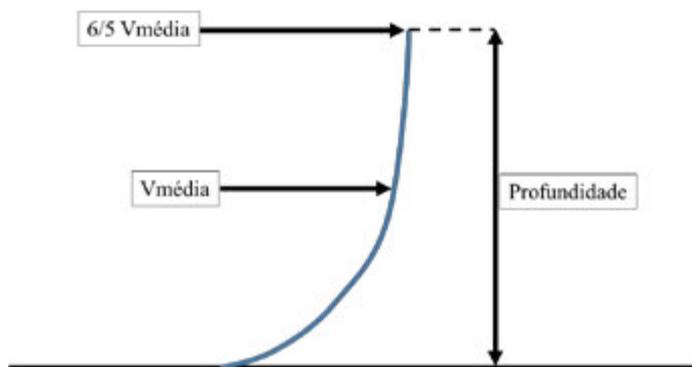


Figura 5.8: ilustração do perfil logarítmico vertical de velocidades (Martin e Mc Cutcheon, [20]) usado para o modelo Quasi-3D.

de não deslizamento; e a profundidade no leito do rio que foi convencionalizada igual a zero. O segundo par é a profundidade e a velocidade obtidos a partir da simulação 2DH ($z/2, V_m$). O terceiro par é a velocidade e a profundidade na superfície do rio ($z, 6/5 V_m$). Os pares ordenados seguem a definição proposta na Figura 5.8 e os dois últimos pares são utilizados para o cálculo dos coeficientes A e B (Equação 5.44). Assim, todo o perfil de velocidades, em uma dada vertical, pode ser definido em função das simulações de profundidades simuladas através do modelo 2DH.

Referências Bibliográficas

- [1] Barbosa, P. A. V., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A. and Secretan, Y. [2018]. A simplified methodology for the analysis of the establishment of hydrokinetic parks downstream from hydroelectric plants, *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* **13**(3): 1.
- [2] B.E.Launder and D.B.Spalding [1974]. The numerical computation of turbulent flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **2**(3): 269–289.
- [3] Blanco, C., Sena, M., Mesquita, A., Filho, M. and Secretan, Y. [2013]. Hydrodynamic evaluation of a flood embankment in the amazon estuary region, brazil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, Vol. 166, Thomas Telford Ltd, pp. 49–55.
- [4] Bourgoïn, A., Abderrezzak, K. E. K., Benhamadouche, S. and Ata, R. [2020]. An adoption of the spalart–allmaras turbulence model for two- and three-dimensional free surface environmental flows, *Journal of Hydraulic Research* **0**(0): 1–15.
URL: <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1780490>
- [5] Cassan, L., Roux, H. and Dartus, D. [2019]. Velocity distribution in open channel flow with spatially distributed roughness, *Environmental Fluid Mechanics* **20**(2): 321–338.
- [6] Cea, L., Puertas, J. and Vázquez-Cendón, M.-E. [2007]. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts, *Archives of Computational Methods in Engineering* **14**(3): 303–341.

- [7] Chow, V. T. [1956]. *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill.
- [8] Cruchaga, M., Battaglia, L., Storti, M. and D'Elía, J. [2014]. Numerical modeling and experimental validation of free surface flow problems, *Archives of Computational Methods in Engineering* **23**(1): 139–169.
- [9] da Silva Cruz, J., Blanco, C. J. C. and Junior, A. C. P. B. [2019]. Flow-velocity model for hydrokinetic energy availability assessment in the amazon, *Acta Scientiarum. Technology* **42**: e45703.
- [10] da Silva Holanda, P., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N. and Secretan, Y. [2017]. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants, *Renewable Energy* **101**: 1203–1214.
- [11] de Pinho Bittencourt, M., Nunes, M. A., da Silva Holanda, P., da Silva Alves, C., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B. and Secretan, Y. [2016]. Avaliação de potencial hidrocínético remanescente a jusante de uhes na bacia hidrográfica do rio tietê, *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia* **2**(4): 38–53.
- [12] Dhatt, G. [1990]. *Hydraulique numérique*, Technical report, IPSI, Paris.
- [13] dos Santos, I. F. S., Camacho, R. G. R., Filho, G. L. T., Botan, A. C. B. and Vinent, B. A. [2019]. Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data, *Renewable Energy* **143**: 648–662.
- [14] Durbin, P., Mansour, N. and Yang, Z. [1994]. Eddy viscosity transport model for turbulent flow, *Physic of Fluids* **6**: 1007–1015.
- [15] Espina-Valdés, R., Álvarez, E. Á., García-Maribona, J., Trashorras, A. J. G. and González-Caballín, J. M. [2019]. Tidal current energy potential assessment in the avilés port using a three-dimensional CFD method, *Clean Technologies and Environmental Policy* **21**(6): 1367–1380.
- [16] Heniche, M., Secretan, Y., Boudreau, P. and Leclerc, M. [2000]. A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries, *Advances in water resources* **23**(4): 359–372.

- [17] Lin, J., Lin, B.-L., Sun, J. and Chen, Y.-L. [2016]. Modelling hydrodynamic processes in tidal stream energy extraction, *Journal of Hydrodynamics* **28**(6): 1058–1064.
- [18] Maghrebi, M. F. [2006]. Application of the single point measurement in discharge estimation, *Advances in Water Resources* **29**(10): 1504–1514.
- [19] Maghrebi, M. F. and Rahimpour, M. [2005]. A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels, *Flow Measurement and Instrumentation* **16**(6): 347–352.
- [20] Martin, J., McGutcheon, S. and Schottman, R. [1998]. Hydrodynamics and transport for water quality modeling, *LEWIS PUBLISHERS, 2000 CORPORATE BLVD., N. W., BOCA RATON, FL 33431(USA)*. 768 .
- [21] Nikora, V. I., Stoesser, T., Cameron, S. M., Stewart, M., Papadopoulos, K., Ouro, P., McSherry, R., Zampiron, A., Marusic, I. and Falconer, R. A. [2019]. Friction factor decomposition for rough-wall flows: theoretical background and application to open-channel flows, *Journal of Fluid Mechanics* **872**: 626–664.
- [22] Qi, M., Li, J., Chen, Q. and Zhang, Q. [2018]. Roughness effects on near-wall turbulence modelling for open-channel flows, *Journal of Hydraulic Research* **56**(5): 648–661.
- [23] Rodi, W. [2017a]. Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review, *Journal of Hydraulic Engineering* **143**(5): 03117001.
- [24] Rodi, W. [2017b]. *Turbulence models and their application in hydraulics: A state-of-the-art review*, 3th edn, IAHR.
- [25] Sonnenwald, F., Guymer, I. and Stovin, V. [2019]. A CFD-based mixing model for vegetated flows, *Water Resources Research* **55**(3): 2322–2347.
- [26] Spalart, P. and Allmaras, S. [1994]. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *La Recherche Aéronautique* pp. 5–21.

- [27] Suárez-López, M. J., Espina-Valdés, R., Pacheco, V. M. F., Manso, A. N., Blanco-Marigorta, E. and Álvarez-Álvarez, E. [2019]. A review of software tools to study the energetic potential of tidal currents, *Energies* **12**(9): 1673.
- [28] Wilcox, D. [1993]. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW industries Inc.
- [29] Yan, J., Deng, X., Korobenko, A. and Bazilevs, Y. [2017]. Free-surface flow modeling and simulation of horizontal-axis tidal-stream turbines, *Computers & Fluids* **158**: 157–166.
- [30] Yang, Z. and Coppng, A. (eds) [2017]. *Marine Renewable Energy*, Springer-Verlag GmbH.

Capítulo 6

Formulação tridimensional de escoamentos ambientais

Kajaal R. Gopie, Isadora M. Bugarin, Taygoara F. de Oliveira e Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

6.1 Considerações gerais

Os escoamentos ambientais em corpos d'água apresentam uma complexidade inerente à variabilidade espacial da morfologia e da temporalidade sob a qual os fenômenos da natureza acontecem. As condições naturais de relevos de fundo, sobre os quais os escoamentos em rios, lagos ou regiões oceânicas se dão, estabelecem uma necessidade de abordagem física relativa à aplicação das equações da mecânica dos fluidos em situações em que escalas espaciais não podem ser totalmente descritas. Associado a isso, as próprias condições de forçamento randômico dos escoamentos naturais, exigem sempre uma descrição racional baseada em uma abordagem estatística dos campos hidrodinâmicos.

O enfoque de modelagem de escoamentos ambientais acompanha historicamente todo o desenvolvimento da mecânica dos fluidos e das abordagens numéricas e experimentais associadas a este domínio do conhecimento (e.g [22], [24]). Nomes

importantes como L. Prandtl, J. V. Boussinesq, H. Pitot, O. Reynolds, dentre muitos outros, proporcionaram avanços expressivos do conhecimento em mecânica dos fluidos, tendo como base de partida a compreensão e aplicabilidade de teorias e métodos para escoamentos hidráulicos naturais ([6]). A hidrodinâmica dos escoamentos ambientais e a engenharia de sistemas que modificam os cursos d'água para fins diversos (conversão de energia, arranjo de vias fluviais, modificação de ambientes naturais aquáticos, etc) envolve o equacionamento com formulações próprias considerando as seguintes particularidades:

- Diversidade de escalas de comprimento e tempo em largo espectro, envolvendo fenômenos de pequenas escalas associadas às micro-iterações dos balanços de quantidade de movimento e energia nas correntes aquáticas, bem como efeitos que envolvem grandes escalas de variabilidade espaciais e temporais sinópticas (como o caso de correntes oceânicas, por exemplo);
- Escoamentos ambientais são turbulentos, envolvendo portanto uma abordagem de descrição estatística das equações governantes;
- Escoamentos em corpos d'água apresentam interação hidrodinâmica da superfície livre com a atmosfera, envolvendo os efeitos de força gravitacional e estabelecendo uma dinâmica associada a ondas de superfície. Uma formulação específica exige uma abordagem própria para a descrição da hidrodinâmica de ondas;
- As grandes escalas características dos escoamentos ambientais induzem, por uma condição prática, o desenvolvimento de modelos específicos em escalas menores (não descritíveis) tais como atrito de fundo, interação com meios multifásicos (líquido-sólido ou líquido-ar), dentre outros fenômenos físicos que muitas vezes precisam ser considerados.

Neste sentido, para a formulação de escoamentos em corpos d'água, em especial em canais naturais, as seguintes hipóteses são assumidas:

- Escoamento incompressível de fluido newtoniano, como classicamente se assume para escoamentos de água;

- Escoamentos em regime permanente e transiente, definidos em um domínio tridimensional onde o limite superior pode variar no tempo e espaço (superfície livre); e
- Escoamento isotérmico.

Dessa forma, o conjunto de equações que descreve o problema é composto pelas equações da continuidade (conservação da massa) e de Navier-Stokes (Conservação da quantidade de movimento linear), dadas respectivamente por

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - g \mathbf{e}_3, \quad (6.2)$$

em que ν é a viscosidade cinemática, ρ a densidade e g é a aceleração da gravidade, que se alinha da direção $-\mathbf{e}_3$. Ainda, $u_i(t, x_i)$ e $p(t, x_i)$ são os campos de velocidade e pressão no escoamento. O equacionamento é formulado no presente capítulo utilizando a notação indicial.

Escoamentos turbulentos são caracterizados por instabilidades espaciais e temporais, intrínsecas ao comportamento do movimento de fluidos em altos número de Reynolds - $Re \equiv \rho L_0 U_0 / \mu$, em que L_0 é uma escala de comprimento, U_0 uma escala de velocidade e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Nesse regime, os termos de inércia são dominantes (termo convectivo não-linear da equação de Navier-Stokes - Eq. 6.2), propagando assim instabilidades no domínio de fluido e induzindo um comportamento caótico dos campos hidrodinâmicos. A turbulência, portanto, é um fenômeno no meio contínuo, que relaciona-se com um comportamento complexo do escoamento de fluidos, cuja a compreensão física tem sido objeto de investigação ao longo de vários séculos. Por outro lado, a utilização de modelos de turbulência, capazes de gerar soluções de problemas de cunho aplicado, é um tópico que data de pouco mais de meio século, e evoluiu de forma adjunta ao desenvolvimento de métodos numéricos para a mecânica dos fluidos.

As equações de Navier-Stokes são capazes de prever o comportamento caótico de escoamentos turbulentos, em abordagens conhecidas como *Simulação Direta da*

*Turbulência*¹. No entanto, as escalas de tempo e espaço envolvidas na discretização numérica em tal abordagem, induzem a um esforço computacional imenso, sendo esta metodologia somente aplicável em situações muito simples e em condições nas quais o número de Reynolds é relativamente baixo. A maneira prática de tratar-se o problema de escoamentos turbulentos, na atualidade, é utilizar modelos estatísticos que envolvem uma filtragem de pequenas escalas² ou ainda utilizando uma formulação estatística média das equações de conservação (*RANS - Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation*). Esta última abordagem será explorada neste capítulo. Neste sentido, as equações fundamentais da mecânica dos fluidos (6.1 e 6.2) serão aplicadas aos escoamentos de correntes aquáticas naturais na descrição dos campos hidrodinâmicos médios, envolvendo uma discussão geral sobre a modelagem de escoamentos turbulentos em corpos d'água e direcionando de forma não exaustiva o equacionamento matemático a uma aplicabilidade dos fenômenos abordados no presente texto e em suas metodologias numéricas implementadas.

Portanto, uma breve introdução sobre a modelagem dos escoamentos turbulentos é apresentada, com vista a uma posterior solução numérica de problemas. Serão exploradas aqui formulações de modelos de turbulência tipo RANS.

Leituras complementares sobre a física ou sobre modelagem de escoamentos turbulentos são sugeridas através dos textos mais avançados tais como [20] ou [34] e ainda, para os francófilos, no excelente texto de [3].

6.2 Campos hidrodinâmicos turbulentos

Seja um escoamento de fluido, em regime turbulento, no qual os campos hidrodinâmicos apresentam um comportamento turbulento, tal como no exemplo ilustrado na Figura 6.1.

Em uma posição qualquer, os sinais de velocidade e pressão variam no tempo. Tendo em vista o comportamento do sinal, fica claro que, para o tratamento de escoamentos turbulentos, uma abordagem estatística é necessária. Isto é efetuado classicamente decompondo as variáveis principais do escoamento em um termo

¹Em inglês *Direct Numerical Simulation - DNS*

²Essa abordagem é conhecida como Simulação de Grandes Escalas, em inglês *Large Eddy Simulation - LES*

médio e uma parcela flutuante. Introdz-se assim a *decomposição de Reynolds* para os campos, na forma

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad h = \bar{h} + h' \quad (6.3)$$

As variáveis $\bar{u}_i(x_i, t)$ e $\bar{p}(x_i, t)$ denotam os valores médios dos campos de velocidade e pressão, enquanto $u'_i(x_i, t)$ e $p'(x_i, t)$ denotam as parcelas flutuante em relação à média. Introdz-se aqui também a variabilidade da altura da superfície livre h em relação a um *datum* (ver Fig. 5.2).

Considera-se que os campos médios são obtidos por abordagens clássicas de operador de média temporal, aqui considerado na forma

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u(\tau) d\tau \quad (6.4)$$

em que a janela de amostragem da média temporal Δt é definida para que seja suficientemente mais longa do que as menores escalas da turbulência (Escala de Kolmogorov) e inferior ao comportamento sinóptico da média.

Obs.: Para $x_3 = h$, um equacionamento específico para a superfície livre deve ser elaborado no sentido de quantificar uma equação cinemática para $h(t, x_1, x_2)$.

Obs.: Para $x_3 = -H$, um modelo de atrito de fundo considerando a morfologia e rugosidade do relevo. Isto proporciona as condições de contorno para a equação de Navier-Stokes e para os modelos de turbulência utilizados.

6.3 Equações de conservação médias

Utilizando a decomposição de Reynolds para os campos de velocidade e pressão e substituindo-os nas equações instantâneas de conservação de massa e quantidade de movimento (eqs. 6.1 e 6.2), a evolução dos campos médios são dadas pelas equações médias da continuidade e Navier-Stokes, na forma

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (6.5)$$

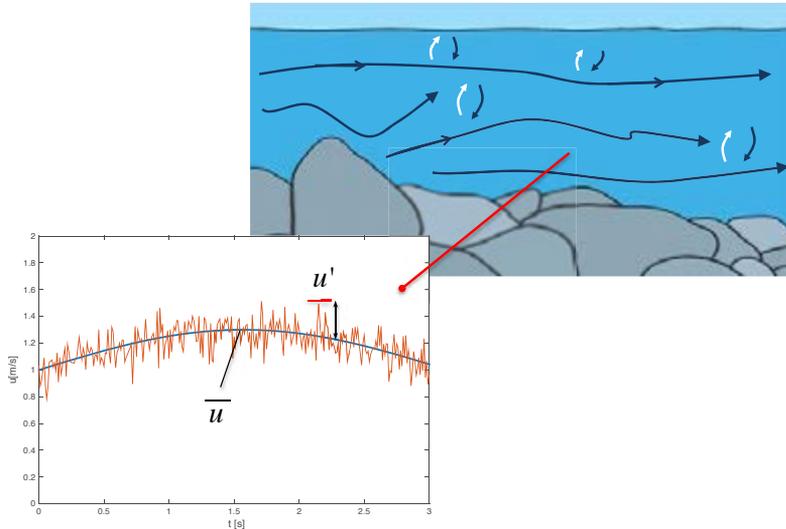


Figura 6.1: Escoamento turbulento em rios.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} - g \mathbf{e}_3. \quad (6.6)$$

Surge assim o termo adicional de tensões aparentes de Reynolds $\tau_{ij} \equiv \overline{u'_i u'_j}$. Este termo é composto por correlações estatísticas cruzadas entre as parcelas flutuantes dos componentes do campo de velocidade. Em sua diagonal, os termos do tensor ($\tau_{ij} = \overline{u_i'^2}$ para $i = j$) representam a variância estatística das flutuações dos componentes do campo de velocidade.

Em modelos de turbulência do tipo RANS, utiliza-se formulações para o tensor de Reynolds envolvendo relações fechadas de seus componentes como função do campo médio de velocidade e suas derivadas, ou ainda, pelo fechamento de termos de novas correlações estatísticas da equação diferencial de transporte para τ_{ij} (que será apresentada na próxima seção). Neste sentido, é necessário que os modelos propostos levem em conta o caráter matemático das correlações estatísticas dos campos randômicos. Logo, um conjunto de restrições para o tensor de Reynolds

conhecidas como *condições de Realizabilidade* ([3]: Cap. IX, [14], [15], [16]) são colocadas:

- $\tau_{ij} \geq 0; i = j$
- $\tau_{ij} \leq \overline{u_i^2} \cdot \overline{u_j^2}$ (Desigualdade de Cauchy-Schwartz)
- $\det \tau \geq 0$

Em uma base racional elementar, modelos também devem ser compatíveis com princípios de invariância à mudança de referencial ([30], [32], [8]).

Obs.: Nota-se que devido ao exposto, o tensor de Reynolds é simétrico e positivo semi-definido.

Obs.: Define-se energia cinética de turbulência o escalar

$$k \equiv \frac{1}{2} \tau_{ii} = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'}. \quad (6.7)$$

A energia cinética de turbulência é uma medida do estado de agitação média do campo turbulento.

6.4 Equação do tensor de Reynolds

Uma equação de conservação para o campo flutuante pode ser obtida pela subtração do campo médio, Eq. (6.6), da equação campo instantâneo, Eq. (6.2). Desta maneira obtêm-se

$$\frac{\partial u_i'}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i'}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \quad (6.8)$$

Multiplacando-se a equação acima pela parcela flutuante do campo de velocidade u_j' e tirando a média, obtêm-se a equação de transporte para as componentes do tensor de Reynolds dada por

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = P_{ij} + \Pi_{ij} + d_{ij} - \varepsilon_{ij}. \quad (6.9)$$

No lado direito desta equação os termos de correlações estatística representam um balanço entre os efeitos da flutuação quantificados pelos termos de produção, P_{ij} , correlação pressão-deformação Π_{ij} , difusão, d_{ij} e taxa de dissipação, ε_{ij} . Tais termos são detalhados e explicitados pelas correlações estatísticas de alta ordem como

$$P_{ij} = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} = -\tau_{ik} (S_{kj} - \Omega_{kj}) - \tau_{kj} (S_{ik} - \Omega_{ik}), \quad (6.10)$$

$$\Pi_{ij} = p' \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}, \quad (6.11)$$

$$d_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j u'_k} + p' \overline{(u'_i \delta_{jk} + u'_j \delta_{ik})} - v \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} \right], \quad (6.12)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}. \quad (6.13)$$

Nota-se que o termo de produção pode ser expresso alternativamente pelo uso dos tensores de decomposição do gradiente de velocidade em uma parte simétrica S_{ij} (taxa de deformação média) e uma antisimétrica Ω_{ij} (tensor vorticidade do campo médio). Estes tensores são definidos por

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (6.14)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (6.15)$$

6.5 Equação de energia cinética de turbulência

A equação para a energia cinética de turbulência pode ser obtida a partir da contração de índices da equação de evolução do tensor de Reynolds 6.9, fazendo $i = j$, logo

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + d - \varepsilon. \quad (6.16)$$

Aparecem no lado direito desta equação os termos escalares de produção, P_k , difusão, d e dissipação escritos como

$$P_k = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}, \quad (6.17)$$

$$d = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_k} + \overline{p' u'_k} - \nu \frac{\partial k}{\partial x_k} \right], \quad (6.18)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon_{ii}. \quad (6.19)$$

Como se trata de uma equação obtida também pelo processo de média e manipulação algébrica da Eq. 6.9, as correlações estatísticas do termo de difusão na Eq. 6.18 necessitam ser devidamente modelados. O termo de produção, P_k , será imediatamente determinado através da escolha de fechamento para o próprio tensor de Reynolds e a taxa de dissipação, ε , é uma variável que surge de forma natural, que deverá ser determinada por análise de escalas (modelo à uma equação) ou por uma equação de transporte adicional para a evolução da mesma.

6.6 Considerações gerais sobre fechamento e modelagem

No sentido de propor modelos de fechamento para o escoamento turbulento, duas linhas metodológicas podem ser consideradas:

- **Modelos de fechamento em primeira ordem:** Neste modelos uma equação "constitutiva" para o tensor de Reynolds é proposta, relacionando-o com o campo médio de velocidade. Eventualmente equações de transporte adicionais são consideradas para determinações de valores de escalas da turbulência, em particular envolvendo a energia cinética de turbulência e sua taxa de dissipação em modelos com uma ou duas equações adicionais;
- **Modelos de fechamento em segunda ordem:** Nestes modelos os termos de correlação estatística da equação do tensor de Reynolds, na Eq. 6.9, são modelados ([3], [20] ou [34]). Isto induz ao uso de ao menos uma equação de transporte para cada componente do tensor de Reynolds.

Limitar-se-á aqui a algumas abordagens de fechamento em primeira ordem, escolhendo alguns modelos específicos para serem aplicados aos escoamentos ambientais em corpos d'água. Neste sentido, usualmente o tensor de Reynolds geralmente é modelado pela hipótese de Boussinesq dada por

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_T S_{ij}. \quad (6.20)$$

Nesta equação ν_T é a viscosidade de turbulência, modelada por uma relação proposta por Prandtl e Kolmogorov na forma

$$\nu_T = C_\mu L_\mu k^{1/2}, \quad (6.21)$$

em que C_μ é uma constante e L_μ uma escala de comprimento característico, que depende do modelo de turbulência utilizado.

A origem da modelagem formulada pela Eq. 6.20 reporta-se a uma analogia com a equação constitutiva para modelos de fluidos newtonianos. Aqui, no entanto, estabelece-se uma dependência da escala L_μ para a viscosidade de turbulência relacionada com à fenomenologia física do transporte de energia dos vórtices na turbulência, sendo portanto uma propriedade local do escoamento e não uma propriedade do fluido.

Obs.: Alguns modelos contornam o uso da equação (6.21) propondo diretamente uma equação de transporte para a viscosidade de turbulência ([29], [34]). Neste tipo de modelo o problema é fechado utilizando uma equação na forma

$$\frac{Dv_T}{Dt} = \frac{\partial v_T}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial v_T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(v + v_T) \frac{\partial v_T}{\partial x_k} \right] + P_v - C_v \frac{v_T^2}{L_v^2}. \quad (6.22)$$

Esta equação envolve um termo de produção, P_v e um último termo de dissipação da viscosidade de turbulência, onde C_v é uma constante e L_v uma escala característica. Este modelo é empregado com relativo sucesso em escoamentos aerodinâmicos, onde considerações específicas de modelagem estabelecem o comportamento da evolução de v_T mesmo em regiões de re-laminarização (baixo-Reynolds), tais como regiões de camada limite próximas a superfícies sólidas.

6.7 Modelo a duas equações $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência a duas equações tipo $k - \varepsilon$ é certamente o modelo mais difundido e utilizado para a simulação de escoamentos turbulentos. Embora este modelo não seja capaz de descrever com acurácia algumas situações físicas, ao mínimo ele é um primeiro passo importante em qualquer simulação de escoamentos complexos. A facilidade de implementação numérica do modelo e seu comportamento estável em relação à convergência de solução, representam vantagens no uso desta abordagem.

Uma das principais deficiências deste modelo relacionam-se com as limitações da hipótese de Boussinesq para a viscosidade de turbulência (Eq. 6.20) a qual impõe um alinhamento entre os eixos principais dos tensores de Reynolds, τ_{ij} , e de Taxa de deformação média, S_{ij} . Isto, em várias situações, não é fisicamente verificado. De fato, esta deficiência se reflete em todos os modelos que utilizem a hipótese de viscosidade de turbulência, ou seja, em boa parte dos modelos de fechamento em primeira ordem.

No contexto do modelo $k - \varepsilon$, a escala L_μ da equação 6.21 é dada por

$$L_\mu = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}. \quad (6.23)$$

Neste sentido, uma equação adicional para a taxa de dissipação ε deve ser utilizada e a equação para viscosidade de turbulência se reduz a

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.24)$$

Com o fechamento dos termos de ordem superior da equação de energia cinética de turbulência 6.16 e uma equação de transporte adicional para ε , o equacionamento da forma original do modelo ([12]) é dada por

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon, \quad (6.25)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6.26)$$

Nessas equações o termo de produção considera o modelo para o tensor de Reynolds dado pela equação de Boussinesq 6.20 e é re-escrito como

$$P_k = 2v_T S_{ij} S_{ij}, \quad (6.27)$$

Os valores das constantes são propostos como

$$C_{\mu} = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3. \quad (6.28)$$

as quais foram obtidas por ajustes com resultados de problemas padrões (decaimento da turbulência homogênea e isotrópica, cisalhamento homogêneo e equilíbrio na camada limite turbulenta).

Algumas observações devem ser ressaltadas:

- Embora uma equação de transporte exata possa ser obtida para a taxa de dissipação (para ε_{ij} e conseqüente para ε). A interpretação física dos termos de correlações estatísticas obtidos não é uma tarefa trivial, neste sentido a

versão final da equação de ε tem origem em uma abordagem simplificada de termos de fonte de produção e de destruição da equação de ε , dimensionalmente compatíveis com a equação da energia cinética de turbulência, introduzindo as constantes à serem ajustadas ($C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$) ([12]). Tal enfoque tem sido considerado suficiente ao longo dos anos, sempre com novos valores *ad-hoc* modificados para ajuste do modelo para situações específicas.

- As equações que descrevem o modelo são válidas somente para altos números de Reynolds local, ou seja, para uma condição de regime de turbulência estabelecida. Na proximidade de paredes e em condições de re-laminarização do escoamento, correções do modelo devem ser propostas (modelo baixo Reynolds). Em escoamentos ambientais, a modelagem em condições de proximidade de parede (típica dos modelos de baixo-Reynolds) é substituída por funções de parede que descrevem o balanço de forças superficiais de fundo. No contexto dos problemas reais de escoamentos em corpos d'água esta abordagem é conveniente, em face das características reais de fundos rugosos.

6.8 Correções no Modelo $k - \varepsilon$

O baixo desempenho do modelo $k - \varepsilon$ em algumas situações relaciona-se em parte à hipótese de isotropia para o tensor de Reynolds expressa pela aproximação de Boussinesq - Eq. 6.20.

O modelo proporciona reconhecidamente resultados pobres em diversas situações físicas tais como : i) escoamentos com forte curvaturas de linhas de corrente, ii) escoamento com níveis importantes de rotação (formulado em referencial móvel), iii) escoamentos não confinados descritos em coordenadas axi-simétricas e iv) resposta do modelo à condições de gradiente adverso de pressão.

Muitas correções são propostas na literatura para reduzir os erros do modelo em relação à acurácia em situações específicas. Em geral as correções propostas direcionam-se à modificação da equação de ε , com valores diferentes para suas constantes, ou ainda introduzindo-se novos termos de fonte. Estes ajustes apresentam um enfoque *ad-hoc*, com argumentos bastante frágeis em sua aplicação universal. Algumas correções mais robustas foram elaboradas a partir de metodologias mais

abrangentes, como no caso do modelo $k - \varepsilon$ RNG, que utiliza a metodologia de renormalização de grupo estatístico - *Renormalization Group* ([35]).

O primeiro desafio é proporcionar ao modelo um observância em relação às condições de realizabilidade. Tendo em vista as equações 6.20 e 6.24, observa-se que a condição de realizabilidade para tensões normais é dada por

$$\overline{u_i^2} = -\frac{2}{3}k + 2\nu_T S_{ii} \geq 0 \Rightarrow \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \geq \frac{\varepsilon}{k} \frac{1}{3C_\mu} \geq 3.7 \frac{\varepsilon}{k} \quad (\text{sem soma}) \quad (6.29)$$

Ou seja, em algumas condições de gradientes axiais, a condição não pode ser verificada. De forma equivalente, utilizando a relação de Cauchy-Schwartz, os termos de cisalhamento também podem caracterizar uma não observância à condição de realizabilidade do modelo $k - \varepsilon$.

Para contornar este modelo uma versão modificada denominada *Reliazable* $k - \varepsilon$ ([27]) corrige a equação de ε para

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (6.30)$$

onde $S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ e as constantes dadas por

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{5 + \eta} \right] \text{ e } C_2 = 1.9 \text{ com } \eta = S \frac{k}{\varepsilon}. \quad (6.31)$$

Propõe-se também um ajuste na escala para o cálculo da viscosidade de turbulência na modificando a constante para

$$C_\mu = \left(A_0 + A_s U^* \frac{k}{\varepsilon} \right)^{-1}, \quad (6.32)$$

com

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (6.33)$$

e constantes adicionais calculadas por

$$A_0 = 4.04 \text{ e } A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (6.34)$$

onde

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} W \right) \text{ e } W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\sqrt{2} S}. \quad (6.35)$$

O modelo proposto proporciona as condições necessárias de conformidade para os sinais dos componentes do tensor de Reynolds. Ele também, em sua forma original, proporciona modificações considerando termos de fonte (como termos de flutuação) ou ainda descrições em referenciais móveis rotativos (forças de Coriolis).

As modificações implementadas no modelo possibilitam melhor acurácia verificada para resultados em:

- Jatos planos e circulares
- Melhores resultados para zonas recirculantes com gradientes adversos de pressão
- Bons resultados para situações de rotação e fortes curvaturas de linhas de corrente.

No entanto, as modificações implementadas ainda falham em situações onde o comportamento anisotrópico das tensões de Reynolds é verificado. Mesmo com bons avanços, o modelo é incapaz por exemplo de prever escoamentos secundários e canais de seção transversal não circular, ou ainda, o decaimento de vorticidade transversal (*Swirl*).

6.9 Modelo $k - \varepsilon$ anisotrópico e não linear

As diferentes correções do modelo a duas equações, disponibilizadas na literatura, certamente produzem resultados bons em várias situações específicas, contornando assim as deficiências identificadas para o modelo original. No entanto, boa parte das

modificações propostas não atacam o aspecto de base da inconsistência associado ao caráter isotrópico da hipótese de Boussinesq. Neste sentido, alguns modelos alternativos propõem uma extensão da Eq. 6.20, considerando termos adicionais anisotrópicos e não-lineares, sempre observando a invariância material e a condição de realizabilidade ([31], [32]). Logo, introduz-se uma formulação para o tensor de Reynolds na forma

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_T S_{ij} + A_{ij} + C_{ij} + D_{ij} \quad (6.36)$$

onde

$$A_{ij} = C_1 \nu_T \frac{k}{\varepsilon} \left(S_{im} S_{mj} - \frac{1}{3} S \delta_{ij} \right) \quad (6.37)$$

$$B_{ij} = C_2 \nu_T \frac{k}{\varepsilon} (\Omega_{im} S_{mj} + \Omega_{jm} S_{mi}) \quad (6.38)$$

$$C_{ij} = C_3 \nu_T \frac{k}{\varepsilon} \left(\Omega_{im} \Omega_{mj} - \frac{1}{3} \Omega \delta_{ij} \right) \quad (6.39)$$

Nestas equações $C_1 = -0.76$, $C_2 = 0.18$ e $C_3 = 1.04$ são constantes do modelo. Este modelo é facilmente implementado nas equações governantes (como termos de fonte adicionais com os tensores adicionais não lineares).

A ideia original da expansão da equação de Boussinesq deve-se à [14] e foi desenvolvida mais explicitamente nos trabalhos de [31] e [19]. Esta concepção posteriormente foi interpretada como uma versão dos modelos de fechamento de segunda ordem, considerando uma simplificação da forma explícita das equações diferenciais ([8]). Modelos com expansões cúbicas são também encontrados na literatura, com bons resultados relatados (e.g. [5]). Observa-se que os termos tensoriais adicionados são invariantes à mudança de referencial.

Particularmente para aplicações em escoamentos ambientais, diversos artigos tem utilizado modelos não-lineares na descrição do escoamento em canais, para

configurações de escoamento de desenvolvido ([19]), canais curvos ([35], [9]) ou confluências ([25]). Os resultados obtidos apresentam uma boa aderência às medidas experimentais em diferentes tipos de escoamento em canais, com uma boa previsão do escoamento secundário nas seções transversais, que caracterizam uma topologia de linhas de correntes espiraladas na direção da linha principal axial do escoamento. Cabe observar que modelos de turbulência que utilizam unicamente a aproximação de Boussinesq, Eq. 6.20, são incapazes de prever os escoamentos secundários existentes neste tipo de situação. Logo, o uso do modelo não-linear e anisotrópico apresenta uma vantagem diferenciada, quando se torna necessária uma descrição hidrodinâmica precisa destes fenômenos complexos.

Observa-se, no entanto, que o modelo não-linear e anisotrópico proposto pela Eq. 6.36, não se aplica para condições de baixo-Reynolds. Embora algumas versões do modelo apresentem propostas para funções de atenuação em regiões do escoamento onde $v_T/v \rightarrow 0$ ([1], [26]), o uso de um modelo específico para a proximidade de superfícies sólidas (fundo e margens) serão contornadas pelo uso de funções de parede, mantendo-se a formulação original do modelo.

6.10 Modelo de Tensões de Reynolds - *RSM*

O Modelo de Tensões de Reynolds, mais conhecido na literatura como modelo *RSM*³, propõe expressões para as componentes do tensor de tensões turbulentas criando uma equação de transporte para o Tensor de Reynolds. Nesse sentido, o modelo *RSM* não assume a hipótese de Boussinesq, dispensando o conceito de viscosidade turbulenta. Uma característica distintiva dos modelos para as tensões de Reynolds é precisamente abandonar o conceito de uma viscosidade turbulenta, o qual intrinsecamente impõe uma condição de isotropia local do escoamento médio, o que muitas vezes não é observado na prática, como é o caso de escoamentos em camadas limites e canais abertos. No entanto, se por um lado modelos *RSM* permitem maior flexibilidade na descrição do transporte de quantidade de movimento por flutuações turbulentas, por outro são consideravelmente mais elaborados no sentido de que exigem, no caso mais geral, a formulação de 5 equações constitutivas para cada uma de suas componentes, sendo duas associadas às diferenças de tensões

³Sigla na língua inglesa para *Reynolds Strees Model*

normais turbulentas, e três das componentes deviatóricas.

Considerando o tensor de Reynolds como definido no texto imediatamente após a Eq.6.6, a equação de transporte de τ_{ij} em que são desconsiderados transientes associados à variações em escalas de tempo superiores da média temporal é dada por

$$\bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = - \left(\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) + d_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij}. \quad (6.40)$$

A Eq. (6.40) é, na verdade, a Eq.(6.9) sem o termo transiente e em que os termos de produção são expressos explicitamente, permitindo que sejam tratados numericamente de maneira análoga ao que se faz com os termos convectivos de outras equações de transporte. A definição dos termos de difusão (d_{ij}), taxa de dissipação ε_{ij} e pressão turbulenta (Π_{ij}) é feita em função das características constitutivas desses termos, que permitem que teorias possam ser elaboradas separadamente para cada um. De fato, há na literatura vários modelos para esses termos. Choi and Kang [4] realizaram experimentos numéricos comparando três diferentes modelos para o tensor de difusão de τ_{ij} e cinco modelos para o tensor de pressão turbulenta, em um escoamento de canal com dados experimentais disponíveis. Esses autores reportam que o modelo para o tensor de difusão de Mellor and Herring [17], o modelo para o tensor de pressão turbulenta de Speziale et al. [33] reproduzem os resultados experimentais com mais acurácia. Na presente publicação, e nas simulações que serão apresentadas no estudo de caso, utilizaremos o modelo *RSM* com esses modelos. Em adição, para o termo de taxa de dissipação, será empregado o modelo de Rotta [23], que assume que a taxa de dissipação de τ_{ij} é isotrópica, e que será descrito mais adiante. A forma final de um modelo *RSM* acurado para o escoamento em canais, composto pela união dos melhores modelos de d_{ij} e Π_{ij} , além do modelo de ε_{ij} de Rotta aparece no trabalho de Kang and Choi [11] e será reproduzida aqui.

O tensor de difusão de τ_{ij} é dado por

$$d_{ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{jk}}{\partial x_i} \right) \right], \quad (6.41)$$

em que $C_s = 0,22/3$ é uma constante e $k = \tau_{ii}/2$ é a energia cinética de turbulência.

O modelo de Rotta prevê que taxa de dissipação de τ_{ij} , ε_{ij} , é dada por

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}, \quad (6.42)$$

em que δ_{ij} é o operador delta de Kronecker. A taxa de dissipação de energia cinética de turbulência é obtida da equação de transporte padrão de ε , dada por

$$\overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \tau_{kl} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (6.43)$$

em que P_k é a taxa de produção de energia cinética de turbulência e as constantes do modelo são dadas por $C_\varepsilon = 0,18$, $C_{\varepsilon 1} = 1,45$ e $C_{\varepsilon 2} = 1,90$. A equação de transporte de ε é a mesma do modelo $k - \varepsilon$ padrão.

O tensor de pressão turbulenta (último termo da Eq. (6.40)) está associado à redistribuição conservativa de energia cinética de turbulência entre as diversas componentes de τ_{ij} . Como se mencionou, usaremos o modelo de Speziale et al., que também é referenciado na literatura como modelo SSG⁴. No modelo SSG o tensor de pressão turbulenta é modelado como

$$\begin{aligned} \Pi_{ij} = & \alpha_0 \varepsilon b_{ij} + \alpha_1 \varepsilon (b_{ik} b_{jk} - 1/3 b_{mn} b_{nm} \delta_{ij}) + \alpha_2 k S_{ij} + \alpha_3 P_k b_{ij} \\ & + \alpha_4 k (b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - 2/3 b_{kl} S_{lk} \delta_{ij}) \\ & + \alpha_5 k (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}), \end{aligned} \quad (6.44)$$

em que b_{ij} é o tensor de anisotropia, S_{ij} o tensor taxa de deformação e W_{ij} o tensor vorticidade (parte anti-simétrica do gradiente de velocidades) dados, respectivamente, por

$$b_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij}, \quad (6.45)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) e \quad (6.46)$$

⁴Speziale, Sarkar e Gatski - SSG.

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (6.47)$$

As constantes empíricas de α_p , $p = 0, \dots, 5$ são $\alpha_0 = -3,4$, $\alpha_1 = 4,2$, $\alpha_2 = 0,8 - 1,3(b_{nm}b_{mn})^{1/2}$, $\alpha_3 = -1,8$, $\alpha_4 = 1,25$ e $\alpha_5 = 0,4$.

Próxima à superfície livre ou à paredes sólidas, há uma tendência de amortecimento das pressões turbulentas. Esse efeito pode ser levado em consideração multiplicando os termos do lado direito da Eq.(6.44) por fatores de amortecimento, determinado algebricamente no contexto de modelos *ad hoc*. Detalhes sobre esse assunto podem ser encontrados em [11] (Eqs. (11) e (12)) e na literatura citada naquele trabalho.

6.11 Hidrodinâmica de fundo rugoso

O escoamento em corpos d'água naturais envolve uma formulação adequada que leva em conta a não-homogeneidade geométrica presente no relevo de fundo, caracterizadas pela sua rugosidade, a qual é formada pelo processo de deposição natural de pedras, areia ou demais elementos característicos de fundos fluviais ou oceânicos. De forma prática, estes elementos de rugosidade não são descritos de forma geométrica detalhada, sendo necessário portanto um modelo local de quantificação da interação dos esforços hidrodinâmicos médios do escoamento com o fundo rugoso. Utiliza-se a notação k_s para a dimensão característica média da rugosidade de fundo (rugosidade de *areia* ou de *grão*).

A formulação da hidrodinâmica de escoamento de fluidos próximos a superfícies rugosas inspira-se nos trabalhos experimentais clássicos de Nikuradse ([18]) o qual estabeleceu um conjunto de formulações para o comportamento do atrito hidrodinâmico em tubos de paredes rugosas, cujas dimensões de grãos de areia eram dimensionalmente controlados. Um importante número de trabalhos abordam a questão de forma a descrever os mecanismos de interação do escoamento com a rugosidade, incluindo uma descrição matemática compatível com os modelos de turbulência utilizados (ver revisões de [7], [10] ou [21]). Em particular, propõe-se modificações para as leis de parede que são utilizadas como condições de contorno em simulações de escoamentos ambientais complexos.

As observações experimentais inspiram uma formulação que considera a influência de uma superfície rugosa sobre a camada limite, de forma a extinguir a sub-camada laminar, tendo em vista a interação hidrodinâmica do escoamento na proximidade de parede com os elementos rugosos, criando uma dinâmica local que envolvem vórtices com escalas de comprimento estão da ordem da dimensão dos elementos de rugosidade.

Em uma primeira hipótese, considera-se que a viscosidade de turbulência é quantificada por uma modificação da relação de Von Karmann na forma

$$v_T = u_f \kappa (y + y_0) \quad (6.48)$$

onde y é a distância da parede tendo como origem a posição virtual onde a velocidade tangencial se anula, i.e. $u(0) = 0$. $\kappa = 0.41$ é a constante de Karmann e y_0 é chamada de *rugosidade hidrodinâmica*.

A velocidade de fricção u_f é determinada por

$$u_f = v_T \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6.49)$$

Integrando as duas últimas equações obtêm-se a lei logarítmica de variação da velocidade tangencial na forma

$$u(y) = \frac{u_f}{\kappa} \ln \left(\frac{y - y_0}{y_0} \right) \quad (6.50)$$

A partir da observação experimental, para condições de paredes rugosas onde $k_s^+ \equiv \frac{k_s u_f}{\nu} > 70$, os resultados de Nikuradse sugerem a variação vertical da forma

$$\frac{u}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8.5 \quad (6.51)$$

o que é compatível com a relação

$$y_0 = \exp(-8.5\kappa) k_s \simeq 0.03 k_s \quad (6.52)$$

Tendo em vista que para uma parede lisa a lei-log é dada por

$$\frac{u}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_f y}{\nu} \right) + 5.0 \quad (6.53)$$

Pode-se propor uma função mais ampla na forma

$$\frac{u}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_f y}{\nu + 0.246 u_f k_s} \right) + 5.0 \quad (6.54)$$

Nota-se que a Eq. 6.54 é compatível com as condições de fundo liso, $\nu \gg 0.246 u_f k_s$, ou em caso contrário com efeito da rugosidade dominante. Esta formulação é também utilizada no programa Flow3D ([28]).

Complementarmente, para os campos de k e ε as seguintes condições são sugeridas (inspirado em [13])

$$k = \frac{u_f^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (6.55)$$

e

$$\varepsilon = \frac{u_f^3}{\kappa(y + y_0)}. \quad (6.56)$$

6.12 Considerações sobre implementação numérica 3D

O conceito de implementação numérica das condições de contorno de superfície rugosa envolve uma abordagem de topologia de elementos de superfície, tal como ilustrado na Fig. 6.2.

A superfície do domínio fluido é deslocada de $y = \delta \simeq k_s$. O problema de utilização das equações do modelo de rugosidade é não-linear e à cada iteração, um referencial local é determinado em sobre a face de um elemento sobre a superfície através dos seguintes vetores:

- O vetor normal à superfície (\mathbf{e}_n) é obtido geometricamente pela face do elemento superficial;
- O vetor tangente (\mathbf{e}_t) é obtido pela direção projetada do vetor velocidade na linha de corrente próxima à superfície do elemento;
- O vetor tangente adjunto (\mathbf{e}_s) é obtido pela multiplicação vetorial dos demais vetores

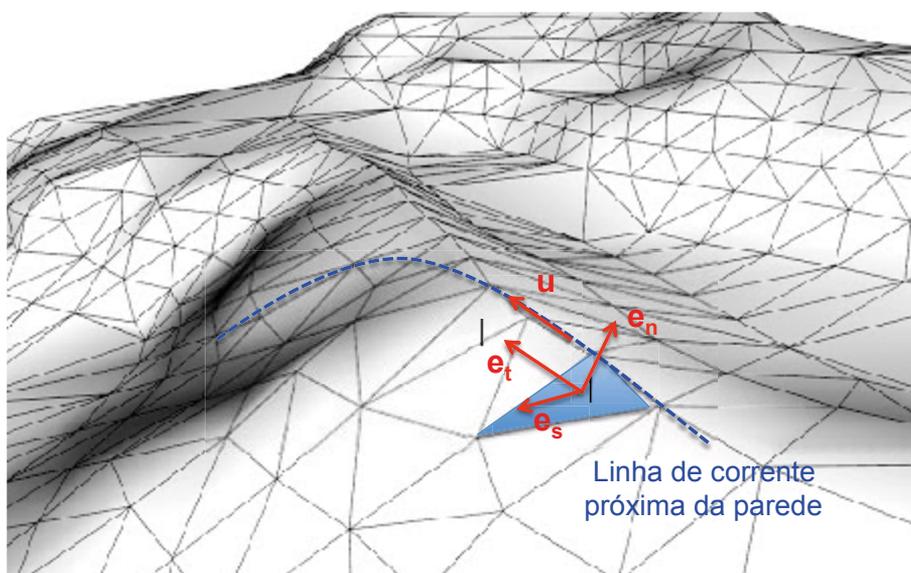


Figura 6.2: Referencial para leis de parede.

Considerando $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ o campo de velocidade calculado em uma etapa de tempo t . No elemento superficial e , a velocidade de atrito é calculada por

$$u_f = \nu_T^e \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_t) \cdot \mathbf{e}_n \quad (6.57)$$

O campo de velocidade em $t + \Delta t$ é então imposto na forma

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_t = \frac{u_f^e}{\kappa} \ln \left(\frac{u_f \delta}{\nu + 0.246 u_f k_s} \right) ; \mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_s = 0 ; \mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_n = 0 \quad (6.58)$$

Esta abordagem é aplicada com sucesso em vários códigos de pesquisa e comerciais (ver descrição em [2]). A mesma envolve condições do tipo Dirichlet para os diferentes componentes de velocidade pelos nós que compõem os elementos superficiais. Outras abordagens utilizam condições tipo Neumann considerando um modelo de tensões superficiais obtidas pelo comportamento do atrito de fundo formulado pelas leis de parede.

As condições para k e ε são impostas na forma calculada pelas equações 6.55 e 6.56.

Referências Bibliográficas

- [1] Abe, K., Jang, Y.-J. and Leschziner, M. [2003]. An investigation of wall-anisotropy expressions and length-scale equations for non-linear eddy-viscosity models, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **24**(2): 181–198.
- [2] Brasil-Junior, A. [2001]. *I Escola de Turbulência e Transição*, ABCM, chapter Elementos finitos e turbulência.
- [3] Chassang, P. [2000]. *Turbulence en mécanique des fluides*, Cepadues Editions.
- [4] Choi, S.-U. and Kang, H. [2001]. Numerical tests of reynolds stress closure models i the computations of open-channel flows., *The 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan.
- [5] Craft, T., Launder, B. and Suga, K. [1997]. Prediction of turbulent transitional phenomena with a nonlinear eddy-viscosity model, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **18**(1): 15–28.
- [6] Fenton, J. D. [2016]. Hydraulics: science, knowledge, and culture, *Journal of Hydraulic Research* **54**(5): 485–501.
- [7] Flack, K. A. and Schultz, M. P. [2010]. Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime, *Journal of Fluids Engineering* **132**(4).
- [8] Gatski, T. B. and Speziale, C. G. [1993]. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics* **254**: 59–78.

- [9] Jia, Y., Blanckaert, K. and Wang, S. S. Y. [2002]. Simulation of secondary flow in curved channels, *Advances in Fluid Modeling and Turbulence Measurements*, World Scientific.
- [10] Jimenez, J. [2004]. Turbulent flows over rough walls, *Annual Review of Fluid Mechanics* **36**(1): 173–196.
- [11] Kang, H. and Choi, S.-U. [2006]. Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **51**: 1319 – 1334.
- [12] Launder, B. and Spalding, D. [1974]. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**(2): 269–289.
- [13] Lee, C.-H. [2017]. Rough boundary treatment method for the shear-stress transportk- ω model, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* **12**(1): 261–269.
- [14] Lumley, J. L. [1970]. Toward a turbulent constitutive relation, *Journal of Fluid Mechanics* **41**(2): 413–434.
- [15] Lumley, J. L. [1979]. Computational modeling of turbulent flows, *Advances in Applied Mechanics*, Elsevier, pp. 123–176.
- [16] Lumley, J. L. [1983]. Turbulence modeling, *Journal of Applied Mechanics* **50**(4b): 1097–1103.
- [17] Mellor, G. and Herring, H. [1973]. A survey of mean turbulent field closure., *AIAA Journal* **11**: 590–599.
- [18] Nikuradse, J. [1933]. Strömungsgesetze in rauhen rohren, *Technical Report 361*, VDI- Forschungsheft, Berlin.
- [19] Nisizima, S. and Yoshizawa, A. [1987]. Turbulent channel and couette flows using an anisotropic k-epsilon model, *AIAA Journal* **25**(3): 414–420.
- [20] Pope, S. B. [2000]. *Turbulent Flows*, Cambridge University Press.

- [21] Raupach, M. R., Antonia, R. A. and Rajagopalan, S. [1991]. Rough-wall turbulent boundary layers, *Applied Mechanics Reviews* **44**(1): 1–25.
- [22] Rodi, W. [2017]. Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review, *Journal of Hydraulic Engineering* **143**(5): 03117001.
- [23] Rotta, J. [1951]. Statistische theorie nichthomogener turbulenz, *Zeitschrift fur Physik* **129**: 547–572.
- [24] Schmitt, F. G. [2017]. Turbulence from 1870 to 1920: The birth of a noun and of a concept, *Comptes Rendus Mécanique* **345**(9): 620–626.
- [25] Shaheed, R., Mohammadian, A. and Gildeh, H. K. [2018]. A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels, *Environmental Fluid Mechanics* **19**(2): 543–568.
- [26] Shi, T. H. [1990]. An improved $k - \epsilon$ model for near-wall turbulence and comparison with direct numerical simulations, *Technical Report NASA Rpport ICOMP-90-16*, NASA.
- [27] Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. [1995]. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows, *Computers & Fluids* **24**(3): 227–238.
- [28] Souders, D. and Hirt, C. [2002]. Modeling roughness effects in open channel flows, *Technical Report FSI-02-TN60*, Flow Science, Inc.
- [29] Spalart, P. R. and Allmaras, S. [1994]. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *La Recherche Aérospatiale* **1**: 5–21.
- [30] Speziale, C. G. [1979]. Invariance of turbulent closure models, *Physics of Fluids* **22**(6): 1033.
- [31] Speziale, C. G. [1987]. On nonlinear $k-l$ and $k-\epsilon$ models of turbulence, *Journal of Fluid Mechanics* **178**: 459–475.
- [32] Speziale, C. G. [1989]. Turbulence modeling in noninertial frames of reference, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* **1**: 3–19.

- [33] Speziale, C., Sarkar, S. and T., G. [1991]. Modeling the pressure strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach, *Journal of Fluid Mechanics* **227**: 245–272.
- [34] Wilcox, D. C. [2006]. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries.
- [35] Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G. [1992]. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* **4**(7): 1510–1520.

Capítulo 7

Estudo de caso UHE Serra do Facão - Simulação 3D

Kajaal R. Gopie, Isadora M. Bugarin e Taygoara F. de Oliveira
Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

7.1 Visão geral da metodologia

No presente capítulo é elaborado um estudo de caso em que modelos escoamentos turbulentos, apresentados nos capítulos anteriores, são aplicados para estimar o potencial hidrocínético de um rio real. As simulações são realizadas utilizando o pacote comercial ANSYS/CFX. Essa ferramenta numérica permite a discretização de domínios em malhas computacionais, a aplicação do método de volumes finitos ao conjunto de equações governantes (equação de conservação da massa, quantidade de movimento e equações do modelo de turbulência), a resolução dos sistemas lineares resultantes desse método e a análise dos resultados com ferramentas de pós-processamento poderosas. Trataremos do caso do rio São Marcos em um trecho de 345m a jusante da barragem da usina SEFAC. A principal condição de contorno é a vazão do rio, que é conhecida em termos das vazões através dos sistemas hidráulicos da usina. O objetivo principal é determinar a velocidade e a intensidade de turbulência locais no trecho de rio analisado, visando determinar pontos em que

seja viável a instalação de turbinas hidrocínéticas. Um fator relevante que também deve ser analisado é a presença de correntes secundárias nesses locais, as quais podem impactar negativamente a produção de energia por esse tipo de escoamento.

De um ponto de vista amplo, as seguintes etapas serão cumpridas:

1. *Validação da metodologia numérica de simulação de escoamentos turbulentos em canais abertos.* Essa etapa envolve a simulação de um escoamento similar ao do objeto final do estudo, mas cujas características sejam conhecidas e documentadas. Dessa forma, resultados numéricos e experimentais podem ser comparados e a acurácia da metodologia numérica pode ser avaliada.
2. *Simulação do escoamento no rio.* Uma vez que o método de simulação numérica é validado pela comparação com resultados experimentais, parte-se do pressuposto de que se a mesma metodologia for aplicada ao escoamento natural, resultados igualmente acurados serão obtidos. Dessa forma, para uma dada condição de vazão do canal, determina-se numericamente a velocidade e intensidade de turbulência locais.
3. *Avaliação dos escoamento com vistas a instalação de turbinas hidrocínéticas.* Os campos de velocidade e grandezas turbulentas resultantes da simulação permitem que se tenha uma visão detalhada do escoamento e que se possa determinar os pontos em que a instalação de turbinas hidrocínética é mais vantajosa. Um vez determinados esses locais preferenciais de instalação de turbinas, a capacidade de conversão pode ser estimada, para as condições de vazão consideradas na simulação.
4. *Previsão da produção anual de energia.* Com vistas à determinação da energia convertida anualmente, simulações com condições de vazão diferentes podem ser realizadas, considerando-se valores diferentes que eventualmente sejam representativos de períodos longos distintos.

A simulação 3D de um escoamento turbulento em um trecho de rio é, ainda hoje, tarefa computacionalmente dispendiosa, mesmo com recursos computacionais modernos. É comum que simulações em domínios com grandes variações topográficas (relevo de fundo variável e presença de curvas) exijam malhas refinadas

cuja simulação requeira vários dias de computação ininterrupta. Sendo assim, não é viável que uma metodologia como a que se apresentará neste capítulo seja repetida para todos os pontos de curvas de permanência de vazão, típicas de usinas hidrelétricas, que geralmente contém centenas ou milhares de registros. Nesse sentido, se houver regimes distintos que possam ser considerados representativos de longos períodos do ano, tal que apenas um conjunto reduzido de simulações seja necessário, então a presente metodologia pode ser diretamente aplicada para determinar o potencial de geração hidrocínética. Por outro lado, naquelas situações em que isso não é possível, métodos de simulação 3D de escoamentos turbulentos podem fornecer bases de comparação sólidas e confiáveis para metodologias simplificadas de previsão do campo de velocidade, como as do capítulo 8 deste livro, as quais podem ser aplicadas para a estimativa dos campos de velocidade em rios com custo computacional significativamente menor.

7.2 Validação do método numérico

A validação do método numérico deve ser feita comparando as soluções produzidas pela simulação com algum resultado de referência. No caso de um escoamento através de canal natural (rio), com vistas à determinação do potencial hidrocínético, a variável mais relevante para o estudo é o vetor velocidade local do escoamento. Dessa forma, é preciso, em primeiro lugar, encontrar um trabalho de referência na literatura em que um escoamento de canal aberto seja produzido em condições controladas de laboratório e cujo campo de velocidades seja medido em pontos suficientes para permitir uma comparação confiável com resultados numéricos. Considerando elementos típicos da topografia de rios, tais como a presença de regiões de várzea e curvas, é ainda desejável que o experimento de referência contenha essas mesmas características. Uma vez definido esse *benchmark*, simulações com os diversos modelos de turbulência e em diferentes níveis e refinamento das malhas computacionais são realizadas de forma sistemática. Busca-se determinar o nível de refinamento necessário para que as soluções numéricas fornecidas por cada modelo sejam independentes da malha computacional e depois selecionar qual modelo melhor aproxima o campo de velocidade da referência. Esse processo será exemplificado nas seções a seguir.

7.2.1 Descrição do benchmark

O *Science and Engineering Research Council* (SERC) foi fundado em 1984 no Reino Unido para substituir o *Science Research Council*. Essa instituição engloba agências de pesquisa inglesas para os estudos teóricos e aplicados em áreas como a astronomia, física de partículas, biotecnologia e engenharia. Em 1994 o centro passou a se chamar *Engineering and Physical Sciences Research Council* (EPSRC) e conta com diversas instalações laboratoriais com capacidades avançadas e disponíveis para realização de pesquisas conduzidas principalmente por instituições inglesas, mas também de outros países. No EPSRC, o *Flood Channel Facility* (FCF) consiste em uma grande instalação central construída para possibilitar a investigação do comportamento hidráulico de rios e o alívio de fluxo de canais e foi fundada ainda no tempo do SERC.

Segundo Knight e Sellin [4], a principal motivação para o desenvolvimento desse grande projeto foi a limitação de espaço existente em laboratórios para esse tipo de análise. O canal foi planejado para ser quatro vezes maior do que a maior instalação experimental existente até então nos laboratórios do Reino Unido, com 56 metros de comprimento e 10 metros de largura. O escoamento de recirculação de água é fornecido por inúmeras bombas que drenam de um cárter comum e a vazão máxima disponível é de $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$. Desde a sua construção, muitos experimentos foram realizados para as mais diversas condições iniciais e conformações geométricas. Assim, o SERC-FCF tornou-se uma referência para pesquisadores do mundo inteiro, fornecendo de modo geral um grande banco de dados para a validação de novos trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos.

No presente estudo de caso, foram utilizados dados do modelo experimental FCF-23B do SERC. O FCF-23B consiste de um canal sinuoso com um trajeto de 1 m reto, seguido por quatro curvas sucessivas, como apresentado na Fig. 7.1 [2]. O experimento foi desenvolvido por Da Silveira Lorena, 1992 [1], utilizando uma sinuosidade de 1,374 e um ângulo de *crossover* de 60° , em que duas seções transversais distintas foram utilizadas: trapezoidal e natural. Para este estudo, focaremos na análise com seção transversal trapezoidal e declive natural de 45° (Fig. 7.2). O declive longitudinal da várzea é de $0,996 \times 10^{-3}$. A água foi distribuída por meio de 6 bombas, totalizando uma vazão de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$. O autor realizou testes para 6 casos de rugosidade da várzea. Os critérios seguidos para o estudo do caso descrito no parágrafo anterior e os valores definidos para as variáveis

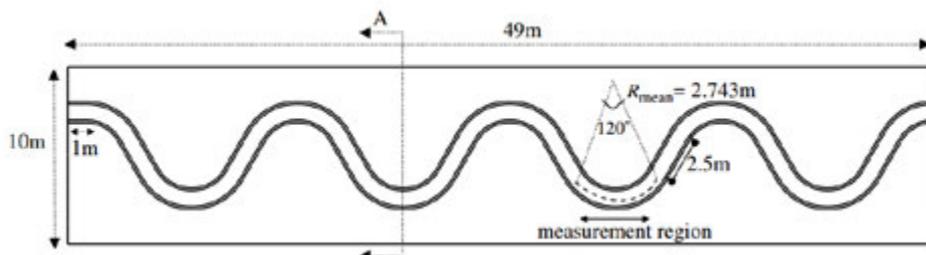


Figura 7.1: Canal sinuoso do FCF-23B, em que o comprimento efetivo utilizado é 49 m e a largura 10 m, o ângulo de curvatura é de 120° e de *cross section* de 60° , o raio é de 2,743m e o trecho reto que liga as curvas tem comprimento de 2,5m [2].

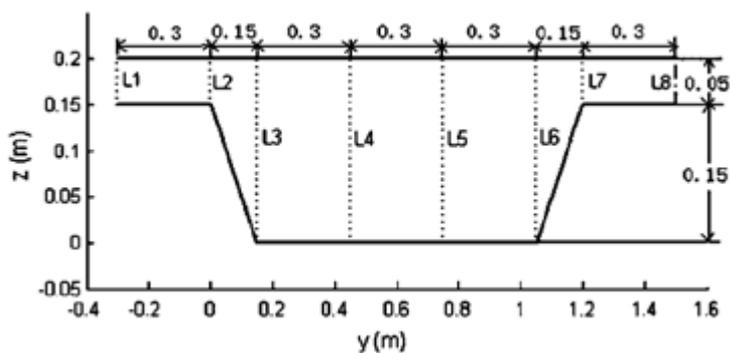


Figura 7.2: Seção transversal do modelo FCF-23B [1].

principais do problema foram:

- curvas compostas por arcos circulares, unidos por trechos de seções atravessadas com comprimento de 2,50 m;
- o uso de 4 curvas para permitir o desenvolvimento do escoamento;
- largura do topo do canal (B_c) de 1,2 m;
- comprimento de onda na região sinuosa (λ_m) de aproximadamente $10 \times B_c$;
- raio da curva de aproximadamente 2,743m;
- amplitude dupla na região sinuosa (a) de aproximadamente $0,5 \times B_c$;
- largura da várzea (W_t) de aproximadamente 10 a $20 \times B_c$;
- largura da várzea fora da região sinuosa larga o suficiente para permitir o desenvolvimento de camadas cisalhantes com 3,90m.

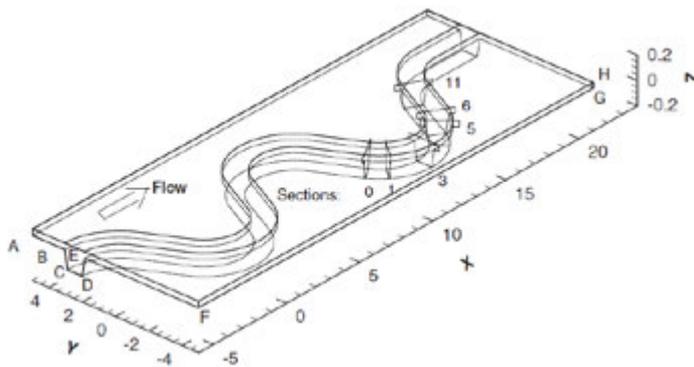


Figura 7.3: Sistema de coordenadas, direção do escoamento e planos de medida. O plano transversal 3 é a seção do escoamento onde foram coletados os dados para do *benchmark* [3].

Os perfis de velocidade empregados nas comparações foram realizadas por da Silveira Lorena [1], em um plano transversal do escoamento, nas linhas verticais L1,

$L2, \dots, L8$ como define a Fig.(7.2). O plano de medida é a seção 3 da Fig.(7.3), posicionada na terceira curva do canal precisamente de maneira que a componente de velocidade perpendicular ao plano seja componente paralela ao eixo x , e que no texto de referência é chamada componente longitudinal (w), em contraste com a componente paralela à direção y , no plano, chamada transversal (u).

7.2.2 Condições de contorno do *benchmark*

Em todas as simulações do *benchmark* foram admitidas condição de não escorregamento nas paredes do canal e pressão estática igual a zero na saída. Para a superfície livre, optou-se por utilizar um modelo monofásico assumindo que a superfície livre é uma parede deslizante (sem tensão de cisalhamento). Na entrada do canal o escoamento é assumido uniforme com velocidade média $U_{in} = Q/A$, em que Q é a vazão volumétrica do escoamento e A é a área da seção transversal na entrada. A energia cinética de turbulência k_{in} e a taxa de dissipação ε_{in} na entrada são calculadas por

$$k_{in} = \frac{3}{2}(IU_{in})^2, \quad (7.1)$$

$$\varepsilon_{in} = c^{3/4} \mu \frac{k_{in}^{3/2}}{0.1R}, \quad (7.2)$$

em que I é a intensidade de turbulência e R é o raio hidráulico na entrada. A tabela 7.1 mostra os valores de entrada calculados considerado $I = 10\%$, em que DR é a razão entre a profundidade acima da várzea e a altura máxima do canal principal (H)[3].

DR	Q (m^3/s)	H (m)	U_{in} (m/s)	k_{in} (m^2/s^2)	ε_{in} (m^2/s^3)
0.25	0.2480	0.2	0.378	2.14×10^{-3}	8.14×10^{-4}

Tabela 7.1: Valores de entrada para a simulação do canal sinuoso com seção transversal trapezoidal.

7.2.3 Estudo de sensibilidade quanto ao refinamento de malha

As malhas foram construídas usando majoritariamente volumes tetraédricos. Próximo das paredes, definiu-se um *inflation*¹ de 15 camadas com a primeira a $3,8 \times 10^{-4}m$ (distância da parede), proporcionando uma discretização mais precisa das camadas limites sobre as superfícies sólidas do canal.

Foram realizadas comparações de velocidade média e energia cinética de turbulência no ponto $\mathbf{p} = (0, 22.24, 24.5)$, definido na seção transversal 3 da Fig. (7.3), para diferentes refinamentos. Os modelos testados foram o $k - \varepsilon$, $k - \varepsilon$ anisotrópico, SST ² e RSM . As Figuras 7.4 e 7.5 mostram os resultados empregando o modelo $k - \varepsilon$.

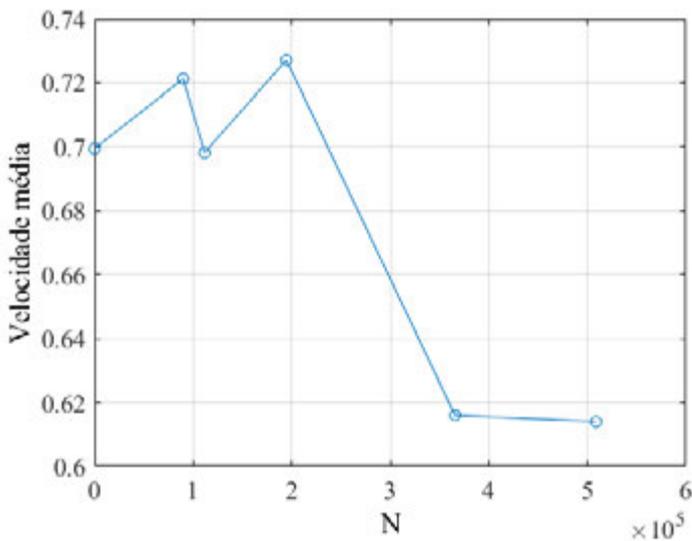


Figura 7.4: Componente longitudinal w no ponto \mathbf{p} em função do número de nós da malha para o modelo $k - \varepsilon$. O Valor para $N = 0$ corresponde a velocidade uniforme da entrada. A diferença entre os resultados obtidos para as duas malhas mais refinadas é menor do que 1% do valor absoluto da velocidade local.

¹Camada de elementos paralelepípedicos delgados.

²O modelo SST é uma combinação dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ desenvolvido por Menter [5].

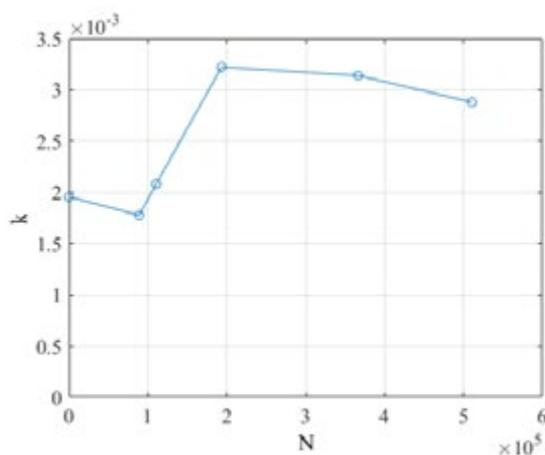


Figura 7.5: Energia cinética de turbulência no ponto **p** em função do número de nós da malha para o modelo $k - \varepsilon$. O Valor para $N = 0$ corresponde a k na seção de entrada. A diferença entre os resultados obtidos para as duas malhas mais refinadas é menor do que 5% do valor absoluto de k no local.

A análise feita usando o modelo $k - \varepsilon$ mostra que as duas malhas mais refinadas produzem praticamente o mesmo resultado para velocidade local (diferenças inferiores a 1%). Isso indica que o refinamento final é suficiente para calcular essa quantidade. As variações de energia cinética de turbulência entre as malhas também foram analisadas, constatando-se que essa quantidade varia em menos do que 5% entre as duas malhas mais refinadas. Naturalmente, simulações empregando maior número de pontos levariam a diferenças ainda menores, porém com custo computacional mais elevado. Para a determinação do potencial hidrocínético em rios, os níveis de incerteza para velocidade local e energia cinética de turbulência relativos ao refinamento de malha atingidos são suficientes.

O mesmo estudo foi realizado também usando modelos $k - \varepsilon$ anisotrópico, *SST* e *RSM*. Entre todos, o que precisou de malhas mais refinadas para obter resultados convergidos nos níveis de tolerância adotados foi o $k - \varepsilon$. Os resultados do estudo de convergência de malha no *benchmark* podem ser usados para estimar as primeiras malhas dos casos reais, reproduzindo a mesma densidade de nós. No entanto, as simulações do canal natural devem ser antecedidas por estudo de sensibilidade

quanto ao refinamento, realizado nos mesmos moldes já empregados no caso de referência.

7.3 Comparação entre resultados de modelos de turbulência

A fim de verificar qual modelo de turbulência apresenta melhor desempenho na simulações da canal de *benchmark*, foram realizados testes com três modelos de turbulência distintos: $k - \varepsilon$, $k - \varepsilon$ anisotrópico, e *RSM*. Para isso, compararam-se os resultados das simulações para os três modelos com os dados experimentais, possibilitando definir qual apresenta maior acurácia para o caso estudado. As Figuras (7.6) e (7.7) mostram, respectivamente, os valores das componentes de velocidade transversal e longitudinal nas regiões L1 (na região de várzea) e L3 (no canal principal) simulados, juntos aos dados experimentais.

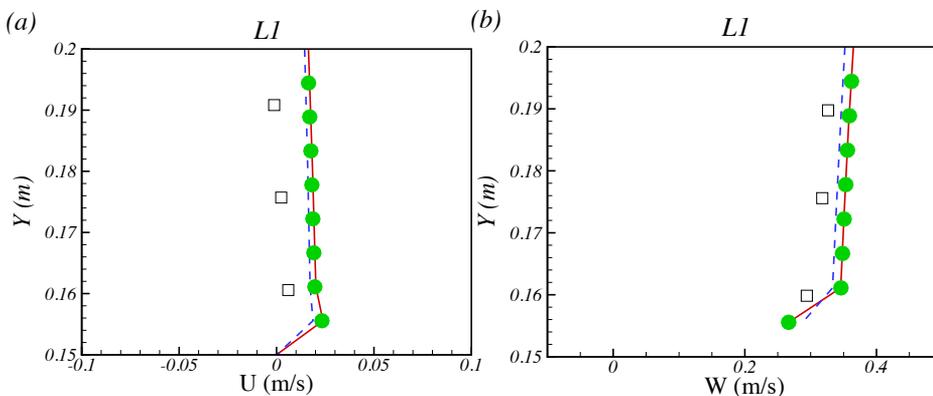


Figura 7.6: Perfis de velocidade transversal (a) e longitudinal (b) em L1. Quadrado preto representa os dados experimentais, a linha vermelha contínua o *RSM*, a linha azul tracejada o modelo $k - \varepsilon$ e os círculos verdes $k - \varepsilon$ anisotrópico.

Ao analisar essas seções, pode-se concluir que os três modelos resultaram em perfis de velocidade muito semelhantes entre si, e semelhantes aos perfis definidos experimentalmente. Isso é indicativo de que os modelos são adequados para a

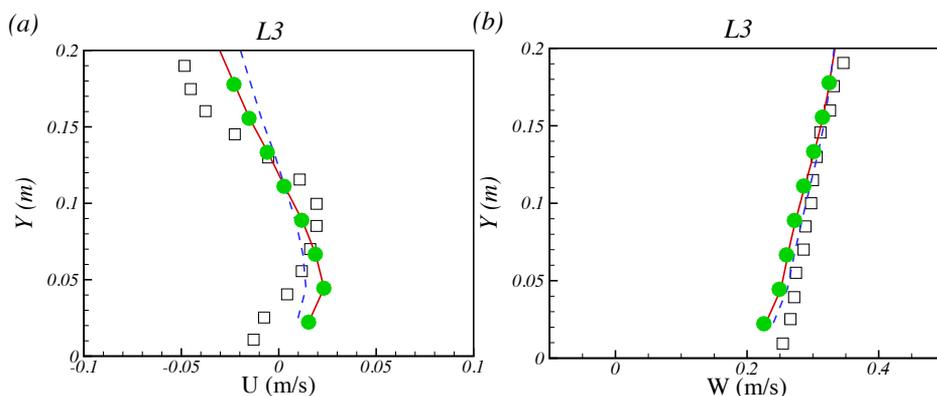


Figura 7.7: Perfis de velocidade transversal (a) e longitudinal (b) em L3. Quadrado preto representa os dados experimentais, a linha vermelha contínua o RSM, a linha azul tracejada o modelo $k-\epsilon$ e os círculos verdes $k-\epsilon$ anisotrópico.

investigação do canal aberto. Comparações similares foram realizadas nos demais perfis disponíveis, com resultados similares aos mostrado acima. A Fig.(7.8) mostra uma comparação entre resultados experimentais e numéricos usando o modelo *RSM* para a componente transversal de velocidade. Esse resultados é bastante expressivo porque mostra a capacidade do método em prever o campo de velocidade no plano transversal, tipicamente associados à escoamentos secundário.

Os perfis de velocidade na Fig.(7.8) são evidência de que a metodologia de simulação é acurada na detecção de escoamento secundários. De maneira qualitativa, esse escoamento pode ser visualizado traçando-se os vetores velocidade no plano transversal, como se faz na Fig.(7.9). O escoamento recirculante na figura é, na verdade, a projeção do vetor velocidade local naquele plano. Dessa forma, é possível imaginar que o campo de escoamento é composto por trajetórias helicoidais. A energia cinética contida nas componentes nesse plano não está disponível para uma turbina hidrocínética que opere naquela posição. Além disso, a presença desse tipo de recirculação altera as condições de trabalho de turbinas de eixo horizontal e reduz o seu coeficiente de potência. Portanto, sua instalação em regiões onde há escoamentos secundários não é recomendada.

A simulação do *benchmark* permitiu concluir que o modelo de turbulência *RSM*,

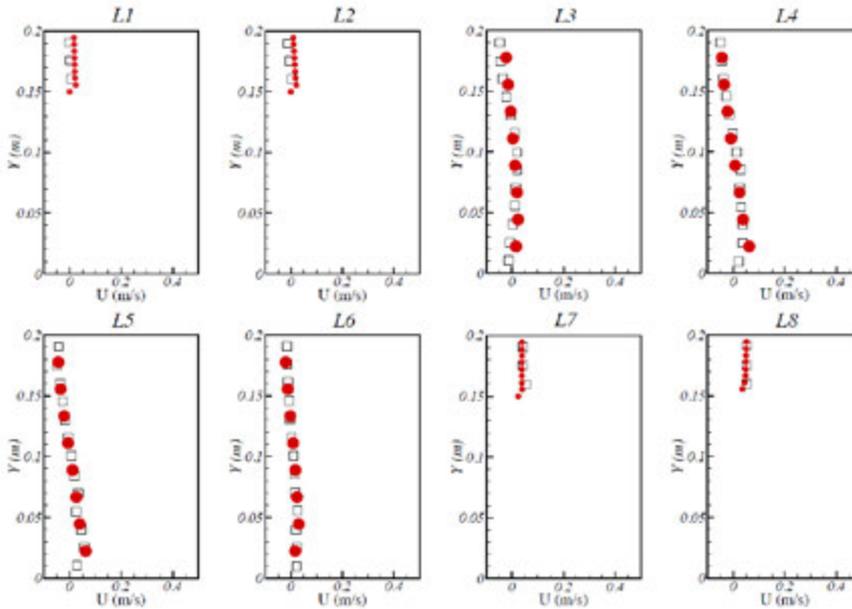


Figura 7.8: Perfis de velocidade transversal para o modelo *RSM* (círculos vermelhos) e experimentais (quadrados vazados).

depois de determinado o refinamento necessário para garantir que os resultados sejam independentes da malha, é capaz de prever com acurácia os perfis de velocidade local, incluindo as componentes no plano transversal. A metodologia também foi capaz de calcular perfis de intensidade de turbulência independentes da malha. Idealmente, seria desejável que fazer comparações entre grandezas turbulentas (energia cinética ou intensidade de turbulência, por exemplo), no entanto, nem sempre esse dados estão disponíveis, como é o caso do FCF-23B [4]. Finalmente, o método mostrou ser capaz detectar a ocorrência de escoamentos secundários com precisão.

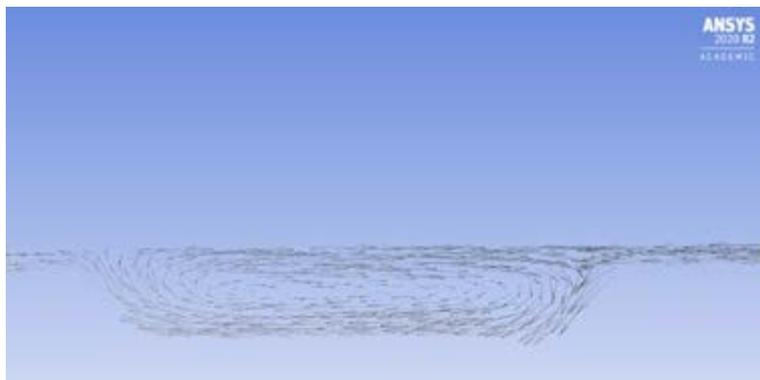


Figura 7.9: Campo de vetores de velocidade no plano transversal do escoamento obtido para a malha mais refinada, com o modelo RSM.

7.4 Simulação do escoamento no rio São Marcos

7.4.1 Modelo geométrico e condições de contorno

Os dados para a determinação do domínio computacional necessários na simulação do rio São Marcos a jusante da barragem da SEFAC foram coletados *in loco* utilizando os métodos de batimetria por ADP discutidos no capítulo 4 (vide Fig.(4.13). A geometria do canal foi reproduzida usando o ANSYS Spaceclaim. A Fig. 7.10 mostra vista superior (b) do canal, depois da modelagem, além da uma imagem com a malha computacional na superfície inferior (a), correspondente ao leito do rio. O sistema de coordenadas define como cota de referência (nível zero) a altura da superfície livre.

Como mostra a Fig. 7.10, esse trecho do rio São Marcos não possui curvas acentuadas. Inspeções locais indicam que o fundo do rio é rochoso. A largura na entrada do canal é de $78,53m$, e diminui até $65,62m$, aumentando depois disso até a maior largura encontrada, de $108,99m$. Logo após a seção de entrada, o escoamento encontra as maiores profundidades no canal, incluindo uma depressão de $24,5m$. Adjacentes à área de menor largura, profundidades de até $6m$ podem ser encontradas.

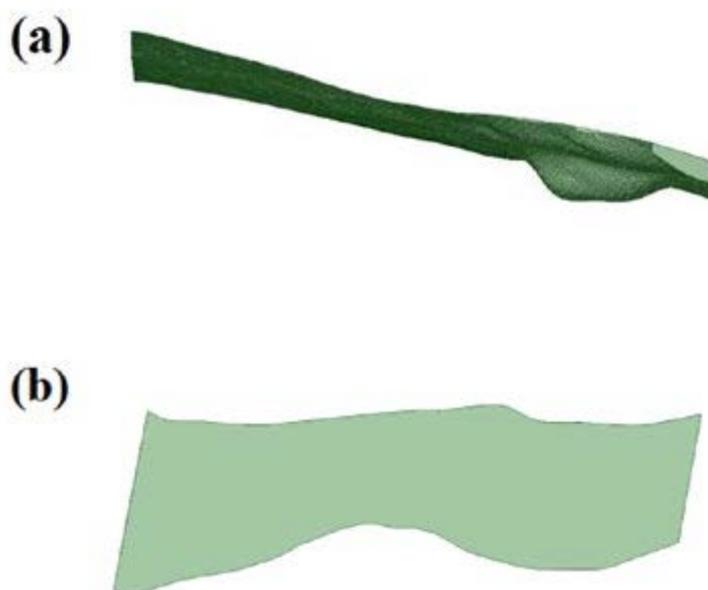


Figura 7.10: Malha computacional (a) e vista superior (b) do canal SEFAC. Comprimento de 345,27m, largura máxima de 108,99m e profundidade máxima de 24,5m. Os dados geométricos foram obtidos *in loco* usando as técnicas de batimetria por ADP, discutidas no Capítulo 4.

7.4.2 Estudo de convergência de malha

De forma análoga ao que se fez no caso de validação, utilizou-se uma malha com volumes majoritariamente tetraédricos e uma região de *inflation* de 15 camadas, sendo a primeira posicionada a $3,8 \times 10^{-4}m$ das superfícies sólidas. Foram testados três refinamentos diferentes em malhas com 515.182, 788.902 e 1.390.664 nós. Para este estudo, considerou-se uma vazão mássica de 91.000 kg/s (dados da SEFAC) e uma intensidade de turbulência estimada de 10%.

Para a realização do estudo de convergência de malha foram definidos três pontos de monitoramento nas posições indicadas pelas marcações em amarelo na Fig.(7.11). O primeiro ponto está localizado na depressão, o segundo aproximada-

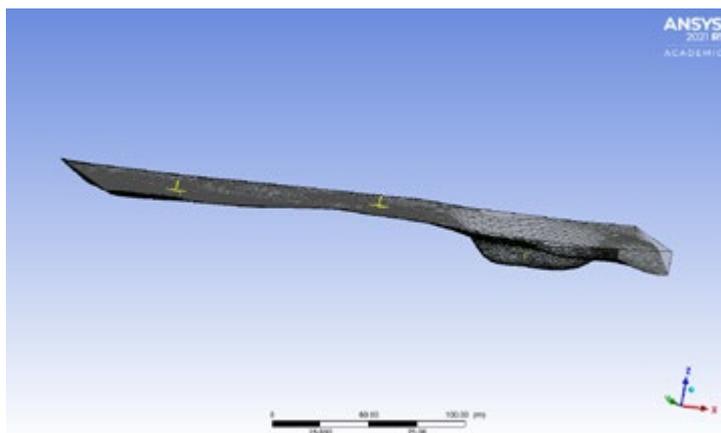


Figura 7.11: Pontos de monitoramento de velocidade (marcações em amarelo) para o estudo de convergência de malha no canal do rio São Marcos.

mente na metade do canal e terceiro mais próximo à seção de saída do domínio do escoamento. Os modelos de turbulência utilizados foram $k - \epsilon$ padrão, $k - \epsilon$ anisotrópico e o *RSM*. A Fig.(7.12) mostra a variação da velocidade local nos três pontos de monitoramento obtidos usando o modelo *RSM*, para os três refinamentos empregados. Como é possível observar, mesmo a malha mais grossa resultou em variações muito discretas de velocidade local em relação às demais. As variações entre os resultados das duas malhas mais refinadas foram menores do que 0,1%

tanto para a velocidade como para a energia cinética de turbulência. As simulações

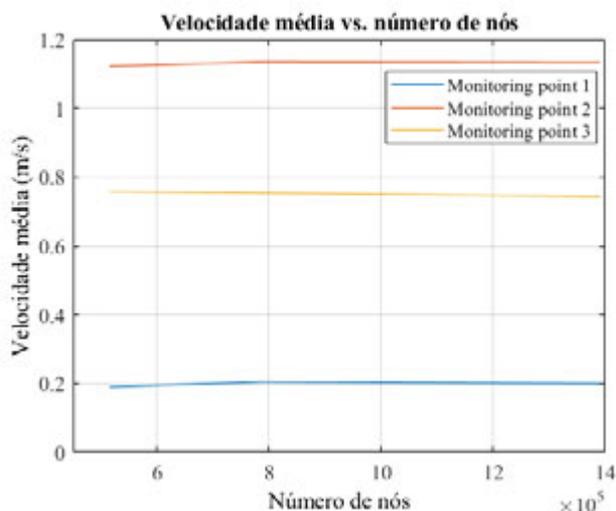


Figura 7.12: Componente longitudinal da velocidade local nos três pontos de monitoração para .

realizadas com os demais modelos de turbulência geraram resultados semelhantes. Muito embora fosse admissível que se empregasse a malha mais grossa para estas simulações, optou-se pela malha de 788.902 nós (cerca de 4 milhões de volumes) para garantir uma resolução espacial compatível com o relevo do fundo do rio.

Os resultados numéricos obtidos usando o modelo *RSM*, com malha de 788.902 nós foram considerados satisfatórios para o cálculo da velocidade e intensidade de turbulência locais na seção de rio estudada. Esses resultados serão explorados nas seções seguintes, com vistas à determinação dos melhores sítios para instalação turbinas hidrocínéticas.

7.4.3 Determinação dos sítios para instalação de turbinas hidrocínéticas

Os principais fatores que devem ser levados em consideração para a escolha dos locais de instalação de turbinas são a velocidade e a intensidade de turbulência

locais. Naturalmente, o outro fator determinante é a profundidade do rio, que, no caso de rios de pouco calado, é limitante do diâmetro das turbinas. O rio São Marcos, imediatamente após a barragem, tem uma grande depressão com profundidade máxima maior do que $20m$, como mostra a Fig. (7.13). Depois dessa região, o canal mantém-se com profundidades variando entre $5m$ e cerca de $2,4m$.

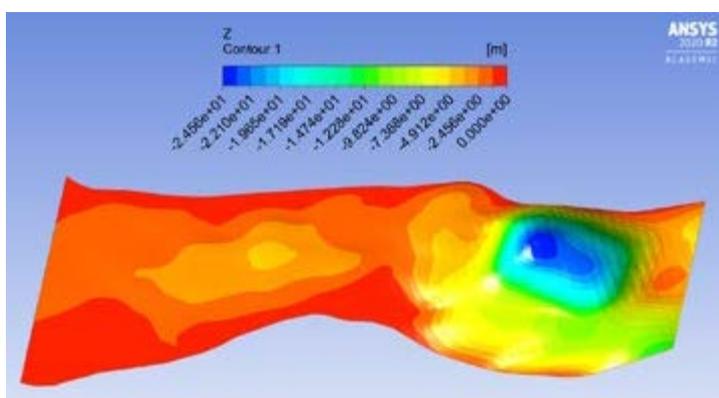


Figura 7.13: Contorno de profundidade do rio São Marcos a jusante da usina SEFAC. A região de cor azul indica local de profundidade máxima, igual a $24m$.

A região de depressão após a barragem da SEFAC promove o aparecimento de duas zonas de recirculação do escoamento, como mostra a Fig.(7.14). A velocidade média local é baixa, e há trechos em que a componente longitudinal é oposta à direção do fluxo do rio. A instalação de turbinas hidrocinéticas nessa região não é viável.

A componente longitudinal da velocidade, na superfície do escoamento, é mostrada na Fig.(7.15). É possível distinguir a região de baixa velocidade sobre a depressão (porção mais a direita do escoamento, em tons predominantemente azulados), da parte com mais energia cinética disponível. As regiões na cor amarela marcam os pontos de maior velocidade do trecho, com picos de aproximadamente $1,5m/s$.

Finalmente, é preciso verificar os níveis de turbulência local do escoamento, a fim de se identificar eventuais regiões em que esse fator possa ser impeditivo para a instalação de turbinas hidrocinéticas. A Fig.(7.16) mostra o mapa de energia

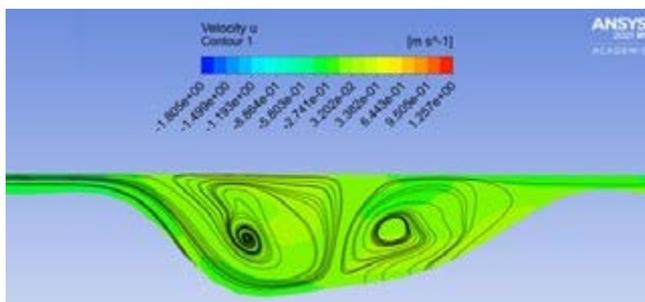


Figura 7.14: Linhas de corrente do escoamento na depressão após a barragem da SEFAC. O escoamento local é caracterizado por duas zonas de recirculação e baixas velocidades médias.

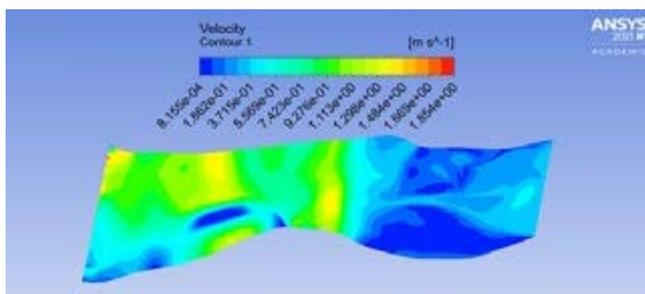


Figura 7.15: Mapa de contorno de velocidade longitudinal.

cinética de turbulência do escoamento. É possível verificar que os maiores níveis de turbulência concentram-se precisamente na região de depressão e que o fluxo após esse trecho assume um padrão com flutuações de velocidade de pouca energia. Dessa forma, é possível afirmar que todo o trecho de rio após a depressão na saída da barragem da SEFAC, até o final do domínio analisado, tem níveis de turbulência compatíveis com a instalação de turbinas hidrocinéticas.

Considerando as características do escoamento, com relativa estratificação de velocidade em seções específicas do rio, cinco seções onde há maior potencial hidrocinético foram destacadas. Essas seções foram escolhidas nas de forma que a velocidade local mínima fosse de $1,0\text{m/s}$ com profundidade superior a $2,0\text{m}$. Essas

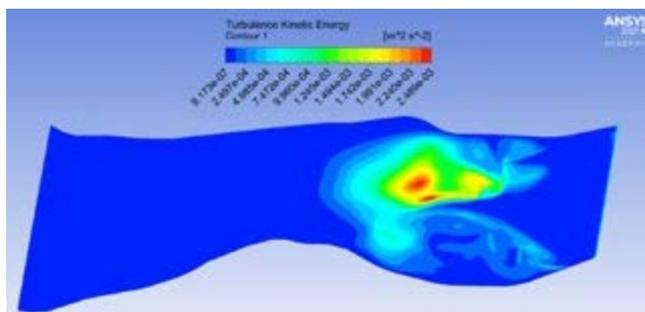


Figura 7.16: Mapa de energia cinética de turbulência.

seções estão indicadas na Fig.(7.17). As seções de 1 a 5 têm comprimento de $72m$, $80m$, $89m$, $98m$ e $103m$, respectivamente.

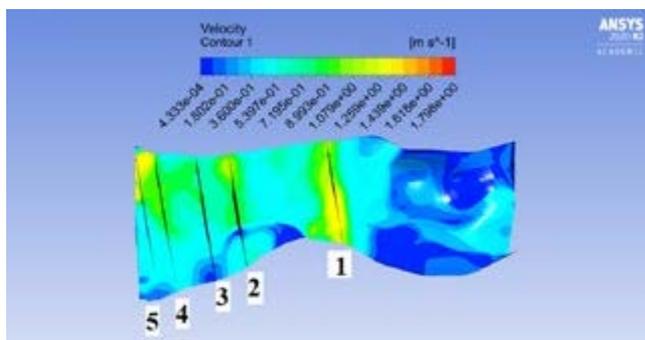


Figura 7.17: Localização das seções preferenciais para instalação de turbinas hidrocinéticas.

Cada uma das seções preferenciais para instalação de turbinas hidrocinéticas foi estudada isoladamente. Em cada caso, os planos transversais foram analisados para verificar condições de profundidade e velocidade local. Ilustrando o processo, a Fig.(7.18) mostra o plano transversal na seção 2, onde foram definidas posições nas quais é possível a instalação de turbinas hidrocinéticas, assinaladas de $P1$ a $P4$.

Os perfis de velocidade e intensidade de turbulência, em cada posição definida nas 5 seções preferenciais para instalação de turbinas, foram traçados para quanti-

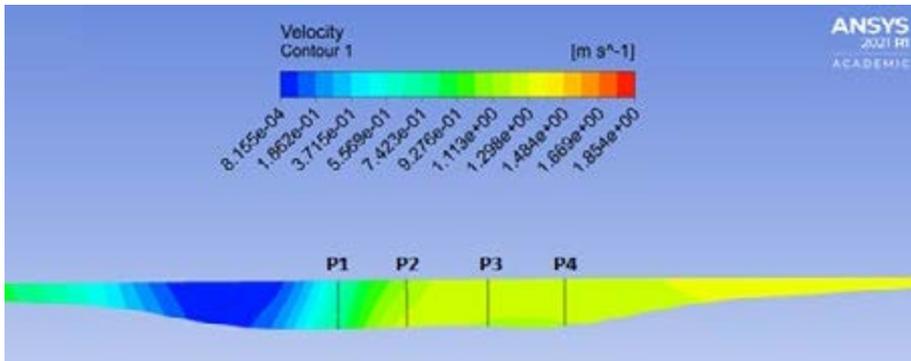


Figura 7.18: Seção transversal do escoamento na seção 2. As linhas assinaladas de *P1* a *P4* marcam locais para instalação de turbinas hidrocinéticas, onde os perfis de velocidade e intensidade de turbulência serão determinados.

car esses parâmetros e permitir a estimativa do potencial de geração hidrocinética. A Fig.(7.19) exemplifica esse processo, mostrando os perfis em *P1* e *P2* da seção preferencial 2 (definidos na Fig.(7.18)). Resultados de simulações feitas com modelos $k - \epsilon$ são apresentados juntos ao modelo *RSM*, que é a referência. A análise dos perfis de velocidade permite concluir que até uma profundidade de aproximadamente $2m$, o perfil de velocidade é próximo de uniforme. No caso da seção 2, em particular, constatou-se que os perfis 3 e 4 são essencialmente constantes, com velocidade igual a $1,3m/s$.

A Fig.(7.16) revelou que há pouca energia cinética de turbulência no escoamento na superfície, a jusante da depressão. Para confirmar que o mesmo padrão se verifica volumetricamente no escoamento, perfis de intensidade de turbulência devem ser traçados. Esse estudo produz resultados como os da Fig.(7.20), a partir dos quais se pode concluir que os níveis de turbulência são baixos (menores do que 2%) para o escoamento nos perfis de *P1* a *P4* da seção 2, desde a superfície livre até a profundidade de $2m$.

A análise das seções preferenciais com o levantamento de perfis de velocidade e intensidade de turbulência é continuada de forma sistemática. Ao final do processo, confirmou-se que a intensidade de turbulência não compromete a instalação de turbinas hidrocinéticas em nenhuma das seções preferenciais. Desta

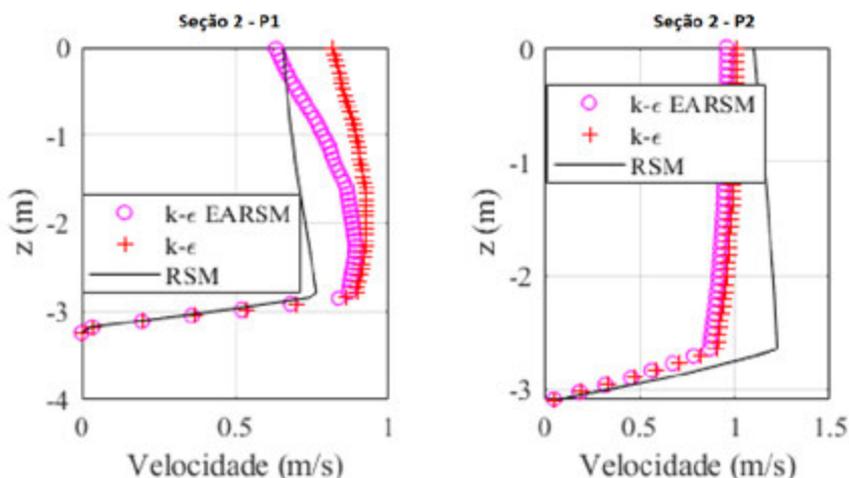


Figura 7.19: Perfis de velocidade em $P1$ e $P2$ na seção preferencial 2.

forma, os melhores sítios podem ser escolhidos levando em conta apenas a velocidade e a profundidade locais. Baseados nestes resultados, a seção 4 foi descartada por apresentar baixos valores de velocidade, enquanto as seções 1, 2, 3 e 5 apresentam velocidades maiores do que 1 m/s. A proximidade entre as seções 2 e 3 sugere que turbinas instaladas na seção 3 possam ser comprometidas pelas esteiras turbulentas geradas pelas turbinas na seção 2. Como entre 2 e 3 a primeira seção tem perfis de velocidade com valores mais elevados, decidiu-se por não utilizar a seção 3 para a instalação de turbinas hidrocinéticas. Dessa forma, ficam consolidadas as seções 1, 2 e 5 como seções para posicionamento de turbinas. Nessas seções, os sítios para instalação de turbinas hidrocinéticas serão posicionados e as velocidades de corrente livre locais serão empregadas para prever o potencial de geração hidrocinética.

Uma análise do campo de velocidades na seção 1 revela que há duas regiões dividindo aquele plano aproximadamente em duas metades em que as velocidades variam significativamente. A seção 1 será então dividida em seções 1A e 1B, nas quais serão distribuídas turbinas hidrocinéticas. Em cada subseção a velocidade será considerada constante para fins da estimativa da potência hidrocinética disponível. A divisão da seção 1 em duas foi feita de forma a garantir que em cada subseção a variação local de velocidade não fosse superior a 10% da velocidade máxima.

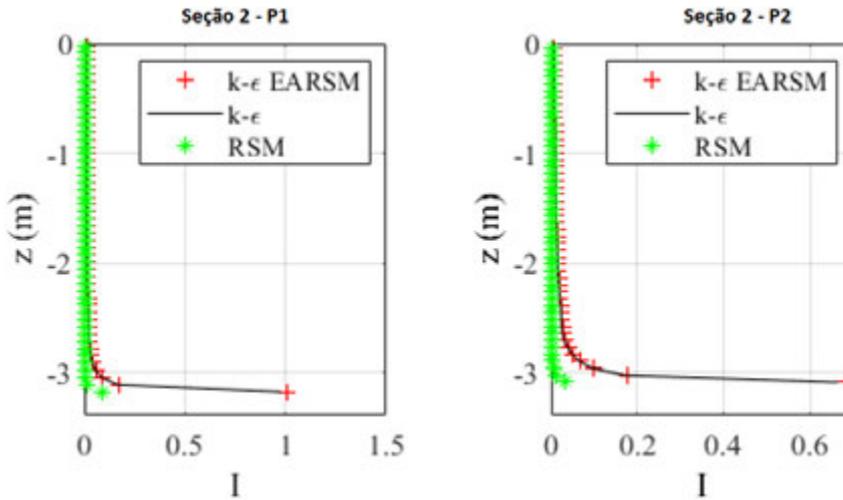


Figura 7.20: Perfis de intensidade de turbulência em $P1$ e $P2$ na seção preferencial 2.

A seção 2 tem uma área significativa de baixas velocidades locais, de forma que apenas a região contendo os perfis $P3$ e $P4$ (Fig.(7.18)) será considerada para o posicionamento de turbinas. Procedimento similar é adotado em relação à seção 5, de forma a garantir que nas condições de contorno empregadas apenas regiões do escoamento com velocidades longitudinais locais superiores a $1,0m/s$ sejam utilizadas para posicionar turbinas.

Levando em conta as características do rio São Marcos no trecho analisado, concluiu-se que o diâmetro do rotor de uma turbina hidrocinética que pode ser instalada seguramente no canal deve ser de $D = 1,0m$. Esse valor leva em consideração, além da profundidade, os perfis de velocidade locais – que apresentam uma camada limite de aproximadamente $0,5m$ – além do fato de ser recomendável manter uma distância mínima entre a superfície livre e a turbina de pelo menos a metade do diâmetro do rotor (D), evitando assim interações entre as pás e a superfície livre que alterem significativamente a potência convertida. Finalmente, entre uma turbina e outra, um afastamento lateral no mesmo plano de $1/2D$ é mantido. Respeitando essas restrições, 23 turbinas podem ser instaladas, distribuídas entre as seções de

acordo com o que indica a Tab.(7.2). Com essas informações, a potência total de uma fazenda hipotética de turbinas hidrocínética pode ser estimada supondo-se um coeficiente de potência típico para esses equipamentos e conhecendo-se a velocidade média local nas seções de instalação, para cada regime de vazão do canal.

Tabela 7.2: Distribuição de turbinas entre as seções de maior potencial do trecho estudado.

Seção	Q ^{de} turbinas
1A	5
1B	5
2	8
5	5

7.4.4 Estimativa anual de geração hidrocínética

A metodologia apresentada é útil para determinar o campo de velocidade e de energia cinética de turbulência em um trecho de rio, para uma dada vazão. No entanto, as vazões a jusante de usinas hidrelétricas podem variar expressivamente, e para cada vazão o campo de velocidade é alterado, o que requer novas simulações. Demonstrando esse fato, a Fig.(7.21) mostra a curva de permanência de vazão em m^3/s da usina SEFAC ao longo do ano de 2018, com medidas diárias. Nesse período a vazão flutua entre $31,51 m^3/s$ e $313,76 m^3/s$.

De um ponto de vista prático, é inviável aplicar a metodologia a todos os regimes de vazão do canal. A finalidade principal das simulações 3D é avaliar as condições do escoamento para regimes específicos (vazão máxima, por exemplo) e, principalmente, servir de padrão para metodologias simplificadas de simulação, capazes de calcular rapidamente um conjunto expressivo de condições de vazões distintas, como as descritas no capítulo 8. Ainda assim, uma estimativa do potencial hidrocínético pode ser feita se a curva de permanência do canal puder ser substituída razoavelmente por um conjunto reduzido de valores vazão, assumidas permanentes ao longo de períodos inteiros do ano. Analisando os dados reproduzidos na Fig. 7.21 é possível discernir dois períodos em que a vazão do canal esteve ao redor

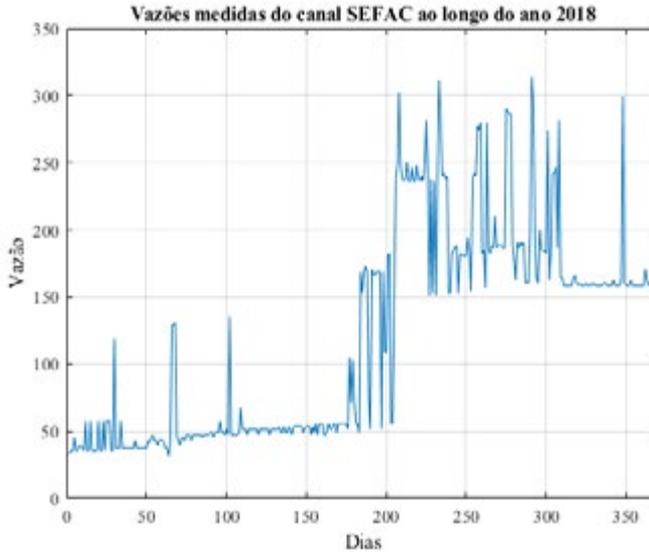


Figura 7.21: Variação da vazão mássica dada em m^3/s através da barragem da SEFAC ao longo do ano de 2018.

de valores médios expressivamente diferentes. A média de vazão nos primeiros 200 dias do ano de 2018 é de cerca de $48M^3/s$. Nos 165 dias restantes do ano, a média foi de $158m^3/s$. Usando esses valores para definir as condições de contorno da simulação do canal, duas simulações foram executadas e as velocidades nas seções de instalação das turbinas coletadas, resultando nos valores apresentados na Tab.(7.3).

A potência gerada por uma turbina hidrocinética é parametrizada usando o coeficiente de potência, C_p , definido de forma que

$$Pot = \frac{1}{2}C_p\rho A_{rot}W^3, \quad (7.3)$$

em que ρ é a densidade da água, A_{rot} é a área varrida pelo rotor, W é a velocidade longitudinal média da seção (perpendicular ao plano do rotor). O coeficiente de potência C_p é função da geometria do rotor (desenho e número de pás), das

Tabela 7.3: Velocidades nas seções de instalação de turbinas para dois regimes de vazão do canal, representativos do ano de 2018.

Seção	Velocidade longitudinal local (m/s)	
	$Q = 48m^3/s$	$Q = 158m^3/s$
1A	0,66	2,04
1B	0,58	1,83
2	0,63	1,59
5	0,62	1,93

condições do escoamento e velocidade de rotação da turbina. Em geral, para rotores com diâmetros na ordem de $1m$, como os que são viáveis no trecho em estudo, é possível conceber projetos de turbinas hidrocínicas de eixo horizontal nas condições observadas para este canal, que operem com $C_p = 0,30$. Estimativas da produção de energia de cada seção selecionada, para as duas condições de vazão assumidas, são apresentadas na Tab.(7.4). As diferenças expressivas observadas entre os valores de potência produzida em cada seção com diferentes vazões refletem o fato de que a potência produzida por uma turbina hidrocínica é linear com o cubo da velocidade de corrente livre.

Tabela 7.4: Potência total gerada por seção para dois regimes de vazão do canal, representativos do ano de 2018.

Seção	Potência gerada por seção (W)	
	$Q = 48m^3/s$	$Q = 158m^3/s$
1A (5 turbinas)	170	5000
1B (5 turbinas)	115	3610
2 (8 turbinas)	235	3788
5 (5 turbinas)	140	4235

Usando os valores da Tab.(7.4) e considerando também a duração de cada período de vazão considerada, obtém-se que uma fazenda hipotética de turbinas hidrocínicas com a concebida no presente estudo teria gerado em 2018 $70MWh$. Os primeiros 200 dias daquele ano, em que as vazões foram baixas, contribuiriam

com pouco mais de $3MWh$. Por outro lado, no senso de uma previsão de potencial de geração, se a vazão média do segundo período fosse observada ao longo de todo ano, a produção de energia chegaria a $145MWh$. Como nota final desse estudo de caso, antes de tecer a conclusão geral, é valioso comentar que as variações expressivas de vazão na usina SEFAC – picos superiores a $300m^3/s$, períodos de vários dias com vazões superiores a $200m^3/s$ –, conjugadas com o fato de que a potência de turbinas hidrocínéticas varia fortemente com a velocidade do escoamento, sugerem que as previsões do potencial hidrocínético realizadas usando metodologias *quasi*-3D serão mais acuradas, já que poderão prever a geração em todo o conjunto de condições de vazão observadas.

7.5 Conclusões

A tecnologia de simulação numérica de escoamentos turbulentos pode ser uma ferramenta valiosa para a determinação do potencial hidrocínético de rios. Os métodos e modernos de simulação de escoamentos permitem que dados de topografia de rios sejam usados para a geração de malhas computacionais que representam detalhadamente o domínio desse tipo de escoamento. Associado a isso, o conhecimento da vazão no canal natural, geralmente disponível para usinas hidrelétricas, contribui para o estabelecimento de condições de contorno realistas, que permitem a determinação de campos de velocidade e variáveis turbulentas com alta resolução espacial. De posse dessas informações, o projeto de turbinas hidrocínéticas para a conversão do potencial disponível em um rio pode ser desenvolvido conhecendo-se em detalhes a velocidade e os níveis de turbulência locais, a incidência de regiões de recirculação ou escoamentos secundários a serem evitados, e mesmo prever condições críticas de operação (como quando ocorre a máxima vazão do canal) permitindo que situações potencialmente prejudiciais ao funcionamento de turbinas hidrocínética sejam antecipadas.

No estudo de caso apresentado, as diversas etapas da simulação competente de um trecho de rio foram exemplificadas. Passo universal no uso de ferramentas numéricas para aplicações de engenharia, a validação da metodologia incluiu a seleção de *benchmark* adequado, estudo de convergência de malha no caso *benchmark* e avaliação de desempenho de diferentes modelos de turbulência na determinação dos campos de velocidade, energia cinética (ou intensidade) de

turbulência e acurácia na detecção de escoamentos secundários. Em um segundo momento, o canal natural a ser estudado – trecho do rio São Marcos após a usina SEFAC – foi discretizado usando dados de batimetria feita por técnica de ADP, seguida da simulação do escoamento com o modelo de turbulência que melhor descreveu o escoamento de referência, que inclui também um novo estudo de convergência de malha, agora para a geometria do rio. Para a previsão do potencial hidrocínético, simulações considerando duas vazões representativas dos regimes de vazão ao longo de um ano foram realizadas. Usando esses resultados, as posições no canal com maiores velocidades foram selecionadas para o posicionamento de unidades de uma fazenda fictícia de turbinas hidrocínéticas. Finalmente, o potencial de geração ao longo do ano de 2018 foi calculado para exemplificar o método.

Finalmente, como nota final deste capítulo, vale mencionar que no que tange a metodologia de determinação do potencial hidrocínético, vista de forma mais orgânica e ampla no contexto do Projeto Lambari, o papel da simulação 3D de escoamentos turbulentos é antes fornecer uma referência na escala do problema em foco para os métodos *quasi*-3D (capítulo 8) do que efetivamente ser a ferramenta de cálculo do potencial. Mas, para além da estimativa do potencial ou do estabelecimento de uma referência dedicada para métodos simplificados, a metodologia de simulação exemplificada neste estudo de caso pode também ser usada para a previsão de condições específicas, como a de máxima vazão do canal, e que possam ser do interesse de projetistas dedicados a instalar turbinas hidrocínéticas no rio.

Referências Bibliográficas

- [1] da Silveira Lorena, M. L. M. L. [1992]. *Meandering Compound Flow*, PhD thesis, University of Glasgow, United Kingdom.
- [2] Farshi, F., Kabiri-Samani, A., Chamani, M. and Atoof, H. [2018]. Evaluation of the secondary current parameter and depth-averaged velocity in curved compound open channels, *Journal of Hydraulic Engineering* **144**.
- [3] Jing, H., Li, C., Guo, Y. and Xu, W. [2011]. Numerical simulation of turbulent flows in trapezoidal meandering compound open channels, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **65**: 1071 – 1083.
- [4] Knight, D. and Sellin, R. [2007]. The serc flood channel facility, *Water and Environment Journal* **1**: 198 – 204.
- [5] Menter, F. [1994]. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal* **32**(8): 1598–1605.

Capítulo 8

Estudo de caso UHE Serra do Facão - Modelo Quasi-3D

Claudio J. C. Blanco, Cleidson Alves da Silva e Patrícia da Silva Holanda
Universidade Federal do Pará. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Nelio Moura Figueiredo
Universidade Federal do Pará. Departamento de Engenharia Naval.

Yves Secretan
Université du Quebec. INRS-ETE

8.1 Introdução

Quanto maior é a transformação de recursos naturais em bem duráveis, maior é a demanda por energia elétrica para a produção e o consumo desses bens. Logo, o que se observa é uma grande necessidade de geração de energia elétrica para o sustento do crescimento econômico mundial. Nesse contexto, o aproveitamento de vazões remanescentes a jusante de UHEs por centrais hidrocínéticas/parques hidrocínéticos torna-se interessante. Esse tipo de geração tem sido significativamente estudado nos

últimos anos. A tecnologia de centrais hidrocínéticas vem sendo explorada devido à conversão de energia apresentar baixo impacto ambiental, favorecendo, assim, um ganho na geração de energia elétrica, levando-se, ainda, em consideração, que a região já é impactada pelo empreendimento da própria UHE. Nesse contexto, a tecnologia está de acordo com Objetivo 7 para o desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) – “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos”.

Para o aproveitamento desse manancial energético, a modelagem hidrodinâmica fluvial é apresentada como ferramenta computacional para estimar os potenciais hidrocínéticos dessas áreas, visando à simulação de velocidades e profundidades para o dimensionamento das centrais e dos parques hidrocínéticos. No contexto do estudo da tecnologia que desponta, Khan et al. [8] realizaram um estudo das tecnologias de conversão de energia hidrocínética de eixo horizontal e vertical. Essas tecnologias têm sido utilizadas em rios com ou sem influência de maré.

Lago et al. [10] estudaram os recentes avanços e tendências no desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas, que utilizam a corrente natural (rios, estuários, marés, correntes oceânicas e canais). Duvoy e Toniolo [4] desenvolveram o CCHE2D, que é um modelo do tipo 2DH para estimar a energia hidrocínética em rios. O modelo foi desenvolvido pelo National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi (EUA) e tem como saída velocidades, que são utilizadas pelo Hydrokal (calculadora hidrocínética) para calcular a densidade de potência hidrocínética. Tal modelo foi aplicado ao rio Tanana próximo à Nenana, Alaska, EUA.

Punys et al. [11] avaliaram o potencial hidrocínético do rio Neris, Lituânia, que é um dos maiores rios do país. Os autores utilizaram o modelo 1DHEC-RAS para a simulação da vazão do rio. O modelo foi validado a partir de uma série histórica de dados de vazão, velocidade e área transversal, em três estações de calibração. Ramirez et al. [12] realizaram um estudo sobre o uso potencial de turbinas hidrocínéticas nos canais de vazão de grandes usinas hidrelétricas na Colômbia. Eles também utilizaram o modelo 1DHEC-RAS para a obtenção de dados de velocidade e profundidade em seções transversais dos canais. Os autores concluíram que o uso de turbinas hidrocínéticas nos canais de vazão de grandes usinas hidrelétricas nos estudos de caso apresentados não é recomendável em função da viabilidade financeira.

Gunawan et al. [6] analisaram o principal canal de irrigação de Roza, em Yakima, WA, EUA. No estudo, foram feitas medidas de batimetria, vazão e nível d'água em locais-chave do canal (transições, bifurcações, sifões, estruturas de medição de vazão, etc.). Os autores destacaram que os dados medidos podem ser usados de forma associada a modelos numéricos para apoiar as avaliações de locais mais propícios para implantações de centrais hidrocínéticas. Ladokun et al. [9] avaliaram o potencial e a viabilidade de aumentar a produção de energia hidrelétrica das três principais usinas da Nigéria, instalando turbinas hidrocínéticas nas saídas dos tubos de sucção e dos canais de fuga das barragens. Os resultados preliminares mostraram que existe potencial em cada usina hidrelétrica para aumentar a geração de energia existente.

Guerra e Thomson [5] estudaram experimentalmente uma turbina hidrocínética em escala real no Rio Kvichak, Alaska, EUA. Na região de instalação da turbina, o rio tem aproximadamente 5 m de profundidade, 150 m largura e velocidade máxima no centro de 2,5 m/s. Os experimentos resultaram em um conjunto de dados, que pode servir para validação de modelos numéricos. Esses dados também podem ajudar projetistas e tomadores de decisão sobre impactos ambientais de centrais hidrocínéticas.

Tigabu et al. [15] avaliaram o potencial hidrocínético usando simulações numéricas com parâmetros hidráulicos e geométricos obtidos a partir de dados históricos e visitas de campo. O modelo desenvolvido foi validado com medições nos rios Gumara e Gilgel-Abay da Bacia do Alto Nilo Azul e no canal de irrigação Koga na Etiópia. O modelo desenvolvido apresenta concordância com as medições nos rios Gumara e Gilgel-Abay e as do canal de irrigação Koga. Nesse caso, a região analisada do rio Gumara é adequada para turbinas hidrocínéticas com potência de $1,4 \text{ kW/m}^2$; a região analisada do rio Gilgel Abay tem capacidade de $3,4 \text{ kW/m}^2$; já a região analisada do rio Bahirdar-Abay tem capacidade de $2,6 \text{ kW/m}^2$; finalmente, 100% do canal de irrigação Koga apresenta um potencial de $4,3 \text{ kW/m}^2$.

Ridgill et al. [13] analisaram o recurso hidrocínético fluvial global, usando um conjunto de dados de vazão diária de 35 anos e representação vetorizada de rios, com cobertura quase global e resolução espaço-temporal adequada, determinando a produção de energia média anual de 2,94 milhões de trechos de rios. Nesse caso, a energia global média (excluindo a Groelândia) é estimada em $58.400 \pm 109 \text{ TWh/ano}$. China, Rússia e Brasil são os países com maior potencial. Butão, Nepal

e Tajiquistão também mostram grande potencial.

No Brasil, tem-se, como exemplo, os trabalhos de Bittencourt et al. [3]; e Holanda et al. [2], que avaliaram o potencial hidrocínético de duas UHEs instaladas na bacia hidrográfica do rio Tietê. O trabalho de Holanda et al. [2] também avaliou o potencial hidrocínético do reservatório de jusante da UHE de Tucuruí. Nos trabalhos desenvolvidos no Brasil, o modelo Saint-Venant (2DH) vem sendo utilizado com a finalidade de simular velocidades e profundidades em função do espaço e do tempo. Entretanto, um modelo 2DH não é suficiente para determinar perfis verticais de velocidade e profundidade necessários à determinação de velocidades e diâmetros de projetos para equipar as turbinas hidrocínéticas. Modelos 3D seriam os mais indicados, mas precisam de mais infraestrutura, consumindo mais tempo computacional e de pessoal e aumentando custos. Assim, foi desenvolvido um modelo Quasi-3D para definição das regiões mais favoráveis para implantação de parques hidrocínéticos com estimativas de geração de energia remanescente das vazões turbinadas e vertidas de UHEs, tendo como estudo de caso o reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no Estado de Goiás.

8.2 Área de Estudo

Trata-se do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão (Figura 8.1). A UHE está localizada no rio São Marcos, no Estado de Goiás, encontrando-se a 58 km da cidade de Catalão e a 27 km da cidade de Davinópolis (Figura 8.1-a). As coordenadas geográficas são: Latitude 18° 04' Sul e Longitude 47° 40' Oeste (SEFAC 2020). A construção da UHE Serra do Facão (Figura 8.1) iniciou-se em meados de fevereiro de 2007, sua implantação ocorreu em outubro de 2010. A usina possui uma potência instalada de 212,6 MW com turbinas do tipo Francis com potência de 106,3 MW cada, o diâmetro do rotor é de 4.160 mm, rotação 171,4 rpm, quantidade de pás do rotor igual a 13 e quantidade de pás do distribuidor igual a 24. A potência instalada é de 178,8 MW médios, os quais são suficientes para suprir a demanda energética de uma cidade com aproximadamente 1,2 milhão de habitantes (FURNAS 2020). Na Figura 8.1, são mostrados a UHE Serra do Facão sua barragem e os reservatórios de montante e jusante.

O reservatório da UHE tem uma área de 218,84 km² e banha terras dos municípios de Catalão, com 72,8%; Campo Alegre de Goiás, com 22,4%; Cristalina, com

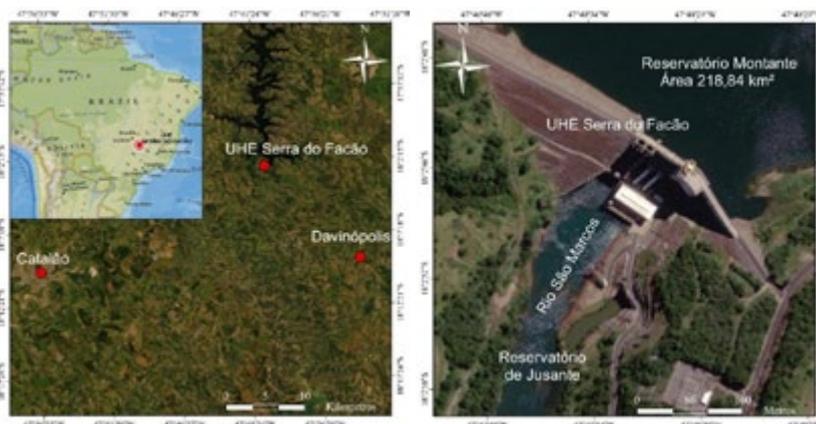


Figura 8.1: localização da UHE Serra do Facão, reservatórios, barragens e rio São Marcos.

0,6%; Davinópolis, com 0,4% e Ipameri, com 0,1%, no Estado de Goiás, e Paracatu com 3,7%, no Estado de Minas Gerais (SEFAC [14]).

8.2.1 Dados de Batimetria

Na Figura 8.2, é mostrada a trajetória para medição no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão, do perfilamento acústico por ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*. As linhas pontilhadas referem-se aos pontos de medição de profundidades realizada com ADCP. Esses dados foram registrados durante trabalhos de campo e visita de equipe do projeto Lambari à UHE Serra do Facão em fevereiro de 2021. Os dados referentes às margens do reservatório foram estimados a partir de imagens de satélite.

Os dados de batimetria foram importados para a plataforma H2D2, através da qual isolinhas de cotas topográficas foram geradas (Figura 8.3). Na mesma plataforma, esses dados de batimetria são interpolados na malha de elementos finitos triangulares, dando origem ao Modelo de Elevação do Terreno (MET).



Figura 8.2: Trajetória de medição de batimetria por ADCP embarcado

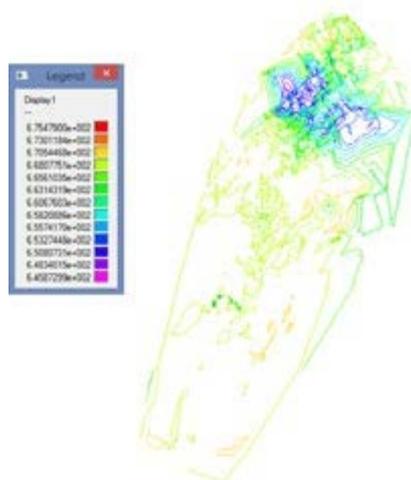


Figura 8.3: isolinhas de cotas topográficas projetadas na plataforma H2D2.



Figura 8.4: estação Fluviométrica a jusante da UHE Serra do Facão usada como referência para definição dos níveis de jusante do domínio de simulação.

8.2.2 Condições de Contorno

As condições de contorno foram definidas como Nível-Nível, os níveis de montante e vazões turbinadas e vertidas foram fornecidos pelo pessoal da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021. Os níveis de jusante foram reduzidos de 0,3-0,7 m em relação à fronteira de montante, tendo como parâmetro de referência a vazão simulada comparada à vazão medida na estação fluviométrica. Esse desnível foi considerado devido à estação fluviométrica ficar a aproximadamente 2 km da barragem (Figura 8.4).

8.3 Resultados

8.3.1 Calibração do Modelo 2DH e Estudo de Malha

Para determinação da rugosidade equivalente de fundo do trecho analisado do rio São Marcos, seria necessário ter dados de granulometria dos materiais, que formam

o leito do rio. Entretanto, pela falta desses dados, o coeficiente de Manning, n , foi usado como parâmetro de calibração. Assim, tal coeficiente foi variado até se atingir uma boa correlação entre as vazões observadas e simuladas; e o modelo foi calibrado comparando-se as vazões observadas e simuladas (Figura 8.5) no período de 05/2012 a 02/2021. O coeficiente de Manning resultante foi igual a 0,05. Com a determinação do coeficiente de Manning, foi realizado um estudo de malha; a primeira com vértice maior dos elementos finitos triangulares igual a 3 m; e a segunda com vértice maior igual a 5 m (Figura 8.6). A malha de 5 m apresentou um resultado próximo ao da malha de 3 m, mas com um tempo computacional menor, sendo selecionada para todas as simulações.

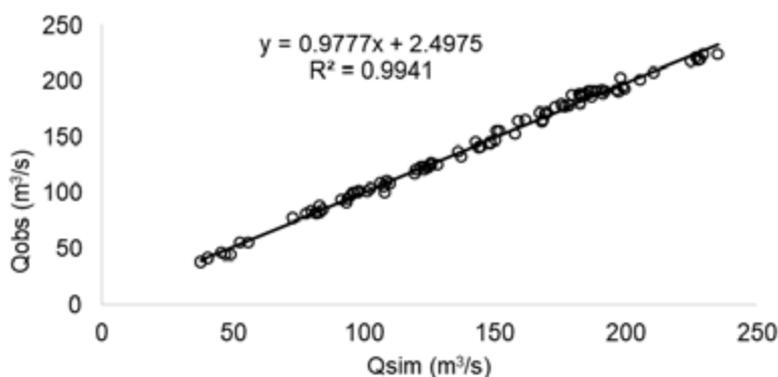


Figura 8.5: correlação entre as vazões observadas e simuladas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

Analisando-se a Figura 8.5, observa-se um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas, com R^2 igual a 0,9941. Sendo o coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1,0, um indicador de precisão da modelagem, que é comumente usado em hidráulica e hidrologia (GUPA et al. [7]; VIS et al. [16]).

8.3.2 Modelo de Elevação do Terreno

Na Figura 8.7, são apresentadas as isosuperfícies de cotas topobatimétricas do modelo de elevação do terreno interpoladas via método dos elementos finitos e projetadas na malha da Figura 8.6. Observa-se que o modelo representou bem o

terreno, pois se percebe a sutil formação do canal do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

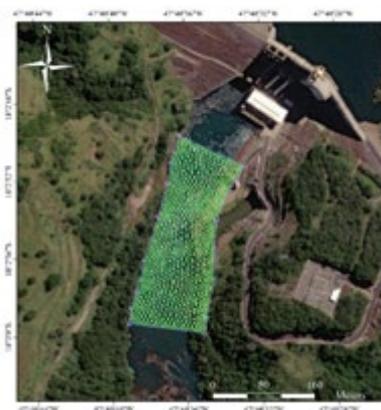


Figura 8.6: malha hidrodinâmica em elementos finitos triangulares com refinamento de 5 m, 1943 elementos e 4058 nós.

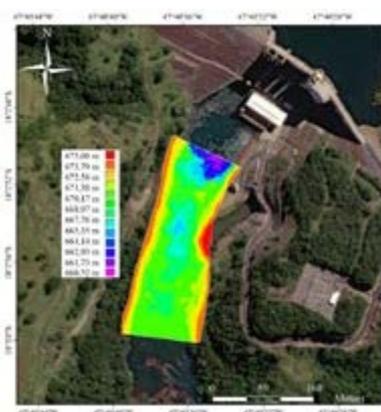


Figura 8.7: modelo de Elevação do Terreno do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

8.3.3 Simulações 2D de velocidades e profundidades

Buscando-se avaliar a variação de velocidades e profundidades em função das vazões regularizadas pela UHE Serra do Facão, utilizaram-se simulações de velocidades e profundidades para a vazão máxima ($Q_{\max} = 224,0 \text{ m}^3/\text{s}$), média ($Q_{\text{med}} = 145,0 \text{ m}^3/\text{s}$) e mínima ($Q_{\text{men}} = 38,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Essas vazões foram determinadas através dos dados observados no período de 5/2012 a 2/2021. Esses dados foram fornecidos pelo pessoal da UHE Serra do Facão e são compostos das vazões e seus respectivos níveis de água (NA). Na Figura 4.4, são apresentadas, respectivamente, as isosuperfícies de velocidade e profundidade para a vazão máxima (Figura 8.8 a-b), média (Figura 8.8 c-d) e mínima (Figura 8.8 e-f), que foram simuladas com a malha da Figura 8.6.

Analisando-se a Figura 8.8, observa-se que as velocidades máximas mais ao norte do reservatório, variam de 1,601 m/s (Figura 8.8-a) a 1,106 m/s (Figura 8.8-c). No caso da simulação de velocidades para a vazão mínima (Figura 8.8-e), a velocidade máxima de 2,656 m/s não foi considerada devido a essa velocidade ocorrer ao final do domínio de solução. Para uma melhor análise dessa região, é necessário expandir a fronteira do domínio para confirmação dessa região, como sendo região de velocidades máximas. Já as profundidades máximas variaram entre 11,63 m e 9,89 m. A análise de velocidades e profundidades máximas é importante, pois a potência e, conseqüentemente, a energia gerada por turbinas hidrocínéticas são favorecidas por maiores velocidades e maiores profundidades, proporcionando a seleção de turbinas com maiores velocidades e diâmetros de projeto.

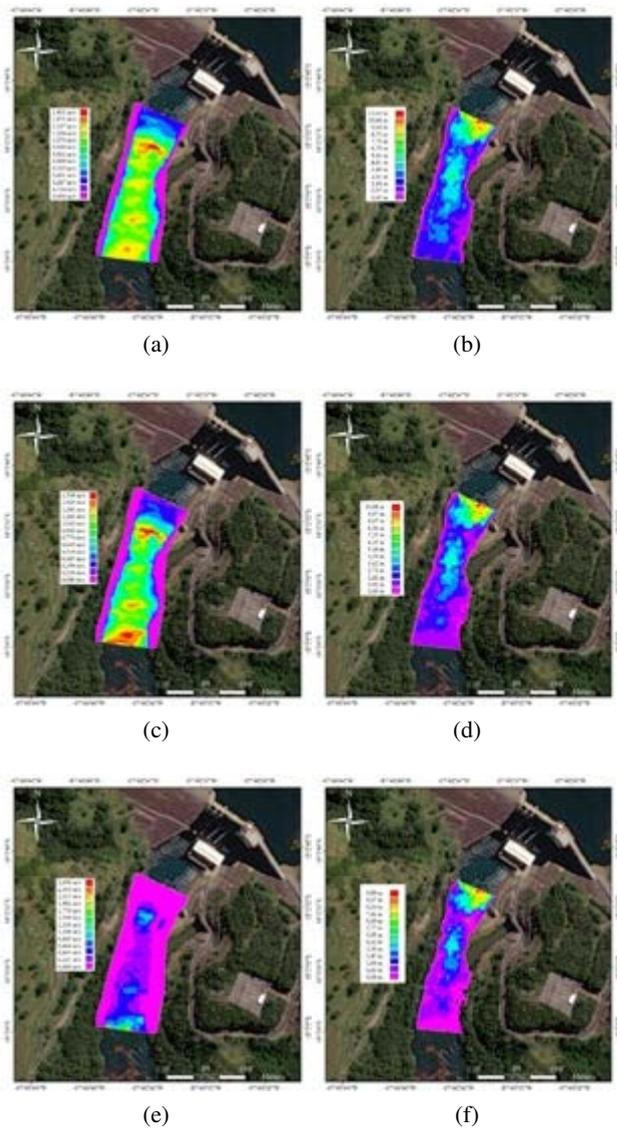


Figura 8.8: isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima, média e mínima observadas no período de 5/2012 a 2/2021 no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

8.3.4 Determinação de Densidade de Potência Hidrocinética e Velocidade de Projeto

Na Figura 8.9, são indicadas três regiões (seções 1, 2 e 3), para as quais foram determinadas a densidade de potência hidrocinética e velocidade de projeto, visando à implantação de parques hidrocinéticos. Apenas para ilustrar, as regiões, foram utilizadas as isosuperfícies de velocidade referentes à simulação do dia 3/2/2021 com as seguintes condições de contorno: NA-montante = 670,60 m e NA-jusante = 671,05 m, e $Q = 91,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

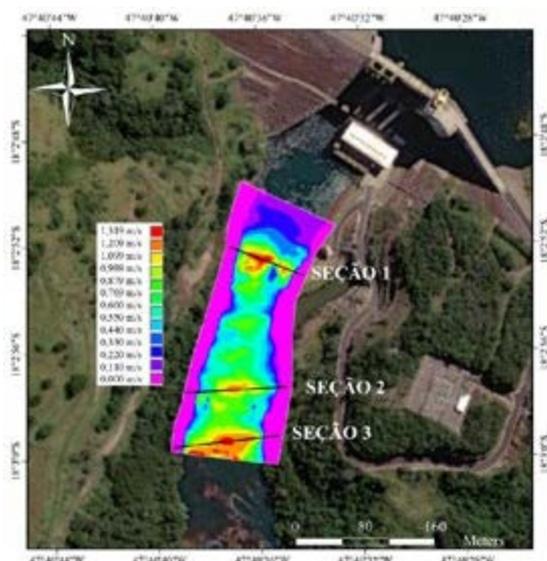


Figura 8.9: seções para determinação de densidade de potência hidrocinética e velocidade de projeto para análise de potencial energético no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Seção 1

Na Figura 8.10, são apresentadas as vazões observadas e as velocidades máximas simuladas para a seção 1 (Figura 8.9) no período de 5/2012 a 2/2021. Nesse caso, é observada que a dispersão das vazões é maior que a dispersão das velocidades. No primeiro caso, as vazões variam de 38 a 224 m^3/s e as velocidades variam de 0,830 m/s a 1,762 m/s. A dispersão das vazões é a mesma para as 3 seções analisadas. Entretanto, observa-se que a maioria das velocidades encontra-se acima de 1,0 m/s. Assim, pela maior ocorrência de velocidades no intervalo de 1,0 m/s a 1,762 m/s, a velocidade de projeto para as turbinas hidrocinéticas deve ser encontrada entre esses valores. A densidade de potência hidrocinética foi determinada tomando-se as velocidades máximas simuladas para a região da seção 1. Na Figura 8.11, são mostradas as frequências de ocorrência das velocidades simuladas da seção 1 (Figura 8.9).

Analisando-se a Figura 8.11, observa-se que a velocidade máxima de 1,3 m/s possui uma frequência de ocorrência igual a 26%. Com as frequências de ocorrência de velocidade da Figura 8.11, pode-se determinar a densidade de potência hidrocinética (D_{ph}). Na Figura 8.12, essa densidade é apresentada.

Na Figura 8.12, observa-se um pico de densidade de potência com velocidade igual a 1,4 m/s. Essa velocidade é elegível para projeto, pois maximiza a potência e, em consequência, a energia gerada por centrais hidrocinéticas na região analisada. A análise da Figura 8.12 é importante para comparações de locais para implantações de centrais hidrocinéticas, pois os maiores picos de densidade de potência são caracterizados por maiores velocidades, que devem ser utilizadas como velocidades de projetos.

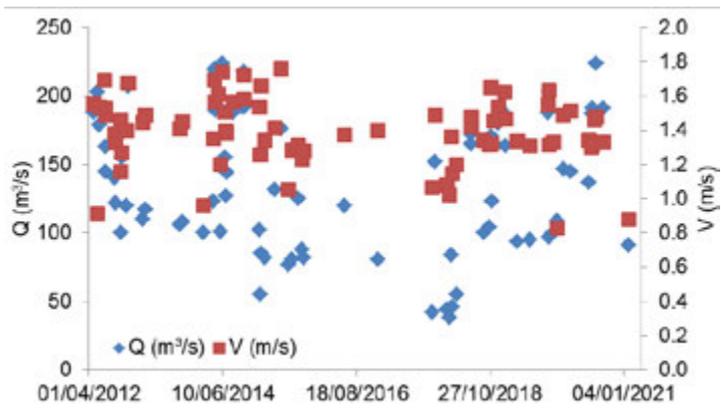


Figura 8.10: vazões observadas e velocidades máximas simuladas da seção 1 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão para o período de 5/2012 a 2/2021.

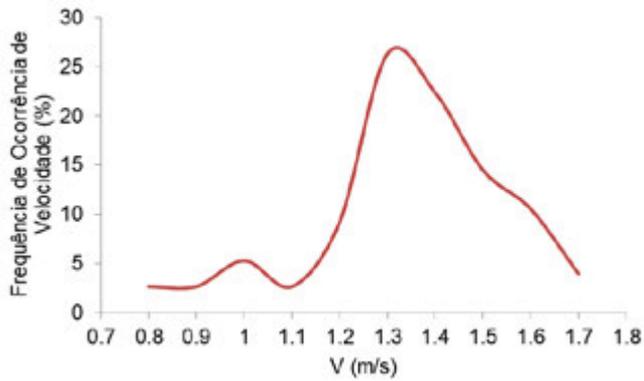


Figura 8.11: frequência de ocorrência de velocidades máximas simuladas para a seção 1 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

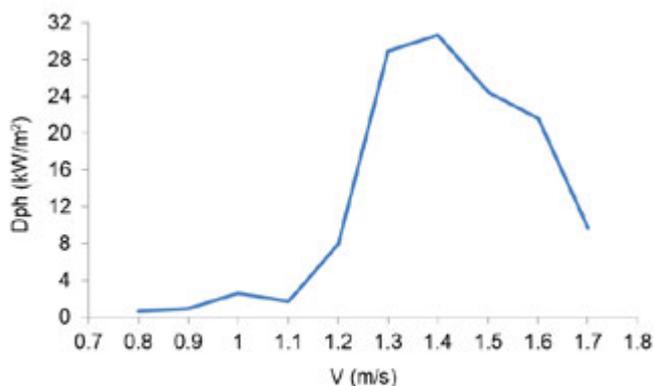


Figura 8.12: densidade de potência hidrocínética para a seção 1 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Seção 2

Na Figura 8.13, são apresentadas as vazões observadas e as velocidades máximas simuladas para a seção 2 (Figura 8.9) no período de 5/2012 a 2/2021. Nesse caso, as velocidades variam de 0,830 m/s a 1,936 m/s. Entretanto, observa-se, também, que a maioria das velocidades encontra-se acima de 1,0 m/s. Assim, pela maior ocorrência de velocidades no intervalo de 1,0 m/s a 1,936 m/s, a velocidade de projeto para as turbinas hidrocínéticas deve ser encontrada entre esses valores.

A densidade de potência hidrocínética foi determinada, tomando-se as velocidades máximas simuladas para a seção 2. Na Figura 8.14, são mostradas as frequências de ocorrência das velocidades simuladas da seção 2 (Figura 8.9).

Analisando-se a Figura 8.14, observa-se que a velocidade máxima de 1,7 m/s possui uma frequência de ocorrência igual a 25%. Com as frequências de ocorrência de velocidade da Figura 8.14, pode-se determinar a densidade de potência hidrocínética (D_{ph}). Na Figura 8.15, essa densidade é apresentada. Na Figura 8.15, observa-se um pico de densidade de potência com velocidade igual a 1,7 m/s. Essa velocidade é elegível para projeto, pois maximiza a potência e, em consequência, a energia gerada por centrais hidrocínéticas na região analisada. A análise da Figura 8.15 é importante para comparações de locais para implantações de centrais

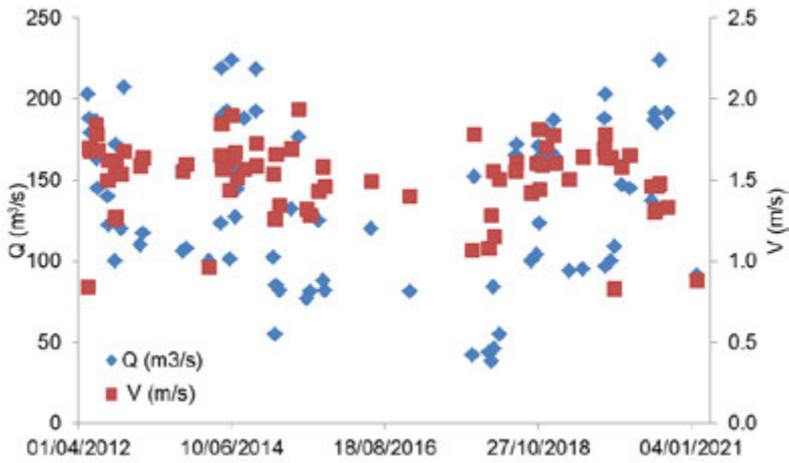


Figura 8.13: densidade de potência hidrocínica para a seção 1 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

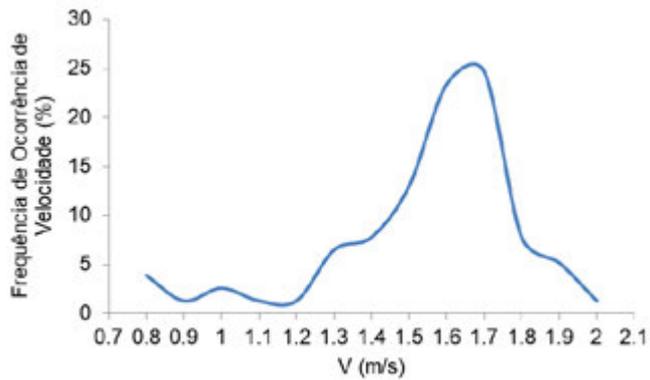


Figura 8.14: frequência de ocorrência de velocidades máximas simuladas para a seção 2 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

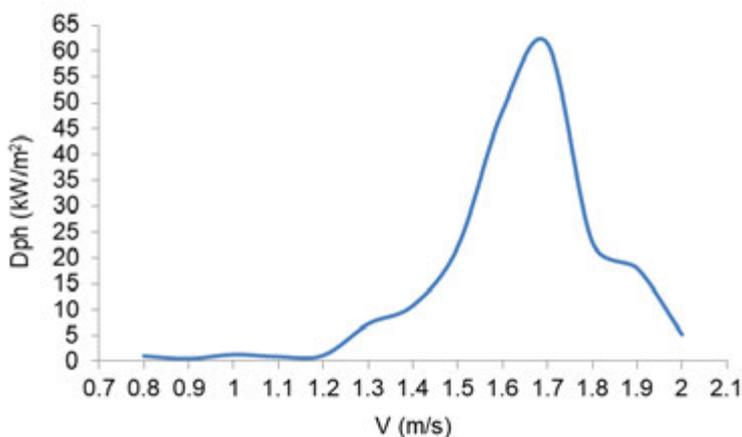


Figura 8.15: densidade de potência hidrocínética para a seção 2 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

hidrocínéticas, pois os maiores picos de densidade de potência são caracterizados por maiores velocidades, que devem ser utilizadas como velocidades de projetos.

Seção 3

Na Figura 8.16, são apresentadas as vazões observadas e as velocidades máximas simuladas para a seção 3 (Figura 8.9) no período de 5/2012 a 2/2021. Nesse caso, as velocidades variam de 0,760 m/s a 1,936 m/s. Entretanto, observa-se também que a maioria das velocidades encontra-se acima de 1,0 m/s. Assim, pela maior ocorrência de velocidades no intervalo de 1,0 m/s a 1,936 m/s, a velocidade de projeto para as turbinas hidrocínéticas deve ser encontrada entre esses valores. A densidade de potência hidrocínética foi determinada tomando-se as velocidades máximas simuladas para a seção 3. Na Figura 8.17, são mostradas as frequências de ocorrência das velocidades simuladas da seção 3 (Figura 8.9). Analisando-se a Figura 8.17, observa-se que a velocidade máxima de 1,5 m/s possui uma frequência de ocorrência igual a 32%. Com as frequências de ocorrência de velocidade da Figura 8.17, pode-se determinar a densidade de potência hidrocínética (D_{ph}). Na Figura 8.18, essa densidade é apresentada.

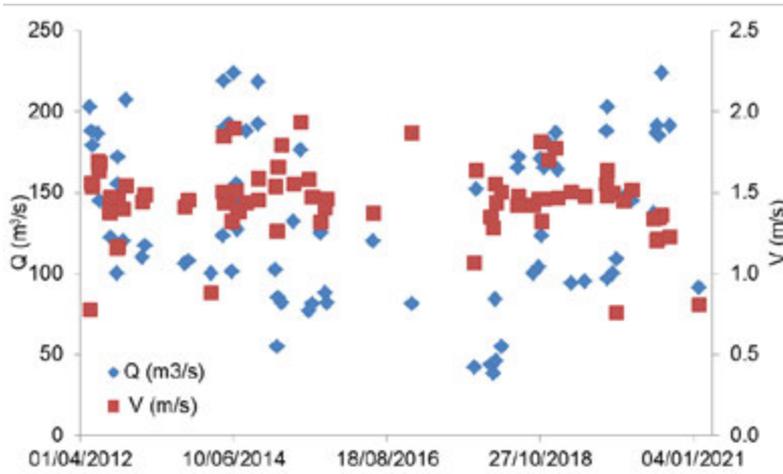


Figura 8.16: vazões observadas e velocidades máximas mensais simuladas da seção 3 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão para o período de 5/2012 a 2/2021.

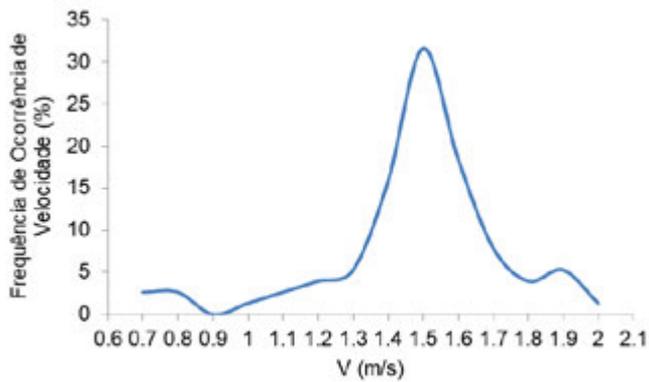


Figura 8.17: frequência de ocorrência de velocidades máximas simuladas para a região da seção 3 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

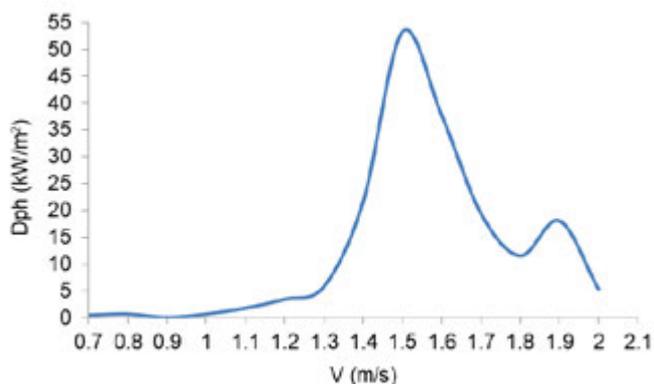


Figura 8.18: densidade de potência hidrocínética para a região da seção 3 do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Na Figura 8.18, observam-se dois picos de densidade de potência com velocidades iguais a 1,5 m/s e 1,9 m/s. Por sua maior densidade, a primeira é elegível para projeto, pois maximiza a potência e, em consequência, a energia gerada por centrais hidrocínéticas na região analisada. A análise das Figuras 8.12, 8.15 e 8.18 revelaram velocidades de projeto de centrais hidrocínéticas. Entretanto, visando à implantação de um parque dessa tecnologia, é necessário simular os perfis verticais de velocidades através do modelo Quasi-3D. Nesse caso, foi incluída uma análise de variação de vazão, seguindo a curva de permanência das vazões turbinadas e vertidas para estabelecer qual proposta de parque hidrocínético proposto geraria mais energia e por mais tempo.

8.3.5 Modelo Quasi-3D

Validação

Antes de se aplicar o modelo Quasi-3D às seções analisadas (Figura 8.19-a), foi elaborada sua validação através da comparação de seus resultados de velocidade e profundidade relativos a dados medidos via ADCP pela equipe do projeto Lambari em 3/2/2021. Na Figura 8.19, são apresentados os perfis de velocidade e profundidade, medidos via ADCP (Figura 8.19-b) e simulados via modelo Quasi-3D (Figura

8.19-c), além das seções do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão. As velocidades de entrada do modelo Quasi-3D, as quais são saídas do modelo 2DH, foram simuladas com as seguintes condições de contorno: NA-montante = 670,60 m e NA-jusante = 671,05 m, e $Q = 91 \text{ m}^3/\text{s}$. Esses dados também serviram de referência para os dados medidos supramencionados. A validação foi avaliada em relação à seção 1.

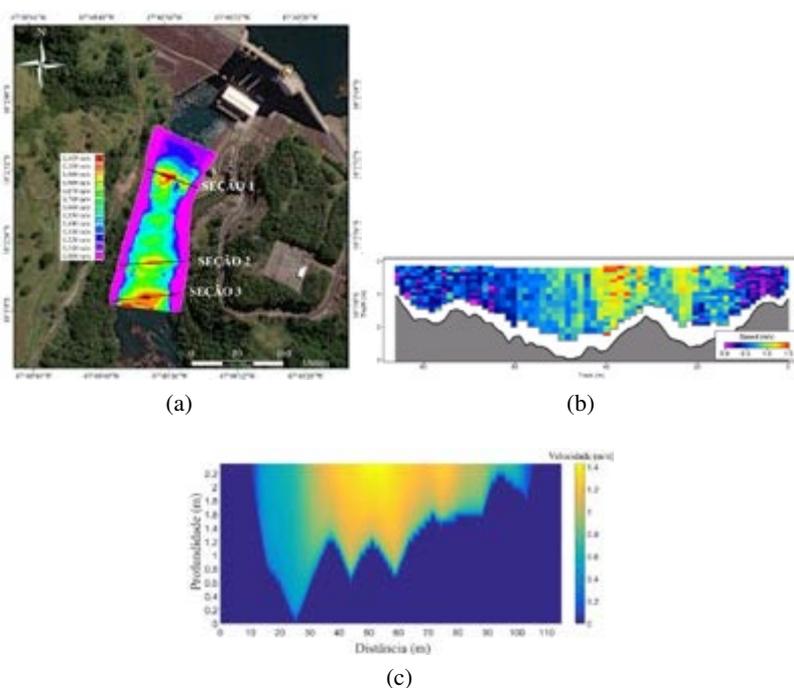


Figura 8.19: seções analisadas (a), perfis de velocidade e profundidade medidos via ADCP (b) e simulados via modelo Quasi-3D (c).

Analisando-se a Figura 8.19, observa-se uma diferença de 0,1 m/s entre as velocidades máximas medidas e simuladas, significando um erro relativo percentual de 6,67%. Esse erro valida o modelo Quasi-3D como uma alternativa em relação a medidas experimentais, as quais necessitam de mobilização de pessoal para ir a campo, tendo um custo significativo. Observação importante é que a velocidade

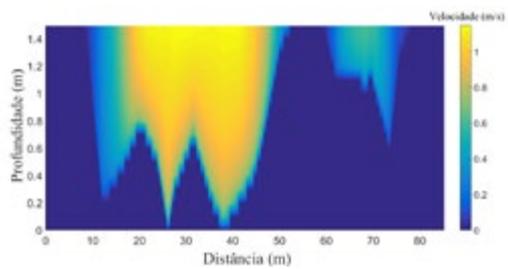
máxima experimental (1,5 m/s) é muito próxima à velocidade de projeto (1,4 m/s), validando também o método para determinação de velocidade de projeto via determinação da densidade de potência hidrocínética. Em relação às profundidades máximas, observa-se que as mesmas são ligeiramente superiores a 2,0 m. Entretanto, na região de maiores velocidades, mais interessante para o aproveitamento hidrocínético, as profundidades não ultrapassam 1,4 m. É importante ressaltar que a vazão de $91,0 \text{ m}^3/\text{s}$ está mais próxima à vazão mínima do que à vazão máxima de $224,0 \text{ m}^3/\text{s}$, as quais são oriundas dos dados fornecidos pela Sefac. Nesse caso, a vazão mínima é igual a $38,0 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, situação menos favorável para a produção de energia hidrocínética, mas que garante produção ao longo de todo o ano.

8.3.6 Aplicação do Modelo Quasi-3D nas seções analisadas

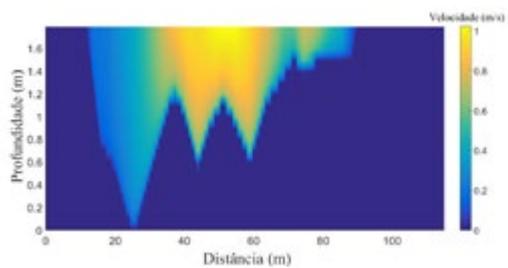
Na Figura 8.20, são mostradas simulações de velocidade e profundidade para as três seções analisadas, via Modelo Quasi-3D, na situação menos favorável para a produção hidrocínética, ou seja, com a vazão mínima de $38 \text{ m}^3/\text{s}$ e NA de montante = 670,42 m e NA de jusante = 669,77 m.

Analisando-se a Figura 4.16, observa-se que, para a vazão mínima da UHE Serra do Facão, há uma redução considerável das velocidades em relação às velocidades de projeto apresentadas nas Figuras 8.15 e 8.18. Redução considerável nas profundidades disponíveis também é observada. Nesse caso, haveria menor geração de energia hidrocínética, se o dimensionamento das turbinas considerasse a vazão mínima, mesmo gerando por mais tempo. Assim, a curva de permanência de vazões observadas a jusante da UHE Serra do Facão, a qual é representada a seguir (Figura 8.21), foi analisada.

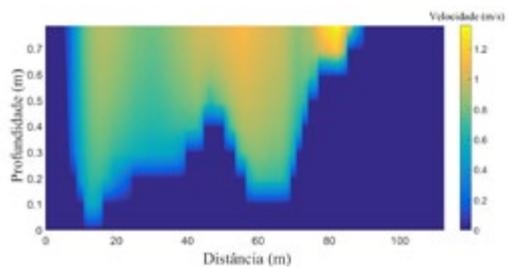
Nesse caso, observa-se uma queda abrupta dos valores de vazão a partir de $Q_{90\%}$. Essa queda pode ter sido causada por valores de vazão atípicos na operação da usina. Então, a vazão $Q_{90\%}$ ($81,0 \text{ m}^3/\text{s}$) foi tomada como vazão mínima para balizar as velocidades de projeto e profundidades disponíveis para implantação das turbinas hidrocínéticas. As simulações para vazão igual a $81,0 \text{ m}^3/\text{s}$ com NA de montante = 671,10 m e NA de jusante = 670,87 m são mostradas na Figura 8.22 para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão. Analisando-se a Figura 8.22, observa-se que as velocidades não ultrapassam 1,2 m/s, a qual se encontra na seção 1 e as profundidades, em todas as seções, são superiores a 1,0 m. Comparando-se esses resultados com os resultados da Figura 8.23, simulados com



(a) Seção 1



(b) Seção 2



(c) Seção 3

Figura 8.20: simulações de velocidade e profundidade para as três seções analisadas via Modelo Quasi-3D para vazão mínima.

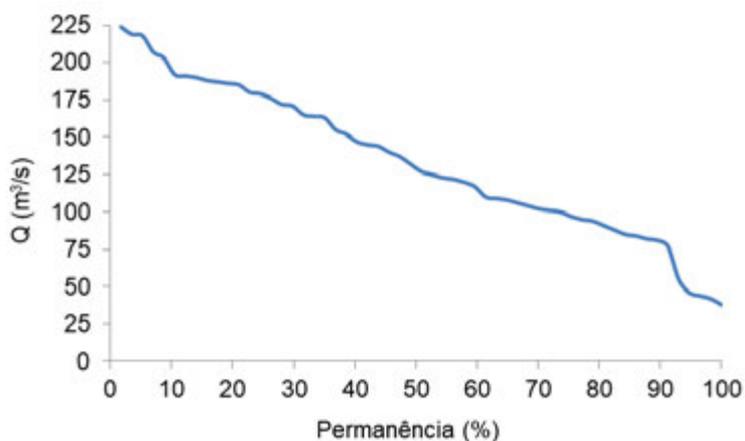
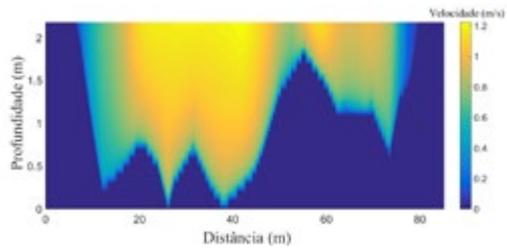


Figura 8.21: curva de permanência de vazões do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

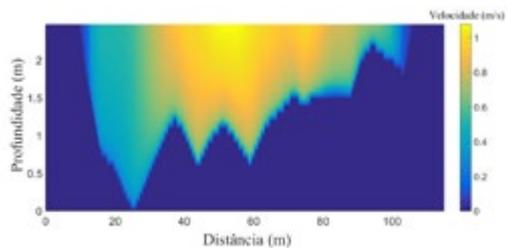
uma vazão igual a 91,0 m³/s, observa-se uma redução nas velocidades, afastando-se das velocidades de projeto determinadas. Entretanto, considerando-se a curva de permanência corrigida (Figura 8.24), na qual os valores atípicos de vazão foram retirados da amostra, a vazão de 91 m³/s possui uma permanência de 88,46 %, garantindo uma produção hidrocinética por mais tempo, aproximando-se mais das velocidades de projetos determinadas e com maiores profundidades, permitindo o dimensionamento de turbinas com maiores diâmetros, gerando mais energia.

8.3.7 Proposta de Parques Hidrocinéticos e Energia Gerada nas três seções analisadas

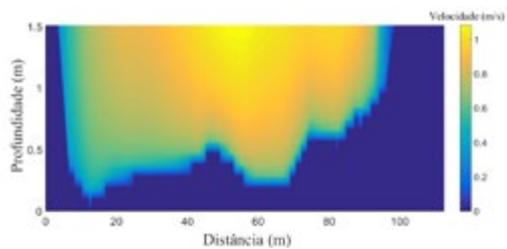
Com base nos perfis de velocidade em função da profundidade (Figura 8.23), podem ser selecionadas regiões de maiores velocidades e profundidades para o arranjo de parques hidrocinéticos (Figura 8.25). Para a seção 1, pode-se considerar uma turbina com diâmetro de 0,8 m, posicionando-a verticalmente, deixando-se 0,1 m de escoamento livre acima e abaixo dessa turbina (Figura 8.25-a). Em relação à largura, foram considerados 20 m (40 m – 60 m), onde podem ser instaladas até 11 turbinas, considerando-se um distanciamento de 1,36D, resultando em uma



(a) Seção 1

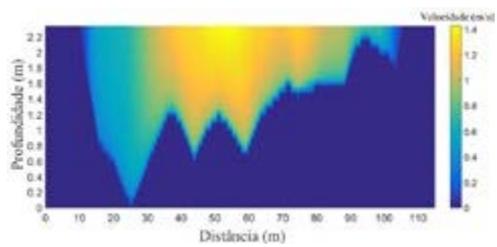


(b) Seção 2

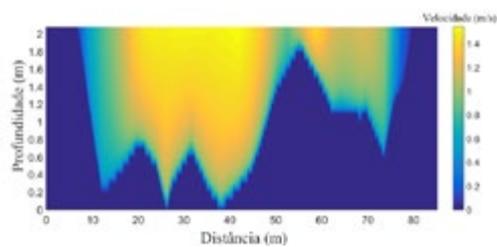


(c) Seção 3

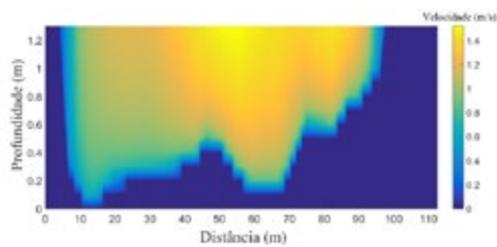
Figura 8.22: simulações de velocidade para vazão igual a $81,0 \text{ m}^3/\text{s}$ com NA de montante = 671,10 m e NA de jusante = 670,87 para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.



(a) Seção 1



(b) Seção 2



(c) Seção 3

Figura 8.23: simulações de velocidade para vazão igual a $91,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

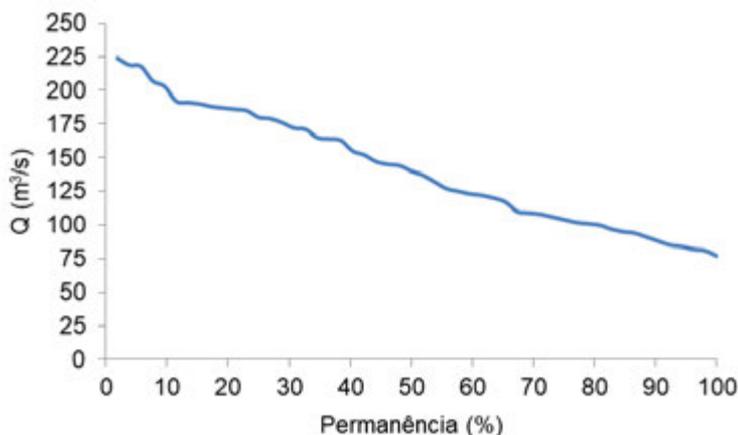


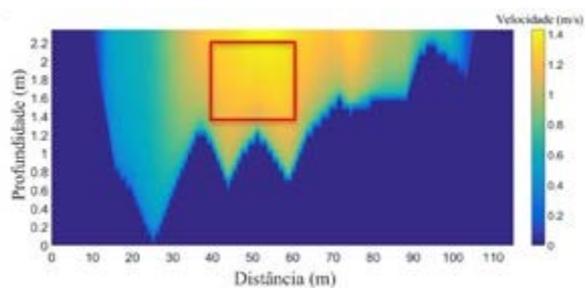
Figura 8.24: curva de permanência de vazões corrigida do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão no período de 5/2012 a 2/2021.

distância lateral de 1,09 m entre cada turbina. Com esse distanciamento, para Brasil Junior et al., 2016, o C_p é igual 0,418. Para a seção 2, (Figura 8.25-b), também é considerada uma turbina com diâmetro de 0,8 m e uma largura de 30 m (20 m – 50 m), onde podem ser instaladas até 16 turbinas, conforme o distanciamento considerado. Para a seção 3 (Figura 8.25-c), pode-se considerar uma turbina de 0,5 m de diâmetro e uma largura 40 m (40 m – 80 m), onde podem ser instaladas até 34 turbinas, conforme o distanciamento já mencionado.

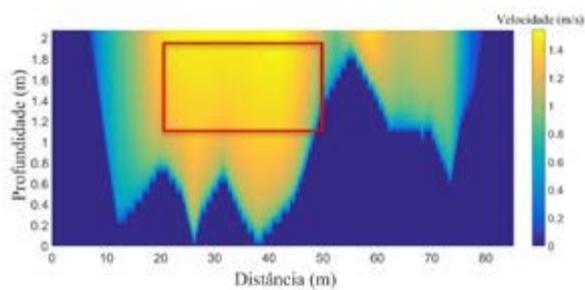
Na Tabela 8.1, são apresentados velocidades e diâmetros de projeto (V_p e D_p), potências instaladas e E_{ag} – energia anual gerada, multiplicando-se o resultado de P_i pelo tempo de operação das turbinas, conforme a permanência das vazões. As permanências das velocidades são asseguradas, pois as velocidades aumentam em função das vazões, através de curvas de potência para cada seção analisada (Figura 8.26).

Analisando-se a Tabela 8.1, a E_{ag} total produzida pelo parque hidrocínético, contando com 61 turbinas, é estimada em 105,2 MWh/ano.

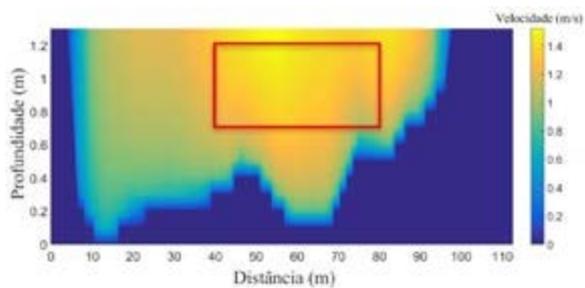
As curvas mostradas na Figura 8.26, além de assegurar que as velocidades crescem com as vazões em correlações e curvas de potência com R^2 acima de



(a) Seção 1



(b) Seção 2



(c) Seção 3

Figura 8.25: perfis de velocidade simulados com vazão de $Q_{88,46\%} = 91,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

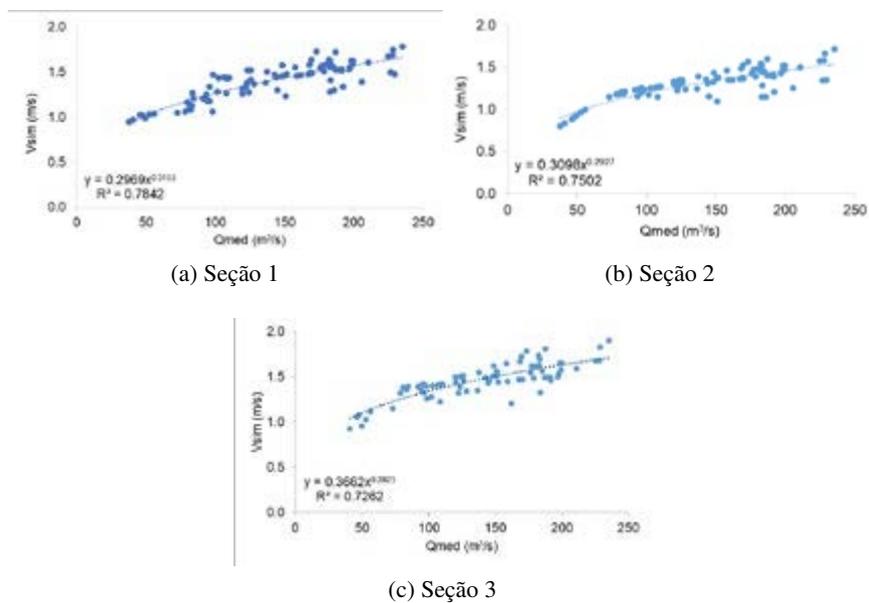


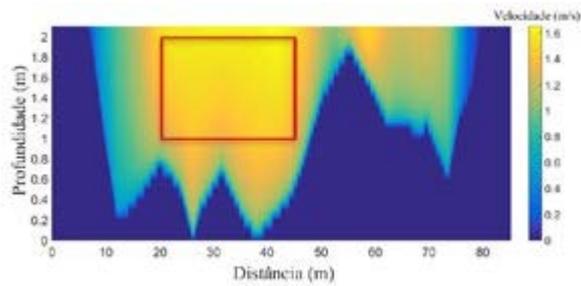
Figura 8.26: regressão em curvas de potência estabelecidas entre velocidades máximas simuladas e vazões medidas das três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Tabela 8.1: velocidades e diâmetros de projeto, potência instalada e energia gerada para uma turbina e o número máximo de turbinas que podem ser instaladas em cada seção analisada.

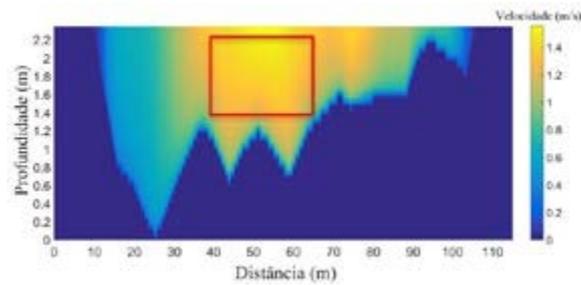
Seção	Vp (m/s)	Dp (m)	Pi (kW)		Eag (MWh/ano)		
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	
1	1,4	0,8	1	11	1	11	
			0,288	3,168	2,232	24,55	
			N.º de Turbinas		N.º de Turbinas		
2	1,5		1	16	1	16	
			0,355	5,680	2,751	44,02	
			N.º de Turbinas		N.º de Turbinas		
3		1,5	1	34	1	34	
			0,139	4,726	1,077	36,62	
			N.º de Turbinas		N.º de Turbinas		
Total			0,782	13,574	6,059	105,2	

0,7, podem ser usadas para determinação de velocidades máximas das seções analisadas em função apenas das vazões medidas, as quais são controladas pela UHE serra do Facão. Seguindo a curva de permanência corrigida (Figura 8.24), outras vazões foram analisadas para aplicação do modelo Quasi-3D, $Q_{75\%} = 104,0$ m³/s e $Q_{50\%} = 140,0$ m³/s. Essas vazões devem aumentar as velocidades de projeto e profundidades para seleção de turbinas com maiores diâmetros, podendo aumentar a geração de energia, mas deve se levar em consideração, também, a redução do tempo de operação, diminuindo essa mesma geração. A Figura 8.27 apresenta os perfis de velocidade das três seções analisadas, em função da profundidade, simulados para a vazão $Q_{75\%}$ com NA de montante = 671,09 m e NA de jusante = 670,54 m. Para a seção 1 (Figura 8.27-a), pode-se considerar uma turbina com diâmetro de 1,0 m. Em relação à largura, foram considerados 25 m (20 m – 45 m), onde podem ser instaladas até 11 turbinas, considerando-se um distanciamento de 1,36D, resultando em uma distância lateral de 1,36 m entre cada turbina, com Cp igual al 0,418 (Brasil Junior et al. 2016). Para a seção 2 (Figura 8.27-b), foi considerada uma turbina com diâmetro de 0,8 m e uma largura de 25 m (40 m – 65 m), onde podem ser instaladas até 14 turbinas, conforme o distanciamento considerado. Para a seção 3 (Figura 8.27-c), pode-se considerar uma turbina de 0,6

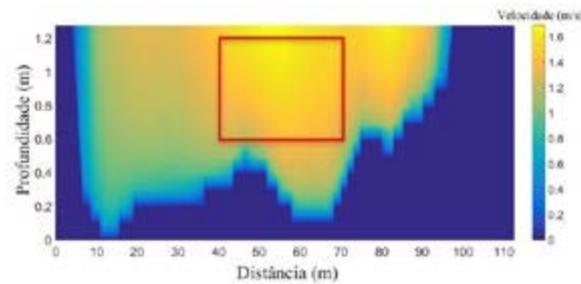
m de diâmetro e uma largura de 30 m (40 m – 70 m), onde podem ser instaladas até 21 turbinas, conforme o distanciamento já mencionado.



(a) Seção 1



(b) Seção 2



(c) Seção 3

Figura 8.27: perfis de velocidade simulados com vazão igual a $104,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Na Tabela 8.2, são apresentados V_p , D_p , P_i e E_{ag} para uma e o número máximo de turbinas, em função das seções analisadas e conforme a permanência das vazões, nesse caso, 75%.

Tabela 8.2: velocidades e diâmetros de projeto, potência instalada e energia gerada para uma turbina e o número máximo de turbinas que podem ser instaladas em cada seção analisada.

Seção	V_p (m/s)	D_p (m)	Pi (kW)		Eag (MWh/ano)	
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
1	1,6	1,0	1	11	1	11
			0,672	7,392	4,415	48,57
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
2	1,5	0,8	1	14	1	14
			0,355	4,970	2,332	32,65
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
3	1,6	0,6	1	21	1	21
			0,242	5,082	1,590	33,39
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
Total			1,269	17,44	8,337	114,6

Analisando-se a Tabela 8.2, a E_{ag} total produzida pelo parque hidrocínético de 46 turbinas hidrocínéticas é estimada em 114,6 MWh/ano. A Figura 8.28 apresenta os perfis de velocidade das três seções analisadas, em função da profundidade, simulados para a vazão Q50% com NA de montante = 671,45 m e NA de jusante = 670,95 m. Para a seção 1 (Figura 8.28-a), pode-se considerar uma turbina com diâmetro de 1,3 m. Em relação à largura, foram considerados 25 m (20 m – 45 m), onde podem ser instaladas até 8 turbinas, considerando-se um distanciamento de $1,36D$, resultando em uma distância lateral de 1,77 m entre cada turbina, com C_p igual a 0,418 (Brasil Junior et al. [1]). Para a seção 2 (Figura 8.28-b), foi considerada uma turbina com diâmetro de 0,9 m e uma largura de 25 m (40 m – 65 m), onde podem ser instaladas até 12 turbinas, conforme o distanciamento considerado. Para a seção 3 (Figura 8.28-c), pode-se considerar uma turbina de 0,8 m de diâmetro e uma largura de 30 m (40 m – 70 m), onde podem ser instaladas até 17 turbinas, conforme o distanciamento já mencionado.

Na Tabela 8.3, são apresentados V_p , D_p , P_i e E_{ag} para uma e o número máximo

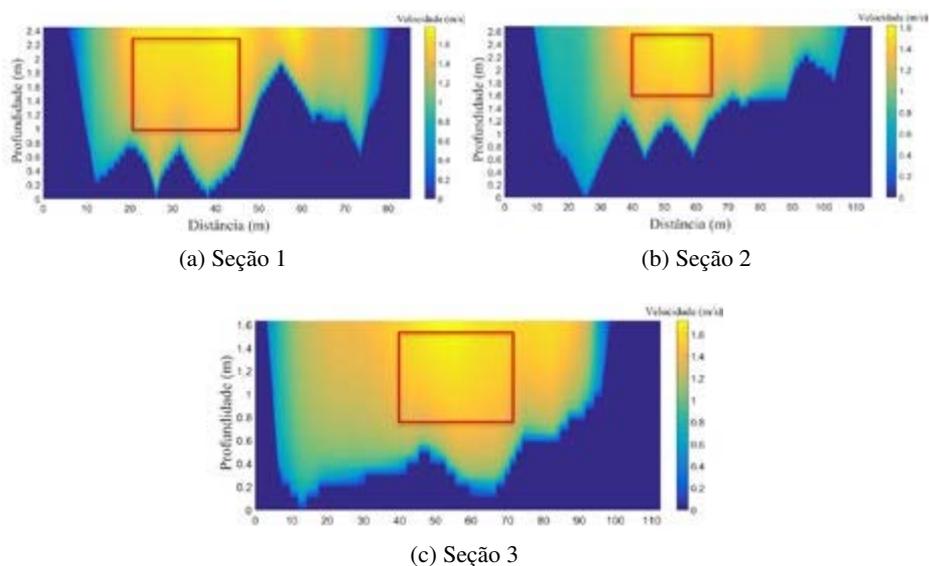


Figura 8.28: perfis de velocidade simulados com vazão de $140,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para as três seções analisadas do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

de turbinas, em função das seções analisadas e conforme a permanência das vazões, nesse caso, 50%. Tabela 8.3: velocidades e diâmetros de projeto, potência instalada e energia gerada para uma turbina e o número máximo de turbinas que podem ser instaladas em cada seção analisada.

Tabela 8.3: velocidades e diâmetros de projeto, potência instalada e energia gerada para uma turbina e o número máximo de turbinas que podem ser instaladas em cada seção analisada.

Seção	Vp (m/s)	Dp (m)	Pi (kW)		Eag (MWh/ano)	
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
1	1,7	1,3	1	11	1	11
			1,363	10,90	5,970	47,76
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
2	1,6	0,9	1	12	1	12
			0,545	6,540	2,387	28,64
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
3	1,7	0,8	1	17	1	17
			0,516	8,772	2,260	38,42
			N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas	N.º de Turbinas
Total			2,424	26,21	10,62	114,8

Analisando-se a Tabela 8.3, a Eag total produzida pelo parque hidrocinético de 37 turbinas hidrocinéticas é estimada em aproximadamente 114,8 MWh/ano. Observando-se, os resultados apresentados nas Tabelas 8.1, 8.2 e 8.3, tem-se que, em relação ao retorno de energia gerada e o tempo de geração, a melhor opção é um parque hidrocinético com 46 turbinas, funcionando 75% do tempo e com uma produção estimada em 114,6 MWh/ano. Se for desejado produzir energia hidrocinética por mais tempo, tem-se a opção de um parque hidrocinético com 61 turbinas, funcionando quase 90% do tempo e com uma geração estimada em 105,2 MWh/ano.

8.4 Conclusão

A calibração do modelo 2DH, que foi realizada com dados observados de vazão do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão, demonstrou um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas, com R^2 igual a 0,9941, indicando uma boa precisão da modelagem, pois o valor máximo de R^2 é 1,0. Esse resultado é importante, pois as velocidades e profundidades simuladas pelo modelo são dados de entrada para o modelo Quasi-3D. O bom desempenho do modelo 2DH favoreceu a modelagem Quasi-3D, a qual se mostrou propícia para a simulação de perfis verticais de velocidade e profundidade. Nesse caso, a validação com dados experimentais de velocidade, que foram medidos em campo através de ADCP pela equipe do projeto Lambari, confirma que os perfis simulados de velocidade são bens próximos aos perfis medidos. A validação permitiu o uso do modelo Quasi-3D para simulações de perfis de velocidade e profundidade em três seções do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão. Nas seções, foi projetada a instalação de turbinas hidrocinéticas, formatando parques hidrocinéticos. A quantidade de turbinas de cada parque variou com as vazões oriundas da curva de permanência corrigida e consideradas no estudo, as quais balizaram as velocidades e profundidades simuladas nas três seções analisadas. Para a primeira vazão analisada, sendo igual a 91,0 m³/s e representando uma permanência igual a 88,46% do tempo, o parque hidrocinético teria 61 turbinas hidrocinéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 105,2 MWh/ano. Para a segunda vazão analisada, sendo igual a 104,0 m³/s e representando uma permanência igual a 75% do tempo, o parque hidrocinético teria 46 turbinas hidrocinéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 114,6 MWh/ano. Para a terceira vazão analisada, sendo igual a 140,0 m³/s e representando uma permanência igual a 50% do tempo, o parque hidrocinético teria 37 turbinas hidrocinéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 114,8 MWh/ano. Assim, a opção com a vazão de 75% de permanência, em relação à quantidade de energia gerada, seria a melhor opção de vazão de projeto para a possível instalação de um parque hidrocinético no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão, pois teve praticamente a mesma produção, entretanto com 25% de tempo a mais de operação em relação ao parque analisado com a vazão de 50% de permanência. Se for desejado produzir energia hidrocinética por mais tempo, ainda, tem-se a opção de um parque hidrocinético

com 61 turbinas, funcionando quase 90% do tempo e com uma geração estimada em 105,2 MWh/ano. No que diz respeito às velocidades de projeto para cada seção, estas variariam de 1,4 a 1,7 (seção 1), de 1,5 a 1,6 (seção 2) e de 1,5 a 1,7 (seção 3). Essas velocidades estão coerentes com as velocidades de projeto determinadas via análise de densidade de potência hidrocínética apresentadas, as quais, de maneira geral, ficaram entre 1,4 e 1,7 m/s. As opções apresentadas e analisadas de parques hidrocínéticos que poderiam ser instalados no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão precisam de análises de fabricação e custos das turbinas; e da montagem dos parques hidrocínéticos, entre outras. Além de uma análise de arranjo do posicionamento das turbinas, ou seja, ficando todas em paralelo, ou em módulos triangulares, por exemplo. Apesar das análises que ainda precisam ser elaboradas, o desenvolvimento da modelagem Quasi-3D, incluindo nessa a modelagem 2DH, permitiu proposições de parques hidrocínéticos, demonstrando o potencial remanescente de energia proveniente das vazões turbinadas e vertidas da UHE Serra do Facão.

Referências Bibliográficas

- [1] Brasil Junior, A., Mendes, R., Oliveira, T., Andriamparany, T., Kouidri, M. and MESQUITA, A. [2016]. On the hydrodynamics of a row arrangement of hydrokinetic propeller turbines, *American Journal of Hydropower, Water and Environmental Systems*, v. July pp. 19–24.
- [2] da Silva Holanda, P., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N. and Secretan, Y. [2017]. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants, *Renewable Energy* **101**: 1203–1214.
- [3] de Pinho Bittencourt, M., Nunes, M. A., da Silva Holanda, P., da Silva Alves, C., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B. and Secretan, Y. [2016]. Avaliação de potencial hidrocínético remanescente a jusante de uhes na bacia hidrográfica do rio tietê, *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia* **2**(4): 38–53.
- [4] Duvoy, P. and Toniolo, H. [2012]. Hydrokal: A module for in-stream hydrokinetic resource assessment, *Computers & geosciences* **39**: 171–181.
- [5] Guerra, M. and Thomson, J. [2019]. Wake measurements from a hydrokinetic river turbine, *Renewable Energy* **139**: 483–495.
- [6] Gunawan, B., Neary, V. S., Mortensen, J. and Roberts, J. D. [2017]. Assessing and testing hydrokinetic turbine performance and effects on open channel hydrodynamics: An irrigation canal case study., *Technical report*, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).

- [7] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. [2009]. Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of hydrology* **377**(1-2): 80–91.
- [8] Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M. and Quaicoe, J. [2009]. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, *Applied Energy* **86**(10): 1823–1835.
- [9] Ladokun, L. L., Sule, B. F., Ajao, K. R. and Adeogun, A. G. [2018]. Resource assessment and feasibility study for the generation of hydrokinetic power in the tailwaters of selected hydropower stations in nigeria, *Water Science* **32**(2): 338–354.
- [10] Lago, L., Ponta, F. and Chen, L. [2010]. Advances and trends in hydrokinetic turbine systems, *Energy for sustainable development* **14**(4): 287–296.
- [11] Punys, P., Adamonyte, I., Kvaraciejus, A., Martinaitis, E., Vyciene, G. and Kasiulis, E. [2015]. Riverine hydrokinetic resource assessment. a case study of a lowland river in lithuania, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **50**: 643–652.
- [12] Ramírez, R. D. M., Cuervo, F. I. and Rico, C. A. M. [2016]. Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in colombia: A case study, *Renewable Energy* **99**: 136–147.
- [13] Ridgill, M., Neill, S. P., Lewis, M. J., Robins, P. E. and Patil, S. D. [2021]. Global riverine theoretical hydrokinetic resource assessment, *Renewable Energy* **174**: 654–665.
- [14] SEFAC [2020]. *Serra do Facão Energia S.A*, Disponível em: <<https://sefac.com.br/empresa/nossa-historia/>>.
- [15] Tigabu, M. T., Wood, D. and Admasu, B. T. [2020]. Resource assessment for hydro-kinetic turbines in ethiopian rivers and irrigation canals, *Energy for Sustainable Development* **58**: 209–224.

- [16] Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W. and Seibert, J. [2015]. Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics, *Water* 7(5): 2358–2381.

Capítulo 9

Impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna

Marianela Machuca Macías, Miguel Ángel García e Rafael Castilho Faria Mendes

Universidade de Brasília. Laboratório de Energia e Ambiente

9.1 Introdução

O presente projeto tem como objetivo propor uma abordagem metodológica para o levantamento do potencial hidrocínético de usinas hidroelétricas, visando à instalação de instalações hidrocínéticas a jusante destas centrais hidroelétricas convencionais. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de impactos ambientais associados à instalação e operação desta incipiente tecnologia resulta fundamental para tornar futuros empreendimentos desta natureza possíveis e respeitosos com o entorno.

Os impactos ambientais associados à instalação e operação de turbinas hidrocínéticas são ainda um tema em aberto na literatura devido à incipiência da tecnologia, por encontrar-se em fase de maturação devido ao fato de serem poucas as unidades operando comercialmente. Na literatura, são descritas as principais causas que podem afetar a vida aquática após a instalação de dispositivos hidrocínéticos, tais

como: suspensão de sedimentos, alteração dos regimes hidráulicos do rio, ruídos, campos eletromagnéticos, colisões dos peixes com as pás da turbina, toxicidade por pinturas e outros químicos e a instalação de várias unidades hidrocínéticas formando um arranjo.

Algumas dessas questões vêm sendo estudadas há quase duas décadas, como é o caso das colisões entre peixe e rotor. Sem embargo, existem outros problemas importantes que ainda não foram abordados, como por exemplo, o efeito da esteira na biomecânica do nado de peixes ou o risco de colisão de cardumes de peixes com parques hidrocínéticos. Este tipo de situação coloca um problema hidrodinâmico de trajetórias admissíveis de peixes, em sua situação de nado, na região de esteira de turbinas hidrocínéticas, sendo que: esse tipo de estudo e de descrição hidrodinâmica adequada é inédito na literatura internacional.

Esse projeto, portanto, direciona esforços de pesquisa na hidrodinâmica de turbinas e peixes no sentido de investigar o comportamento do nado de peixes na região de esteiras de turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal. Na Fig. 9.1, o problema é apresentado de forma visual para ajudar no entendimento, ilustrando como peixes nadam a jusante de uma turbina hidrocínética instalada em um canal na direção contrária ao escoamento.

Portanto, o objetivo principal deste estudo reside no desenvolvimento de uma abordagem metodológica que contribua com o levantamento de impactos ambientais em sistemas hidrocínéticos. De forma mais específica, o estudo tem seu foco na avaliação dos impactos sobre a ictiofauna.

9.1.1 Contextualização

Promovidas pelo constante debate sobre aquecimento global, as energias renováveis continuam sendo um assunto de vanguarda nos âmbitos corporativos, políticos e de pesquisa. A busca por alternativas tecnológicas deve adequar soluções de forma que cada país considere seus recursos e possibilidades, criando assim seu próprio espaço energético.

No caso do Brasil, com um importante potencial hídrico, aproximadamente 70% da energia elétrica produzida vem de usinas hidrelétricas convencionais. Nos últimos anos, tem aumentado o interesse pela energia hidrocínética, alternativa hídrica para a produção de eletricidade, em que se aproveita a velocidade de corrente ou da energia cinética de um escoamento [78]. Locais habituais de instalação de

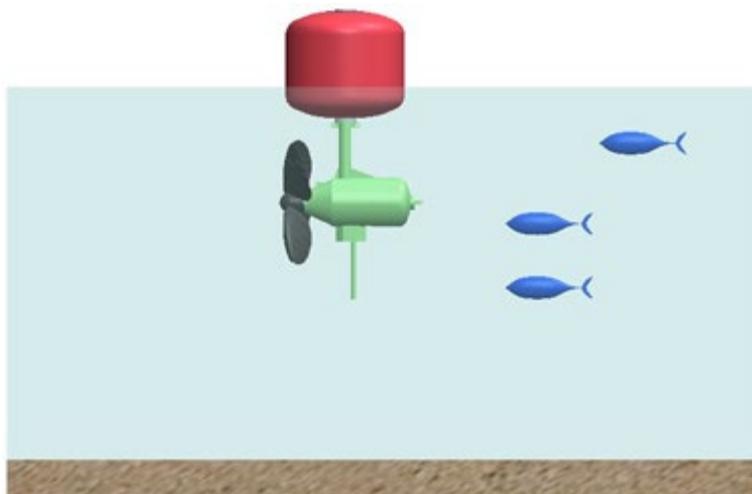


Figura 9.1: Esquema da interação peixe-turbina. Modelo flutuante de turbina hidrocínética modelo Hk10, desenvolvida pelo Laboratório de energia e Ambiente, UnB.

turbinas hidrocínéticas são estuários, rios ou correntes marinhas, sem a necessidade de grandes obras civis, como reservatórios ou barragens, e sem a criação de quedas de água e/ou o desvio do leito dos rios. Tudo isso representa uma vantagem frente à energia hidrelétrica convencional que carrega importantes efeitos desfavoráveis no meio ambiente, tais como: realocação de pessoas, inundações de áreas agrícolas e *habitats*, alteração de regimes de rios, emissão de gás metano (CH_4), entre outros [183].

A base teórica empregada para o estudo de turbinas hidrocínéticas é a teoria de turbinas eólicas devido à forte semelhança entre elas. Em ambos os casos, um dispositivo extrai energia cinética contida em um escoamento, água ou ar, respectivamente. As turbinas hidrocínéticas apresentam maior potencial de extração de energia do que as eólicas, mesmo trabalhando com escoamentos a velocidades bastante menores, devido à massa específica da água ser bem superior à do ar. A Fig. 9.2 exibe as capacidades energéticas de sistemas eólicos e hidrocínéticos

equivalentes (mesmo tamanho e coeficiente de potência¹) para as velocidades de escoamento próprias em cada caso, de 11 a 14 m/s e de 1,5 a 3 m/s, respectivamente [74, 183]. Nota-se que máquinas hidrocinéticas apresentam capacidades energéticas maiores do que 50%, se comparadas a dispositivos eólicos equivalentes, nas faixas de velocidade de operação habituais. Observando a Fig. 9.2, percebe-se como uma turbina hidrocinética operando em água a 1.5 m/s apresenta a mesma densidade de potência ($600\text{W}/\text{m}^2$) que uma turbina eólica do mesmo tamanho e eficiência em ar a 14 m/s.

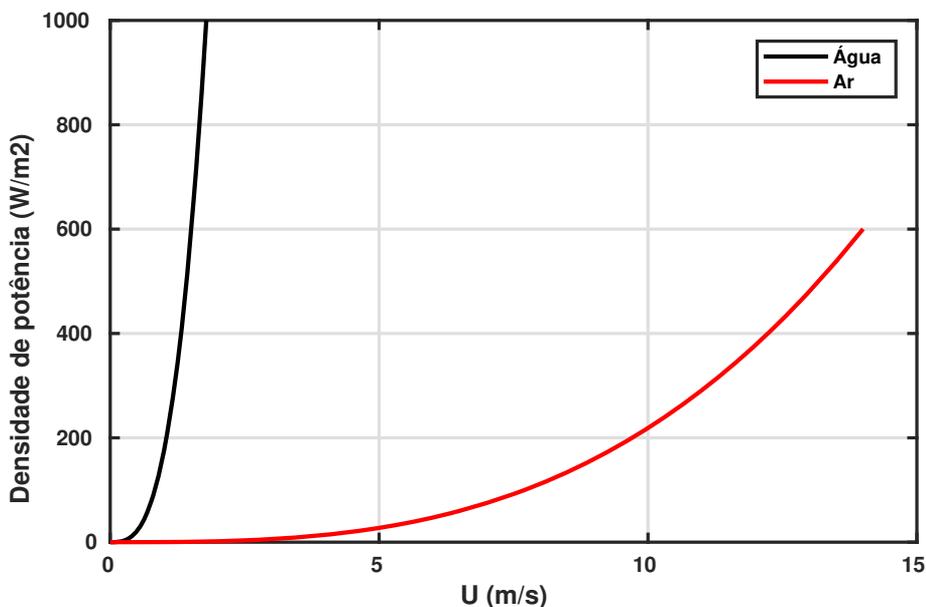


Figura 9.2: Densidade de potência para dois sistemas eólicos e hidrocinéticos equivalentes ($C_p=0,35$)

¹Coeficiente de potência, C_p , é uma medida da eficiência fluido-mecânica de uma máquina. Determinado pela razão entre a potência mecânica extraída pelo rotor da turbina e a potência disponível no escoamento que atravessa a área varrida pelo rotor (Ver definição na Eq. 9.23 na seção 9.4).

Além do elevado potencial energético do escoamento de água, existem outros fatores importantes que favorecem a aplicação desta tecnologia, como: a maior previsibilidade energética, se comparada a outras energias renováveis como a solar ou a eólica [51], o fornecimento de energia elétrica para comunidades isoladas sem acesso ao sistema elétrico nacional de transmissão [158] e os menores impactos ambientais, se comparados com as centrais hidrelétricas convencionais, como mencionado anteriormente.

Por outro lado, a principal desvantagem em comparação a outros métodos de produção de energia é a baixa eficiência dos dispositivos, com limite máximo teórico de 59,3% (limite de Betz²), e na prática, apenas em sistemas profissionais de alta qualidade se atingem eficiências de 50% [183]. Outro inconveniente em relação à produção de energia é o menor tamanho dos dispositivos, se comparados a eólicos e hidrelétricos convencionais, devido à limitação da profundidade do local de instalação. Porém, a questão de produção de energia, influenciada pelo tamanho e pela eficiência das máquinas, pode ser contornada adotando estratégias como a instalação de várias turbinas na forma de arranjo ou a utilização de difusores [117]. Em contrapartida, a repercussão de um arranjo hidrocínético sobre o ambiente será consideravelmente maior do que no caso de uma única turbina [48].

Entretanto, os impactos ambientais associados à instalação e operação de turbinas hidrocínéticas são ainda um tema em aberto na literatura devido à incipiência da tecnologia, por encontrar-se em fase de maturação devido ao fato de serem poucas as unidades operando comercialmente. Na literatura, são descritas as principais causas que podem afetar a vida aquática após a instalação de dispositivos hidrocínéticos, tais como: suspensão de sedimentos [69, 112], alteração dos regimes hidráulicos do rio [72, 39], ruídos [139, 134], campos eletromagnéticos [27, 78], colisões dos peixes com as pás da turbina [126, 125, 185], toxicidade por pinturas e outros químicos e a instalação de várias unidades hidrocínéticas formando um arranjo [48, 112]. Algumas dessas questões vêm sendo estudadas há quase duas décadas, como é o caso das colisões entre peixe e rotor. Sem embargo, existem outros problemas importantes que ainda não foram abordados, como, por exemplo, o risco de colisão de cardumes de peixes com parques hidrocínéticos ou o efeito da

²Limite de Betz representa o valor teórico máximo da eficiência de uma turbina de eixo horizontal. O máximo da função do coeficiente de potência $C_p = 16/27 \approx 0.593$ foi estabelecida pelos autores Lanchester [76], Betz [16] e Joukowski [70].

esteira na biomecânica do nado de peixes.

O risco ambiental da tecnologia relaciona-se com a possibilidade de cardumes de peixes aproximarem-se das partes rotativas da máquina. Este tipo de situação coloca um problema hidrodinâmico de trajetórias admissíveis de peixes, em sua situação de nado, na região de esteira de turbinas hidrocínéticas, sendo esse tipo de estudo e de descrição hidrodinâmica adequada é inédito na literatura internacional.

Neste trabalho, a relação peixe/turbina é abordada visando à interação hidrodinâmica entre ambos desde estudos tanto numéricos como experimentais. Por um lado, a caracterização é realizada a partir de simulações numéricas baseadas na dinâmica dos fluidos computacional CFD³ que integram a biomecânica do nado de peixes junto a escoamentos turbulentos tridimensionais, tais como o induzido na esteira de uma turbina hidrocínética. Até o momento, não foram encontrados na literatura estudos similares e portanto, este trabalho contribuirá para o estado da arte dos assuntos estudados: impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna e simulações numéricas de peixes nadando em escoamentos perturbados. Ademais, estudos experimentais foram realizados em túnel de água, empregando tanto peixes reais como um protótipo mecatrônico.

9.2 Estado da arte

9.2.1 Impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna

As turbinas hidrocínéticas são normalmente instaladas em locais de grande riqueza ecológica, e portanto, é importante conhecer como esses dispositivos poderiam impactar o ambiente, afetando a flora, fauna, hidrologia e incluso a hidrodinâmica do escoamento. Quantificar e qualificar os impactos ambientais de um dispositivo energético é fundamental para que os órgãos ambientais pertinentes permitam a instalação e operação desses. A pesquisa sobre impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas vem sendo desenvolvida nos últimos 15 anos e é ainda um tema emergente na literatura científica, como consequência da expansão da indústria de energia hidrocínética [131].

³ Acrônimo da expressão originária na língua inglesa *Computational Fluid Dynamics*.

Entre os primeiros trabalhos fundamentais abordando questões sobre os impactos de tecnologias hidrocínéticas e marinhas, destaca-se o estudo realizado por Cada et al. [26]. Nele, os autores reuniram todas as informações apresentadas na oficina *Proceedings of the hydrokinetic and wave energy technologies technical and environmental issues workshop* e resumiram os principais potenciais impactos ambientais que a instalação e operação de turbinas hidrocínéticas poderiam originar, tais como: impactos com partes físicas da turbina, ruídos, campos eletromagnéticos, sedimentação, toxicidade por químicos, alteração de regimes hidráulicos e hidrológicos, assim como do *habitat* do fundo do rio. Posteriormente, instituições de prestígio internacional, como o *U.S. Department of Energy* e o *Electric Power Research Institute*, publicaram relatórios científicos sobre o assunto, reforçando as poucas investigações existentes até o momento [156, 44].

Inicialmente, a pesquisa sobre impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas se centra maioritariamente no problema das colisões de peixes e rotores, partindo da extrapolação do conhecimento adquirido das já consolidadas turbinas hidrelétricas convencionais [172, 44]. Lesões e taxas de sobrevivência e mortalidade vêm sendo avaliadas ao longo dos anos a partir de simulações numéricas [126, 184] e experiências em laboratórios [45, 132, 68, 29, 5, 180], onde os autores reportam altas taxas de sobrevivência (>90%) para peixes entrando no rotor. Dependendo da espécie e do tamanho dos peixes, observaram diferentes padrões comportamentais e variação na taxa de mortalidade e gravidade das lesões. Outros trabalhos avaliam os possíveis riscos de colisão, utilizando modelos probabilísticos baseados em dados empíricos de distribuição de animais, densidade e comportamento destes [60, 137, 129].

Além dos possíveis danos causados pelo impacto direto, alterações na hidrodinâmica do escoamento, principalmente a jusante da turbina, na região da esteira, poderiam afetar também à vida aquática. Drásticas mudanças na pressão, cavitação nas pás, grandes tensões de cisalhamento e turbulências em zonas localizadas são alguns deles. Neste sentido, são escassas as referências encontradas na literatura, podendo destacar os trabalhos de Jacobson et al. [68] e Zangiabadi et al. [184]. Jacobson et al. [68], a partir de ensaios experimentais, propuseram alguns biocritérios para que o desenho do rotor e as condições de operação da máquina permitissem o passo de peixes através desta sem risco de morte. Por outro lado, Zangiabadi et al. [184] computaram, utilizando simulações numéricas, campo de pressão e tensões

de cisalhamento no fluido, avaliando a magnitude desses fatores sobre os peixes.

Estudos de campo utilizando técnicas acústicas [163] e [17] e/ou de observação *in situ* [135] e [59] têm investigado também a probabilidade de encontro dos peixes com a turbina, avaliando riscos de colisão e o comportamento dos peixes na aproximação e evasão aos dispositivos [164] e [18]. Os autores concluem que fatores como: espécie do peixe, tamanho, condições de luz ambiente, velocidade de rotação, turbidez da água, tamanho dos peixes e se eles nadam de forma individual ou formando cardumes, influenciam os padrões de aproximação.

A presença de turbinas hidrocínéticas pode trazer outros riscos à vida aquática além das colisões, destacando a interrupção do comportamento migratório e de forrageamento, deslocamento do *habitat* natural e/ou a agregação de animais em torno ao dispositivo que pode interferir na interação presa-predador [171]. Os trabalhos mais recentes focam na compreensão da morfologia de cardumes de peixes monitorando-os antes [122, 52, 114] e depois da instalação da turbina e avaliando o comportamento para diferentes condições fluviais ou de marés e de operação da máquina [170, 53, 171, 131]. Em todos os casos, os peixes demonstraram uma resposta comportamental significativa à presença do dispositivo, que precisa continuar sendo investigada e monitorada para máquinas ativas com diferentes desenhos [67].

A operação de máquinas hidrocínéticas traz consigo também efeitos como campos eletromagnéticos [78] e ruídos [18, 134]. Mais recentemente, Lossent et al. [93] publicaram um estudo sobre o impacto acústico que uma turbina origina sobre a fauna marinha fazendo com que a lesão fisiológica do aparato auditivo de invertebrados, peixes e mamíferos seja improvável. Atribuíram pouca preocupação para o caso de uma turbina, sem embargo, e trazem a discussão dos impactos de ruído em parques de até 100 turbinas. Por outro lado, Rosli et al. [128] reportaram que os níveis de ruído em condições de operação da máquina se apresentaram dentro dos limites estabelecidos por dados de referência. Os autores analisaram um modelo de turbina observando a reação dos peixes e, posteriormente, extrapolaram esses resultados para turbinas em escala real.

É consenso na literatura que o monitoramento das unidades operando é crucial para afiançar o *status* da tecnologia hidrocínética e o conhecimento sobre seus impactos ambientais, devido ao fato das características específicas de cada local e o desenho e a configuração de cada montagem influenciarem de forma diferente

os efeitos produzidos. Outra questão fundamental reportada em vários trabalhos, mas pouco estudada ainda sob o ponto de vista ambiental, é a repercussão sobre a vida marinha da instalação de um parque hidrocínético constituído por várias unidades [112]. Por último, é essencial evidenciar que foi identificada uma lacuna de conhecimento na abordagem numérica turbina-peixe, resolvendo de forma conjunta o escoamento tridimensional turbulento e a biomecânica do nado do peixe, avaliando as consequências da esteira na mecânica do nado, desde o ponto de vista da hidrodinâmica.

9.2.2 Nado de peixes em escoamentos não perturbados

Na literatura, estudos sobre nado de peixes começam a proliferar a partir da década de 60. Uma grande parte desses estudos investigando peixes nadando em escoamentos não perturbados em velocidade constante, embora existam alguns outros estudando manobrabilidade e demais movimentos.

Questões baseadas em: cinemática do nado, forças atuantes na locomoção, eficiência propulsiva e estrutura da esteira vêm sendo estudadas usando técnicas experimentais ou simulações numéricas. Neste trabalho, e, conseqüentemente, na revisão bibliográfica a seguir, a análise do peixe reside apenas na mecânica da locomoção, desconsiderando a parte biológica envolvida, como esforços musculares ou consumo de oxigênio, por exemplo, o que traz simplificações.

Estudos usando a técnica PIV apresentam excelentes resultados em questões de cinemática e caracterização da esteira. Porém, exibem deficiências na avaliação de algumas situações, já que durante ensaios em laboratório, alguns parâmetros não podem ser sistematicamente variados, porque, em muitos casos, representam cenários que não podem ser naturalmente replicados. Outra limitação encontrada em experimentos PIV é que as variáveis medidas durante estes ensaios (velocidade e, conseqüentemente, vorticidade) não são suficientes para o cálculo das forças locomotivas e a eficiência hidrodinâmica, devido à falta de informação sobre o campo de pressão. Entre os principais trabalhos que aplicam a técnica PIV para a caracterização de nado de peixes em escoamentos não perturbados, destacam-se [110, 187, 73, 104, 56, 150].

Para avaliar os casos em que os experimentos não aportam informações suficientes, encontram-se na literatura estudos numéricos abordando a problemática da natação de peixes, os quais vêm aumentando significativamente na última década

devido aos avanços computacionais. Segundo Borazjani and Sotiropoulos [21], no seu trabalho publicado em 2008, os trabalhos experimentais eram muito mais abundantes do que os numéricos.

Na literatura, são encontradas diversas abordagens do problema numérico de um peixe nadando. Existem trabalhos focados na análise do modo de nado [136, 22], outros com o objetivo de caracterizar a cinemática do peixe [12, 77, 103] e outros analisando a variação sistemática dos principais números adimensionais do problema [21, 113]. Encontram-se também estudos da hidrodinâmica de peixes bidimensionais (2D) [150] e trabalhos que desenvolvem peixes-robôs [37, 25, 107].

Por outro lado, os problemas numéricos podem ser resolvidos utilizando diferentes metodologias. Na literatura, encontram-se trabalhos que empregam o método dos painéis, tendo como principal limitação o escoamento potencial. Nessas simulações uma fonte de vorticidade é adicionada na esteira do peixe [12, 187, 113, 119]. Simulações utilizando o método de fronteira imersa são comuns neste tipo de problema, porém não se encontram estudos utilizando esta técnica que modela a turbulência do problema. Assim, nos casos abordados, o fluido se encontra em regime laminar ou é considerado como invíscido, escoamento potencial. Os principais trabalhos nesta linha são os reportados por Borazjani and Sotiropoulos [21] e Borazjani and Daghooghi [20], que utilizam método híbrido cetersiano/fronteira imersa, e os trabalhos de Cui et al. [37] e Thekkethil et al. [150], que desenvolvem uma solução baseada no método level set/fronteira imersa. No seu trabalho, Liu et al. [91] também utilizaram o método de fronteira imersa para analisar o desempenho e a dinâmica dos vórtices devido à interação corpo-nadadeira e nadadeira-nadadeira.

Nos trabalhos até agora referidos, o peixe é um corpo deformado segundo a onda característica que define seu movimento. No entanto, existem outros poucos trabalhos que tratam o peixe como um conjunto de corpos rígidos interligados que se movimentam através de um fluido. Assim, Kajtar and Monaghan [71] empregam o método SPH *Smoothed-particle hydrodynamics* e Munnier and Pinçon [111] analisam o movimento do peixe através de um sistema mecânico de 6 graus de liberdade.

Segundo Liu et al. [91], são poucos os trabalhos que empregam simulações de peixes, incluindo escoamentos viscosos com altos números de Reynolds, em que é necessário resolver o problema da turbulência. A maioria dos trabalhos

utilizam as equações médias de Navier-Stokes URANS⁴ para resolver o escoamento, escolhendo o modelo de turbulência mais apropriado para resolver o problema de fechamento da turbulência [23].

Entre os estudos encontrados, destacam-se o trabalho de Adkins and Yan [3], que estudam o nado de um peixe carangiforme utilizando o *software* FLUENT, a partir da abordagem URANS com modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e um algoritmo de malha móvel. Nos trabalhos de Chang et al. [31] e Li et al. [80], peixes do tipo tuniforme foram simulados utilizando o modelo de turbulência $k - \omega - SST$, que também foi empregado por Espenchitt [47] em simulações quase estáticas para peixes como o atum e o lambari. Esse último, foi estudado já de forma dinâmica por Souza [146], considerando o modelo de turbulência $k - \omega - SST$ de transição.

Por outro lado, alguns poucos trabalhos empregam a abordagem turbulenta LES⁵, que resolve as grandes escalas de turbulência e apenas modela as pequenas. Bottom et al. [23] estudaram a hidrodinâmica de uma arraia e Ogunka et al. [120] os efeitos do solo sobre o nado de peixes tipo enguias.

Trabalhos recentes, sejam experimentais ou numéricos, têm tratado o assunto da formação de vórtices na borda de ataque da nadadeira caudal e a sua interação com a o resto de vórtices. Neste ponto, destacam-se os trabalhos [25, 107, 178, 61, 165].

Todos os estudos reportados até agora tratam do nado do peixe em condições de microturbulência, uma simplificação comumente adotada para o escoamento que facilita o entendimento dos efeitos tridimensionais do nado de peixes, mesmo não sendo um comportamento dominante na natureza. Certamente, os peixes enfrentam escoamentos turbulentos resultantes de fontes variadas como diferença de temperaturas, vorticidade gerada por organismos em movimento ou escoamento perturbado por obstáculos fixos ou móveis [85]. Assim, entender como peixes nadam em escoamentos complexos é um tópico de considerável interesse para a comunidade científica em campos como a ecologia, a gestão pesqueira, a dinâmica de fluidos e a biologia de peixes, entre outros [82].

Já na década de 1960, Breder [24] identificou os benefícios potenciais de nadar em fluxos turbulentos, sugerindo que os peixes nadando entre os vórtices poderiam explorar esses vórtices devido à diminuição na velocidade do escoamento. Desde então, vários estudos vêm investigando como ambientes turbulentos, que aportam

⁴ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*.

⁵ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Large Eddy Simulation*.

maiores níveis de energia, podem resultar em melhores desempenho no nado de peixes [168, 35, 85, 83, 151].

Na literatura, se distinguem duas fontes perturbadoras do escoamento, influenciando o comportamento de peixes nadando: abióticas (obstáculos fixos ou móveis) ou bióticas (cardumes de peixes). Assim, estudos teóricos, experimentais e numéricos têm sido desenvolvidos avaliando como as esteiras induzidas pelas diferentes fontes podem afetar a cinemática e dinâmica dos peixes. Desde a perspectiva das fontes abióticas, encontram-se vários trabalhos analisando o comportamento de peixes nadando na esteira de um cilindro, já que se trata de uma geometria bem caracterizada desde o ponto de vista hidrodinâmico, em que se sucedem uma série de vórtices periódicos de diferentes sentidos, conhecida como esteira de vórtice de von Kármán. Desta forma, a interação do peixe com os vórtices emitidos pelo cilindro fornece uma maneira apropriada para começar a entender as interações peixe-fluido em escoamentos complexos, porém previsíveis.

Webb [166] conduziu um estudo experimental no qual avaliou os efeitos do diâmetro do cilindro e a sua orientação, a velocidade do escoamento e a temperatura nas estratégias de nado de dois tipos de peixes. Utilizando técnicas de vídeo para observação, concluiu que a orientação do cilindro tem um efeito pequeno e que a baixas velocidades os peixes conseguem evitar o obstáculo. O diâmetro do cilindro influencia também na capacidade de o peixe de evitar o cilindro e o possível arrasto produzido pela esteira, porém os experimentos apresentaram uma grande variabilidade nos resultados, impedindo conclusões confiáveis.

A interação peixe-cilindro também é avaliada em outros estudos importantes, como os publicados por Montgomery et al. [109], que estudam a integração sensorial dos peixes em estudos hidrodinâmicos, e por Liao et al. [85], que executam simulações numéricas variando o tamanho do cilindro e a velocidade do escoamento, enquanto monitoram parâmetros cinemáticos de nado como frequência, comprimento de onda ou amplitude. Ambos os estudos concluem que o peixe nadando atrás de um obstáculo, mantendo-se na mesma posição, utiliza as condições do escoamento local, minimizando o gasto energético e também a recuperação potencial da energia dos vórtices. Liao et al. [85] também observaram que o peixe modifica sua frequência e o comprimento de onda, adquirindo valores próximos aos apresentados pela esteira de vórtices do cilindro, segundo o diâmetro e a velocidade de escoamento não perturbado. O mesmo autor, nos trabalhos [84] e [81], estudou

o efeito do escoamento turbulento e a exploração de vórtices a partir das análises de órgãos como a visão ou a linha lateral⁶ ou da atividade muscular.

Na mesma linha dos trabalhos anteriormente reportados, Tritico and Cotel [152] levam a cabo estudos experimentais utilizando a técnica PIV de um peixe nadando em escoamento turbulento no qual os vórtices foram produzidos por arranjos de cilindros dispostos de forma horizontal e vertical, respectivamente. Os autores concluíram, da mesma forma que nos estudos anteriores, que o diâmetro e a orientação dos vórtices desempenham um papel importante na capacidade natatória dos peixes.

Em 2006, Beal et al. [15] publicaram um estudo revelador no qual um peixe morto foi colocado atrás de um cilindro e aquele foi propulsionado corrente acima. Desta forma, evidenciaram como o corpo do peixe extraia energia suficiente dos vórtices emitidos pelo cilindro, desenvolvendo uma quantidade de empuxo superior ao arrasto, em um modo passivo de propulsão.

Outros trabalhos analisam a interação do peixe com outros tipos de obstáculos. Neste sentido, destaca-se o trabalho de Sutterlin and Waddy [147], que executam experimentos em um canal de uma truta nadando na esteira de obstáculos de formas geométricas diferentes. Eles observaram como os peixes escolhem locais específicos para se manterem nadando segundo o padrão de fluxo específico de cada geometria. Nesta direção, encontram-se estudos de observação de salmões aproveitando as menores velocidades do escoamento atrás de obstáculos como rochas ou pedras [140] ou estruturas em forma de T [49]. Mais recentemente, destacam-se os trabalhos de Kim et al. [75] e Costa et al. [33], que estudam peixes nadando nas imediações de obstáculos. Ambos são estudos experimentais desenvolvidos utilizando tanques de água. Kim et al. [75] avaliaram, empregando técnicas de visualização, se um peixe desvia de um obstáculo, no caso uma placa plana vertical, de diferentes cores. Desta forma, os autores reportaram a existência de uma relação da visão com o sensor de linha lateral ante a presença do obstáculo. Por outro lado, Costa et al. [33] colocaram estruturas triangulares, como obstáculos, estudando a resposta fisiológica e comportamental de peixes nadando individualmente e em grupo.

Apesar de existir um esforço comum sobre a pesquisa de peixes nadando

⁶Órgão sensorial de alguns animais marinhos que detecta movimento e vibrações do fluido em volta, permitindo o desvio de obstáculos e a localização de presas.

em escoamentos perturbados, os resultados reportados na literatura apresentam impactos contraditórios, como descrito anteriormente. Isso porque a maior parte dos estudos apontaram que um escoamento turbulento poderia reduzir o desempenho da natação dos peixes e aumentar o consumo de oxigênio, e, desta forma, os peixes evitariam esse tipo de fluxo [121, 152]. Por outro lado, outros autores reportam o impacto sobre o desempenho dos peixes como neutro para esse tipo de escoamento [116] e outros relatam que os peixes parecem beneficiar-se dessas situações, como quando nadam em esteiras de von Kármán [84, 81]. Por tudo isto, [34] centraram seu trabalho em propor soluções a essas aparentes contradições reportadas na literatura. Segundo eles, apenas vórtices de determinados tamanhos causariam instabilidade nos peixes afetando o desempenho. Os autores assumem que os resultados neutros surgem quando os métodos que geram turbulência falham em produzir os vórtices de tamanho apropriado.

Por outro lado, as causas bióticas que originam escoamentos perturbados e vorticidade aparecem mais frequentemente na literatura dos últimos anos, especialmente, em estudos hidrodinâmicos de cardumes de peixes, avaliando a eficiência dos peixes em diferentes configurações. Os primeiros estudos relacionados a esse assunto focaram em como um peixe precedendo outros (em um cardume) poderia aproveitar a esteira induzida pelos outros apresentando melhoras hidrodinâmicas. Breder [24] e Weihs [169] observaram como a formação em diamante dos peixes em um cardume é adotada. Mais recentemente, encontram-se importantes trabalhos referentes à configuração [6, 41], sincronização [7, 58] e eficiência de cardumes [64, 79], alguns utilizando técnicas complexas como simulações LES [38] ou aprendizagem por reforço⁷ [55, 159].

Uma vez concluída a revisão bibliográfica sobre peixes nadando em escoamentos perturbados, evidencia-se que não aparece na literatura nenhum trabalho resolvendo de forma conjunta um escoamento tridimensional turbulento, como o da esteira de uma turbina hidrocínética, com a biomecânica de um peixe nadando nela. Todavia, existem grandes esforços por parte da comunidade científica relacionando o impacto de escoamentos perturbados, caracterizados por altos níveis de intensidade de turbulência e estruturas vorticais de várias escalas, ao comportamento e ao

⁷Aprendizagem por reforço ou em inglês *Reinforcement learning* é uma técnica de aprendizagem automático inspirado na psicologia behaviorista ou comportamental, que treina algoritmos usando um sistema de recompensa e punição, sem a interferência do programador.

desempenho da natação de peixes.

9.2.3 Nado de peixes em escoamento perturbado

Na natureza, é comum peixes encontrarem fluxos com perturbados, isto é, escoamentos tridimensionais que apresentam comportamentos instáveis e complexos, caracterizados tipicamente por estruturas turbulentas, tais como flutuações e criticidade. Um peixe nadando em um escoamento dessa natureza pode sofrer mudanças no seu comportamento, no que se refere à sua própria cinemática ou da sua posição, por exemplo, e segundo a tipologia do fluxo, poderá ver-se prejudicado ou beneficiado.

De forma geral, peixes poderiam ser atraídos por escoamentos turbulentos que apresentam mecanismos de estabilidade, algum componente espaço-temporal previsível, e evitam fluxos imprevisíveis, com grandes flutuações ou com escalas espaço-temporais capazes de interferir na trajetória de nado [46]. Por exemplo, em escoamentos com elevados níveis de turbulência e mudanças de pressão, como os encontrados nas vizinhanças de turbinas hidrelétricas convencionais, os peixes se deparam com condições adversas nas quais poderiam correr até risco de morte, como reportado por Cada et al., Electric Power Research Institute [26, 44]. Por outro lado, [85] observaram como um peixe nadando em um escoamento de von Kármán explorou a esteira de vórtices aproveitando a energia neles contida. Portanto, em algumas situações, a turbulência em um escoamento pode ser considerada um benefício; e, em outras uma limitação [83, 75].

Existem diferentes formas de geração de fluxos perturbados, que podem ser classificadas em: **fontes abióticas**, esteiras induzidas por obstáculos fixos ou móveis (turbinas), ou **fontes bióticas**, esteira de um peixe ou cardume [50]. Na Fig. 9.3 são ilustradas, a como exemplos, duas situações nas quais os peixes nadam em escoamentos do tipo esteiras de vórtices de von Kármán, com certas características de previsibilidade espaço-temporal. A Fig. 9.3(a) apresenta um peixe nadando na esteira de um cilindro com seção transversal tipo-D, enquanto na Fig. 9.3(b) pode-se observar um cardume de peixes com formação em diamante.

Nota-se, dessa forma, como em ambos os casos, os peixes nadam em um escoamento com velocidade reduzida (representado na cor cinza) em que podem aproveitar para manter a posição em uma correnteza, diminuir a frequência de batimento e minimizar o gasto energético. Por outro lado, eles também podem

obter benefícios quando nadam em esteiras desse tipo pela captura de energia dos vórtices. Esse mecanismo de exploração dos vórtices dependerá da proporção entre as dimensões do peixe e do vórtice, assim como dos níveis e das escalas de turbulência.

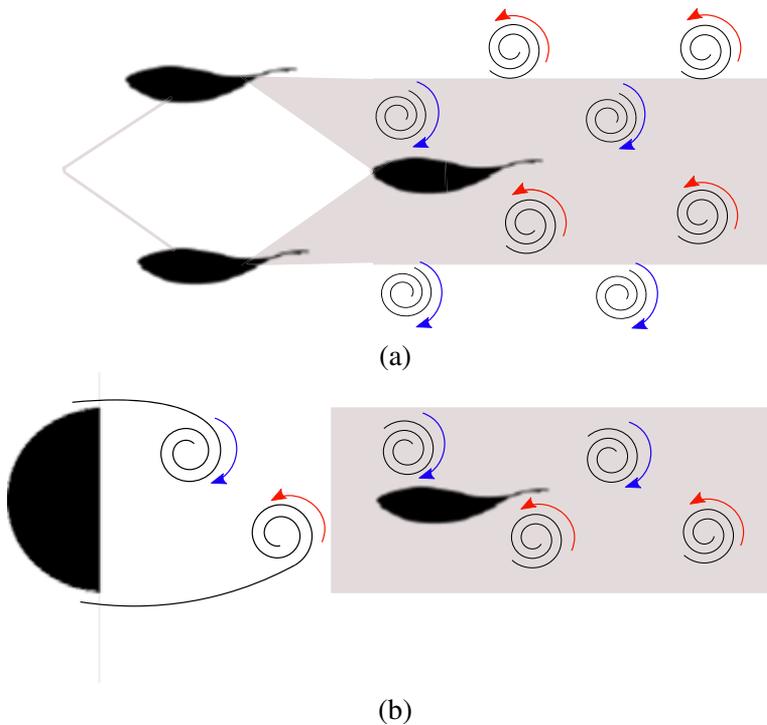


Figura 9.3: Esteiras de vórtices de von Kármán tradicional (tipo arrasto) (a) induzida por dois peixes nadando em cardume com configuração do tipo diamante; (b) a jusante de um obstáculo fixo com geometria cilíndrica de seção tipo-D. Região de baixa velocidade representada na cor cinza e vórtices positivos (vermelho) e negativos (azul). Adaptado de Liao [82].

Na linha do descrito acima, experimentos de laboratório demonstraram que uma truta se adapta a um novo modo de movimento para aproveitar o corredor entre os vórtices despreendidos periodicamente de um corpo a montante [85]. Sob

essas condições, a frequência de batida de cauda diminuiu, permitindo que os indivíduos empreguem apenas os músculos axiais anteriores, e, conseqüentemente, reduzindo os custos energéticos da locomoção [81]. Similarmente, o escoamento induzido pelos movimentos de outros peixes também pode ser explorado de forma semelhante, como nos cardumes de peixes. A vantagem fundamental desse tipo de escoamento perturbado é o padrão de previsibilidade que apresenta, fazendo com que o peixe consiga reconhecer e agir ante essas estruturas do fluido [151].

Além dos benefícios expostos acima, a turbulência em um escoamento também pode ter efeitos indesejáveis sobre os organismos aquáticos, independentemente da previsibilidade do escoamento. Como reportado durante a revisão bibliográfica, o impacto de um escoamento perturbado na natação e no comportamento de um peixe não é consenso na literatura. Em algumas ocasiões, o impacto pode ser positivo, aproveitando o peixe a energia dos vórtices e a região de velocidade reduzida. Existem situações nas quais a repercussão pode ser negativa, causando instabilidade nos peixes e afetando o desempenho destes. Nessas situações, podem requerer uma maior produção de forças verticais (anteriores e posteriores ao centro de massas) para corrigir os movimentos não desejados originados pelos comportamentos não previsíveis do escoamento. Ademais, escoamentos caracterizados por grandes flutuações e altas tensões de cisalhamento podem ocasionar a deformação do corpo do peixe, alterando a sua cinemática, por meio de aumentos na amplitude do batimento da cauda, e também causar desorientação, assim como lesões ou até a morte.

Para quantificar o efeito do escoamento sobre o peixe, alguns parâmetros derivados da descrição física das estruturas do fluido e das respostas do peixe ante o escoamento vêm sendo empregados na literatura. Nessa sentido, [34] propõem alguns parâmetros adimensionais baseados nos vórtices do escoamento, como o tamanho, a circulação ou o momento dos vórtices. Outros autores, apoiam suas próprias pesquisas em variáveis características do escoamento turbulento, como a energia cinética turbulenta, a intensidade de turbulência ou o tensor tensões aparentes de Reynolds. No que segue, são referidos alguns desses parâmetros, assim como o possível efeito que podem originar sobre os peixes.

Em primeiro lugar, observamos que a vorticidade aparece como uma variável-chave neste tipo de análise, já que permite quantificar a rotação das partículas fluidas em escoamentos que têm sido previamente perturbados por um obstáculo ou animal,

como é o caso neste estudo. Assim, os vórtices são definidos como áreas do fluido onde as partículas deles experimentam movimentos circulares. Existem várias formas de identificar os vórtices e de estimar seu tamanho, como, por exemplo, as linhas de corrente curvas, iso-vorticidades ou mínimos de pressão. Assim, a vorticidade fornece escalas de comprimento para as estruturas do escoamento, como o tamanho dos vórtices, que podem ser comparados com a escala de comprimento do peixe neste caso. Nesse sentido, é definido o adimensional RL entendido como a razão entre escalas de comprimento fornecidas pelo tamanho característico dos vórtices (L_v) e o comprimento do peixe (L), tal que

$$RL = \frac{L_v}{L}. \quad (9.1)$$

Existe uma faixa de tamanho para os vórtices muito pequena em comparação com a dimensão do peixe e, conseqüentemente, o tamanho relativo desses vórtices não é suficiente para criar distúrbios que possam afetar os peixes. Igualmente, há uma gama de tamanhos relativos de vórtices, grande o bastante, para os quais os peixes percebem o fluxo como retilíneo. Por fim, existe um limite no qual a razão entre os tamanhos é próxima à unidade, e os impactos que o escoamento apresenta sobre o peixe são significativos [152, 34]. Outros autores, como Webb and Cotel [167] e Lupandin [94], estabeleceram valores para o RL entre 50 – 75% e 66, 67%, respectivamente. Trinci et al. [151] reportaram que os desafios de estabilidade não eram identificáveis até que os maiores vórtices atingissem 76% do comprimento do corpo do peixe. Sob tais condições, os peixes perderam o controle postural, girando e transladando-se a jusante ao longo do eixo de rotação dos maiores vórtices. O que traz a discussão relacionada ao impacto da orientação das estruturas de fluxo sobre o comportamento e a energia dos peixes. Pode-se esperar que os vórtices em que o eixo de rotação está alinhado com a direção do fluxo principal causem o rolamento dos peixes, talvez o mais caro em níveis energéticos pela estabilização. Os vórtices transversais (na direção de deformação) acarretam movimentos laterais e os vórtices verticais vêm relacionados com movimentos que modificam o ângulo de ataque.

Outros parâmetros adimensionais relacionados a medições nos vórtices foram propostos por Cotel and Webb [34], como, por exemplo, a circulação. Eles propõem o cômputo da razão entre a circulação dos vórtices incidentes em relação ao peixe,

caracterizando o impacto dos vórtices de forma mais abrangente do que a análise baseada apenas no tamanho desses vórtices, já que a circulação fornece uma medida do potencial da força do vórtice. Desta forma, podemos entender se um possível deslocamento do peixe, na sua postura ou trajetória de natação, pode ser resultado do comportamento corretivo devido à velocidade, à força ou a momento de um vórtice [167].

A circulação definida como Γ é calculada integrando a vorticidade sobre uma área de superfície, A , ou integrando a velocidade, em torno a certa região do fluxo, sendo, portanto,

$$\Gamma = \iint \omega \cdot A = \oint \vec{V} \cdot l. \quad (9.2)$$

Outras variáveis consideradas na análise vórtice-peixe são o momento linear e angular carregado pelo vórtice, ambos relacionados com a circulação. A partir da comparação entre os momentos de vórtice e peixe foi observado que o aumento do momento de um peixe promove o amortecimento das perturbações de tal forma que será capaz de suportar perturbações [166, 34].

Por outro lado, é reportado na literatura que a energia cinética turbulenta (k), que corresponde à energia cinética associada às flutuações de velocidade para um ponto do escoamento, pode causar um impacto significativo sobre os peixes. Enders et al. [46] observaram que um aumento na energia cinética de turbulência pode afetar o desempenho do nado de um peixe, aumentando os custos energéticos, devido a um maior consumo de oxigênio nessas situações. Por outro lado, Silva et al. [141] reportaram no seu trabalho estatísticas indicando que, após observações experimentais, os peixes evitaram regiões de maior energia cinética turbulenta. Ademais, os autores empregam outro descritor turbulento comumente utilizado na caracterização de escoamentos turbulentos que é a intensidade da turbulência (IT), definida como uma medida normalizada de variação na magnitude da velocidade em relação à velocidade média local em um ponto do escoamento [121]. Da mesma forma que na análise da energia cinética turbulenta, resultados reportados na literatura indicam que os peixes podem diminuir sua velocidade em regiões com maior intensidade de turbulência [94].

Finalmente, outro parâmetro de interesse relacionado intimamente com a natureza turbulenta do escoamento é a tensão de cisalhamento de Reynolds, definida pela transferência contínua de momento entre massas de água viscosas adjacentes

de diferentes velocidades, cruzando-se ou movendo-se próximas umas das outras [149]. A força gerada, exercida paralelamente ao corpo do peixe, tem um forte impacto no desempenho e na estabilidade dos peixes nadando [118], e, em níveis extremamente altos, pode causar lesões graves ou mortalidade [28, 118]. Além disso, o impacto dessa tensão depende de sua orientação em direção ao corpo do peixe, como demonstrado por [141], que descobriram que o componente longitudinal da tensão de cisalhamento de Reynolds ($-\rho u'v'$) afeta mais os peixes.

O objeto de estudo neste trabalho consiste na caracterização hidrodinâmica de um peixe nadando nas proximidades de uma turbina hidrocínética, e que ainda não tenha sido reportado na literatura, por isso, não sabemos, *a priori*, como um peixe explorará escoamentos tridimensionais complexos, como os induzidos na esteira de uma turbina. Nesse sentido, se analisará o desempenho de um peixe nadando em diferentes locais da esteira, avaliando o tamanho e tipologia dos vórtices, assim como os descritores da turbulência (energia cinética de turbulência, intensidade de turbulência e tensor de Reynolds).

9.2.4 Turbinas hidrocínéticas

Parte deste trabalho reside na simulação de um rotor de turbina hidrocínética para obter um escoamento tridimensional turbulento, como o induzido pela esteira de uma turbina desse tipo. Para isso, foi empregado o método simplificado da linha atuadora, que oferece uma boa caracterização da esteira hidrodinâmica para o estudo da interação turbina-peixe, com menores custos computacionais do que outros métodos. A principal vantagem do método da linha atuadora é que consegue reproduzir as estruturas vorticais típicas de uma esteira de turbina hidrocínética sem a necessidade de resolver o escoamento na superfície da turbina, o que traz economia de malha e de tempo de computação. Portanto, a seguir, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre simulações numéricas de rotores, empregando o método simplificado da linha atuadora.

A modelagem numérica da linha atuadora foi desenvolvida por Sørensen and Shen [145] com o objetivo de caracterizar a esteira de turbinas eólicas, simulando parques eólicos, incluindo camada limite atmosférica. Alguns anos depois, Mikkelsen et al. [108] e Troldborg et al. [153] reformularam o modelo implementando uma ferramenta de simulação aeroelástica.

O método da linha atuadora acopla os métodos BEM⁸ e CFD, resolvendo os esforços no rotor e o escoamento, respectivamente. O principal objetivo de Sørensen and Shen [145] foi superar as limitações das metodologias do disco atuador axi-simétrico desenvolvidas até o momento. Os métodos atuadores da linha e do disco, ALM⁹ e ADM¹⁰, respectivamente, divergem na forma como o rotor é modelado. No primeiro, como uma série de pontos ao longo da linha que configura o eixo das pás; e, no segundo, como um disco.

São vários os autores que têm comparado as metodologias ALM e ADM, usando as abordagens RANS ou LES, para resolver as equações de Navier-Stokes. Sørensen and Shen [145] encontraram resultados coerentes na predição de potência para a turbina eólica *Nordtank* de 500kW e apresentaram como o ALM consegue captar os vórtices de raiz e de ponta de pá, o que não acontece nos ADM. Wu et al. [176] e Wu et al. [177] também comparam as duas metodologias para uma turbina eólica, nesse caso, os autores aplicaram duas versões da ADM, uma que considera apenas a força de empuxo sobre o fluido e outra que considera tanto o empuxo como torque. Os resultados reportados se apresentam próximos aos dados experimentais nas simulações ALM e ADM com empuxo e torque.

Outros trabalhos destacados na questão de avaliação das metodologias ADM e ALM são os reportados por Martínez-Tossas and Leonardi [102] e Martínez-Tossas et al. [100]. Em primeiro lugar, Martínez-Tossas and Leonardi [102] analisaram parques eólicos utilizando ADM e ALM. Os autores encontraram alguns bons resultados de coeficiente de potência para algumas situações, porém, em outras, os erros encontrados foram de 1 a 17%. Com isso, concluíram que nesses tipos de simulações, é preciso tomar grande cuidado nas etapas de malha e na eleição do fator de projeção das forças para conseguir o grau de acurácia esperado nos resultados. Mais recentemente, Tzimas and Prospathopoulos [155] compararam os resultados de ambas as metodologias com dados experimentais obtidos em túnel de vento. Destacaram que as metodologias atuadoras são uma alternativa bastante atrativa frente às simulações, empregando a geometria do rotor completa, já que não é necessário malhar a superfície desse rotor nem resolver o escoamento na camada limite. O que leva a malhas com menos elementos, trazendo maior eficiência

⁸ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Blade Element Momentum*.

⁹ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Actuator Line Model*.

¹⁰ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Actuator Disk Model*.

computacional. A ausência do rotor possibilita também a utilização de malhas estruturadas, outra vantagem desde o ponto de vista numérico.

Além dos estudos mencionados acima, que comparam várias metodologias e acreditam a confiabilidade das simulações empregando o modelo da linha atuadora, existem muitos outros trabalhos publicados focando em questões como a análise da esteira [100, 186, 101, 124] ou nas simulações de parques eólicos [123, 153, 182, 106]. O estudo do posicionamento das turbinas em um arranjo é fundamental para maximizar a eficiência e diminuir as perdas do mesmo, devido a que a esteira turbulenta de uma turbina tem um efeito nas máquinas a jusante, o que cria uma resposta diferente à esperada dificultando a predição do comportamento do parque [133].

Devido à conversão de energia em turbinas hidrocínéticas ser similar à energia das turbinas eólicas convencionais, os modelos atuadores vêm sendo também utilizados no estudo deste tipo de máquinas. Na literatura, aparecem trabalhos simulando turbinas hidrocínéticas, empregando o método do disco atuador com as equações médias de Navier-Stokes [14], ou com a abordagem de grandes escalas [19]. Outro trabalho que também utiliza a técnica ADM é o publicado por Liu et al. [92], no qual analisam o escoamento na esteira de turbinas hidrocínéticas e o comparam com simulações CFD com rotor e malha móvel.

No entanto, em termos de metodologias atuadoras, são muito mais frequentes, nos últimos anos, os trabalhos baseados no método da linha atuadora. Neste sentido, encontram-se estudos usando modelos URANS [8, 88] e LES [179, 65, 10], assim como trabalhos dedicados ao estudo de arranjos hidrocínéticos, tendo como objetivos caracterizar esteira e otimizar o posicionamento do conjunto de máquinas [32, 40, 90], e estudos utilizando turbinas com difusor [11].

9.2.5 Tanques e túneis de água para estudos de impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas

As turbinas hidrocínéticas ainda são um tema de pesquisa teórica e experimental (a grande maioria das turbinas estão em estágio pré-comercial), e os estudos sobre os impactos ambientais encontram-se na mesma situação. Como há poucas instalações operando no mundo, existem poucos estudos de impacto ambiental de turbinas hidrocínéticas [78]. Mesmo assim, considera-se que essa tecnologia pode gerar efeitos ambientais negativos, como alteração de corrente e ondas, alteração de

habitats de pequenos organismos, ruído, geração de campos eletromagnéticos, toxicidade (tintas, lubrificantes etc.), interferência com movimentos de animais e finalmente colisão de organismos aquáticos com as pás do rotor da turbina [156]. Muitas espécies de peixes se direcionam ou migram longas distâncias através de rios e oceanos e podem cruzar com turbinas hidrocínéticas. Estudos sobre batimento e colisão de peixes com as partes moveis da turbina mostram que a gravidade da tal colisão depende com a capacidade de natação do peixe, a velocidade da corrente e as características da pá (número, perfil, comprimento, espessura, espaçamento e rotação) [156, 172].

Nota-se que a maior parte de trabalhos sobre interação de peixes e turbinas hidrocínéticas têm origem no estudo de turbinas hidroelétricas convencionais. Existem poucos estudos específicos de impacto ambiental focados em peixes e turbinas hidrocínéticas. Nota-se, também, que muitos estudos sobre colisão de peixes com turbinas hidrocínéticas foram realizados em campo [53, 171].

Testes com tanque ou túnel de água oferecem uma abordagem alternativa para obter dados sobre as interações entre turbinas e peixes, com a vantagem de permitir que as respostas fundamentais sejam observadas [180]. Até hoje, vários testes de tanques de água foram realizados para entender como os peixes se comportam em torno das turbinas. Por exemplo, em 2011 e 2014, Amaral e colaboradores conduziram um experimento usando um modelo em escala 1:10 [4, 5], enquanto CASTRO-SANTOS and HARO [29] usaram uma turbina hidrocínética de eixo vertical em larga escala para testar as respostas de salmão juvenil do Atlântico (*Salmo salar*) e sável adulto (*Alosa sapidissima*) em um tanque de água [29]. Segundo os autores, não foram observadas lesões e não houve aumento mensurável da mortalidade associada à passagem da turbina.

Outros trabalhos propuseram uma lei de similaridade entre dados do campo e experimentos em escala laboratorial por meio da realização de um experimento usando *Oryzias latipes* [185]. Torna-se possível comparar os resultados experimentais com os resultados reais do mar, para permitir explicações e discussões sobre o comportamento dos peixes em torno de turbinas hidrocínéticas, através dos parâmetros de velocidade de fluxo, velocidade da ponta da turbina e velocidade máxima de nado dos peixes [185].

No entanto, nenhum desses estudos relatou efeitos impressionantes. No caso de Zhang et al. [185] e colaboradores, os resultados mostraram que a taxa de

sobrevivência dos peixes era de 100% após 48 h, e apenas um peixe entrou em contato com o cubo da turbina [185]. Outro experimento mostrou que peixes como *Gnathopogon elongatus* têm uma chance de aproximadamente 1% de atingir as pás da turbina no teste do tanque de água, apesar de terem a capacidade de evitar as pás da turbina [180]. Nesse mesmo estudo, foram destacados os possíveis comportamentos dos peixes ao cruzar com a turbina: ‘Passando’, quando o peixe nadou fora da área das pás rotativas; ‘Entrando’, quando o peixe nadou dentro da área das pás rotativas; ‘Evitando’, quando o peixe mudou seu movimento quando na frente das pás da turbina; ‘Evitando e entrando’, quando o peixe mudou seu movimento dentro da área das pás rotativas; ‘Retornando’, quando o peixe virou na frente das pás rotativas; e ‘bater’, quando o peixe atingiu uma das pás ou tinha um alto risco de atingi-las.

Comparando dois trabalhos similares com tanques de água [185, 180], é interessante notar diferenças de comportamentos entre as duas espécies de peixes estudadas, respectivamente *Oryzias latipes* e *Gnathopogon elongatus*, enquanto a turbina gira ou não. Para o *Oryzias latipes*, a probabilidade de comportamentos ‘passando’ e ‘retornando’ aumentou, enquanto o de ‘entrando’ diminuiu quando a turbina estava girando. Além disso, alguns comportamentos de prevenção foram observados em ambos os casos. Com uma velocidade de rotação de 20 rpm, nenhuma colisão ou golpe foi observado durante o experimento. A comparação sugeriu também que o *Gnathopogon elongatus* tem um risco maior de bater, embora o *Oryzias latipes* tenha uma velocidade de nado mais lenta, ou seja, tenha menos capacidade de evitar as pás da turbina em movimento.

Esses experimentos se focam mais no comportamento dos peixes tentando estabelecer as probabilidades de colisão sob certas condições, como as características das espécies e a velocidade de rotação das turbinas, por exemplo. A probabilidade de colisão é geralmente muito baixa ou quase nula [29, 185, 180]. O acúmulo dos resultados experimentais é necessário para compreender o risco de peixes.

A maioria dos estudos sobre impactos ambientais de turbinas hidrocinéticas com peixes usa tanques de água e não túneis de água. No trabalho de CASTRO-SANTOS and HARO [29], o dispositivo apresentado poderia de modo pertinente ser chamado de túnel de água, mas os autores preferem usar o termo tanque. Procurando as palavras-chaves ‘water tunnel’, ‘turbine’ e ‘fish’, encontra-se um artigo que atenda à pesquisa. Porém, percebe-se que o túnel de água em questão foi utilizado para

estudar apenas o comportamento aerodinâmico da turbina investigada sem interação experimental com peixes.

9.3 Biomecânica do nado de peixes

Na análise de um peixe nadando em um escoamento perturbado por uma turbina, é preciso, primeiramente, conhecer a biomecânica dos peixes, identificar quais são os mecanismos de nado deles e como se comportam ante diferentes tipos de escoamento. Neste trabalho, em primeiro lugar, se estuda o nado de um peixe em velocidade constante, em um escoamento não perturbado, para posteriormente, investigar as mudanças ocorridas no nado quando ele encontra escoamentos de topologia mais complexa, como a esteira de uma turbina hidrocínética.

9.3.1 Principais parâmetros adimensionais

Existem espécies de animais aquáticos muito diversas, que vão desde as pequenas larvas até os grandes mamíferos aquáticos, passando por peixes, anfíbios, répteis (jacarés) e aves marinhas (pinguins), apresentando cada um deles diferentes formas de adaptação ao meio em que vivem.

Gazzola, Argentina and Mahadevan [54] propuseram uma classificação de vários organismos aquáticos baseada em uma análise de escala, utilizando números adimensionais, como os números de Reynolds (Re), que definem o regime do escoamento, e de Strouhal (St), que relacionam a velocidade do escoamento (U) com parâmetros cinemáticos do animal como a amplitude (A) e a frequência da cauda (f).

$$Re = \frac{UL}{\nu}, \quad (9.3)$$

$$St = \frac{fA}{U}, \quad (9.4)$$

sendo L o comprimento característico, definido como o comprimento do peixe, e ν a viscosidade cinemática do fluido. Esses parâmetros adimensionais estão

relacionados à velocidade de locomoção que um dado animal atinge (Re) em face da cinemática associada à estratégia de movimento ondulatório de seu corpo (St) como forma de proporcionar propulsão.

Segundo seu número de Reynolds característico, Gazzola, Argentina and Mahadevan [54] categorizaram os organismos aquáticos em uma faixa de Re de oito ordens de magnitude, desde larvas ($Re \sim 10^1$) a baleias ($Re \sim 10^8$). Os peixes, foco de estudo nesta tese, encontram-se na natureza em uma faixa de Reynolds compreendida entre $10^3 - 10^6$. No que se refere ao número de Strouhal, na literatura, é consenso que a maioria dos peixes apresentam valores em um intervalo de $St = 0,2-0,4$ [173, 21, 154].

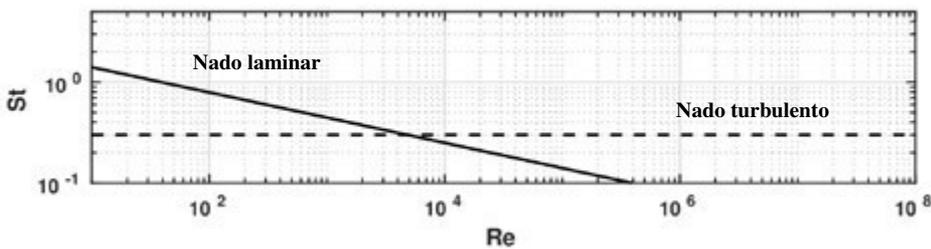


Figura 9.4: Dependência do número de Strouhal com o número de Reynolds. Linha contínua: $St \sim Re^{-0,25}$ ($Re < 10^4$). Linha descontinua: $St = 0,3$ ($Re > 10^4$). Adaptado de Gazzola, Argentina and Mahadevan [54].

A relação entre Re e St tem sido abordada em muitos trabalhos que avaliam nado de peixes [12, 187, 3, 21, 91], concluindo que não existe um valor de Strouhal ótimo universal que maximize a eficiência da natação, já que tal valor dependerá das características geométricas e cinemáticas próprias do organismo, assim como do regime do escoamento. Em seu trabalho, Gazzola, Argentina and Mahadevan [54] evidenciam a relação $Re - St$ no nado de um peixe, propondo uma relação de dependência entre as duas variáveis em forma de lei de potência tal que $St \sim Re^\alpha$, sendo $\alpha = -0,25$ em escoamentos considerados laminares ($Re < 10^4$) e $\alpha = 0$ em turbulentos ($Re > 10^4$). Os autores concluem que, após a análise de uma grande variedade de animais aquáticos, se confirma que, na natureza, peixes nadando em escoamentos turbulentos apresentam valores ótimos de nado próximos a $St = 0,3$.

9.3.2 Cinemática do nado de peixes

Devido à ampla faixa de peixes encontrada na literatura, existem também diversas variações no uso do corpo e das nadadeiras para cada um deles, configurando, assim, diferentes métodos de nado [161].

O movimento propulsivo de um peixe devido ao nado é consequência da aceleração do líquido a jusante dele pelo movimento ondulatório do corpo e das nadadeiras, gerando uma força de empuxo na direção do movimento. No entanto, sucede que, além da propulsão, um peixe realiza também outros tipos de movimentos, como manobras de escape, viradas de direção, saltos ou rápidas saídas.

Na literatura, encontram-se diferentes classificações, enquanto formas de locomoção dos peixes, uma delas é baseada nas características temporais do movimento: nados estacionários e transientes [136], definidos como:

- **Nado periódico:** caracterizado pela repetição cíclica do movimento ondulatório do corpo para propulsão. É considerado um movimento permanente que os peixes empregam para nadar longas distâncias em velocidades praticamente constantes.
- **Movimentos transientes:** incluem as manobras de evasão, partidas rápidas ou viradas de direção, entre outros. Estes movimentos são da ordem de milissegundos, na maioria das vezes, e são utilizados para captura de presas ou evitar predadores.

Outra forma de classificação, mais comum na literatura, habita na forma de como os peixes se movimentam para sua propulsão. Existem dois grandes grupos caracterizados pelo método de nado: os Body and/or Caudal Fin (BCF), que realizam movimentos ondulatórios do corpo e/ou da nadadeira caudal, e os Median and/or Pectoral Fin (MPF), com movimentos característicos das nadadeiras médias e peitorais [150].

A maior parte dos peixes usam o movimento BCF para sua propulsão, como reportado no estudo desenvolvido por Nelson [115] no qual apenas 12% das 450 famílias de peixes estudadas empregavam o movimento ondulatório das nadadeiras médias e/ou peitorais para sua propulsão. Não obstante, uma grande parte dos peixes que empregam BCF para sua propulsão utilizam MPF para estabilidade e manobrabilidade, especialmente em baixas velocidades, e os que usam MPF para

propulsão empregam o modo BCF para atingir altas velocidades durante manobras de escape [154].

No método BCF, os peixes geram a força propulsiva de empuxo pela deformação do seu corpo na forma de uma onda propulsora que se estende até sua nadadeira caudal, com sentido contrário ao sentido do movimento [37]. Assim, o peixe experimenta uma propulsão com velocidade U como consequência de uma massa de fluido ser deslocada pelo movimento ondulatório do seu corpo, caracterizado por frequência e amplitude específicas [54].

Existem diferentes modos de locomoção dentro do método BCF, destacando os modos anguiliformes, subcarangiformes, carangiformes e tuniformes. Eles refletem mudanças principalmente no comprimento de onda e na envolvente da amplitude da onda propulsora [136]. No modo anguiliforme, por exemplo, o movimento do peixe é devido à ondulação completa do corpo. Já o nado de peixes subcarangiformes, carangiformes e tuniformes vem caracterizado por promover ondulações com o terço ou até mesmo com a metade posterior de seus corpos [37].

Os peixes catalogados como carangiformes e tuniformes exibem movimentos similares, apresentando os tuniformes, como principal diferença, um menor deslocamento da cabeça e o movimento independente da cauda. Portanto, a ondulação do corpo vai até o pedúnculo caudal¹¹. A Fig. 9.5 ilustra, a modo de exemplo, os modos de natação anguiliforme e carangiforme, indicando a geometria do corpo associada tipicamente em cada caso e o tipo de deformação que experimentam.

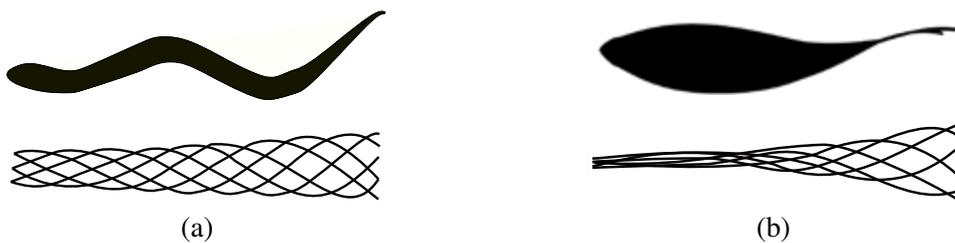


Figura 9.5: Modos de natação: (a) Anguiliforme e (b) Carangiforme. Deformação da linha média do corpo segundo o movimento natatório correspondente e a forma corporal tipicamente associada.

¹¹Parte do corpo do peixe compreendida entre a vertical que passa pelo ânus e a vertical que passa pelo nascimento da aleta caudal.

Neste trabalho, serão analisadas dois peixes com cinemáticas próprias do tipo carangiforme e diferente geometria. Nesse caso, a força propulsora é gerada devido à deformação do corpo na forma de uma onda propulsiva, desde a cabeça até a cauda. A cinemática deste tipo de peixe é modelada utilizando a equação senoidal (Eq. 9.5), caracteriza o deslocamento transversal da linha média do peixe [87, 181], $y(x, t)$, na forma

$$y(x, t) = a(x)\sin(\kappa x - \omega t), \quad (9.5)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência de batimento da cauda em rad/s , $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda da nadadeira caudal, sendo λ o comprimento de onda da onda propulsora, e $a(x)$, a amplitude variável, dada por

$$a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (9.6)$$

Os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 são normalmente determinados de forma experimental a partir de observações de peixes nadando, segundo o modo de nado específico. Na Fig. 9.6, são ilustradas as variáveis cinemáticas descritas.

Para peixes carangiformes, a máxima amplitude do deslocamento da cauda é estabelecida em um valor aproximado a $y_{max} = 0.1L$, sendo L o comprimento do peixe. O comprimento de onda adimensional λ/L é observado na faixa de 89 – 110% [162].

9.3.3 Forças hidrodinâmicas

Na discussão de alguns aspectos fundamentais sobre o nado do peixe, como eficiência ou dependência $Re - St$, torna-se imprescindível a determinação das forças hidrodinâmicas envolvidas no processo de deformação do peixe para sua propulsão. Na Fig. 9.7, são ilustradas as principais forças atuantes em um peixe durante o nado. Na direção vertical, as forças de sustentação, peso e flutuabilidade; e, na direção horizontal, as forças de empuxo e arrasto.

A força de sustentação é causada por assimetrias no escoamento que originam uma diferença de pressões na direção perpendicular ao movimento consequência da circulação do escoamento. Por outro lado, as forças peso e flutuação são devidas ao

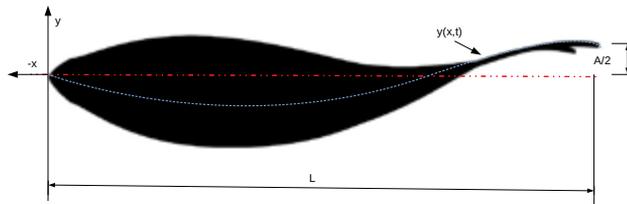


Figura 9.6: Sistema de coordenadas local solidário ao peixe e principais variáveis cinemáticas empregadas na descrição do nado: comprimento do peixe, L , deformação da linha média, $y(x,t)$, e amplitude em um quarto de ciclo, $A/2$ (distância percorrida pela nadadeira caudal desde a posição do eixo horizontal até a posição final pela batida em um semiciclo).

efeito gravitacional e à densidade do peixe, respectivamente, e serão negligenciadas neste trabalho assumindo a hipótese de *quase-balanço* entre elas, pelo fato do peixe e o fluido possuírem valores próximos de densidade [136].

No estudo da propulsão, as forças predominantes são as de arrasto e empuxo, ambas na direção do escoamento e de sinal contrário, como indicado na Fig. 9.7. Essas forças possuem uma componente de cisalhamento ou de fricção (arrasto de superfície), originada na camada limite devido à interação superfície-escoamento e à viscosidade do fluido, e outra componente de pressão, causada pela diferença de pressões no escoamento devida à alteração deste escoamento quando encontra um corpo sólido. O arrasto de pressão é conhecido também como arrasto de forma pela alta dependência com a forma do objeto. Como os peixes têm corpos bastantes hidrodinâmicos, essa componente aparece menos influente na resultante de forças do que o arrasto de superfície.

Na Fig. 9.7, também se apresentam algumas partes da morfologia do peixe, visando facilitar o entendimento do leitor, já que ao longo do texto se fará referência a elas. Assim, podem-se observar as nadadeiras peitorais e anais localizadas

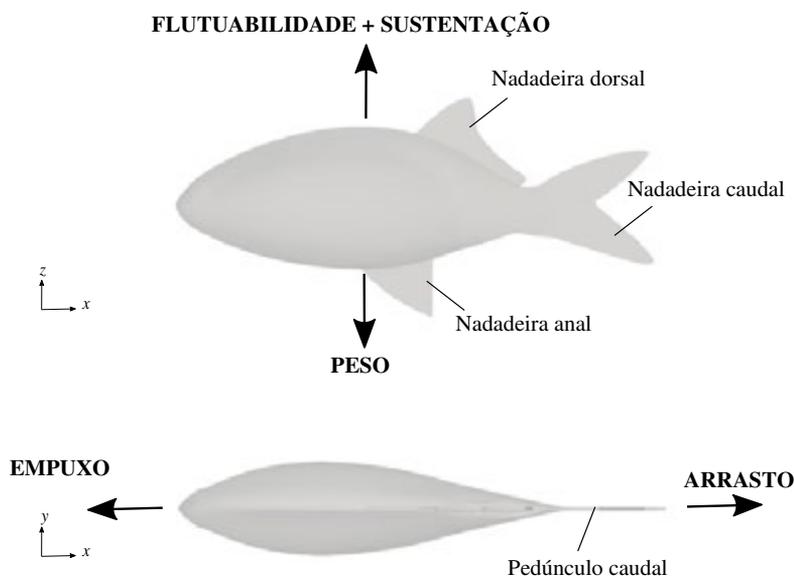


Figura 9.7: Forças atuantes sobre um peixe nadando e principais partes da morfologia do animal.

nas partes superior e inferior do peixe, respectivamente, e que se encarregam da estabilização, giros e paradas repentinas, e a nadadeira caudal, situada no fim do pedúnculo caudal, que é a responsável pela propulsão nos peixes devido a seus grandes movimentos oscilatórios. Na figura, indica-se também a região do pedúnculo caudal.

Já que o deslocamento do peixe é devido a um movimento oscilatório periódico, as forças atuantes sobre ele serão forças instantâneas, variando ao longo do ciclo, na forma de ondas periódicas. Portanto, as forças hidrodinâmicas, $F_i(t)$, serão computadas a partir da integral das forças de pressão e viscosas sobre a superfície do peixe, S , tal que

$$F_i(t) = \int_S (-pn_i + \tau_{ij}n_j) dS, \quad (9.7)$$

onde p é a pressão, τ_{ij} são as componentes do tensor de tensões e n_j as componentes do vetor normal unitário normal à superfície do peixe. Na Eq. 9.7, o subíndice i toma valores $i = x, y$ e z , segundo as três direções do espaço, e a regra da soma aplica-se ao índice j .

Nas direções perpendiculares (y e z) à direção do escoamento (x), as forças instantâneas, originadas sobre um peixe de geometria simétrica (nessas direções), apresentam valores positivos e negativos ao longo de um ciclo, no entanto, a resultante nesse intervalo temporal é nula devido à simetria, $\bar{F}_y = 0$ e $\bar{F}_z = 0$. Da mesma forma, na situação de um peixe nadando em velocidade constante, a resultante das forças na direção do escoamento em um ciclo será também nula, balanceando as forças de arrasto e empuxo. Por outro lado, se a força resultante computada, \bar{F}_x , aparece como não nula, implicará que o peixe experimenta uma aceleração quando $\bar{F}_x > 0$ (avança na direção contrária ao escoamento) ou uma desaceleração quando $\bar{F}_x < 0$ (é arrastado na direção do escoamento). Na primeira situação, a força positiva resultante do balanço é chamada de empuxo ($F_x = T$); e, na segunda, a força negativa resultante é o arrasto ($F_x = D$), atendendo ao critério de sinal apresentado na Fig. 9.7. A nomenclatura T e D (dos termos em inglês, *Thrust* e *Drag*) será utilizada ao longo do trabalho, referindo, as forças de empuxo e arrasto.

Em consequência das simplificações adotadas neste trabalho, a principal força empregada na análise do nado de peixe é a força $F_x(t)$ e será reportada ao longo do texto segundo o coeficiente de força normalizado, C_F , definido como

$$C_F(t) = \frac{F_x(t)}{F_{rig}}, \quad (9.8)$$

onde F_{rig} é a força hidrodinâmica de arrasto sobre o peixe não deformado ou o peixe como corpo rígido.

O conhecimento de $C_F(t)$ e a sua média temporal em um ciclo, \bar{C}_F , tornam-se fundamentais na análise da natação de um peixe, permitindo determinar, por exemplo, a eficiência de nado ou o número de Strohal de equilíbrio, entre outros.

9.3.4 Eficiência propulsiva

O melhor sistema auto-propulsionado será aquele que minimize o ‘consumo de combustível’ para uma determinada velocidade e tamanho [98]. No caso de um peixe, o ‘combustível’ vem na forma de energia metabólica, e a eficiência de conversão dessa energia química em energia mecânica desempenha um papel importante na medida final da eficiência da natação. Neste trabalho, a abordagem do problema é realizada desde a perspectiva hidrodinâmica, quantificando unicamente os esforços mecânicos na interação peixe-escoamento durante o nado, sem considerar características biológicas, como energia muscular ou consumo de oxigênio.

A eficiência é, portanto, definida como a relação entre as potências útil, P_u , e total que o peixe gasta para sua locomoção, P_t , medidas em um intervalo de tempo específico (por exemplo, um ciclo), tal que

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}. \quad (9.9)$$

Baseado nesse conceito, na literatura, definem-se vários tipos de eficiência para caracterizar o desempenho de um corpo autopropulsionado. Todos eles têm em comum que a potência total se quantifica da mesma forma, empregando modos diferentes de expressar a denominada potência útil.

Como indicado na Eq. 9.10, a potência total instantânea $P_t(t)$ vem dada pela integral sobre a superfície do peixe do produto das forças hidrodinâmicas e a velocidade na fronteira, v_i , tal que

$$P_t(t) = \int_A F_i(t) \cdot v_i(t) dA. \quad (9.10)$$

A potência total média em um ciclo de natação calculada a partir da média temporal da potência instantânea, será referida simplesmente como P_t .

A seguir, descrevem-se as principais formas de eficiência empregadas na literatura para caracterizar a natação de um peixe.

- **Eficiência líquida:**

$$\eta_l = \frac{T_l U}{P_t}, \quad (9.11)$$

utiliza a força de empuxo líquida, T_l , para determinar a potência útil do peixe, movimentando-se a velocidade U , tal que $P_l = T_l U$. Na situação de um peixe nadando em velocidade constante, onde as forças de arrasto e empuxo encontram-se balanceadas, o empuxo líquido será nulo, $T_l = 0$, não sendo conveniente o uso deste método para quantificar a eficiência. O empuxo líquido, é de fato, a força resultante na direção do escoamento, compreendendo tanto empuxo como arrasto. Contudo, a eficiência líquida poderia ser empregada em situações nas quais o peixe sofre acelerações, como em manobras evasivas, por exemplo.

- **Eficiência propulsiva:**

$$\eta_p = \frac{T_p U}{P_t}, \quad (9.12)$$

utiliza a força de empuxo propulsiva, T_p , no cálculo da potência útil. Isto é, a força apenas na direção do movimento (contrária ao escoamento), que vem sendo denominada neste trabalho apenas como T .

O principal inconveniente deste método para determinar a eficiência é a dificuldade de computar separadamente as forças de empuxo e arrasto. Na literatura, a força de empuxo estima-se utilizando métodos variados, podendo destacar o método apresentado por Borazjani and Sotiropoulos [21] no qual as forças longitudinais sobre o peixe são separadas em positivas e negativas, diferenciando empuxo de arrasto, ou o método para escoamento invíscido empregado na teoria do corpo alongado (Elongated Body Theory -EBT) de Lighthill [87, 86].

No método de Borazjani and Sotiropoulos [21], as forças longitudinais de empuxo, T , e arrasto, D , são desacopladas. E, portanto, a força longitudinal sobre o peixe é escrita como

$$F_x(t) = T(t) - D(t). \quad (9.13)$$

As forças de empuxo são contrárias ao escoamento e definidas positivas, enquanto o arrasto representa as forças na direção do fluxo e definidas negativas. No que segue, ambas as forças são separadas nas suas componentes de

pressão e cisalhamento, empregando os subíndices p e v , respectivamente, como proposto por Borazjani and Sotiropoulos [21]. A dependência temporal será eliminada no desenvolvimento a seguir para simplificar as equações que seguem.

$$T = T_p + T_v, \quad (9.14)$$

$$T = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\int_A -pn_x dA + \left| \int_A pn_x dA \right|}_{T_p} \right] + \frac{1}{2} \left[\underbrace{\int_A \tau_{xj} n_j dA + \left| \int_A \tau_{xj} n_j dA \right|}_{T_v} \right], \quad (9.15)$$

$$D = D_p + D_v, \quad (9.16)$$

$$D = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\int_A -pn_x dA - \left| \int_A pn_x dA \right|}_{D_p} \right] + \frac{1}{2} \left[\underbrace{\int_A \tau_{xj} n_j dA - \left| \int_A \tau_{xj} n_j dA \right|}_{D_v} \right], \quad (9.17)$$

Em conclusão, a força de empuxo poderá ser desacoplada da força de arrasto permitindo a determinação da eficiência propulsiva proposta na Eq. 9.12.

Por outro lado, outra forma de determinar o empuxo é, segundo o método EBT, em que a força de empuxo, T_{EBT} , e potência requerida, P_{EBT} , são funções apenas da função cinemática de deformação $y(x,t)$ (Eq. 9.5), tal que

$$T_{EBT} = \frac{1}{2} \rho A \overline{\left[\left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 - U^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right]}, \quad (9.18)$$

$$P_{EBT} = \rho U A \overline{\frac{\partial y}{\partial t} \left(\frac{\partial y}{\partial t} + U \frac{\partial y}{\partial x} \right)}, \quad (9.19)$$

sendo A a superfície do peixe e U a velocidade constante de natação. Logo, a eficiência propulsiva baseada no método EBT pode ser escrita como

$$\eta_{EBT} = \frac{T_{EBT}U}{P_{EBT}}. \quad (9.20)$$

- **Eficiência quase-propulsiva:**

$$\eta_{qp} = \frac{F_{rig}U}{P_t}, \quad (9.21)$$

é definida como a razão da potência necessária para rebocar um peixe em linha reta a uma dada velocidade dividida pela potência para se autopropulsionar na mesma velocidade. Este método emprega no seu numerador a resistência do peixe como corpo rígido, F_{rig} , sem deformação, arrastado à velocidade U sem considerar nenhum componente propulsivo.

- **Coefficiente de potência:**

$$C_p = \frac{P_t}{0.5\rho U^3 L^2}, \quad (9.22)$$

medida adimensional da potência gasta (Eq. 9.10), em que ρ é a densidade do fluido e L um comprimento característico do problema, normalmente utilizado o comprimento do peixe, embora, por exemplo Liu et al. [91], empregam a área da nadadeira caudal para avaliar a eficiência de um peixe com diferentes geometrias de cauda.

Maertens et al., no seu trabalho, fazem uma avaliação das diferentes alternativas para medir eficiência de natação para peixes nadando em diferentes modos e números de Reynolds. Os autores concluem que a forma mais apropriada para ser utilizada na análise do desempenho hidrodinâmico da natação de um peixe é a eficiência quase-propulsiva, η_{qp} , já que é a que oferece uma melhor comparação dos modos de natação e é a mais simples de ser computada, por ser mais fácil calcular o arrasto de um peixe parado do que o empuxo que esse realiza durante sua deformação.

Segundo os autores, as outras medidas de eficiência apresentaram-se menos apropriadas por motivos diferentes. A eficiência líquida, por exemplo, não é possível de ser utilizada nas situações avaliadas neste trabalho, em que o peixe se locomove sempre a velocidade constante e, portanto, a força resultante na direção do escoamento será sempre nula. Por outro lado, a eficiência propulsiva tem a desvantagem da dificuldade do desacoplamento de empuxo e arrasto. Além disso, as eficiências líquida e propulsiva, aportam uma medida de desempenho que depende fortemente do modo de nado. Finalmente, as medidas fornecidas pelo coeficiente de potência mostram uma importante dependência do número de Reynolds.

Neste trabalho, o nado dos peixes analisados será avaliado utilizando-se as diferentes medidas, de eficiência hidrodinâmica definidas acima, para, assim, podermos reportar nossas próprias conclusões.

9.3.5 Estrutura da esteira hidrodinâmica

A esteira hidrodinâmica é a região do escoamento a jusante do peixe onde o fluido se vê afetado pelo movimento do nado, como esquematizado na Fig. 9.8. Na literatura, encontram-se numerosos estudos analisando o escoamento na esteira de um peixe, sendo uma grande parte experimentos em laboratório empregando técnicas como Particle Image Velocimetry (PIV) [173, 43, 187, 104]. Porém, nos últimos anos, tornam-se mais frequentes os trabalhos numéricos que se ocupam da análise desse problema devido aos avanços computacionais [21, 31, 80, 97].

Entre os principais motivos pelos quais a esteira é estudada, aparece a relação entre a topologia da mesma com a capacidade de produzir força propulsiva. Outras razões relevantes reportadas na literatura são a importância da esteira na eficiência no nado de cardumes de peixes sob diferentes configurações e as informações que a mesma pode fornecer a predadores, no que se refere à direção e ao tempo que o peixe passou em um determinado local [62].

A locomoção de peixes que nadam sob o modo BCF é devida principalmente ao movimento ondulatório do corpo dos tais peixes que implica a aparição de uma esteira formada por vórtices, normalmente em forma de anéis, gerados a partir do movimento cíclico da cauda. Os vórtices emitidos constituem estruturas coerentes do escoamento e a manipulação deles é uma das formas pelas quais os peixes conseguem melhorar seu desempenho [3]. As nadadeiras laterais também produzem vórtices em forma de anéis durante o nado de acordo com as observações

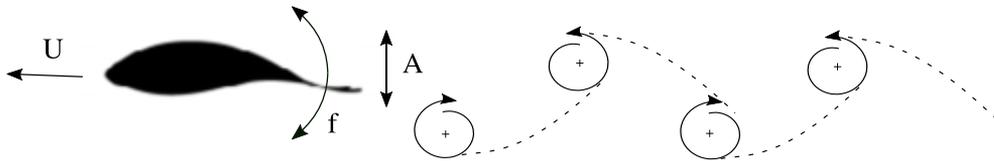


Figura 9.8: Sequência de vórtices na esteira induzida por um peixe com nado característico no modo caranguiforme. Indicando parâmetros fundamentais de nado como velocidade, U , frequência, f , e amplitude máxima da nadadeira caudal, A . Adaptado de Sfakiotakis et al. [136].

reportadas por Tytell [154].

Na natureza, é observado que um peixe que durante o seu nado produz uma força resultante de empuxo, induz uma esteira de vórtices subsequentes de sentidos opostos, como ilustrado nas Figs. 9.8 e 9.9 (c). Neste tipo de esteira, o campo de vorticidade assemelha-se a uma esteira de von Kármán reversa, de forma que os vórtices positivos (no sentido anti-horário, representados com a cor vermelha) são ejetados na parte superior do plano de simetria do movimento do peixe (representado com a linha pontilhada), quando os vórtices negativos (no sentido horário, na cor azul) escoam abaixo do plano de simetria. Nessa configuração, uma região de alta infiltração é observada atrás o peixe, promovendo a geração de empuxo por meio da ejeção de fluido e aumentando a propulsão desse peixe. Esteiras desse tipo são denominadas esteiras do tipo ‘empuxo’.

Por outro lado, existem condições de nado nas quais um peixe induz esteiras com outras configurações, como as apresentadas nas Figs. 9.9 (a) e (b). A esteira da Fig. 9.9 (a), é uma esteira do tipo ‘arrasto’ configurada por vórtices localizados de forma contrária aos da esteira do tipo ‘empuxo’. Assim, os vórtices negativos aparecem sobre a linha de simetria e os positivos na parte inferior, como uma esteira de vórtices de von Kármán tradicional, gerando forças de arrasto dominantes devido à criação de uma região de baixa velocidade na esteira nas proximidades da nadadeira caudal, que faz com que o peixe seja puxado na direção do escoamento. Finalmente, a esteira observada na Fig. 9.9 (b) corresponde à situação na qual o balanço de forças longitudinais no peixe é nulo e, portanto, não experimenta movimento em nenhum dos sentidos, localizando-se os vórtices sobre a linha média.

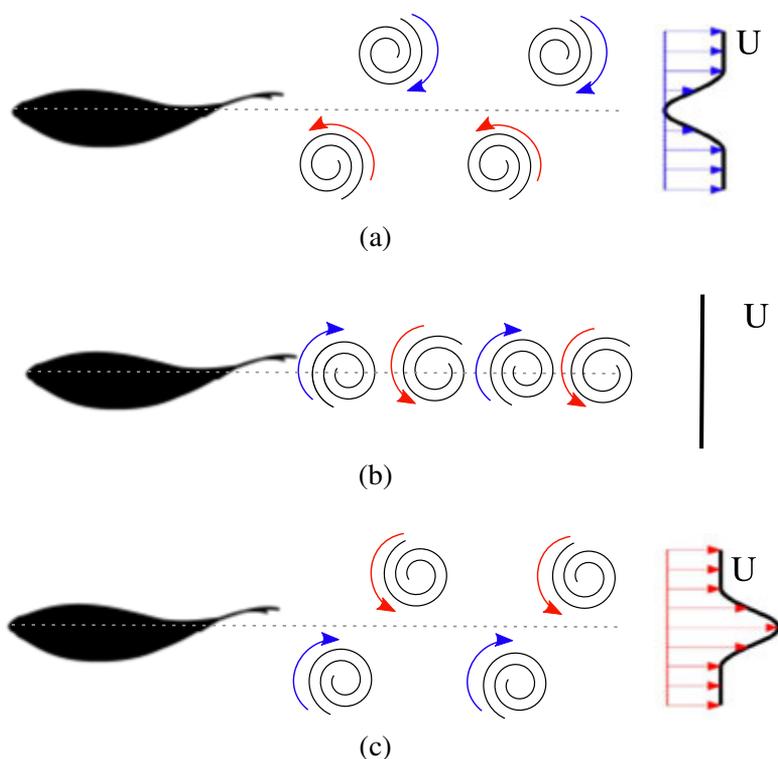


Figura 9.9: (a) Esteira de vórtices de von Kármán tradicional (tipo arrasto), (b) Esteira de vórtices de von Kármán alinhada e (c) Esteira de vórtices de von Kármán reversa (tipo empuxo). Do lado direito das figuras, indica-se o perfil de velocidade média: menor, igual ou maior que a velocidade do escoamento, respectivamente.

Os vórtices emitidos por um peixe, esquematizados na Fig. 9.9, são realmente estruturas tridimensionais com forma de anel. Esses vórtices podem ser organizados formando padrões de uma ou de duas fileiras de anéis, como ilustrado na Fig. 9.10. Em uma estrutura de vórtices tridimensionais conectados formando uma fileira, a ‘cabeça’¹² de um vórtice concatena com a ‘perna’¹² do anterior, como aparece

¹²Neste trabalho, estabeleceram-se os termos ‘cabeça’ e ‘perna’ para denominar as partes do vórtice onde começa e termina a sua formação, respectivamente.

na Fig. 9.10 (a). Nesta configuração, observam-se no plano longitudinal duas fileiras de vórtices simples que originam um fluxo entre os vórtices. Em outras esteiras de peixes, os anéis de vórtices são deslocados lateralmente formando duas fileiras, como na Fig. 9.10 (b), o que no plano resulta em pares de vórtices de diferentes sentidos pelos quais escoo o fluido lateralmente. Configurações deste tipo encontram-se associadas a esteiras de peixes carangiformes com maiores frequências de nado (consequentemente, maiores St) ou também a peixes com cinemáticas próprias anguiliforme.

As esteiras exemplificadas na Fig. 9.10 correspondem a esteiras do tipo ‘empuxo’, onde se origina um ‘jato’ de velocidade entre os vórtices. Porém, elas podem também aparecer, com essas configurações de uma ou de duas fileiras, como sendo esteiras do tipo ‘arrasto’. A diferença reside unicamente no sinal dos vórtices emitidos durante o movimento de cauda ascendente ou descendente. O fluido percorrerá os anéis de dentro para fora, ou vice-versa, segundo sejam emitidos durante o ciclo, o que configurará esteiras de von Kármán reversas ou tradicionais.

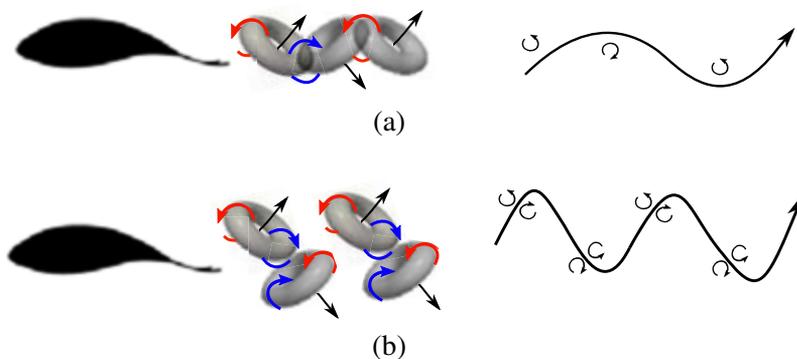


Figura 9.10: Estruturas de vórtices tridimensional visualizadas usando o Q-criteria: (a) Esteira de vórtices de uma fileira; (b) Esteira de vórtices de duas fileiras;

Como já foi mencionado anteriormente, é observado na natureza e constatado na literatura que peixes nadando em escoamentos turbulentos apresentam números de Strouhal ótimos ou de equilíbrio em torno a 0.3. Portanto, é de esperar que, a partir desses valores de St , as esteiras, nessas situações de regimes turbulentos, sejam identificadas como esteiras do tipo ‘empuxo’, permitindo a propulsão dos

peixes apresentando configurações de uma ou duas fileiras segundo o caso.

Finalmente, é importante ressaltar que os trabalhos numéricos, cada vez mais frequentes na literatura devidos aos avanços computacionais, têm trazido grande conhecimento no que se refere às esteiras de peixes, permitindo analisar situações menos frequentes na natureza, e, em alguns casos impossíveis, mas que, podem ajudar no entendimento do comportamento de alguns parâmetros do nado de um peixe e, assim, extrapolar esses conhecimentos a veículos aquáticos [187, 89, 9].

9.4 Hidrodinâmica de turbinas de eixo horizontal

Turbinas livres de eixo horizontal (eólicas e hidrocínéticas) são dispositivos compostos de um rotor de pás aerodinâmicas e uma nacelle com os equipamentos necessários à conversão de potência mecânica no eixo do rotor em energia elétrica. Idealmente, a turbina é posicionada perpendicularmente ao fluxo do escoamento (que pode ser atmosférico, um rio ou correntes marítimas). Na Fig. 9.11, ilustra-se uma turbina hidrocínética de eixo horizontal apresentando seus principais componentes.

Os principais parâmetros do estudo hidrodinâmico de turbinas de eixo horizontal são o coeficiente de potência (C_p) e a razão de velocidade de ponta de pá (TSR ¹³). O coeficiente de potência é definido como

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AU_\infty^3}, \quad (9.23)$$

em que P é a potência mecânica extraída pela turbina [W], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], A a área varrida pelo rotor [m^2] e U_∞ é a velocidade do escoamento fluido não perturbado [m/s]. A razão de velocidade de ponta de pá é dada por

$$TSR = \frac{\Omega R}{U_\infty}, \quad (9.24)$$

onde Ω é a velocidade angular e R o raio do rotor.

A hidrodinâmica de turbinas tem sido estudada ao longo das últimas décadas a partir de estudos analíticos, experimentais e computacionais. Isso facilita o

¹³ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *Tip Speed Ratio*.

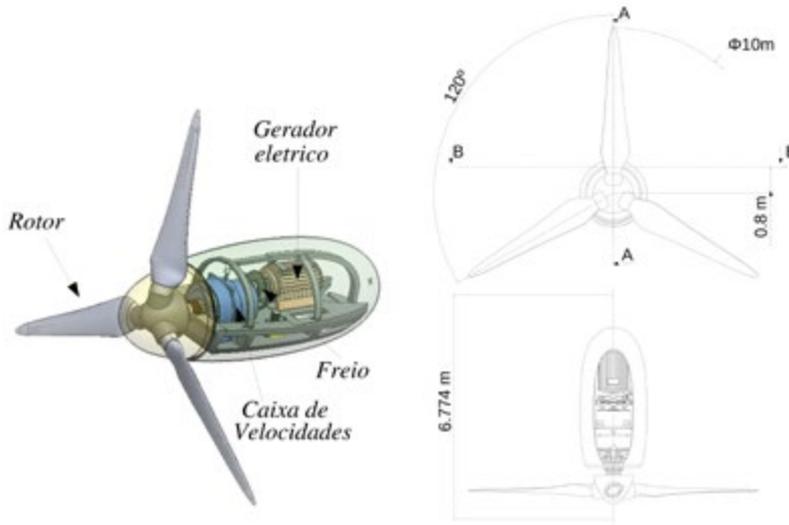


Figura 9.11: Vista em perspectiva de uma turbina hidrocínética ilustrando alguns detalhes dos componentes internos do sistema de conversão, e vistas frontal e superior da mesma turbina exibindo as principais dimensões da máquina. Adaptado de [95].

entendimento do comportamento do escoamento nas proximidades do rotor da turbina e na esteira, região a jusante da turbina caracterizada pela diminuição na pressão e velocidade do fluido após atravessar tal turbina.

Os esforços neste trabalho não são direcionados a avaliar o desempenho de uma máquina hidrocínética, mas sim a caracterizar e analisar sua esteira hidrodinâmica. Para, posteriormente, estudar o comportamento de um peixe nadando em um escoamento perturbado dessa natureza.

9.4.1 Esteira hidrodinâmica de uma turbina de eixo horizontal

A esteira é a região de escoamento localizada a jusante do turbina consequência da interação do escoamentos e as pás do rotor. A esteira é principalmente caracterizada pelo déficit de velocidade e pressão, devido à extração de energia, e pelos altos

níveis de turbulência.

A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura no âmbito de esteiras de turbinas são realizados para esteiras de turbinas eólicas. As principais razões são a consolidação da tecnologia eólica e a implantação de parques eólicos. Inúmeros estudos sobre esteiras surgiram a partir da criação de fazendas eólicas devido ao fato do escoamento na esteira de uma turbina é o fluxo que chega nas subseqüentes máquinas, afetando a produção elétrica total do parque.

Topologicamente, as esteiras de máquinas eólicas e hidrocinéticas são similares. Desta forma, a análise de esteira para uma turbina hidrocinética é realizada fundamentalmente a partir de estudos em turbinas eólicas. Alguns artigos concernentes ao escoamento em turbinas hidrocinéticas podem ser encontrados na literatura, porém aparecem em menor número do que os referentes a máquinas eólicas [2, 40, 142, 179, 112, 175, 95, 105].

A esteira de uma turbina axial de eixo horizontal é descrita segundo uma seqüência de fenômenos bem definida. Comumente a esteira é dividida em duas regiões facilmente diferenciáveis, denominadas esteiras próxima e distante [30], como pode ser observado na Fig. 9.12.

Essas regiões são definidas pelo comportamento do escoamento, observando principalmente as variáveis pressão, velocidade, energia cinética turbulenta e vorticidade. Uma esteira é caracterizada pelo surgimento de estruturas de vórtices próprios que determinam sua forma e hidrodinâmica e também são responsáveis pelo transporte de grande parte da energia cinética turbulenta [130]. Três tipos de estruturas tridimensionais são identificadas na esteira de uma turbina: (1) vórtices de ponta de pá, que são filamentos helicoidais de origem da interação hidrodinâmica na ponta de cada pá do rotor; (2) vórtices de nacele, que surgem devido à interação das raízes das pás com cubo do rotor e com o corpo da nacele que contém o trem de potência; (3) quebra das estruturas coerentes, caracterizando, assim, o começo da região da esteira distante [30]. Na Fig. 9.12, podem ser observadas de forma clara todas essas estruturas vorticais tridimensionais.

A região da esteira próxima é definida como a região logo após o rotor que se estende aproximadamente de 3 a 4 vezes o diâmetro da turbina [160]. A forma da esteira próxima é determinada fundamentalmente pela geometria da turbina e a hidrodinâmica desta turbina. O fim da esteira próxima é estabelecido pela recuperação da pressão (com a pressão da corrente livre), já que, após atravessar o

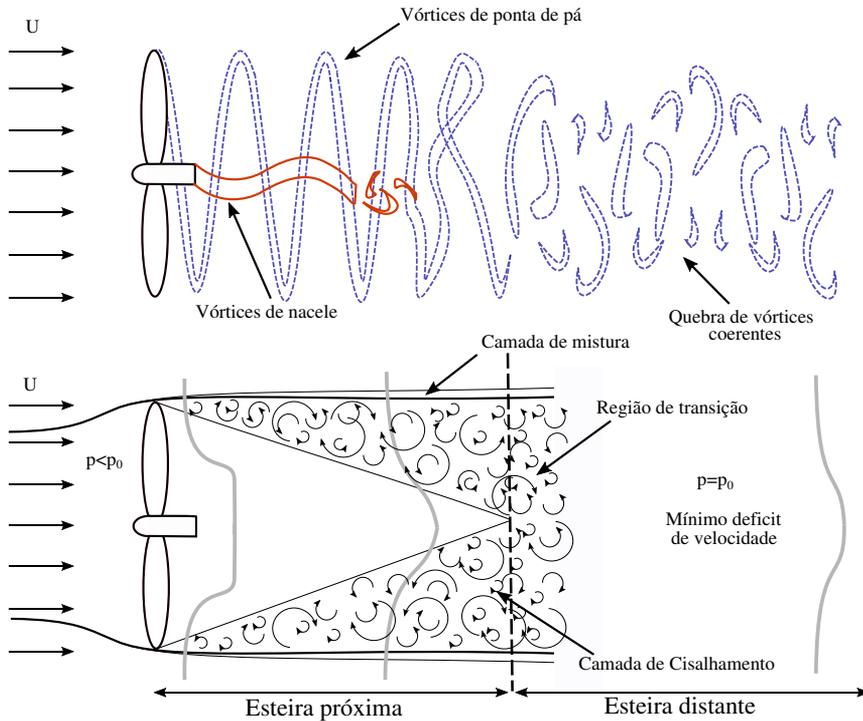


Figura 9.12: Regiões da esteira hidrodinâmica. Esteira próxima: máximo déficit de velocidade e estruturas de vórtices coerentes, como os vórtices da ponta de pá e da nacele. Esteira distante: quebra dos vórtices, recuperação da pressão e mínimo déficit de velocidade.

rotor, a pressão do fluido cai subitamente.

Os perfis de velocidade dentro e fora da esteira próxima são bastante diferentes, como observado na Fig. 9.12. Isso porque é nesta região que ocorre o máximo déficit na velocidade. O elevado gradiente de velocidade resulta no surgimento de uma camada cisalhante onde são formadas estruturas turbulentas devido ao processo de mistura entre o escoamento fora e dentro da esteira. Na esteira próxima outras estruturas turbulentas são visualizadas, como os vórtices de raiz e de ponta de pá. Sendo o relacionado a este último o principal responsável pelo processo de mistura

entre o escoamento livre e a região da esteira [144].

O final da esteira próxima é definido, além da recuperação de pressão, pelo colapso das estruturas de vórtices que resulta na diminuição da intensidade turbulenta após ter atingido seu ponto máximo [160].

A outra região bem caracterizada dentro da esteira é a denominada esteira distante, usualmente localizada a partir de 5 diâmetros do rotor, podendo ir até 20 diâmetros [36]. Alguns autores denominam a região entre a esteira próxima e distante como esteira intermediária ou de transição [13].

O escoamento na esteira distante apresenta menor influência do rotor na configuração do escoamento devido ao afastamento da turbina. Nesta região, predominam os fenômenos de convecção e difusão turbulentos. Como no final da esteira próxima os vórtices de raiz e ponta de pá começam a colapsar um com o outro, são formadas estruturas menores que se difundem ao longo da esteira distante [30].

Na esteira distante, a pressão é constante e igual à pressão do fluxo livre e a velocidade na linha central vai aumentando até se igualar com a velocidade em corrente livre, devido à difusão radial da mistura turbulenta, no caso de um escoamento atmosférico.

A topologia hidrodinâmica da esteira deve apresentar um nível de descrição espacial-temporal adequado, no sentido de obter-se bons resultados, tanto para o cálculo de desempenho (torque no rotor) como para caracterização do escoamento a jusante da máquina. No problema abordado neste trabalho, um bom entendimento e a caracterização da esteira são fundamentais para conseguir avaliar a influência que um escoamento perturbado dessa natureza tem sobre um peixe aproximando-se em direção contrária ao escoamento.

9.4.2 Métodos de descrição da esteira

Propõe-se a usar simulação numérica de escoamentos turbulentos para descrever a esteira de turbinas hidrocinéticas. As equações de Navier-Stokes são normalmente resolvidas no domínio fluido empregando modelagens do escoamento que consideram uma descrição estatística do fluido, como os modelos tipo URANS e LES.

Essas simulações CFD carregam um elevado nível de complexidade ao considerar efeitos viscosos e fenômenos de turbulência, além de precisar de uma malha

numérica altamente refinada, especialmente nas regiões da superfície do rotor, camada limite e esteira. Ademais, as simulações de turbinas envolvem algoritmos para movimentação da malha regidos pelo movimento rotativo do rotor.

Para evitar alguma dessas dificuldades, a análise numérica de um rotor pode ser realizada utilizando métodos simplificados. A seguir, apresentam-se algumas das abordagens mais empregadas para resolver escoamentos em torno a rotores, sendo que algumas fornecem melhores resultados no cálculo de forças hidrodinâmicas, como o método de elementos de pá (habitualmente referidos pelas suas siglas em inglês como método BEM⁸), e outros na caracterização do escoamento na região da esteira, como os modelos de esteira de vórtices e os modelos atuadores.

- **Método de BEM:** quando o objetivo é avaliar o desempenho da máquina, teorias baseadas no método BEM são muito utilizadas para analisar o comportamento hidrodinâmico do rotor. O método BEM é baseado no conceito de disco atuador, um modelo teórico simplificado que trata o rotor como um disco permeável que provoca uma queda abrupta de pressão, descrevendo o processo de conversão de energia de uma turbina de eixo horizontal em um escoamento unidimensional, invíscido e permanente. Glauert [57] estendeu a teoria do disco atuador, propondo o balanço dos momentos linear e angular em um número finito de seções da pá, desconsiderando as interações entre elas.

Para sua implementação, o método BEM precisa primeiramente das curvas polares do aerofólio, para depois discretizar radialmente as pás em seções, definidas por sua distribuição de corda e ângulo de torção. Finalmente, calcula a potência do rotor mediante um processo iterativo, em que computa, a cada iteração, o triângulo de velocidades e as forças hidrodinâmicas [63].

Algumas correções empíricas ou semiempíricas como a correção de ponta e raiz da pá, correções de estol dinâmico, influência da torre, etc. foram introduzidas nos métodos BEM para aumentar a faixa de aplicação, tornando eles uma ferramenta facilmente implementável e rápida desde o ponto de vista computacional. Porém, o BEM é aceitável apenas para uma faixa limitada de condições de operação e não consegue fornecer informações detalhadas do escoamento o que impossibilita seu uso para descrever esteiras hidrodinâmicas. Em contrapartida, até hoje, são a principal ferramenta para

desenho de rotores e predições do desempenho destes rotores.

- **Modelos de vorticidade:** os modelos de vorticidade são baseados na aproximação das equações de Navier-Stokes para um escoamento potencial, invíscido e irrotacional. Esses métodos encontram-se entre os modelos BEM e CFD, proporcionando uma solução mais econômica do ponto de vista computacional do que os modelos CFD, porém, válida para uma ampla faixa de condições de operação da turbina com maior informação da física do escoamento do que no modelo BEM [1]. Esses modelos permitem calcular não só os esforços sobre as pás como também o escoamento em torno ao rotor e na esteira.

Os modelos de vorticidade determinam as velocidades induzidas no rotor geradas a partir dos vórtices na esteira, usando a lei de Biot-Savart [42]. Nestes métodos, os vórtices são modelados por partículas ou filamentos movimentando-se livremente, baseando-se no campo de velocidade local, métodos da vorticidade da esteira livre, ou de forma restrita pela imposição de uma geometria de esteira, conhecido como método de vorticidade de esteira prescrita ou rígida. Este último método requer menores requisitos computacionais do que o método da esteira livre, porém, não é capaz de prever com a mesma precisão a geometria da esteira e os esforços sobre as pás devido a suposições menos restritivas.

- **Modelos atuadores:** outros métodos simplificados utilizados para a simulação de turbinas são os denominados modelos atuadores, que se apresentam como uma combinação dos métodos BEM e CFD, com a principal característica de que não precisam resolver o escoamento sobre a superfície da máquina, porque ela é modelada de forma simplificada. Nas técnicas atuadoras, as forças hidrodinâmicas atuantes sobre o rotor são calculadas a partir da teoria BEM e projetadas sobre o escoamento. Desta forma, evita-se computar o fluido na camada limite da superfície do rotor, reduzindo significativamente o número de nós na malha numérica e o custo computacional. O método CFD emprega-se para resolver o escoamento no domínio uma vez que as forças hidrodinâmicas projetadas são inseridas nas equações de Navier-Stokes como forças de campo.

Os principais modelos atuadores encontrados na literatura são, o modelo do

disco atuador ADM, e o modelo da linha atuadora ALM. Na técnica ADM, as forças são integradas no disco que configura o rotor e projetadas ao fluido. Contudo, não consegue reproduzir as estruturas de vórtices em volta das pás nem resolver os vórtices de ponta de pá. Já o modelo ALM, modela o rotor como uma série de pontos ao longo do eixo da pá, experimentando um movimento rotativo. Cada ponto faz referência a uma seção da pá onde as forças hidrodinâmicas são calculadas baseando-se nas velocidades locais em cada ponto.

Os métodos ADM e ALM combinam a resolução do fluxo turbulento tridimensional a partir das equações de Navier-Stokes com o cálculo BEM das forças hidrodinâmicas, projetando-as sobre o fluido como forças de campo. Na literatura, é comum encontrar estudos numéricos que combinam algum modelo atuador com métodos de resolução de turbulência URANS ou LES, denominados ADM/URANS, ALM/URANS, ADM/LES e ALM/LES.

Na Fig. 9.13, são apresentadas visualizações das esteiras de turbinas de eixo horizontal calculadas utilizando diferentes métodos de resolução do escoamento. Desse modo, observam-se as diferenças obtidas empregando os métodos simplificados de vorticidade e da linha atuadora, Figs. 9.13 (a) e (b), respectivamente, e a resolução do problema completo (escoamento turbulento com geometria do rotor e malha móvel) na Fig. 9.13 (c).

Dos métodos simplificados apresentados, o método da linha atuadora apresenta claramente todas as estruturas tridimensionais definidas em uma esteira clássica de turbina axial de eixo horizontal, como os já mencionados vórtices de ponta de pá e de nacele, assim como a quebra de estruturas na esteira distante. No que tange ao estudo numérico de interação hidrodinâmica entre turbina e peixe o objetivo é caracterizar a esteira hidrodinâmica de uma turbina para analisar o nado do peixe sob um escoamento dessa natureza. Portanto, o modelo da linha atuadora será empregado, já que fornece excelentes resultados na região da esteira mediante uma abordagem simplificada, implicando menores requisitos de malha e, conseqüentemente menor custo computacional.

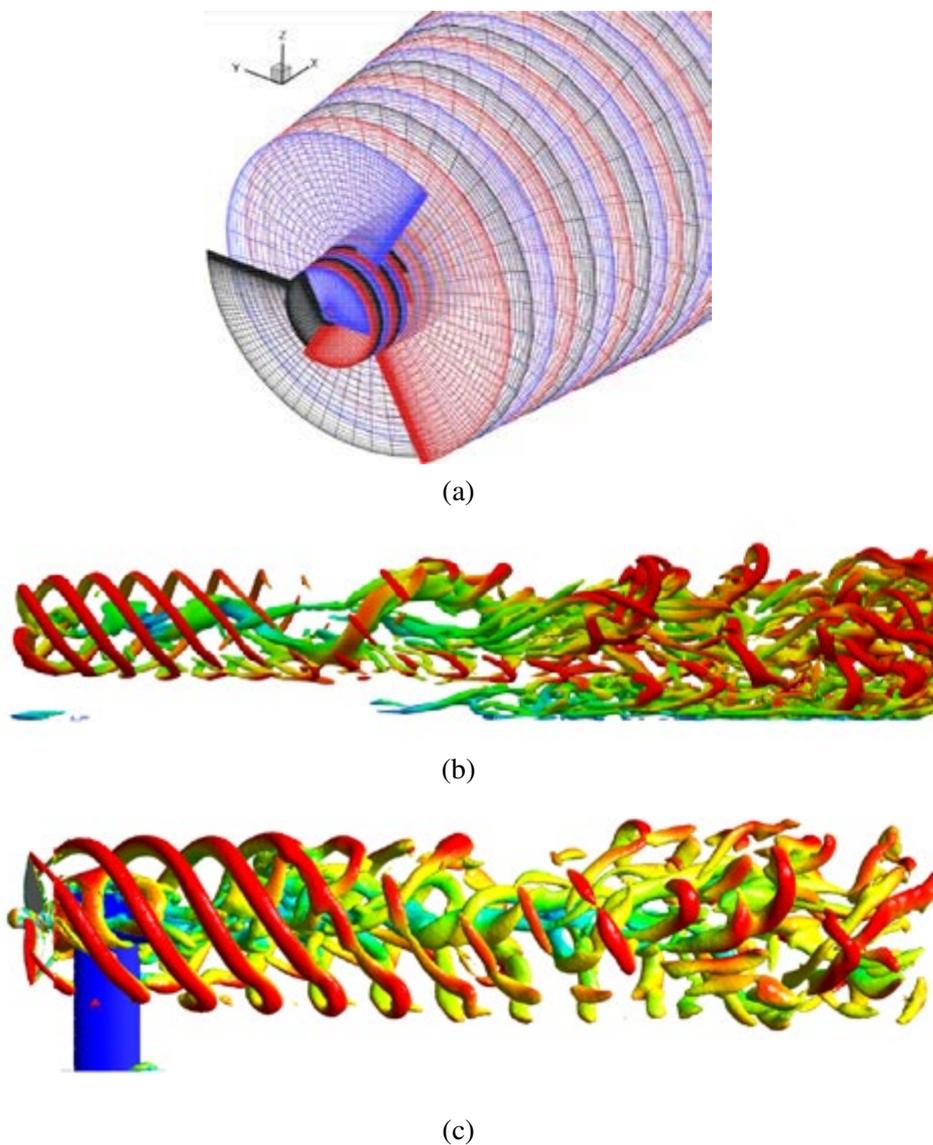


Figura 9.13: Visualizações do escoamento na esteira de uma turbina hidrocinética utilizando diferentes metodologias numéricas: (a) Modelo de vorticidade de esteira livre [127]; (b) Modelo da linha atuadora e (c) Equações de Navier-Stokes com geometria do rotor [105].

9.4.3 Modelo da linha atuadora

Neste ponto, apresenta-se o modelo da linha atuadora de modo detalhado empregado no cálculo do escoamento em problemas de rotores. Como mencionado anteriormente, o modelo simplificado permite caracterizar de forma apropriada a esteira hidrodinâmica induzida por uma turbina, com menores requisitos computacionais, facilitando as subsequentes simulações onde se avaliará o comportamento de um peixe nadando a justante dela.

A principal característica do ALM é a modelagem simplificada das pás do rotor, que são tratadas como um conjunto de ‘pontos’ ou de ‘elementos’ ao longo do eixo da pá, como no esquema da Fig. 9.14. Nesta técnica, não se emprega mais o rotor como superfície, trazendo vantagens como menores custos computacionais ou a possibilidade de malhas estruturadas, apropriadas em simulações do tipo LES.

O método ALM combina os métodos BEM e CFD de forma que as forças hidrodinâmicas sobre as pás, calculadas pelo método BEM, são integradas nas equações de Navier-Stokes como as forças de campo equivalentes que as pás realizam sobre o fluido. No que segue, são apresentadas as equações do método ALM, que permitirão computar dita força.

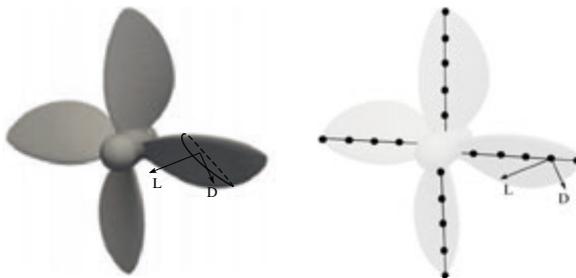


Figura 9.14: Esquema de discretização de uma pá segundo o modelo da linha atuadora, a partir da geometria do rotor. Ilustram-se as forças hidrodinâmicas de arrasto e sustentação, D e L , referidas a uma seção qualquer da pá.

Primeiramente, no método ALM as pás são discretizadas radialmente em uma série de pontos, cada um deles representando uma seção da pá e definidos pelo correspondente ângulo de cambagem e corda. Mediante a teoria BEM, as forças

hidrodinâmicas sobre cada um desses pontos são calculadas a partir das curvas de arrasto e sustentação do aerofólio, $C_D = C_D(\alpha, Re)$ e $C_L = C_L(\alpha, Re)$, respectivamente, medidas experimentalmente ou a partir de simulações bidimensionais de aerofólios.

Os valores das curvas polares obtidos nas simulações 2D de aerofólios devem ser corrigidos para considerar efeitos 3D [145, 138], como os efeitos de rotação, que durante o descolamento, limitam o crescimento da camada limite, o que resulta em um aumento da sustentação se comparado com as características 2D. Existem várias formas de realizar essa correção, neste trabalho foi escolhido o método proposto por [138], que será apresentado mais adiante.

Uma vez obtidos os coeficientes de arrasto e sustentação, C_D e C_L , as forças de arrasto e sustentação sobre as pás por unidade de comprimento são definidas como

$$f_D = \frac{1}{2} C_D(\alpha) \rho U_{rel}^2 c, \quad (9.25)$$

$$f_L = \frac{1}{2} C_L(\alpha) \rho U_{rel}^2 c, \quad (9.26)$$

onde c é o comprimento de corda, U_{rel} a velocidade local relativa às pás e α o ângulo de ataque. Portanto, o vetor força total por unidade de comprimento, para cada elemento da pá, tem a forma

$$\mathbf{f}_{2d} = f_L \mathbf{e}_L + f_D \mathbf{e}_D, \quad (9.27)$$

sendo \mathbf{e}_L e \mathbf{e}_D vetores unitários nas direções de arrasto e sustentação, respectivamente. Os termos em negrito referem-se a magnitudes vectoriais.

Para cada posição radial, em função do ângulo de ataque, se terão valores específicos para as velocidades relativas e os coeficientes de arrasto e sustentação. A velocidade relativa é calculada como

$$U_{rel} = \sqrt{(U_z^2 + (\Omega r - U_\theta)^2)}, \quad (9.28)$$

onde U_z e U_θ as velocidades axial e tangencial, respectivamente, Ω a velocidade angular e r o valor do raio variando ao longo da pá. Por outro lado, o ângulo de ataque é expresso como

$$\alpha = \Phi - \gamma, \quad (9.29)$$

com Φ sendo o ângulo entre a velocidade relativa e o plano do rotor e γ o ângulo de cambagem¹⁴ local, como observado na Fig. 9.15.

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{U_z}{\Omega r - U_\theta} \right). \quad (9.30)$$

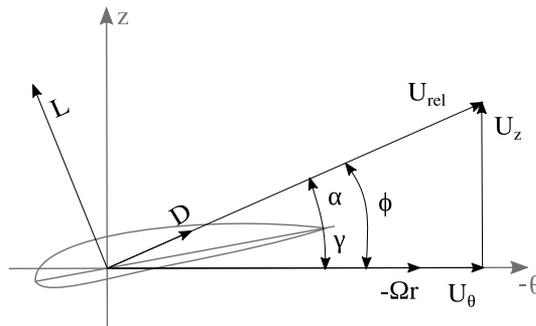


Figura 9.15: Seção transversal do aerofólio que ilustra as forças hidrodinâmicas de sustentação, L , e arrasto, D , e o triângulo de velocidade.

As forças computadas sobre cada elemento da pá ($2D$), \mathbf{f}_{2d} , são projetadas sobre o campo ($3D$), f_i , de forma suave usando a função de regularização de kernel, η_ϵ , uma função de projeção gaussiana $3D$. Desse modo, a partir do produto de convolução entre a força \mathbf{f}_{2d} e a função de regularização η_ϵ , o campo de força sobre os pontos da malha é computado a partir da Eq. 9.31, para posteriormente ser inserido nas equações de Navier-Stokes, tal que

¹⁴Tradução livre para o português do termo inglês *pitch*.

$$f_i(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^B \int_0^R F \mathbf{f}_{2D}(r) \cdot \mathbf{e}_i \eta_\varepsilon(|\mathbf{x} - r\mathbf{e}_k|) dr, \quad (9.31)$$

onde \mathbf{e}_k é o vetor unitário na direção da pá k , $|\mathbf{x} - r\mathbf{e}_k|$ é a distância entre o ponto da malha e o ponto na linha atuadora e η_ε a função regularização definida como

$$\eta_\varepsilon(r) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp[-(r/\varepsilon)^2]. \quad (9.32)$$

O parâmetro ε representa o alcance da função de regularização e r a distancia entre o ponto medido e o ponto de força inicial no rotor.

Por último, é importante ressaltar que a função F na Eq. 9.31 é o fator de correção para efeitos na ponta de pá desenvolvido por [138], tal que

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-g \frac{B(R-r)}{2r \sin \Phi} \right) \right], \quad (9.33)$$

o parâmetro B refere-se ao número de pás e o coeficiente g depende geralmente do número de pás, do TSR, da distribuição da corda, do ângulo de cambagem, etc. Por simplicidade, Shen et al. [138] estabeleceram g para ser unicamente dependente do número de pás e do TSR, assumindo a forma

$$g = \exp(-c_1 (B\Omega R/U_\infty - c_2)), \quad (9.34)$$

com c_1 e c_2 coeficientes estimados experimentalmente, tal que

$$g = \exp(-0.125 (B\Omega R/U_\infty - 21)) + 0.1. \quad (9.35)$$

Para a implementação numérica deste método é preciso fornecer as informações sobre geometria da pá e as curvas polares do aerofólio. Assim, também é necessário definir velocidade do escoamento não perturbado, velocidade de rotação da turbina,

número de elementos ou pontos nos quais as pás serão divididas e o parâmetro de alcance de força ε .

O modelo, para cada ponto da linha atuadora, calcula o ângulo de ataque da velocidade na seção da pá correspondente, devido ao conhecimento do campo fluido computado mediante as equações de Navier-Stokes. Posteriormente, o método BEM é aplicado para a caracterização das forças hidrodinâmicas que serão projetadas no fluido utilizando a função de regularização, e recalculado em cada passo de tempo.

A utilização de um método simplificado, para a resolução numérica do escoamento induzido por uma rotor hidrocínético, apresenta numerosas vantagens em questões computacionais, como foi mencionado previamente. Neste caso específico, no qual as simulações peixe-turbina são combinadas, o emprego do método ALM resulta especialmente satisfatório, já que evita a movimentação da malha na região do rotor, precisando apenas deformar o local em volta do peixe. Isso traz simplificações numéricas importantes ao acoplamento peixe-turbina, além da economia computacional relacionada com o fato de não ter que malhar a superfície do rotor nem resolver o escoamento sobre a turbina, bem como evita os fenômenos de camada limite mais complexos de modelar. Tudo isso será descrito detalhadamente no próximo capítulo, que se ocupa de reportar a metodologia numérica construída durante o trabalho.

9.5 Resultados

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos durante o decorrer do projeto em tudo o que é referente a impactos ambientais associados a peixes interagindo com turbinas hidrocínéticas.

Em primeiro lugar, na seção 9.5.1 apresentam-se resultados obtidos a partir de simulações numéricas computacionais em que se avalia a biomecânica de dois tipos de peixes (atum e lambari), investigando-se a cinemática dos peixes, as forças de propulsão destes, a eficiência de nado e a esteira de vórtice induzida durante o nado. Na seção 9.5.2, mostram-se as simulações numéricas realizadas para uma turbina hidrocínética de eixo horizontal e 4 pás. Foi necessária a realização deste estudo prévio, assim como o apresentado na seção 9.5.1, para poder realizar o estudo acoplado de turbina-peixe mediante simulações computacionais. Sem a criação de metodologias próprias para o estudo numérico do nado de um peixe e de uma

turbina hidrocínética, respectivamente, não seria possível realizar as simulações conjuntas. Destaca-se, ademais, que o estudo da turbina foi realizado empregando um método simplificado e inovador conhecido como método da linha atuadora, o que também aporta originalidade e relevância para o estudo numérico.

Já na seção 9.5.3, estão recolhidos os resultados do conjunto turbina-peixe, assim como a discussão sobre a admissibilidade de nado dos peixes na esteira da turbina hidrocínética. Nesse sentido, são avaliados parâmetros turbulentos do escoamento, tanto de forma quantitativa como qualitativa, extraindo algumas conclusões sobre os impactos que essa tecnologia poderia causar sobre os peixes que nadam no seu entorno. O estudo conceitual de peixes nadando nas vizinhanças de turbinas hidrocínéticas é um estudo inédito tal e como tem sido realizado neste projeto, já que abrange simulações numéricas computacionais nas quais o escoamento turbulento é modelado e apresenta estruturas tridimensionais. Deste estudo, tem-se extraído as principais conclusões sobre a admissibilidade dos peixes nadarem na esteira de turbinas hidrocínéticas.

Finalmente, na seção 9.5.4 apresentam-se os diferentes estudos realizados no laboratório. Por um lado, foi investigada a cinemática de um peixe nadando em um tanque de água mediante técnicas experimentais de velocimetria. Ademais, foi concebido e construído pela equipe de experimentalistas um robô-peixe mecatrônico para a realização de ensaios em um túnel de água.

9.5.1 Estudo numérico de peixes nadando em escoamentos não perturbados

O estudo do nado de peixes em escoamento não perturbado foi realizado variando de forma sistemática os parâmetros Re e St para analisar diferentes cenários. O número de Reynolds foi modificado mudando a viscosidade cinemática do fluido, enquanto a variação do número de Strouhal foi realizada mediante a frequência do movimento de nado. Desta forma, conseguiu-se simular peixes nadando em várias situações cinemáticas e de escoamento, investigando as forças hidrodinâmicas atuantes, as eficiências na natação, a relação do par $\{Re-St\}$ e as características da esteira. Ademais, estabeleceram-se comparações entre os peixes analisados neste estudo, assim como com os resultados reportados na literatura.

Forças hidrodinâmicas instantâneas

Em primeiro lugar, apresenta-se a análise das forças hidrodinâmicas atuantes sobre a superfície dos peixes, atum e lambari. Todas elas expressas na forma do coeficiente adimensional $C_F(t)$ definido na Eq. 9.8, que normaliza o valor da força na direção do escoamento ($F_x(t)$) em relação ao caso do peixe estático, como um corpo rígido ($F_{rígido}$).

As Figs. 9.16 e 9.17 ilustram os coeficientes de força instantâneos em dois ciclos adimensionais t/T , sendo T o período em questão. Cada uma das figuras faz referência a um número de Reynolds específico no qual foram analisadas diversas configurações cinemáticas, caracterizadas pelo St . Ressalta-se que as cores utilizadas para apresentar as forças foram as mesmas, porém, os valores de Strouhal nem sempre são iguais. Em cada caso, o maior St foi apresentado na cor negra e os sucessivos valores, em ordem decrescente, foram azul, vermelho e preto descontínuo. Os St apresentados foram os mais significativos para cada Re , permitindo avaliar situações nas quais o peixe experimenta forças de arrasto a empuxo.

Para facilitar o entendimento das figuras, foram destacadas as retas $C_F(t) = 0$ e $C_F(t) = -1$. A primeira delas, $C_F(t) = 0$, ajuda a visualizar em quais situações e instantes do ciclo o peixe experimenta forças do tipo empuxo ($C_F(t) > 0$) ou arrasto ($C_F(t) < 0$). A segunda, $C_F(t) = -1$, faz referência à força do peixe como um corpo rígido.

Observa-se nas figuras como a dinâmica do nado dos peixes é caracterizada por dois picos do coeficiente de força por ciclo devido ao batimento da nadadeira caudal. Em todos os casos, a amplitude do sinal do coeficiente de força, assim como sua média temporal, crescem monotonicamente conforme o número de Strouhal aumenta, indicando que frequências de nado mais altas estão relacionadas a maiores empuxos. De fato, movimentos mais rápidos da nadadeira caudal aumentam a emissão de fluido a jusante, levando ao mecanismo básico de natação dos peixes carangiformes, conforme relatado por Videler and Wardle [162] e Li et al. [80].

Constata-se também que para cada Re existe um valor de St próprio para o qual o peixe começa a experimentar algum tipo de propulsão, denominado Strouhal de equilíbrio, St^* , que será estimado na próxima seção. Ademais, em uma análise qualitativa das Figs. 9.16 e 9.17, verifica-se que em todos os casos os valores de frequência de batimento para que um peixe experimente algum tipo de empuxo

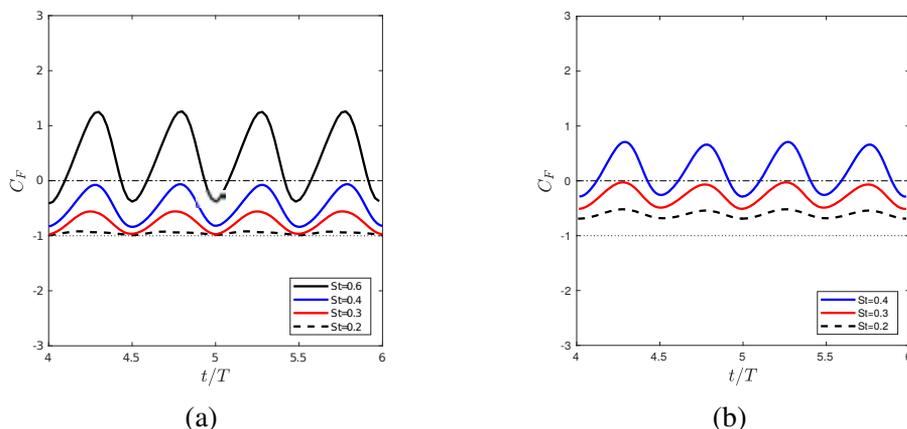
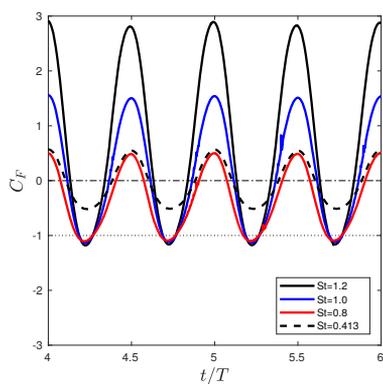


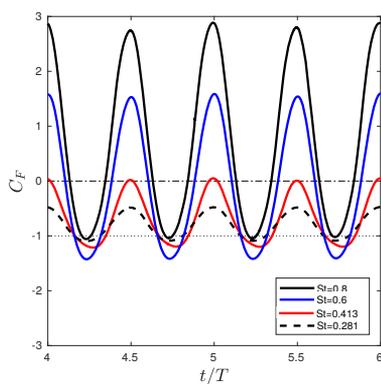
Figura 9.16: Evolução temporal do coeficiente de força C_F do lambari para os números Reynolds: (a) $Re = 9 \times 10^3$; (b) $Re = 9 \times 10^4$.

são muito maiores conforme o Re diminui, já que escoamentos com Re menores apresentam maiores forças viscosas que fazem com que o arrasto de superfície nos peixes cresça devido ao efeito da fricção.

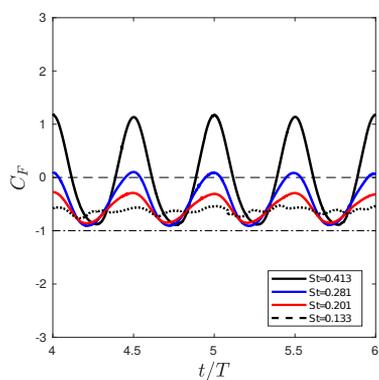
Comparando os dois peixes, o lambari (peixe menor) produz amplitudes de coeficiente de força menores, exibindo um estilo de natação mais suave com picos mais atenuados durante o ciclo. Como mencionado, a linha reta pontilhada preta nos gráficos marca o coeficiente de força relacionado à força de arrasto pura quando o peixe está na posição neutra estável $C_F(t) = -1$. Observe que, o lambari, $C_F(t) > -1$ para cada St e durante todo o ciclo. Ao contrário do que ocorre para o atum, em que $C_F(t) < -1$ em alguns intervalos para cada St no estudo. Este fato, aliado à maior amplitude do sinal temporal do coeficiente de força do atum, pode estar associado a um padrão de movimento menos eficiente em comparação ao lambari.



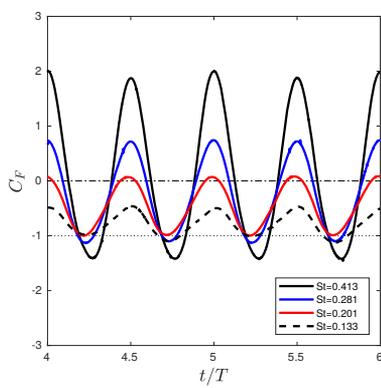
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9.17: Evolução temporal do coeficiente de força C_F do atum para os números Reynolds: (a) $Re = 7 \times 10^2$; (b) $Re = 7 \times 10^3$; (c) $Re = 7 \times 10^4$; (d) $Re = 7 \times 10^5$.

Condição de equilíbrio

Na análise de um regime específico de nado, caracterizado pelo conjunto de parâmetros $\{Re-St\}$, é fundamental verificar se o peixe, sob essas condições, consegue experimentar um movimento propulsivo. Para isso, é preciso calcular a média temporal (\bar{C}_F) dos coeficientes das forças instantâneas apresentadas anteriormente. Assim, quando $\bar{C}_F > 0$ a força resultante aparece na direção contrária ao escoamento (tipo empuxo) experimentando o peixe uma aceleração. Em contraposição, o valor do coeficiente de força negativo, $\bar{C}_F < 0$, indica resultante das forças na direção do escoamento (tipo arrasto) desacelerando o peixe. Finalmente, quando o coeficiente de força médio é nulo o peixe nada em equilíbrio dinâmico, balanceando as forças de arrasto e empuxo.

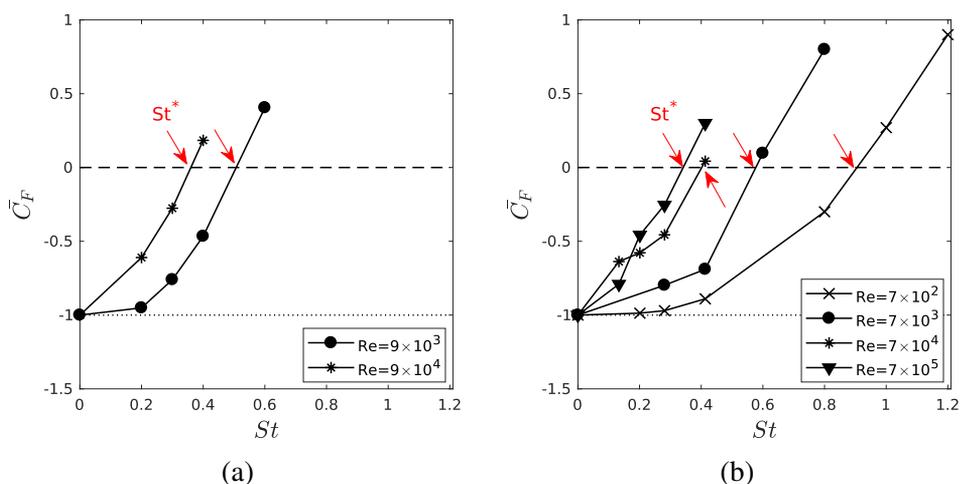


Figura 9.18: \bar{C}_F como função do St para diferentes Re . (a) Lambari; (b) Atum. As setas em vermelho indicam o valor de Strouhal de equilíbrio estimado.

A condição $\bar{C}_F = 0$ está associada à chamada frequência de equilíbrio f^* (e o Strouhal de equilíbrio correspondente, St^*) que produz uma velocidade média constante dos peixes e define o modo natural de natação destes. A partir desta condição de equilíbrio, determina-se, para cada um dos casos simulados, para um dado Re , que valor de St conduz à condição de equilíbrio.

Nas Figs. 9.18 (a) e (b) < 9, apresentam-se as curvas para \bar{C}_F em função de St , para todos os Re considerados no estudo, e para cada peixe. Neste trabalho, St^* é determinado tal que $\bar{C}_F(St^*) = 0$ e estima-se St^* utilizando uma interpolação linear aplicada ao par de pontos na curva $\bar{C}_F \times St$ que contém St^* .

No alcance deste estudo, encontrou-se um único número de Strouhal crítico para cada Re para ambos os peixes. Observou-se também o comportamento monotônico decrescente de St^* em função do Re . Provavelmente, porque os peixes precisam nadar em frequências mais altas para superar os maiores esforços viscosos, relacionados aos baixos números de Reynolds. Isso se torna mais evidente quando o regime do escoamento muda de turbulento para laminar, de modo que St^* atinge valores substancialmente mais altos em escoamentos dessas características. A Tab. 9.1 resume os resultados dos valores estimados de St^* para cada Re .

Tabela 9.1: Número de Strouhal de equilíbrio (St^*) para os diferentes números de Reynolds.

Re	7×10^5	9×10^4	7×10^4	9×10^3	7×10^3	7×10^2
St^* Lambari	-	0,36	-	0,51	-	-
Tuna	0,34	-	0,4	-	0,58	0,91

Finalmente, observa-se, na Fig. 9.19, que os valores para St^* encontrados estão dentro da faixa prevista na literatura, concordando com a escala de Gazzola, Argentina and Mahadevan [54] e os dados experimentais reportados por Tytell [154].

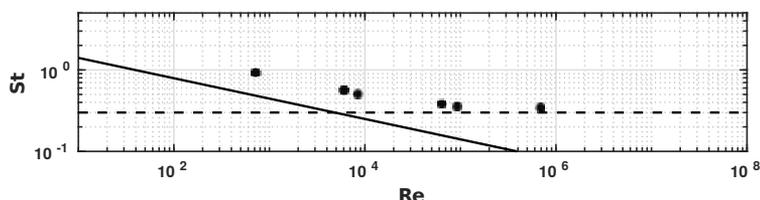


Figura 9.19: Comparação dos valores de St^* obtidos para os números de Reynolds (Tab. 9.1) avaliados com a função $St = f(Re)$ proposta por Gazzola, Argentina and Mahadevan [54]. Linha contínua: $St \sim Re^{-0,25}$ ($Re < 10^4$). Linha descontínua: $St = 0,3$ ($Re > 10^4$).

Desacoplamento das forças de arrasto e empuxo

Na literatura, existe uma vasta discussão no que concerne ao aumento ou diminuição da força de arrasto durante o movimento locomotivo ondulatório de um peixe, quando comparada à força que teria a mesma geometria na posição neutral (sem experimentar deformação alguma). Frequentemente, reportam-se resultados contraditórios devido à inerente dificuldade de estudos experimentais e teóricos para calcular simultaneamente a força total e suas duas componentes, arrasto e empuxo. Existem estudos que relatam a redução das forças de arrasto em altos números de Reynolds [12], e outros sugerem que o movimento ondulatório de um peixe resulta em um aumento dessa mesma força [86, 50].

Para contribuir com a discussão da relação do arrasto com o movimento ondulatório, segue uma análise das forças desacopladas na direção do escoamento, aproveitando-se as vantagens que traz o estudo numérico. Com base no método proposto por Borazjani and Sotiropoulos [21] e apresentado no capítulo 9.3, conseguiram-se estimar as forças de arrasto e empuxo, assim como suas componentes de pressão e viscosas.

A seguir, o coeficiente de forças apresentado anteriormente como \bar{C}_F , passa a ser denominado C_D para forças de arrasto, caracterizadas por $\bar{C}_F < 0$, e C_T , para as forças de empuxo, onde o coeficiente de força médio é positivo, $\bar{C}_F > 0$. As Figs. 9.20 e 9.22, mostram os coeficientes de força para cada par $\{Re - St\}$, para atum e lambari. Observa-se que, tanto o coeficiente de arrasto como o de empuxo, foram

divididos em duas parcelas, correspondendo aos esforços de pressão e viscosos, referidos pelos subíndices p e v , respectivamente. Nota-se ademais, que a discussão sobre as forças é realizada baseada no valor absoluto destas, sendo o sinal apenas para caracterizar se elas são do tipo empuxo ou arrasto.

Para melhorar a análise, e uma vez conhecidos os valores de St^* , novas simulações foram executadas para obter informações mais completas sobre as forças. Para o lambari, na Fig. 9.20 (a), inclui-se o resultado da simulação definida pelo par $\{St^* = 0,51; Re = 9 \times 10^3\}$, e na Fig. 9.20 (b), as forças referente à situação de equilíbrio $\{St^* = 0,36; Re = 9 \times 10^4\}$, além de um novo caso $\{St = 0,6; Re = 9 \times 10^4\}$ que permitirá entender melhor a tendência das forças em altas frequências. No estudo do atum, foi realizada uma única simulação adicional referente ao Strouhal de equilíbrio no maior Re tal que $\{St^* = 0,34; Re = 7 \times 10^5\}$.

Em primeiro lugar, as Fig. 9.20 (a) e (b) exibem as forças calculadas sobre o lambari para os números de Reynolds 9×10^3 e 9×10^4 , respectivamente. Em ambos casos, o arrasto de fricção (C_{Dv}), devido às forças viscosas, é monotonicamente crescente com o aumento do movimento ondulatório, isto é com a frequência do nado, e conseqüentemente com St . O arrasto de forma (C_{Dp}), devido às forças de pressão, tende de forma assintótica até zero, atingindo esse valor para um Strouhal entre $0,3 < St < 0,4$, também para ambos os Re . Conseqüentemente, a partir desses valores de St , o arrasto total é dominado pelo arrasto viscoso, em contraposição ao que ocorre em frequências menores, em que apresenta a mesma tendência que o arrasto de pressão.

Analisando a dependência com o número de Reynolds, observa-se que conforme Re aumenta, o arrasto de fricção tende a tornar-se menos sensível ao St já que as tensões de cisalhamento diminuem. Por outro lado, o arrasto de forma não mostra uma diferença de comportamento significativa, segundo o Reynolds. Em conclusão, o efeito das ondulações do corpo trazem um aumento importante da força de arrasto total quando $Re = 9 \times 10^3$, e muito mais suave para $Re = 9 \times 10^4$.

Para conseguir o movimento propulsivo, na direção contrária ao escoamento, o lambari produz forças de empuxo que balanceiam as forças de arrasto, e que se originam a partir do campo de pressão produzido como consequência do movimento ondulatório. Observa-se nas Fig. 9.20 (a) e (b), como as primeiras forças de empuxo começam a aparecer a partir de $St > 0,3$ (valores de St acima do definido na literatura como Strouhal de equilíbrio para peixes nadando em escoamentos

turbulentos).

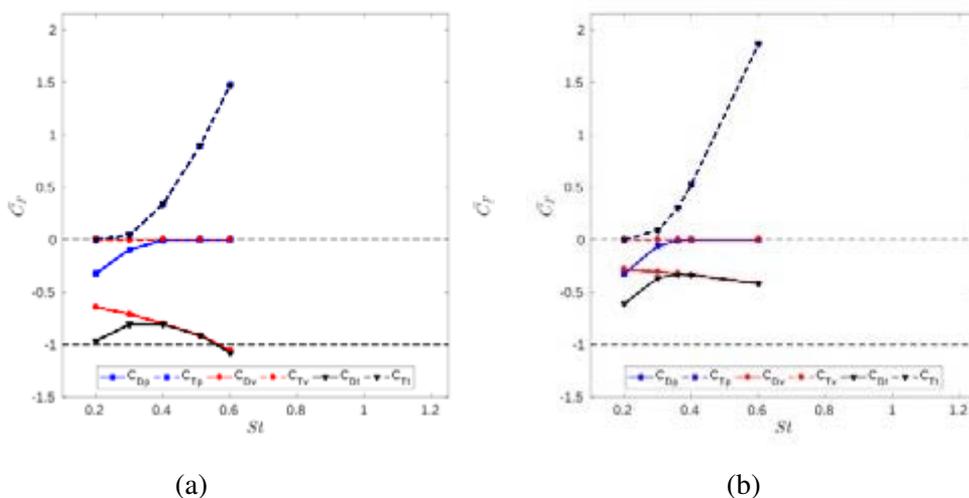


Figura 9.20: Lambari: variação dos coeficientes de empuxo e arrasto total, C_{Tl} e C_{Dr} , de pressão, C_{Tp} e C_{Dp} e viscosas, C_{Tv} e C_{Dv} , em função de St quando: (a) $Re = 9 \times 10^3$ e (b) $Re = 9 \times 10^4$.

Para contribuir com a discussão da produção de forças, na Fig. 9.21, exibem-se os campos de pressão e velocidade nas configurações de Strouhal de equilíbrio, para ambos Re . Primeiramente, desde a visualização dos campos de velocidades, percebe-se um aumento da camada limite em volta do peixe na situação de menor Re , já que se observa uma região de baixa velocidade com maior espessura em torno ao corpo do peixe. Esse fato verifica o aumento de atrito nessa região e, conseqüentemente, as maiores forças de arrasto de fricção. Olhando para o campo de pressão, nota-se que a topologia apresenta-se similar nas situações das Figs. 9.21 (a) e (b), porém, em baixo Re aparece com maior intensidade, devido a frequências de nado mais altas. Em uma análise quantitativa, desde as Figs. 9.20 (a) e (b), estima-se que, nas situações de equilíbrio as resultantes das forças de pressão são $C_{Tp} = 0,9$ e $C_{Dp} = 0,3$, para $Re = 9 \times 10^3$ e $Re = 9 \times 10^4$, respectivamente. O que indica, claramente, a necessidade de o peixe produzir maiores esforços para atingir

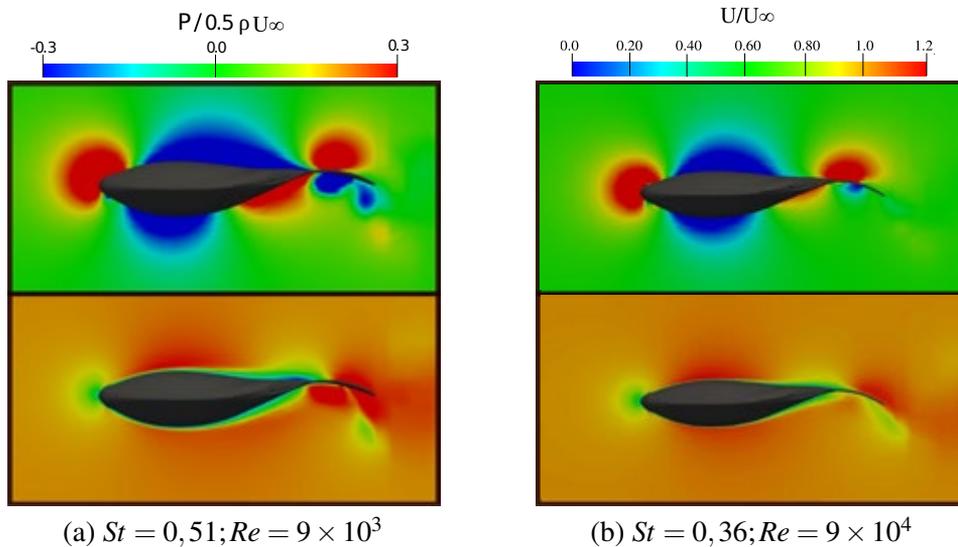


Figura 9.21: Campos de pressão e velocidade adimensionais para o lambari nadando sob diferentes condições de Re e St . Facilitando a comparação em distintos regimes de escoamentos e frequências de nado.

a condição de balanço de forças dinâmico, em Re mais baixos.

Na análise das forças de arrasto para o atum, nota-se inicialmente, na Fig. 9.22, que seu comportamento varia em função do Re , não sendo possível generalizar a conduta dos esforços em toda faixa de Re analisada. Como esperado, observam-se valores de C_D maiores em Re mais baixos, devido ao aumento das tensões de cisalhamento em escoamentos onde as forças viscosas têm mais influência. Para os maiores Re analisados (Fig. 9.22 (c) e (d)), não se observa um aumento das forças de arrasto total com St , diferente do que acontece para o restante dos casos (Figs. 9.22 (a) e (b)). Esse comportamento, não é devido apenas à variação do número de Reynolds, tendo também relação com o fato de a faixa de St analisada em $Re = 7 \times 10^4$ e $Re = 7 \times 10^5$, corresponde a movimentos ondulatórios de frequências menores.

A situação apresentada na Fig. 9.22 (d) correspondente ao maior Re investigado, mostra como as forças de arrasto de pressão são reduzidas nas frequências mais

baixas, apresentando depois pouca variação nos valores encontrados. O arrasto de fricção parece também mostrar pequenas alterações, conforme o aumento do movimento ondulatório. Pode-se intuir que a força de arrasto total continue na tendência assintótica em direção a um valor constante, como observado na figura. Nota-se que o arrasto tende a um valor de aproximadamente 60% do valor do arrasto do peixe na posição neutra, o que implicaria uma redução do arrasto em 40%. Porém, essa sugestão deveria ser verificada mediante o cômputo dos esforços para valores mais altos de St .

É interessante notar como, mesmo conseguindo essa redução no arrasto total, o peixe nunca deixa de experimentar um pequeno arrasto de pressão durante seu movimento. Coisa que não acontecia para o lambari que, com o aumento de St , o C_{Dp} tendia ao zero. No atum, esse comportamento é atribuído ao observado na Fig. 9.17 (d), na qual o peixe, em alguns instantes do ciclo, experimentava valores menores do que os que apresentou como um corpo rígido.

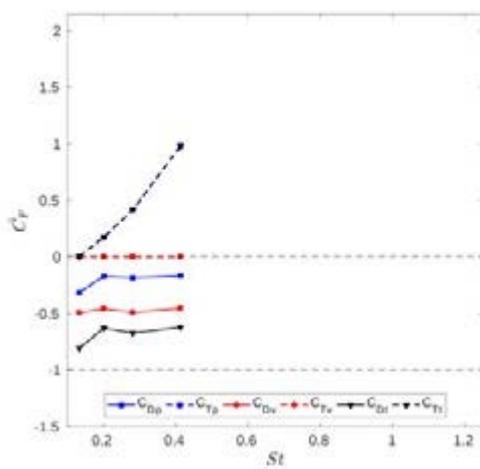
Quando o escoamento encontra-se no regime de Reynolds 7×10^4 , a faixa de St analisada é a mesma que no caso anterior, 0,133 – 0,413, porém, neste caso, as forças de arrasto de pressão e viscosa ainda não parecem tender a um valor assintótico. Pelo comportamento apresentado, espera-se que, para maiores St , C_{Dp} continue diminuindo e C_{Dv} aumentando. A conduta do arrasto total, portanto, dependerá do comportamento das forças em frequências mais altas mas, o que se pode constatar é que na faixa de nado a força total de arrasto é reduzida com o movimento ondulatório do peixe em relação à que teria o peixe sem experimentar deformação. Essa mesma redução do arrasto total acontece também no regime do escoamento apresentado na Fig. 9.22 (b), porém, em menor grau. Dessa forma, uma redução de apenas 10% para o peixe nadando, conforme a cinemática caracterizada pelo maior Strouhal representado $St = 0,8$. Nesse caso, se observa o arrasto de forma com comportamento assintótico, e sem atingir o zero, como nos casos anteriores do atum, e o arrasto de superfície parece também começar a se estabilizar em torno a um valor de 0,9, porém, seriam necessários resultados de outros St para constatar essa afirmação.

Finalmente, na Fig. 9.22 (a), quando $Re = 7 \times 10^2$, o arrasto de fricção aumenta linearmente com St , e, conseqüentemente, também o arrasto total, já que o arrasto de forma é praticamente nulo. Assim, para as frequências mostradas os esforços de pressão contribuem à geração de empuxo e as forças de atrito são as únicas que

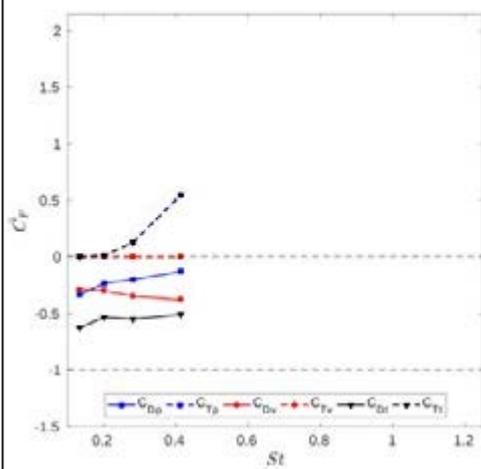
produzem arrasto. Veja que para essa faixa de St o arrasto do peixe é igual ou maior ao que experimenta na posição neutral, apresentando valores de $C_F \leq -1$.

Após a análise das forças de empuxo e arrasto, e suas componentes de pressão e viscosas, obtemos algumas conclusões importantes sobre a propulsão de peixes carangiformes. Em primeiro lugar, a produção do empuxo é unicamente devida ao campo de pressão gerado pelo movimento do peixe. Já o arrasto, pode apresentar parcelas de pressão e/ou viscosas, segundo a frequência de nado. Em segundo lugar, foi observado que o regime de Re do escoamento joga um papel fundamental na geração das forças hidrodinâmicas. Assim, em baixo Re , um peixe precisa gerar um campo de pressão o suficientemente favorável para vencer o atrito originado na camada limite, que será maior com o aumento da viscosidade. Portanto, nessas situações, o peixe precisa nadar a frequências mais altas para conseguir a autopropulsão.

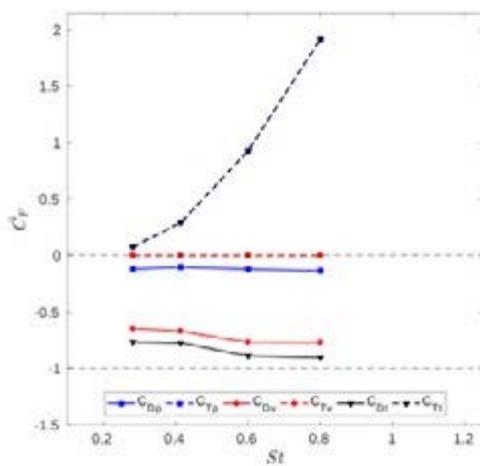
Devido à importância do campo de pressão na biomecânica de um peixe para gerar empuxo, na Fig. 9.23, se exibem os campos de pressões em vários instantes de um ciclo de natação, para lambari e atum, junto com os coeficientes de força instantâneos desacoplados, para uma estudo mais aprofundado. Na figura, comparam-se as situações de nado do lambari e do atum sob condições de St e Re similares, tal que $\{St = 0,4; Re = 9 \times 10^4\}$ e $\{St = 0,413; Re = 7 \times 10^4\}$, respectivamente. Observa-se, nas Figs. 9.23(a) e (b), a partir da evolução temporal das forças, como no arrasto de superfície apenas se percebe o movimento oscilatório do peixe, apresentando valores com pouca variação em torno a uma quantidade constante estimada em 0,35, para ambos os casos. Por outro lado, os coeficientes de forças instantâneos devidos ao campo de pressão diferem bastante em ambos os peixes, mesmo tendo a média temporal de empuxo de pressão próxima a 0,5 como ilustrado nas Figs. 9.20 e 9.22. A principal diferença é que o atum, em alguns instantes do seu ciclo, gera um campo de pressão desfavorável ao movimento, originando arrasto de pressão, além do viscoso. Como consequência, para conseguir vencer a força de arrasto, precisa gerar maior quantidade de empuxo, como aparece na Fig. 9.23. Tomando valores máximos de C_F próximos a $C_F = 1,5$, frente aos máximos estimados para o lambari em torno à unidade, $C_F = 1$.



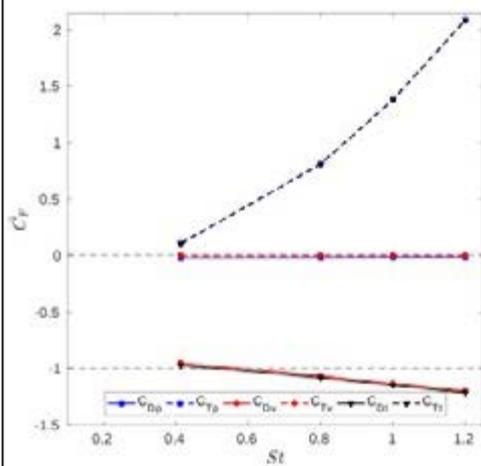
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9.22: Atum: variação dos coeficientes de empuxo e arrasto total, C_{Tt} e C_{Dt} , de pressão, C_{Tp} e C_{Dp} e viscosos, C_{Tv} e C_{Dv} , em função de St quando: (a) $Re = 7 \times 10^2$; (b) $Re = 7 \times 10^3$; (c) $Re = 7 \times 10^4$ e (d) $Re = 7 \times 10^5$.

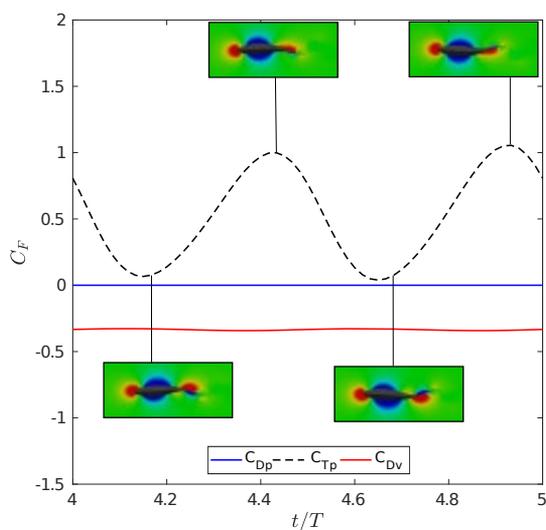
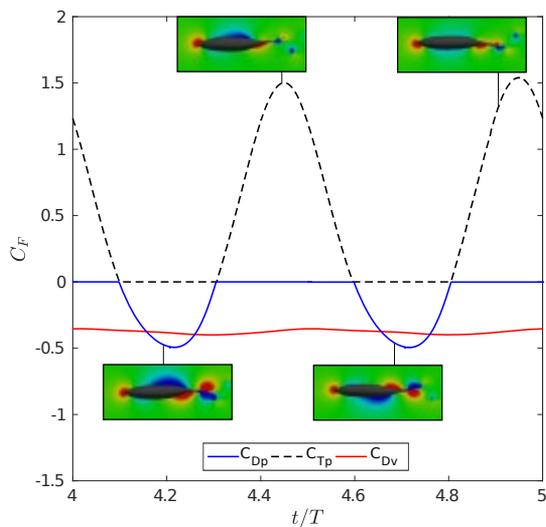
(a) Lambari: $St = 0,4; Re = 9 \times 10^4$;(b) Atum: $St = 0,413; Re = 7 \times 10^4$;

Figura 9.23: Coeficiente de força instantânea desacoplado nas parcelas de empuxo e arrasto, considerando as componentes de pressão e viscosa, em um período adimensional do movimento, incluindo o campo de pressão adimensional em vários instantes do ciclo de natação.

A Fig. 9.23 constata, novamente, como em um ciclo de nado existem dois mínimos e dois máximos da função força, reflexo do modelo cinemático descrito por uma função senoidal. Esses picos aparecem intimamente relacionados com o campo de pressão induzido pelo movimento, já que foi comentado que as forças viscosas apresentam um valor praticamente constante. Pela importância que acarreta o campo de pressões, foram incluídos quatro instantes desse campo durante o ciclo do movimento do peixe representado na Fig. 9.23. Observa-se como as configurações dos peixes relativas aos picos de força máxima correspondem às situações nas quais a amplitude da nadadeira caudal é máxima, isto é, nas posições finais de cada semiciclo. Os picos de mínima força refletem os peixes na posição intermédia de cada semiciclo, onde a nadadeira caudal experimenta a menor deformação possível. Nota-se como as pressões na nadadeira caudal referentes a essa situação aparecem positivas em um lado da cauda e negativas na outra face, resultando em uma diferença de pressões mínima.

Eficiência de nado

O movimento propulsivo de um peixe ocorre pelas deformações laterais sofridas por tal movimento, que deslocam uma quantidade de massa fluida, fazendo com que o peixe consiga se locomover. A potência produzida durante o nado consta de uma parcela entendida como potência útil, encarregada da locomoção do peixe, e outra, referente às deformações laterais que o peixe realiza para movimentar-se, entendida como perda e fortemente relacionada ao modo de nado do peixe. Neste trabalho, em que a abordagem é puramente hidrodinâmica, a eficiência de nado será quantificada considerando apenas os esforços hidrodinâmicos realizados pelos peixes sem contemplar o consumo de energia metabólica deles, entendido como trabalho muscular ou consumo de oxigênio, como propõem Maertens et al. [98]. Mesmo as eficiências calculadas neste trabalho não sendo as melhores estimativas, os resultados extraídos podem contribuir com a discussão da eficiência propulsiva em peixes, reportando novos resultados.

Nas Tabs. 9.2 e 9.3 apresentam-se as eficiências de nado para ambos os peixes (lambari e atum) nos diferentes regimes do escoamento investigados para a condição de equilíbrio (St^*), por ser a única que garante o balanceamento das forças na direção do escoamento, mantendo o peixe nadando em velocidade constante. Nas situações nas quais o atum nada em $Re = 7 \times 10^4$ e $Re = 7 \times 10^3$, onde não se realizaram

novas simulações para os St^* estimados na Tab. 9.1 ($St^* = 0,4$ e $St^* = 0,58$, respectivamente), as potências foram estimadas a partir dos casos já resolvidos correspondentes aos números de Strouhal, $St = 0,413$, quando $Re = 7 \times 10^4$, e $St = 0,6$ para $Re = 7 \times 10^3$, por serem valores próximos aos de St^* .

A eficiência hidrodinâmica de nado de um peixe é apresentada seguindo as definições de eficiência propulsiva, quase-propulsiva e o coeficiente de potência, computados segundo as Eqs. 9.12, 9.21 e 9.22, respectivamente. A eficiência propulsiva considera como potência útil o produto da velocidade de nado constante e a força de empuxo produzida durante a natação, apresentando a dificuldade do cálculo dessa força. Neste trabalho, as forças longitudinais foram desacopladas seguindo o método proposto por Borazjani and Sotiropoulos [21], descrito na seção anterior, sendo possível computar a força de empuxo correspondente. Por outro lado, na eficiência quase-propulsiva, o numerador é definido pela potência útil que o peixe produziria deslocando-se como um corpo rígido em velocidade constante.

Em todos os casos, a potência total é calculada pela definição apresentada na Eq. 9.10, como a integral do produto das forças pela velocidade. A componente na direção do escoamento (x) do vetor velocidade v_i é corrigido com o objetivo de considerar a velocidade de translação constante ($U = U_\infty$) do peixe, já que as simulações se realizaram com o sistema de referência no peixe. De tal forma, o vetor velocidade utilizado é agora $v_i = (v_x + U)\vec{e}_i + v_y\vec{e}_j + v_z\vec{e}_k$. Repare que, na direção transversal, o peixe não experimenta movimento e, conseqüentemente, a componente de velocidade v_z é nula.

As Tabs. 9.2 e 9.3 recolhem os resultados das eficiências propulsivas, quase-propulsivas e coeficientes de potências para cada número de Reynolds analisado, permitindo a comparação para os vários regimes do escoamento. Primeiramente, observa-se como as eficiências propulsivas (η_p) mantêm valores próximos para diferentes Re , para cada um dos peixes, respectivamente. Isso indica que, além da dificuldade de estimar a força de empuxo separadamente, a informação obtida a partir da definição de eficiência propulsiva não traz informação relevante quando o objetivo é entender a dependência com o número de Reynolds. Todavia, pode ser útil para comparar a eficiência entre peixes, com geometrias e cinemáticas específicas. Nesta análise, constata-se que não influenciam nem o efeito da viscosidade nem a frequência de nado, já que são os parâmetros que variam nas diferentes situações sem repercussão no valor da eficiência.

Para o lambari, a eficiência propulsiva toma valores próximos a 24% e, portanto, apresenta uma forma mais eficiente de nado do que no caso do atum, em que η_p oscila em torno a 17%. Para conhecer de fato quais são os parâmetros que predominam no valor da eficiência propulsiva, seria preciso realizar um estudo mais aprofundado dos mesmos. A grosso modo, desde o ponto de vista cinemático, destacam-se como principais diferenças entre os peixes analisados as maiores deformações que o lambari experimenta no seu corpo, assim como uma natação em velocidade mais alta. Geometricamente, por outro lado, os peixes apresentam diferenças na relação de aspecto nos seus corpos, na existência de nadadeiras laterais e/ou peitorais, e na configuração da nadadeira caudal.

Tabela 9.2: Eficiências propulsiva, quase-propulsiva e coeficiente de potência em vários números de Reynolds, no Strouhal de equilíbrio (St^*) estimado para cada caso do lambari.

Lambari		
	$\{Re = 9 \times 10^4; St = 0,36\}$	$\{Re = 9 \times 10^3; St = 0,51\}$
η_p	24,20%	23,31%
η_{qp}	80,36%	26,00%
c_p	0,029	0,110

Tabela 9.3: Eficiências propulsiva, quase-propulsiva e coeficiente de potência em vários números de Reynolds, na condição de equilíbrio (St^*) estimado para cada caso do atum.

Atum			
	$\{Re = 7 \times 10^5; St = 0,34\}$	$\{Re = 7 \times 10^4; St = 0,413\}$	$\{Re = 7 \times 10^3; St = 0,6\}$
η_p	18,18%	16,93%	17,65%
η_{qp}	43,67%	30,87%	19,02%
c_p	0,023	0,042	0,093

A eficiência quase-propulsiva (η_{qp}), tem a vantagem inicial de não precisar desacoplar as forças longitudinais, ao considerar no numerador a força de arrasto do peixe não deformado. Além disso, permite avaliar os efeitos de escala (o número

de Re) na eficiência de natação. Observa-se, nas Tabs. 9.2 e 9.3, como η_{qp} é uma função crescente do Re , evidenciando como o modo de nado carangiforme é pouco eficiente em números de Reynolds baixos. Além disso, mediante a análise da eficiência quase-propulsiva verifica-se a consistência do fato de que altos St^* encontram-se em Re baixos e implicam ondulações laterais mais rápidas, e, conseqüentemente, velocidades laterais mais altas. Portanto, maiores perdas de potência lateral e eficiência menores.

Os valores mais altos de eficiência encontrados foram $\eta_{qp} = 80,36\%$ para lambari sob $Re = 9 \times 10^4$ e $\eta_{qp} = 43,67\%$ quando $Re = 7 \times 10^5$ para o atum. Sendo, ambos os regimes do escoamento, nos quais se encontram esses peixes nadando na natureza, respectivamente. Nota-se, ademais, que o lambari apresenta-se muito mais eficiente na sua autopropulsão, quando estimada nessa forma de eficiência quase-propulsiva. Isso pode estar aliado às maiores amplitudes no sinal temporal da força do atum, observado na Fig. 9.17, assim como o fato que em alguns intervalos o coeficiente de força apresenta valores menores que a força de arrasto pura ($C_F(t) < -1$). As razões podem residir nas diferenças geométricas e cinemáticas dos peixes, porém, seria necessário um estudo mais aprofundado desses aspectos para poder discutir que parâmetros de fato fazem com que o lambari se apresente mais eficiente do que o atum.

Finalmente, o coeficiente de potência parece uma alternativa pouco intuitiva para analisar a eficiência de natação. Nas Tabs. 9.2 e 9.3, mostram-se os valores de C_p para os dois peixes e observa-se a relação de dependência inversa com Re . O coeficiente de potência apresenta uma tendência crescente à medida que Re diminui, isto porque a potência produzida pelo peixe durante o nado é sempre maior à medida que as forças viscosas do escoamento aumentam, incluindo as perdas. Os valores estimados de C_p , para atum e lambari, estimam-se próximos para os mesmos regimes do escoamento.

Esteira hidrodinâmica induzida durante o nado

A esteira hidrodinâmica induzida por um peixe é uma estrutura fundamental de fluxo responsável pelos mecanismos de geração de força de propulsão no nado de peixes no modo carangiforme. Em particular, o padrão de liberação dos vórtices tem influência sobre a geração de ‘arrasto’ ou ‘empuxo’, e é decisivo para a economia de energia do movimento de natação. A seguir, são apresentadas visualizações do esco-

amento hidrodinâmico para as configurações de Re e St analisadas até o momento, de atum e lambari, para estudar as características da esteira induzido pelo nado dos peixes. O estudo do escoamento será baseado na análise dos campos de velocidade e vorticidade adimensionais, na visualização do escoamento tridimensional a partir de isosuperfícies da variável critério- Q ¹⁵.

Fundamentalmente, com esta análise, pretende-se elucidar as diferenças principais na hidrodinâmica do nado quando são variados os números de Reynolds e/ou de Strouhal. Na Fig. 9.24, comparam-se as esteiras de lambari e atum variando St , e mantendo o número de Reynolds. Os Re considerados nesta primeira análise foram os maiores simulados para cada peixe, sendo $Re = 9 \times 10^4$ (lambari) e $Re = 7 \times 10^5$ (atum).

As Figs. 9.24 (a) e (b) apresentam uma situação de nado caracterizada pela estrutura típica de esteira de peixes carangiformes nadando na condição do número de Strouhal subcrítico¹⁶, com St em torno a 0,2. Assim, os campos de vorticidade assemelham-se a uma esteira de von Kármán, de modo que vórtices positivos (sentido anti-horário) são ejetados na parte inferior do plano de simetria do movimento do peixe, enquanto os vórtices negativos (sentido horário) viajam acima do mesmo plano. Esse padrão é chamado de ‘esteira de von Kármán tradicional’ por ser semelhante a escoamentos regulares desse tipo. Em contraste, as Figs. 9.24 (c) e (d), onde o St foi elevado a valores próximos a 0,4, exibem um padrão distinto, com vórtices positivos ejetados na parte superior e vórtices negativos sob no plano de simetria. Isso caracteriza a chamada ‘esteira de von Kármán reversa’.

A esteira de von Kármán tradicional gera forças de arrasto dominantes em peixes carangiformes durante a natação. Desde o campo de velocidade nas Figs. 9.24 (a) e (b), pode-se observar uma região de baixa velocidade na região próxima à nadadeira caudal, que arrasta o peixe para trás (na direção do escoamento) de tal forma que $\bar{C}_F < 0$, como apresentado na Fig. 9.18 (a). Por outro lado, a esteira de von Kármán reversa induz uma região de alta infiltração atrás do peixe, promovendo a geração de empuxo através da ejeção de fluido, aumentando a propulsão do peixe e consequentemente, fazendo com que $\bar{C}_F > 0$ (Fig. 9.18 (b)). Como o coeficiente

¹⁵Filtro matemático, proposto por Hunt et al. [66], que identifica com base em critérios cinemáticos, as estruturas vorticiais tridimensionais no escoamento, filtrando as regiões onde a taxa de rotação é maior que a taxa de cisalhamento

¹⁶Valores de $St_{subcrítico}$ definem-se por números de Strouhal menores do que os de equilíbrio tal que $St_{subcrítico} < St^*$

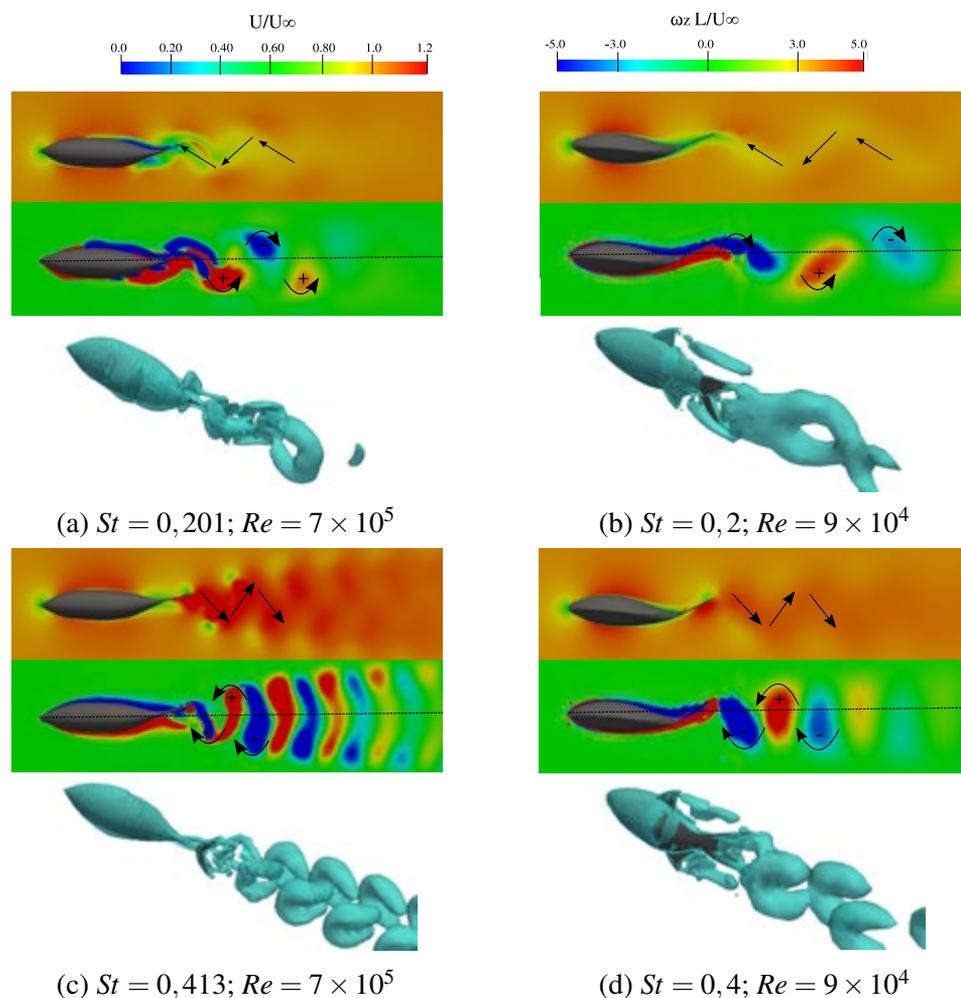


Figura 9.24: Campos de velocidade e vorticidade adimensionais, (U/U_∞) e ($\omega_z L/U_\infty$), e isosuperfícies do critério-Q ($Q=0,1$). (a) Atum; (b) Lambari.

de força médio é uma função crescente de St , conclui-se que, em regime turbulento, a alta frequência de batimento de cauda induz uma esteira reversa de von Kármán em peixes com nado carangiforme, gerando propulsão. Outros trabalhos reportaram

conclusões semelhantes, mas apenas para o fluxo laminar [187, 21].

Outra característica distintiva das esteiras de von Kármán induzidas pelos peixes é a configuração dos anéis de vórtices nessas esteiras. Na Fig. 9.24 observa-se a disposição dos vórtices evidenciados pelas isosuperfícies definidas pelo critério-Q. Ambos os peixes exibem duas fileiras de vórtices, nas situações de esteiras do tipo reversas. Em vez disso, as esteiras tradicionais de von Kármán exibem uma única fileira de vórtices, como pode ser visto nas Figs. 9.24 (a) e (b). A dependência da estrutura da esteira em relação ao St é esperada, pois, por definição (Eq. 9.4), o número de St pode ser entendido como a razão entre a velocidade lateral média da cauda (fA) e a velocidade axial de nado (U). Portanto, em altos St , os vórtices desprendidos pela nadadeira caudal tendem a ter uma componente de velocidade lateral maior, que os desloca da linha central, fazendo com que se espalhem na direção lateral. Olhando para esses resultados, a transição entre as esteiras do tipo arrasto para empuxo será identificada em um valor compreendido na faixa de St entre 0,2 e 0,4, verificando resultados anteriormente apresentados e, também, outros reportados na literatura.

As divergências entre as esteiras de lambari e atum observadas podem ser devido às diferenças geométricas e/ou cinemáticas. Nesse sentido, destaca-se que a parte posterior do corpo do atum aparece mais estreita e comprida do que a do lambari, também as caudas apresentam diferenças na geometria. Visando à cinemática, a principal disparidade entre o nado dos peixes reside na função amplitude $a(x)$ (em seus coeficientes $a_i(x)$) que faz com que a deformação do lambari seja mais acentuada, também comentado na subseção anterior. Outra razão pode ser atribuída a que a velocidade lateral da onda (ω/k) toma valores mais altos para o caso do atum em St semelhantes.

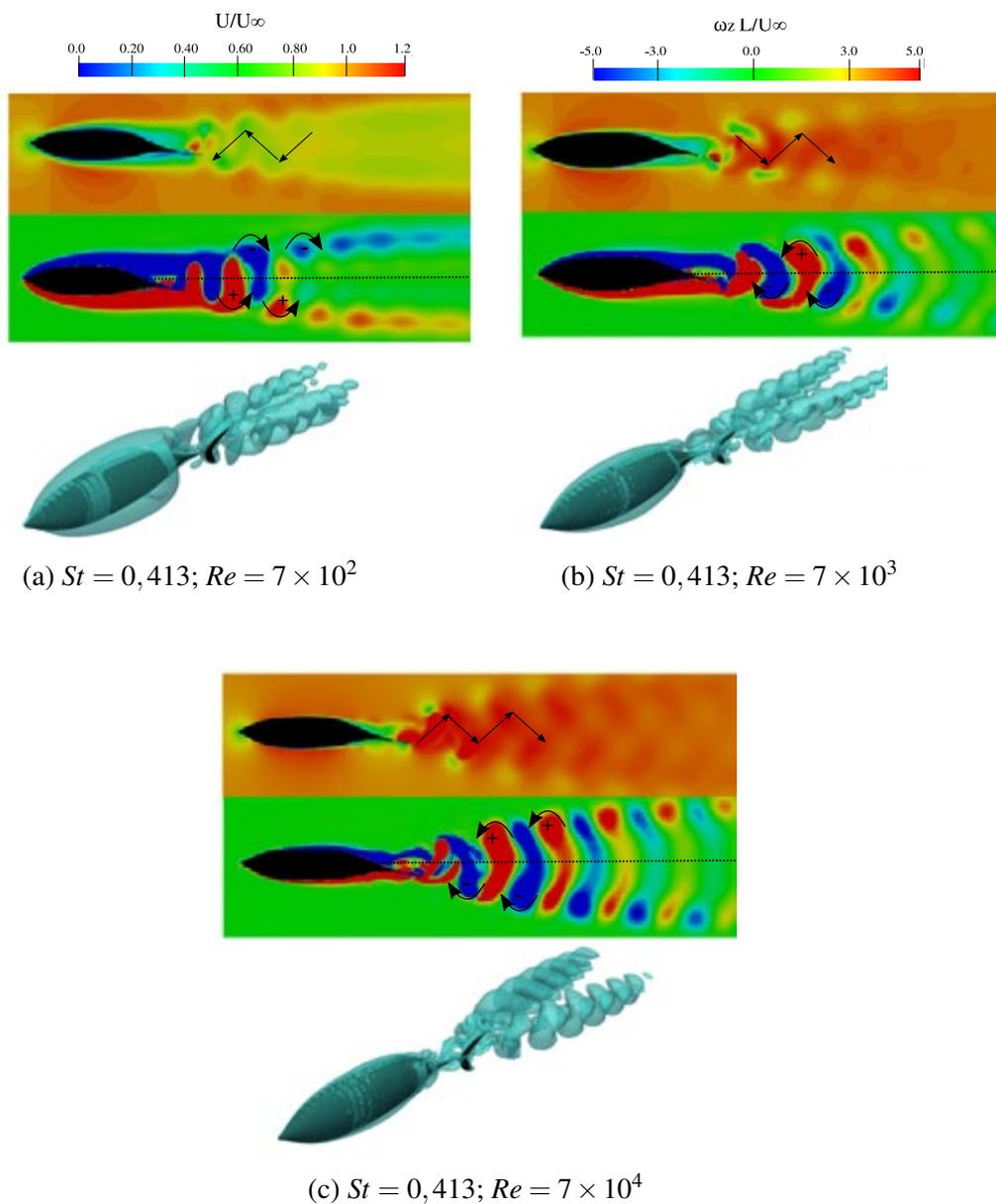


Figura 9.25: Campos de velocidade e vorticidade adimensionais, (U/U_∞) e $(\omega_z L/U_\infty)$, e isosuperfícies definidas pelo critério-Q ($Q=0,1$) para o atum em diferentes Re com $St = 0,413$.

Como consequência da variação do número de Reynolds nas simulações, as esteiras induzidas pelos peixes nas diferentes situações investigadas evidenciam mudanças devido ao aumento das forças de atrito em números de Reynolds mais baixos. Nesses casos, é observado um aumento da espessura da camada limite do peixe o que leva a maiores forças de arrasto, como exibido nas Figs. 9.20 e 9.22. Desta forma, em escoamentos regidos por números de Reynolds menores, os peixes precisam nadar em mais altas frequências (maiores St) para vencer as grandes forças de arrasto e conseguir atingir a condição de equilíbrio, em que experimentariam sua autopropulsão.

Desde a Fig. 9.25 estabelece-se uma comparação das esteiras do atum nadando em diferentes Re e com o mesmo número de Strouhal, $St = 0,413$, em todos os casos. Em primeiro lugar, observa-se a partir dos campos de velocidade e vorticidade o aumento da espessura da camada limite conforme o Re diminui, o que também é percebido nas estruturas vorticiais tridimensionais representadas pelas isosuperfícies do critério-Q. Por outro lado, observa-se a tendência descrita anteriormente em que em menores Reynolds, um peixe precisa elevar sua frequência na natação para produzir o empuxo necessário que o leva à auto-propulsão. Dessa forma, observa-se como para um mesmo St , segundo o número de Reynolds, o tipo de esteira mudará, passando do tipo arrasto ao tipo empuxo a medida que o Re aumenta. Observa-se, na Fig. 9.25 (a), como a esteira induzida pelo peixe é claramente uma esteira de von Kármán tradicional. Nessa situação, o coeficiente de força médio é negativo, como aparece na Fig. 9.18 (b), sendo o peixe arrastado pelo escoamento. Nas restantes situações representadas, correspondendo a $Re = 7 \times 10^3$ e $Re = 7 \times 10^4$, a esteira aparece como uma esteira de von Kármán reversa. Porém, o caso que aparece na Fig. 9.25 (b) tem um número de Strouhal de equilíbrio estimado em $St^* = 0,58$, e, portanto, o coeficiente de força médio no caso representado é $\bar{C}_F < 0$. O peixe, apresenta a resultante da força longitudinal na direção do escoamento. Mesmo induzindo uma esteira do tipo empuxo, as forças de atrito sobre o peixe não são balanceadas pelo efeito de empuxo da esteira, gerando força resultante do tipo arrasto. Esse resultado leva à discussão de que unicamente a configuração da esteira não permite definir se o peixe consegue a autopropulsão, já que a análise das forças atuantes em algumas situações pode dar outro resultado.

A Fig. 9.25 mostra também como para o atum, quando $St = 0,413$, as estruturas de vórtices tridimensionais configuram-se formando duas fileiras, independente-

mente da força experimentada pelo fato de o peixe ser de arrasto ou empuxo, exaltando novamente a forte dependência da esteira com o St , e como para altos números de St a disposição dos vórtices aparece na configuração de duas fileiras. Percebe-se também, na mesma figura, como as esteiras aparecem com menor abertura em Re menores já que os efeitos difusivos das forças viscosas começam a dominar nessas situações.

Formação dos vórtices na nadadeira caudal

Um estudo mais detalhado sobre a dinâmica dos vórtices é apresentado a seguir, a partir das análises dos vórtices induzidos durante o movimento de batida do peixe. Os anéis de vórtices formados a jusante dos peixes são o resultado da fusão de outros vórtices, como os produzidos na parte posterior do corpo (PBV¹⁷) e nas bordas de ataque e fuga da nadadeira caudal (LEV¹⁸ e TEV¹⁹).

Borazjani and Daghooghi [20] foram os primeiros autores a relatar os vórtices LEV durante a natação de peixes como um mecanismo para gerar forças de locomoção, da mesma forma que em insetos ou voos de pássaros. Os autores concluíram no seu trabalho que a cinemática característica dos peixes origina a formação de um LEV estável na nadadeira caudal. Mais recentemente, Liu et al. [91] confirmaram esse fenômeno em nadadores carangiformes. Neste texto, empregam-se os superíndices l e r para denotar os vórtices gerados durante o movimento à esquerda e direita, respectivamente, da mesma forma que Liu et al. [91]. O batimento à esquerda e à direita, refere-se ao movimento da nadadeira caudal no sentido y -positivo e y -negativo, respectivamente, em cada semiciclo da natação.

Primeiramente, nas Figs. 9.26 e 9.27 observam-se os vórtices formados durante o nado do atum sob a condição $\{St = 0,413; Re = 7 \times 10^5\}$, para cinco instantes de tempo durante um ciclo de natação. O movimento da cauda à esquerda ($-y$) vem representado pelos instantes $t_0 + 0,2T$ e $t_0 + 0,4T$, já o deslocamento correspondendo ao segundo semiciclo do período refere-se ao movimento à direita ($+y$), apresentado durante os instantes $t_0 + 0,6T$, $t_0 + 0,8T$ e $t_0 + T$.

Na Fig. 9.26, as colunas 1 e 2 mostram as vistas superior e frontal da estrutura de

¹⁷ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *posterior body vortex*.

¹⁸ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *leading edge vortex*.

¹⁹ Acrônimo da expressão original na língua inglesa *trailing edge vortex*.

vórtices tridimensionais empregando o critério-Q. Na terceira coluna, observa-se a esteira em perspectiva. Nota-se como durante o movimento à esquerda, denominado primeiro semiciclo, forma-se o LEV^l . Esse vórtice originado na borda de ataque do lado direito da nadadeira caudal desloca-se pela cauda (Fig. 9.26 (a2) e (b2)), permanecendo totalmente colado à nadadeira ao fim do primeiro semi-ciclo. Esse instante corresponderia à configuração quando $t_0 + 0,5T$, referente a um pico no valor da força. Durante o movimento de batida à esquerda forma-se também um vórtice na parte posterior do corpo (PBV^l), também com formato tubular como o LEV , e que será emitido no próximo semiciclo, isto é, no movimento reverso da cauda. Finalmente, veja como o vórtice na borda de fuga TEV^l , resultado da fusão do LEV^r e PBV^r (produzidos no semiciclo anterior) é ejetado à esteira originado o anel.

Da mesma forma, no segundo semiciclo, onde o batimento da cauda é realizado à direita forma-se o vórtice na borda de ataque LEV^r , mas, neste caso na parte esquerda da nadadeira caudal, sendo mais facilmente observado na Fig. 9.26 (d2). Ao final do semiciclo, na posição de máxima amplitude observa-se (Fig. 9.26 (e2)) como o LEV^r permanece totalmente colocado à cauda, correspondendo ao pico de força observado na Fig. 9.17 (d) quando $t/T = 5,67$. De forma simultânea, note como o vórtice TEV^r (resultado do LEV e PBV formados no semiciclo anterior) é despreendido. Finalmente, veja-se como dos anéis de vorticidade são formados durante um ciclo completo, um em cada semiciclo. O sinal desses vórtices percebe-se de forma clara na Fig. 9.27, onde se revelam os níveis de vorticidade em um plano (xy), denominado AA' . Ademais, se apresentam as estruturas tridimensionais utilizando o critério-Q nesse plano, coloridas nos mesmos níveis de vorticidade. Essa figura permite entender melhor o sentido dos vórtices formados e posteriormente emitidos à esteira. Note como, no movimento descendente da cauda, o LEV^l originado aparece na cor azul, para posteriormente ser ejetado (durante o movimento reverso) como TEV^r . Esse último vórtice ocupará uma posição na esteira sob a linha de simetria, verificando novamente a topologia do tipo empuxo da esteira do atum na condição analisada. Por outro lado, no movimento ascendente (à direita) se forma um vórtice positivo, que será despreendido durante o próximo semiciclo, fazendo com que o centro de vórtice se localize na parte superior do plano longitudinal.

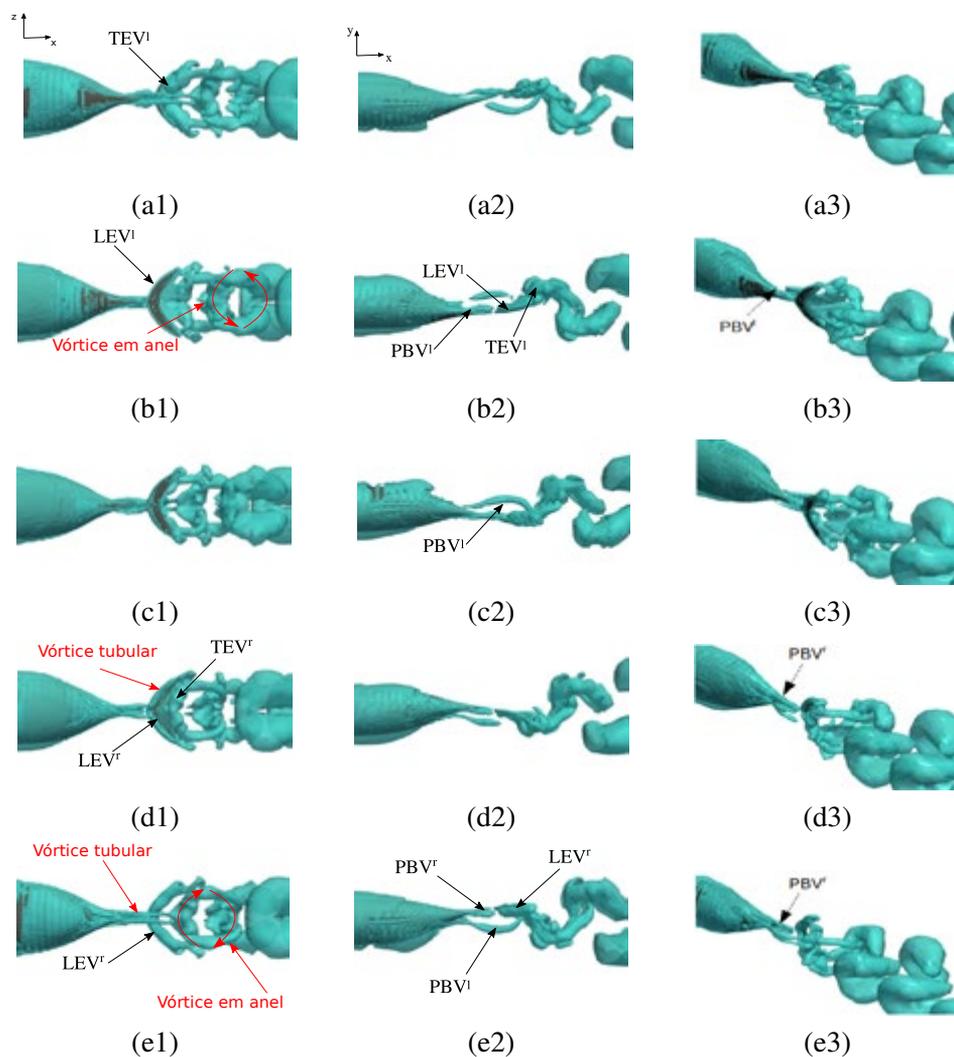


Figura 9.26: Estruturas de vórtices tridimensionais para atum com $St = 0,413$ e $Re = 7 \times 10^5$; (a) $t_0 + 0,2T$; (b) $t_0 + 0,4T$; (c) $t_0 + 0,6T$; (d) $t_0 + 0,8T$ e (e) $t_0 + T$. Os vórtices foram representados pelo parâmetro critério-Q ($Q=0,1$).

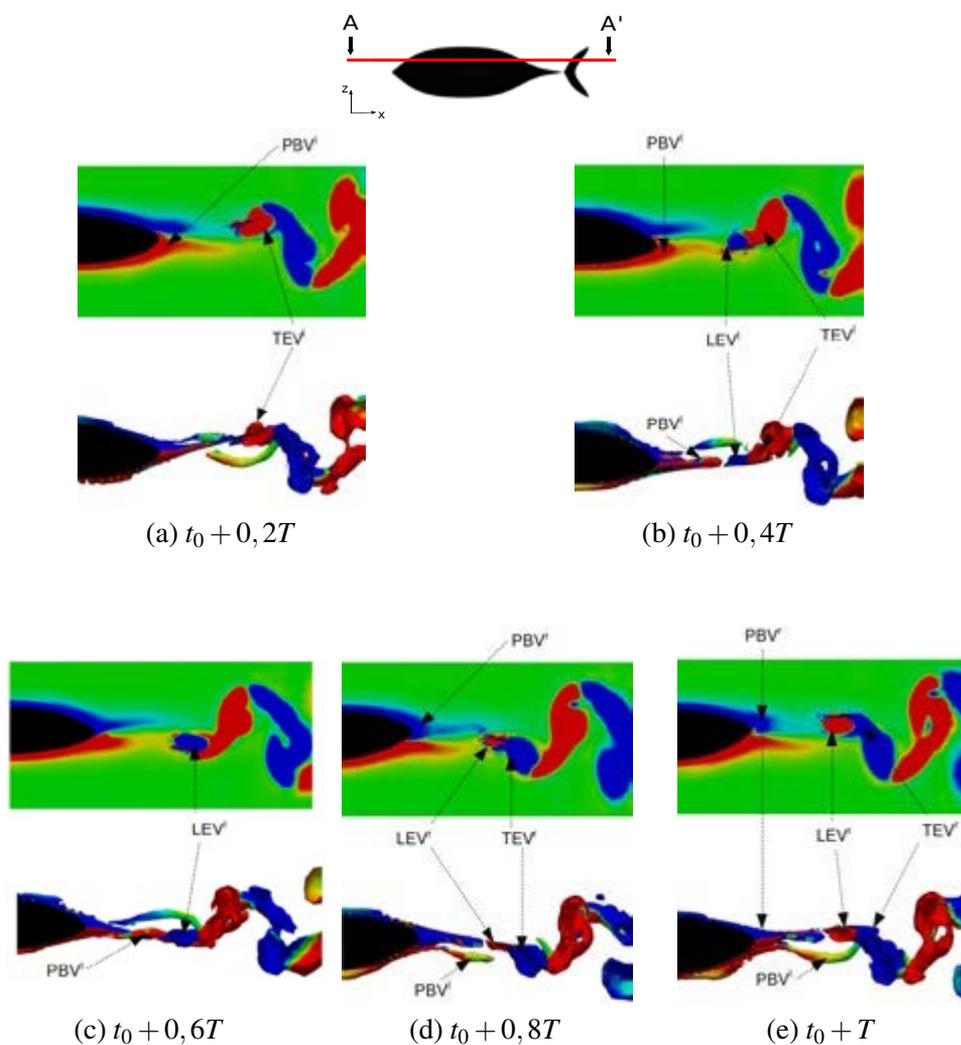


Figura 9.27: Contorno da vorticidade adimensional ($\omega_z L/U_\infty$) sobre o plano AA', identificado na parte superior da figura. Apresentam-se também as isosuperfícies definidas pelo critério-Q coloridas com a vorticidade adimensional, considerando o mesmo plano, durante um ciclo completo. (a) t_0 ; (b) $t_0 + 0, 2T$; (c) $t_0 + 0, 4T$; (d) $t_0 + 0, 6T$; (e) $t_0 + 0, 8T$ e (f) $t_0 + T$, sendo $t_0 = 9s$. Para o atum com $St = 0,413$ e $Re = 7 \times 10^5$.

Concluindo essa primeira análise, é importante destacar que a presença de vórtices *LEV* totalmente colados à nadadeira caudal correspondem a picos na função força, e, conseqüentemente, na geração de empuxo para a propulsão. Resultados condizentes com o apresentado foram reportados por Borazjani and Daghooghi, Liu et al., Brooks and Green, Mignano et al. [20, 91, 25, 107]. Além disso, evidenciou-se que os vórtices *PBV* se descolam do corpo e advectam a jusante, para fundir-se com a nadadeira caudal participando também das estruturas coerentes da esteira que são os vórtices em forma de anel, o que foi observado também por [91, 25].

Um estudo semelhante sobre a formação de vórtices foi realizado para o lambari. Neste caso, diferentes configurações de $Re - St$ serão avaliadas para examinar os vórtices induzidos pelo corpo e nadadeiras em função da variação sistemática dos principais parâmetros adimensionais, para entender o papel que jogam na produção. Ademais, além dos vórtices anteriormente analisados, *PBV*, *LEV* e *TEV*, serão observados também os vórtices formados pelas aletas laterais, denominados *LFV*.

Em primeiro lugar, investigam-se duas situações no regime de Reynolds $Re = 9 \times 10^4$, para os números de Strouhal 0,2 e 0,36 (Fig. 9.28), respectivamente, com o intuito de evidenciar as diferenças na formação dos vórtices que induzirão as esteiras de von Kármán tradicional e reversas, assim como as configurações de uma ou duas fileiras. Posteriormente, é analisada a situação referida à condição de equilíbrio em menor número de Reynolds, $\{St^* = 0,51; Re = 9 \times 10^3\}$, para contrastar o efeito do aumento de viscosidade nos vórtices (Fig. 9.29).

Na Fig. 9.28, apresentam-se duas configurações de nado do lambari em $Re = 9 \times 10^4$ quando $St = 0,36$ e $0,2$, respectivamente. Para cada caso, observam-se seis instantes do ciclo de natação, referidos pelas letras da *a-f*, sendo que as imagens na fileira acima *a-c* representam um semiciclo e conseqüentemente, as imagens *d-f* o seguinte. Em ambos os casos, a letra *c* alude ao instante $t_0 + 0,5T$ e *f* a $t_0 + T$. Os vórtices induzidos pelo lambari durante o nado exibem-se mediante as isosuperfícies do critério-Q (nas vistas em perspectivas e frontal) e no plano de corte longitudinal (*xy*) sendo $z = 0,013$, denominado AA' , observa-se o campo de vorticidade adimensional ($\omega_z L/U_\infty$). Primeiramente, olhando para a configuração que representa condição de equilíbrio, percebe-se como a formação dos vórtices *LEV* e *TEV* acontece de maneira similar ao caso do atum. Durante o primeiro semiciclo, onde o peixe experimenta o movimento à esquerda, nota-se a formação do anel de vorticidade positivo (vermelho), chamado de V^l , resultado da fusão do

TEV^l e os vórtices das nadadeiras laterais LFV , durante o ciclo completo. No lambari, os vórtices do corpo são mais dificilmente observados, já que colapsam com os das aletas laterais, antes de conseguir discerni-los e, portanto, nas figuras apenas são indicados esses últimos, os LFV .

Durante o batimento à direita, vemos a emissão do TEV^r , resultado do LEV^l formado no semiciclo anterior, originando o anel de vórtice negativo (azul), chamado de V^r , que será emitido à esteira. Os vórtices laterais formados durante este batimento LFV^r (também na cor azul), fusionarão com o vórtice em anel durante o semiciclo seguinte, terminando de formar o vórtice. Veja, ademais, como os LFV desprendidos das nadadeiras laterais em direção à esteira, têm afetado seu formato tubular pela nadadeira caudal, especificamente pela sua parte inicial, o pedúnculo caudal.

Na Fig. 9.28, observa-se, na parte inferior, o ciclo de natação do peixe, quando nada em mais baixa frequência, caracterizado pelo $St = 0,2$. Neste caso, os mesmos vórtices são originados durante o batimento da cauda em ambos os sentidos, porém notamos algumas diferenças significativas devido à variação da frequência. Primeiramente, nota-se que frequências menores, com mais baixas velocidades laterais de cauda, levam a um menor deslocamento dos vórtices em torno à linha média. Da mesma forma, originam-se os vórtices V^l e V^r , durante os dois semiciclos do período, porém, a emissão desses vórtices é mais lenta, implicando, que na esteira, os vórtices positivos se localizam sob a linha média e os negativos acima dela. Isto resulta em uma esteira de von Kármán tradicional (do tipo arrasto), como já foi descrito anteriormente. Ademais, observa-se como os vórtices formados pelas aletas laterais estão menos influenciados pelo formato da nadadeira caudal, já que conseguem avançar na direção a jusante sem interferir com a cauda, devido às menores velocidades laterais no movimento da nadadeira caudal.

A falta de empuxo em baixas frequências reportada em vários trabalhos na literatura é resultado da falta de aderência dos LEV à nadadeira caudal, afetando à auto-propulsão [20, 25]. Fato também observado durante a análise do lambari quando $St = 0,2$, já que os LEV produzidos não aparecem com a mesma intensidade que no caso $St^* = 0,36$, onde os vórtices em forma de tubo formados nas arestas de ataque são muito maiores.

Finalmente, o caso do lambari nadando sob a condição de equilíbrio ($St^* = 0,51$), no regime do escoamento de menor número de Reynolds ($Re = 9 \times 10^3$) é

apresentado na Fig. 9.29. O objetivo é entender os efeitos de Re na situação na qual as forças hidrodinâmicas de arrasto e empuxo estão balanceadas. Os vórtices LEV e TEV emergem de forma semelhante aos casos anteriores e nota-se como o LEV' , facilmente observado nos instantes c e d , aparece novamente na forma tubular bem definido e colado à cauda. Além disso, veja como pelo efeito das forças viscosas maiores, a convecção dos vórtices laterais aparece mais lenta o que provoca a fusão deles com a parte posterior do corpo e a nadadeira caudal em maior grau do que na situação de equilíbrio do escoamento em maior Re . Pode-se observar também como os vórtices uma vez desprendidos viajam mais lentamente na esteira devido ao aumento da viscosidade, localizando-se mais próximos da nadadeira caudal pelo atraso da convecção do fluido.

Na literatura, estudos sobre os vórtices nas bordas de ataque e fuga na nadadeira caudal de peixes aparecem apenas nos últimos anos, na direção de análises semelhantes para insetos e pássaros, como comentado previamente. Portanto, trabalhos que relatem o estudo dos LEV não são ainda abundantes. Neste trabalho, aproveitou-se a flexibilidade oferecida pelas simulações numéricas, para contribuir com a discussão sobre o assunto, verificando-se que a produção desses vórtices e a aderência deles à nadadeira caudal, está intimamente relacionada à produção de forças de empuxo, observando-se esse comportamento nas situações de equilíbrio.

De forma geral, todos os resultados aqui obtidos são condizentes com as observações da literatura ($Re-St$), além de permitirem uma interpretação dos fenômenos hidrodinâmicos do nado. Posteriormente, o conhecimento adquirido até o momento a partir da análise simples do nado do peixe, será depositado no estudo da interação desse com o escoamento turbulento induzido pela esteira da turbina hidrocínética.

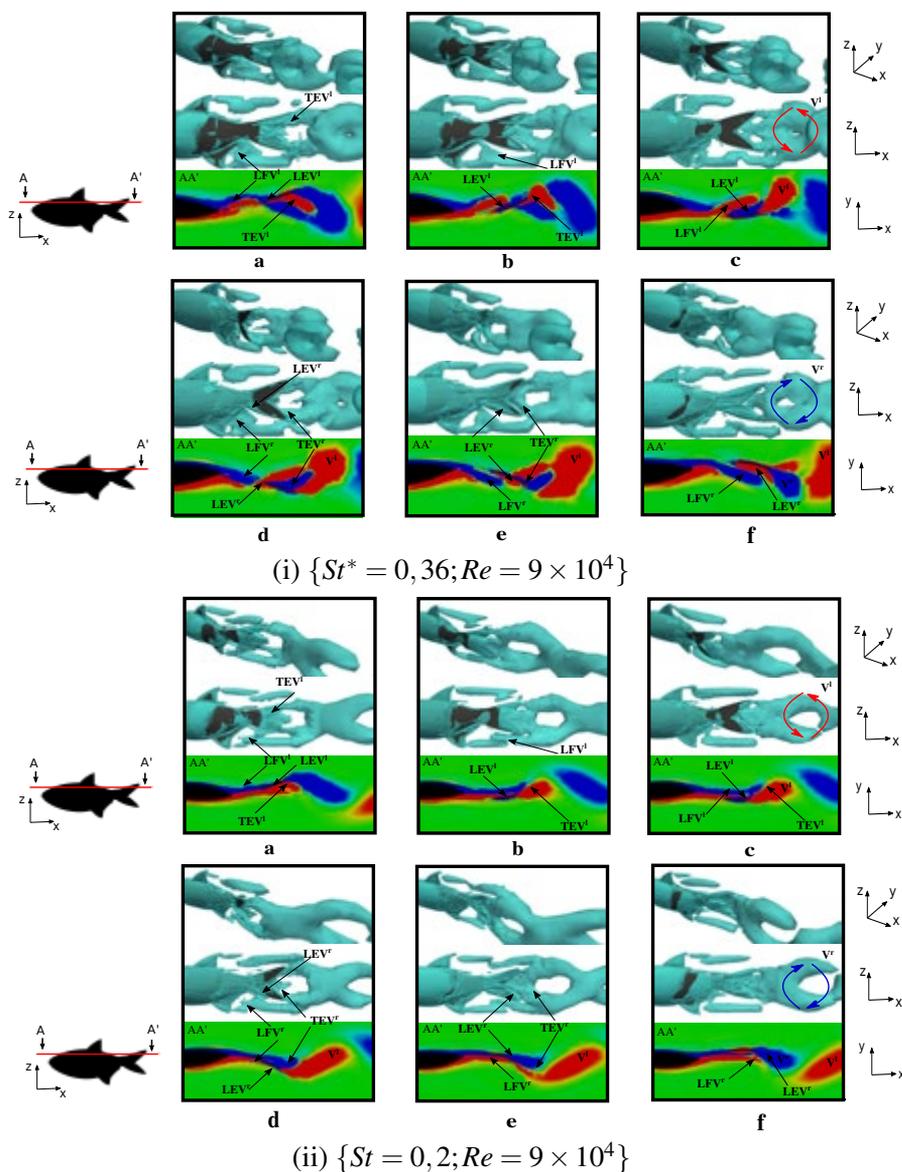


Figura 9.28: Vistas em perspectiva e lateral, exibindo as estruturas de vórtices tridimensionais do lambari usando o critério-Q ($Q=0,1$), durante 6 instantes de um ciclo. Ademais, da vista frontal, representada no plano de corte AA' ilustrando o contorno de vorticidade adimensional ($\omega_z L/U_\infty$). Para as situações do lambari nadando sob as condições (i) $\{St^* = 0,36; Re = 9 \times 10^4\}$ e (ii) $\{St = 0,2; Re = 9 \times 10^4\}$.

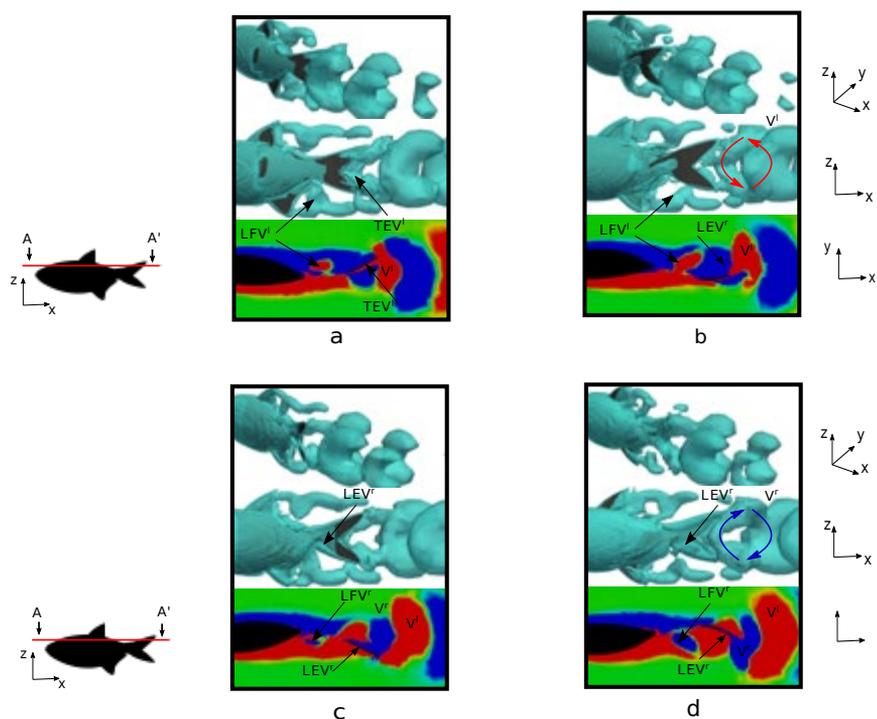


Figura 9.29: Vistas em perspectiva e lateral, exibindo as estruturas de vórtices tridimensionais do lambari usando o critério-Q ($Q=0,1$), durante 4 instantes de um ciclo. Ademais, da vista frontal, representada no plano de corte AA' ilustrando o contorno de vorticidade adimensional ($\omega_z L/U_\infty$). Para as situações do lambari nadando sob a condição $\{St^* = 0,51; Re = 9 \times 10^3\}$.

9.5.2 Estudo numérico de turbina hidrocínética

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos da simulação numérica do rotor da turbina hidrocínética HK10. Analisam-se a curva característica da máquina ($C_p \times TSR$) e as principais variáveis cinemáticas, que permitirão caracterizar a esteira hidrodinâmica, para, posteriormente, conseguir avaliar o comportamento de um peixe nadando em um escoamento dessa topologia.

O comportamento da turbina hidrocínética é analisado mediante simulações CFD executadas no *software* OpenFOAM® a partir da técnica simplificada da linha atuadora. Os resultados obtidos se comparam com os extraídos de simulações empregando o *software* ANSYS-CFX, com mesmo domínio, densidade de malha e a geometria completa da máquina. Esses últimos já validados em alguns trabalhos, como os reportados por Macías et al. [96] e Mendes [105].

Validações com resultados experimentais sempre trazem maior robustez a um estudo como este (que persegue a verificação de uma metodologia simplificada), já que nos aproximam da física real do problema. Sem embargo, a realização de testes em turbinas de grande porte carregam elevada complexidade operacional e custos. Porém, se efetuarão comparações com resultados extraídos de experimentos em túnel de vento, considerando um modelo do rotor HK10 na escala 1/10 [105], realizando a transposição de resultados de modelo a máquina real com base na teoria da similaridade [95].

A comparação dos escoamentos em problemas de diferentes escalas, realiza-se de acordo com as leis de similaridade geométrica, cinemática e dinâmica. Como reportado por Macias, Mendes, Oliveira and Brasil [95], as similaridades geométricas e cinemáticas são facilmente atingidas, uma vez que na construção do modelo, é fielmente respeitada a escala, e que os triângulos de velocidade incidentes nas pás dos dois rotores se garantem mediante a avaliação dos mesmos TSR . Por outro lado, a similaridade dinâmica, em problemas de grande diferença entre os números de Reynolds, para a máquina real e em escala, não é alcançada devido a divergências em fenômenos, como o descolamento da camada limite ou a transição do regime laminar-turbulento. Neste sentido, Macias, Mendes, Oliveira and Brasil [95] propuseram uma lei para a transposição das curvas características, que permite estimar o desempenho da máquina real uma vez conhecido o comportamento do modelo em escala reduzida, corrigindo a falta de similaridade dinâmica anteriormente comentada.

Dessa forma, com base na teoria da similaridade e nas correções propostas na literatura, Mendes Mendes e Nunes et al. [117] avaliaram o desempenho da máquina real HK10 operando em água mediante os ensaios em túnel de vento do modelo em escala da mesma máquina. Neste trabalho, empregam-se esses resultados, baseados na validação do coeficiente de potência, também busca-se de estabelecer novas comparações entre as variáveis cinemáticas, fornecidas pelas diferentes metodologias numéricas e experimentais, já que se esperam comportamentos aproximados desses resultados adimensionalizados devido às similaridades geométrica e cinemática entre os rotores.

Coeficiente de potência

O coeficiente de potência do rotor é apresentado na Fig. 9.30 para uma faixa de TSR aplicando as duas metodologias computacionais, o método simplificado da linha atuadora implementado no *software* OpenFOAM[®], por um lado, e as simulações empregando malha móvel e a superfície do rotor *software* ANSYS-CFX, por outro, referidas no que segue como ALM e CFX, respectivamente. Em ambos os casos, a velocidade do escoamento manteve-se constante e igual a $U = 2,5\text{ m/s}$, variando a velocidade de rotação para obter o intervalo de TSR requerido para a análise. Portanto, uma simulação foi executada para cada ponto de funcionamento, caracterizado pela dupla $\{U - \Omega\}$, computando os resultados de C_p sempre na condição de regime permanente. Na Fig. 9.30, também se apresentam resultados para o coeficiente de potência extraídos de simulações empregando a metodologia BEM, executadas no *software* QBlade [99], tendo assim outra referência para comparar os resultados obtidos pelo ALM, já que parte do método da linha atuadora reside na metodologia BEM.

Os resultados atingidos pelo método ALM apresentaram boa coerência para uma ampla faixa de TSR se comparados com a curva BEM. Por outro lado, a Fig. 9.30 exibe como ambas as curvas, BEM e ALM, não aparecem tão próximas à curva CFX no intervalo de TSR referente ao pré-estol da máquina, $TSR > 1,6$. Essa região vem caracterizada pela aderência do escoamento às pás, resultando mais complexo caracterizar as forças na camada limite nesses métodos e, conseqüentemente, obtendo resultados menos satisfatórios. Conforme reportado nos trabalhos de Simms et al. [143] e Tangler James [148], os métodos BEM tendem a superestimar as curvas de eficiência de turbinas, $C_p \times TSR$, em regiões não tão próximas à

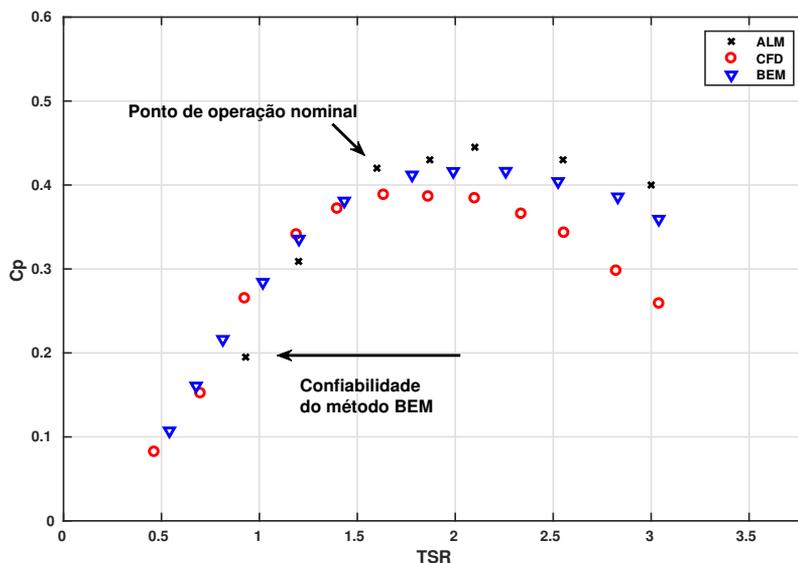


Figura 9.30: Curva característica $C_p \times TSR$ do rotor HK10, comparando os métodos da linha atuadora (ALM), as simulações com rotor no ANSYS-CFX (CFX) e simulações utilizando o método BEM.

região de operação nominal, o que é observado também neste trabalho. Nota-se, ademais, que em torno à condição de operação nominal, $TSR = 1,6$, os valores de C_p obtidos pelos diferentes métodos aparecem bastante próximos, uma vez que a camada limite é aderente à superfície de extradorso das pás, tendo em vista as condições de operação $\{U - \Omega\}$. Observa-se que, para as condições nominais de operação, os resultados BEM (e, por consequência, ALM) em geral apresentam uma boa concordância com resultados CFX, sendo que $C_p = 0,41$ e $C_p = 0,40$ para ALM e BEM, e $C_p = 0,39$ para as simulações CFX.

Ademais, é possível estabelecer uma comparação mais ampla para os resultados no ponto de operação, utilizando os resultados experimentais em túnel de vento apresentados por Mendes [105], como comentado previamente. Nesse trabalho, o autor realiza experimentos em túnel de vento para o rotor HK10 em escala 1/10,

avaliando a mesma faixa de TSR . A partir dos resultados extraídos nos ensaios, consegue-se estimar o coeficiente de potência da máquina em escala real operado em água (caso aqui estudado), mediante a aplicação da lei de transposição proposta por Macias, Mendes, Oliveira and Brasil [95], que corrige a falta de similaridade dinâmica. Portanto, Mendes [105] fornece uma estimativa de C_p para a máquina real mediante os ensaios com um modelo dessa máquina, recuperando o valor de coeficiente de potência obtido nas simulação CFX, $C_p = 0,39$.

Caracterização da esteira

O objetivo nesta seção é caracterizar a esteira hidrodinâmica da turbina onde se identificam grandes déficits de velocidade e pressão, ao mesmo tempo em que há elevados níveis de turbulência. Os resultados obtidos mediante as simulações ALM da turbina hidrocínética HK10 são comparados com aqueles extraídos pelo método que inclui a geometria do rotor e malha móvel (CFX), para verificar uma adequada caracterização da esteira a partir do método simplificado que, posteriormente, será integrado nas simulações do nado de peixes. Ademais, será possível estabelecer também uma comparativa com os resultados obtidos nos experimentos em túnel de vento mediante anemometria de fio quente²⁰, para o modelo em escala, devido à similaridade cinemática dos escoamentos. Como mencionado anteriormente, todos os dados referentes aos ensaios em túnel de vento podem ser encontrados no trabalho de Mendes Mendes [105], assim como uma descrição mais detalha da metodologia empregada nas simulações CFX.

A comparação das esteiras neste trabalho reside na observação, principalmente, dos campos de velocidade, vorticidade e intensidade de turbulência. Antes de começar a análise de comparativa entre máquinas, apresenta-se na Fig. 9.32, a evolução temporal das velocidades em dois locais da esteira, conseguindo-se visualizar o momento em que a máquina atinge uma condição de operação constante. Isto permitirá, por exemplo, escolher um intervalo de tempo apropriado para o cálculo do campo médio de velocidades.

Os locais escolhidos para essa análise vêm ilustrados na Fig. 9.31, onde se observam dois pontos localizados na esteira a $1D$ e $2D$ a jusante do rotor na

²⁰Anemometria de fio quente é uma técnica de experimental dedicada à medição de velocidades de um escoamento.

coordenada axial e a $0,5D$ na direção transversal. Nota-se, a partir da Fig. 9.32, que na distância igual a $1D$ os efeitos de rotor estão latentes, observando que a cada ciclo da turbina aparecem 4 picos de velocidade, relacionados com o batimento de cada uma das pás. Fato não observado nas velocidades tomadas a dois diâmetros a jusante da máquina, onde a influência da rotação da turbina não é significativa. Na figura, exibem-se as velocidades na direção do escoamento e a magnitude do vetor velocidade, evidenciando a menor influência das velocidades nas direções y e z na magnitude da velocidade, em relação a U_x , como exibido na Fig. 9.32. Observa-se, ademais, como a partir da quarta rotação ($t/T = 4$) claramente as velocidades não modificam sua tendência. Tanto a velocidade como o tempo apresentam-se de forma adimensional, segundo a velocidade do escoamento não perturbado ($U_\infty = 2,5m/s$) e o período de rotação da turbina ($T = 1,73$), respectivamente.

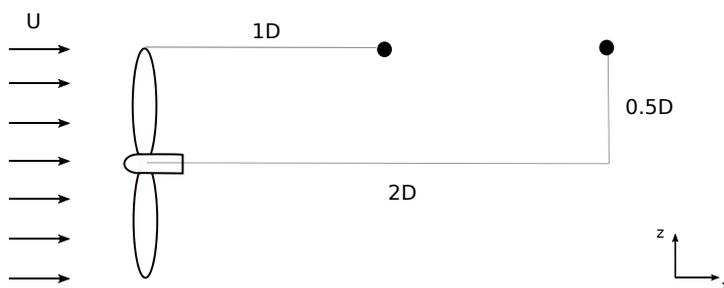


Figura 9.31: Esquema dos locais de toma de velocidade, localizados na esteira a $1D$ e $2D$ a jusante do rotor, e coincidentes com a linha da ponta da pá.

Para começar com a validação do método ALM, a Fig. 9.33 apresenta os perfis da magnitude da velocidade média adimensional (U/U_∞) em diferentes posições a jusante do rotor ($x/D = 1; 2; 3; 4$), exibindo a evolução desses perfis na esteira. Na figura, o eixo z/D corresponde à distância adimensionalizada, tomando como origem o centro do rotor. A média das velocidades foi tomada em um intervalo de tempo de 6,86 s correspondendo a 4 rotações completas, uma vez que o rotor atingiu o regime de funcionamento permanente, estabelecido segundo a Fig. 9.32 a partir da quarta rotação da máquina.

Observa-se que os perfis oriundos das duas técnicas numéricas (ALM e CFX) apresentam boa coerência em forma e magnitude, sendo muito similares nas zonas

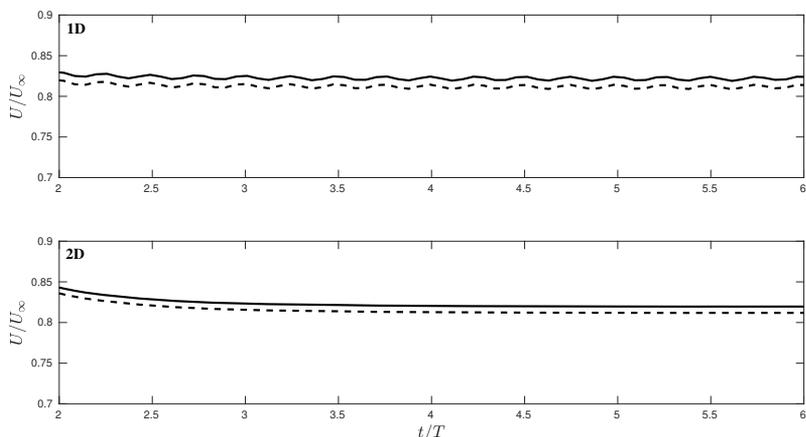


Figura 9.32: Evolução temporal das velocidades adimensionais tomadas na esteira a $1D$ e $2D$ a jusante do rotor, e coincidentes com a linha da ponta da pá, isto é, a $0,5D$ na direção transversal. A linha preta pontilhada refere-se à velocidade na direção do escoamento (U_x) e a linha preta representa os valores da magnitude da velocidade, definida simplesmente como (U). A variável temporal também foi adimensionalizada empregando o período de rotação da máquina.

mais afastadas do centro do rotor, $|z/D| > 0,4$. A maior diferença entre as curvas percebe-se na região central da máquina compreendida pelo intervalo $|z/D| < 0,2$, referente à nacele da turbina. Esse contraste no déficit de velocidades é especialmente acentuado no perfil mais próximo ao rotor ($x/D = 1$), e conforme a distância a jusante aumenta as diferenças entre os perfis de velocidade diminuem. Portanto, espera-se que esse comportamento se estenda à região de esteira distante onde o ALM apresentará uma aproximação também satisfatória no referente à recuperação do perfil de velocidade. Destaca-se que nas simulações ALM, a nacele foi representada por um cilindro horizontal de diâmetro 0,3 m e modelado também pela técnica da linha atuadora, apreciando seu efeito nos perfis de velocidade, como observado. Na Fig. 9.33, apresentam-se os perfis de velocidade ($x/D = 2;3$) extraídos dos ensaios em túnel de vento para a máquina HK10 em escala 1/10,

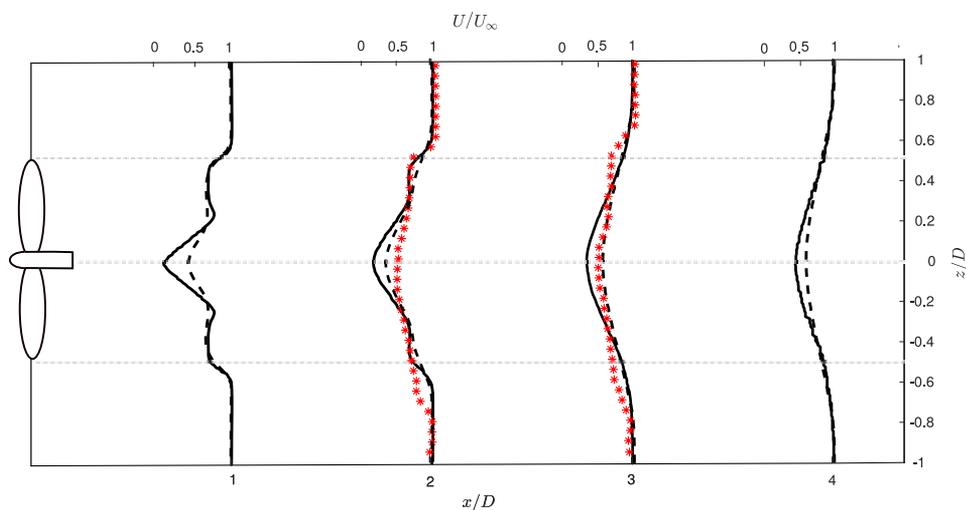


Figura 9.33: Comparação dos perfis da magnitude de velocidade média a 1D, 2D, 3D e 4D a jusante do rotor no plano médio longitudinal nas simulações numéricas com (- -) o método da linha atuadora (ALM) e (—) considerando a geometria do rotor (CFX). Ademais, os perfis de velocidade a 2D e 3D a jusante do rotor foram validados com os resultados experimentais adimensionalizados obtidos no túnel de vento (**).

reportados no trabalho de [105]. Como mencionado previamente, a similaridade cinemática entre ambos os escoamentos é conservada devido ao fato de que a análise ser realizada, em ambos os casos, para condições de operação caracterizadas pelo adimensional $TSR = 1,6$. Veja como, os resultados experimentais e ALM apresentam-se muito próximos nesses perfis. Ademais, observa-se também como no túnel de vento o efeito da queda de velocidade na nacele não se mostra tão acentuado quanto nas simulações CFX.

Continuando com a análise das variáveis na esteira, observa-se, na Fig. 9.34, os perfis das velocidades perpendiculares ao escoamento, U_y (- -) e U_z (—). Embora sabendo que são pequenas frente à velocidade axial, de acordo às observações das velocidades na Fig. 9.32, é importante conhecer o comportamento dessas variáveis visando a uma possível influência no nado do peixe. Primeiramente, nota-se a

partir da Fig. 9.34 que as velocidades U_y são bastante menores do que U_z , estando próximas de zero. Por outro lado, os perfis de velocidade U_z exibem valores mais elevados, especialmente na região mais próxima ao rotor. Neste ponto, destaca-se que o escoamento da esteira de uma turbina é um problema simétrico apenas no que diz respeito à componente axial, e, portanto, as velocidades U_y e U_z apresentam-se diferentes.

As velocidades U_z exibem seus máximos valores na região mais próxima ao rotor, e vão sendo atenuados conforme se avança na esteira. Observa-se que já na posição $x/D = 4$, os valores de U_z aparecem próximos a os de U_y , o que indica que a componente rotativa induzida pela turbina é quase inexistente à distância de $4D$. Nota-se também como em cada perfil avaliado aparecem dois máximos da velocidade, simétricos e em direções opostas, e a posição desses valores máximos se desloca na direção da ponta da pá conforme se afastam do rotor. Em relação a esse comportamento, identifica-se mediante a ilustração dos perfis de velocidade, o formato cônico observado normalmente nas esteiras de turbina.

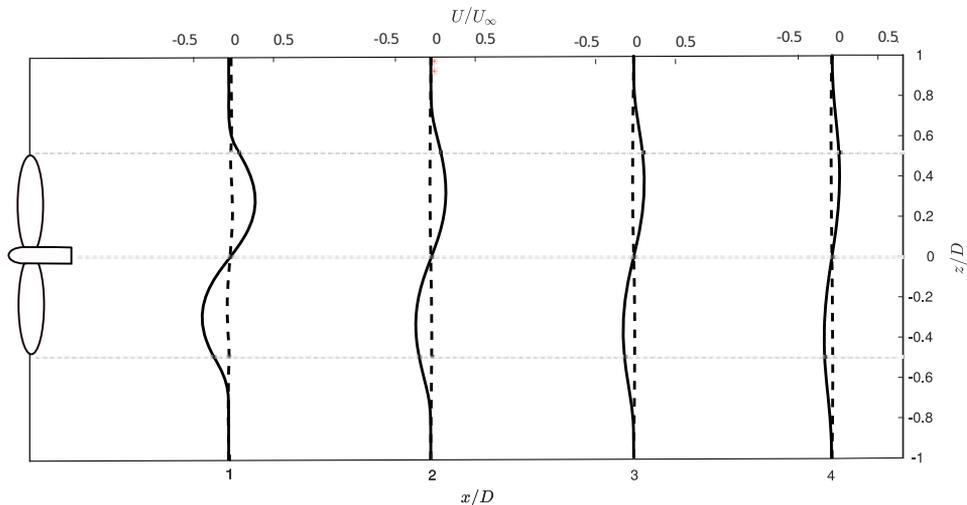


Figura 9.34: Perfis de velocidade média adimensionais, U_y/U_∞ (- -) e U_z/U_∞ (—) a 1D, 2D, 3D e 4D a jusante do rotor no plano médio longitudinal nas simulações numéricas com o método da linha atuadora (ALM).

Além das velocidades, na Fig. 9.35 exibem-se os perfis de intensidade de turbulência nas mesmas regiões da esteira já avaliadas. Por um lado, para posteriormente poder estabelecer correlações entre o desempenho do peixe e esta variável do escoamento; e, por outro, porque eles foram também mensurados por Mendes [105], durante os ensaios no túnel de vento, o que nos permite de novo a verificação do escoamento da esteira computado neste trabalho pela técnica ALM.

Primeiramente, observa-se como, no plano mais próximo do rotor $X/D = 1$, a intensidade de turbulência apresenta os maiores valores observados. Ademais, nota-se como esse perfil apresenta dois máximos coincidindo com as regiões de ponta de pá, identificando a posição dos vórtices de ponta de pá. Por outro lado, observa-se como os valores de IT diminuem à medida que o escoamento se desenvolve e também como a área perturbada aumenta. Na posição $X/D = 1$, esta se limitava claramente à área do rotor, e, no caso $X/D = 4$, vai mais além. Ambos comportamentos, também observados nos perfis de velocidade, devem-se aos fenômenos de difusão e mistura do escoamento nas zonas mais afastada das esteira por causa da evolução do escoamento. Finalmente, observa-se como os perfis aqui apresentados para o rotor HK10 da máquina real exibem valores e tendências similares aos extraídos dos ensaios em túnel de vento para a máquina em escala.

A seguir, continuando com a análise da esteira, apresentam-se sobre o plano central longitudinal da turbina, as visualizações do campo de velocidade e vorticidade adimensionais, no ponto de funcionamento da máquina. A Fig. 9.36 ilustra os resultados do contorno de velocidade para ambos os métodos que exibem uma grande semelhança no mapa de cores na região da esteira próxima, zona a jusante do rotor compreendida pela região até $4D$ aproximadamente [160]. Na Fig. 9.36, aparecem na forma de linhas pontilhadas os locais na esteira onde foram computados os perfis de velocidades exibidos na Fig. 9.33, para facilitar o entendimento do leitor.

Além da semelhança qualitativa no campo de velocidades observada na região da esteira, destacam-se as similitudes nos níveis de velocidades atingidos nas zonas do extradorso e introdorso das pás, onde se aprecia a diminuição e o aumento de velocidade, respectivamente. Fato observado pela mudança de coloração azul e vermelha nessas regiões. Notam-se, também, algumas discrepâncias entre os resultados obtidos pelos dois métodos empregados, ALM e CFX. A principal delas reside na maior queda de velocidade observada na situação que considera a

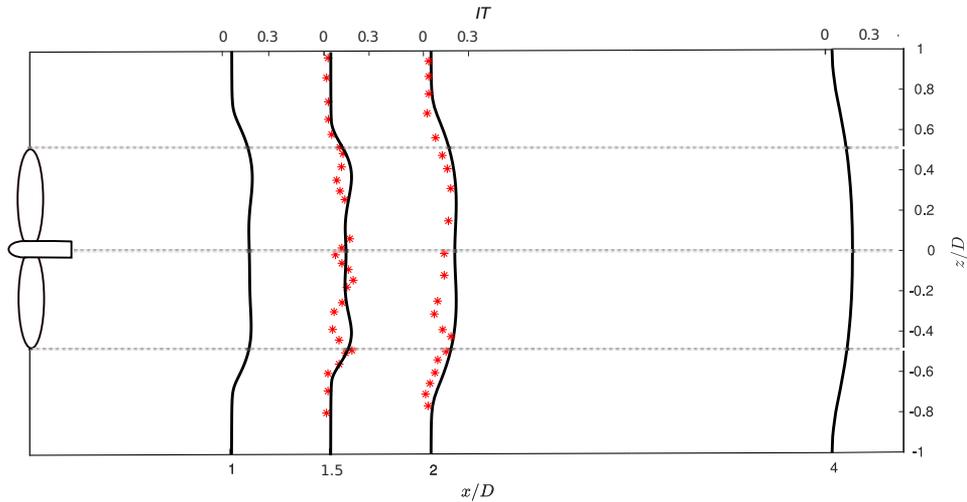


Figura 9.35: Perfis de intensidade de turbulência média a 1D, 1,5D, 2D e 4D a jusante do rotor no plano médio longitudinal, nas simulações numéricas com o método da linha atuadora (ALM) e nos experimentos no túnel de vento (**).

superfície do rotor, exibindo a esteira na região central uma cor azul mais intensa, como mostrado na imagem superior da Fig. 9.36, e que se relaciona ao efeito de bloqueio ao escoamento da nacele. Na esteira computada pelo ALM, nota-se como a velocidade apenas começa a diminuir após dois diâmetros a jusante do rotor e, além do mais, não tem a mesma intensidade. Isto também se percebe na Fig. 9.33, fundamentalmente, no perfil relativo à distância $x/D = 1$, que aparece mais achatado na região central. Porém, mesmo a nacele criada pelo ALM não mostrando o mesmo efeito de quando se considera a geometria plena, consegue aproximar o comportamento desejado. Na situação hipotética de não se considerar o cilindro atuador como nacele no ALM, veríamos a região central da esteira como um jato de alta velocidade, já que não existiria geometria bloqueando o escoamento. Esse comportamento é observado em numerosos trabalhos, empregando-se o método da linha atuadora [100, 124].

As linhas pretas contínuas da Fig. 9.36 são curvas representando os níveis de velocidade, observa-se como em ambos os casos seguem o mesmo padrão. Primeira-

mente, veja-se como as linhas exteriores se expandem a jusante do rotor envolvendo a esteira próxima com uma abertura similar, porém, ligeiramente maior no caso da simulação com rotor. A montante, as curvas apresentam também um comportamento quase idêntico, aparecendo os contornos com uma forma semicircular em ambos os casos. Por outro lado, as linhas internas representam 3 níveis de velocidade nas duas simulações. Observa-se como a linha referente à menor velocidade (a que envolve a região na cor azul) contém o máximo deficit de velocidade, e que nas duas situações finaliza na mesma distância.

Em geral, a aparência de ambos os planos nos quais aparecem diferentes níveis de velocidade é bastante semelhante. Além do mais, permitem a identificação da região da esteira após a turbina, caracterizada pelo deficit de velocidade e pela forma de cunha, que o fluxo vai abrindo a medida que se afasta do rotor. Antes de apresentar o campo de vorticidade no plano longitudinal da turbina, da mesma forma que feito para a velocidade, mostra-se, na Fig. 9.37, planos transversais do rotor exibindo o campo de velocidade desde outra perspectiva.

Nas Figs. 9.37 (a) e (b) observa-se a distribuição da velocidade no plano do rotor, para os métodos com e sem rotor, com comportamentos similares. Nota-se, na região das pás, uma zona de menor velocidade no método ALM, devido à ausência de geometria no método simplificado. A Fig. 9.37 (c) exhibe o campo de velocidade representado em planos transversais da esteira a várias distâncias a jusante do rotor, as mesmas apresentadas nos perfis de velocidade na Fig. 9.33. Novamente, percebe-se como principal discrepância entre os métodos a região central da esteira próxima de baixa velocidade, que aparece maior e mais acentuada nas simulações com rotor. Veja-se que essa característica desaparece na distância de $4D$, região final da esteira próxima onde a geometria do rotor não é determinante na topologia da esteira. Ademais, observa-se como já nessa distância foi superada a região onde ocorre o máximo deficit da velocidade.

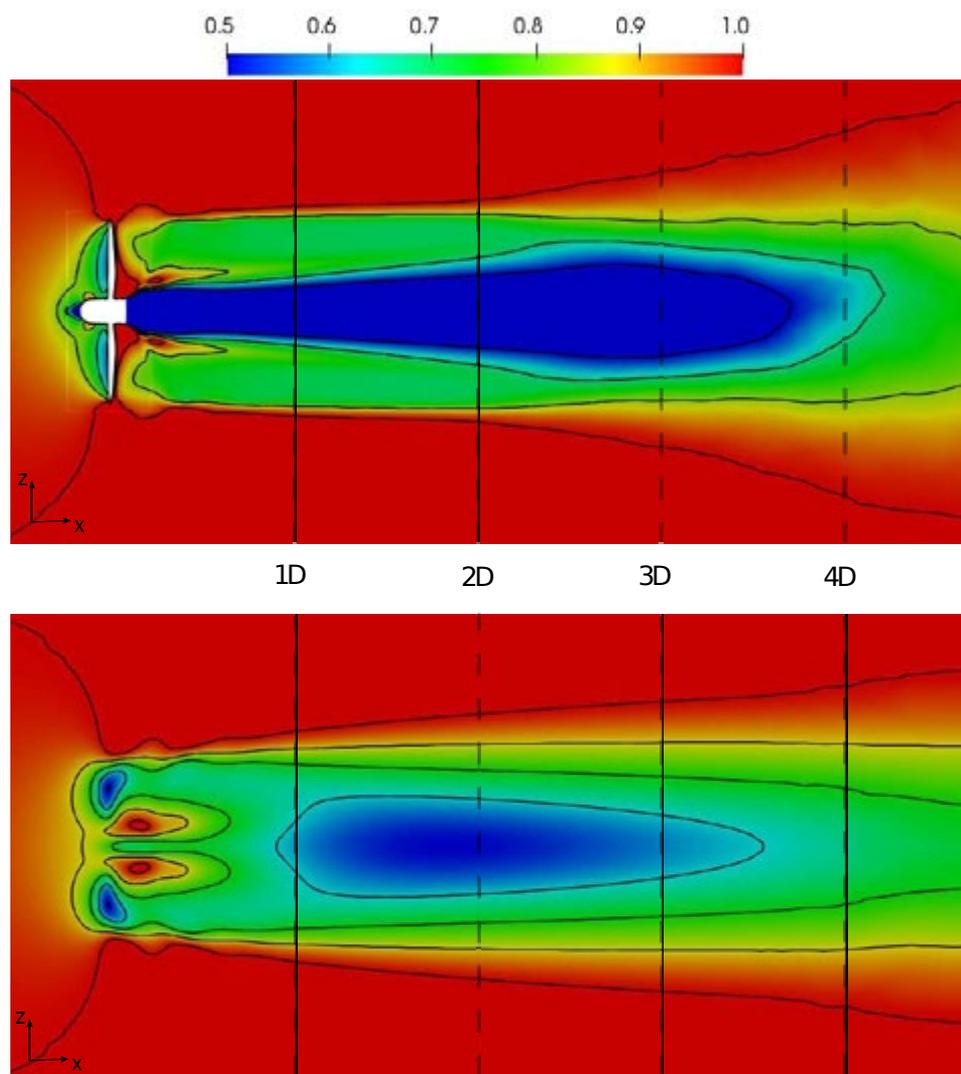


Figura 9.36: Comparação dos campos de velocidades adimensionais U/U_∞ no plano médio longitudinal nas simulações numéricas utilizando os métodos: simulações ANSYS-CFX com geometria do rotor (acima) e método simplificado da linha atuadora ALM (abaixo). Referem-se em linhas pontilhadas às distâncias ao rotor na esteira: 1D, 2D, 3D e 4D.

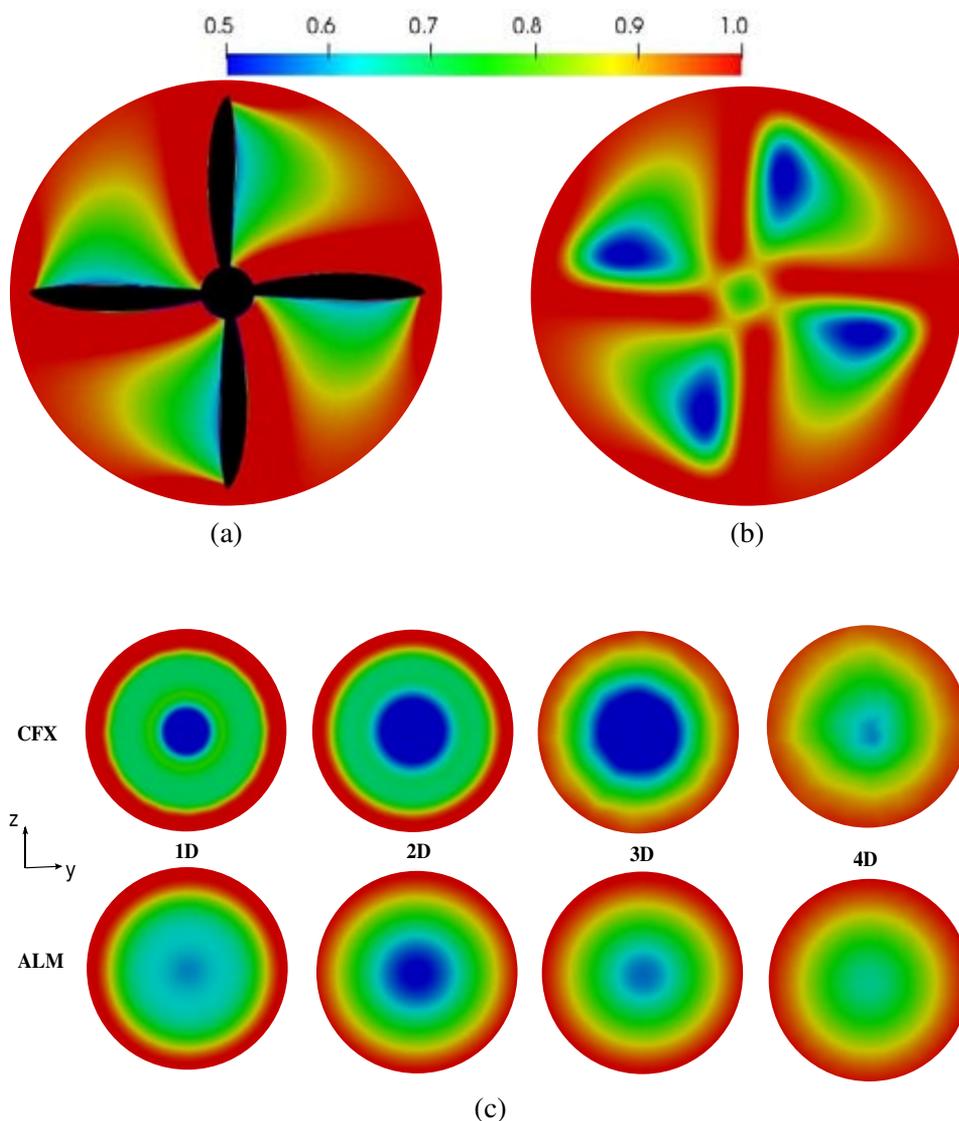


Figura 9.37: Comparação dos campos de velocidades adimensionais U/U_∞ no plano transversal do rotor nas simulações numéricas utilizando os métodos: (a) simulações ANSYS-CFX com geometria do rotor (CFX) e (b) método simplificado da linha atuadora ALM (ALM); (c) Representa diferentes plano transversais a jusante do rotor nas distâncias 1D, 2D, 3D e 4D, para o método com geometria do rotor completa (CFX), acima, e o método simplificado da linha atuadora (ALM), abaixo.

A Fig. 9.38 mostra os campos de vorticidade adimensionais, também no plano médio longitudinal, para ambos os métodos numéricos. Observa-se como os resultados obtido pelo método ALM recuperam os extraídos da simulação, resolvendo o problema completo, exibindo campos de vorticidade semelhantes em morfologia e intensidade. Da mesma forma que na discussão anterior, a divergência entre as figuras vem relacionada à presença da nacele, que induz uma zona de maior vorticidade na linha central, onde ocorre o vórtice de raiz. A distâncias maiores do que $3D$, os campos de vorticidade apresentam comportamentos semelhantes.

Na Fig. 9.39, apresentam-se as estruturas de vórtices do rotor mediante as isosuperfícies representadas a partir do critério- Q , coloridas com os níveis da magnitude da velocidade. Veja como é possível identificar as estruturas coerentes próprias da esteira de uma turbina de eixo horizontal, tais como os vórtices de ponta de pá e os vórtices de nacele. A quebra das estruturas coerentes, sem embargo, não pode ser observada, já que as simulações realizadas foram limitadas à região da esteira próxima.

Em ambos os casos, o vórtice de ponta de pá observa-se como a estrutura com formato helicoidal que aparece na cor vermelha localizada logo após o rotor, resultado das elevadas velocidades angulares nessa região. Por outro lado, o vórtice de nacele, com forma cilíndrica, localiza-se na zona central da esteira próxima, e aparece na cor verde/azul representado a zona de baixa velocidade influenciada pela nacele do rotor. Os dois métodos apresentam resultados muito similares no que concerne à formação das estruturas coerentes da esteira, fazendo com que o método ALM escolhido neste trabalho apareça apropriado para o fim requerido, conseguir um escoamento que represente ao fluxo de uma esteira hidrodinâmica.

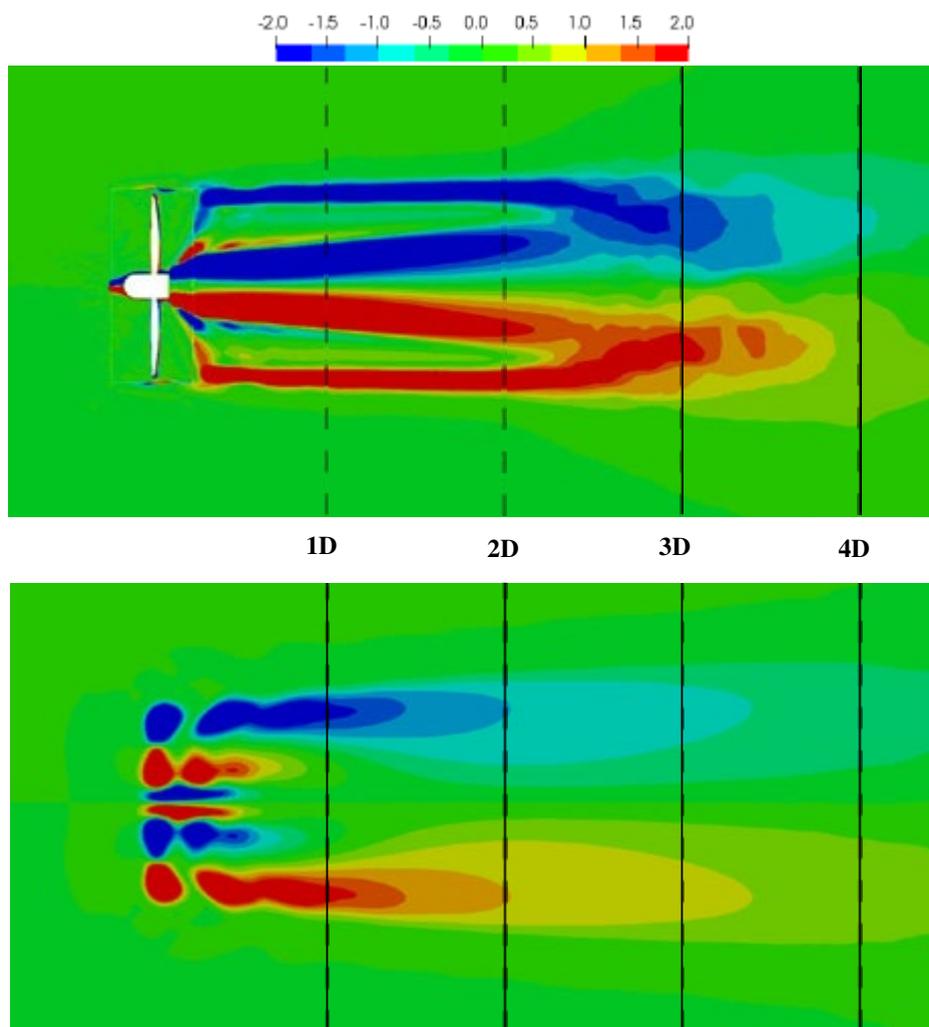


Figura 9.38: Comparação dos campos de vorticidades adimensionais $\omega_z D/U_\infty$ no plano médio longitudinal nas simulações numéricas utilizando os métodos: simulações ANSYS-CFX com geometria do rotor (imagem superior) e método simplificado da linha atuadora ALM (imagem inferior). Referem-se em linhas pontilhadas as distâncias ao rotor na esteira: 1D, 2D, 3D e 4D.

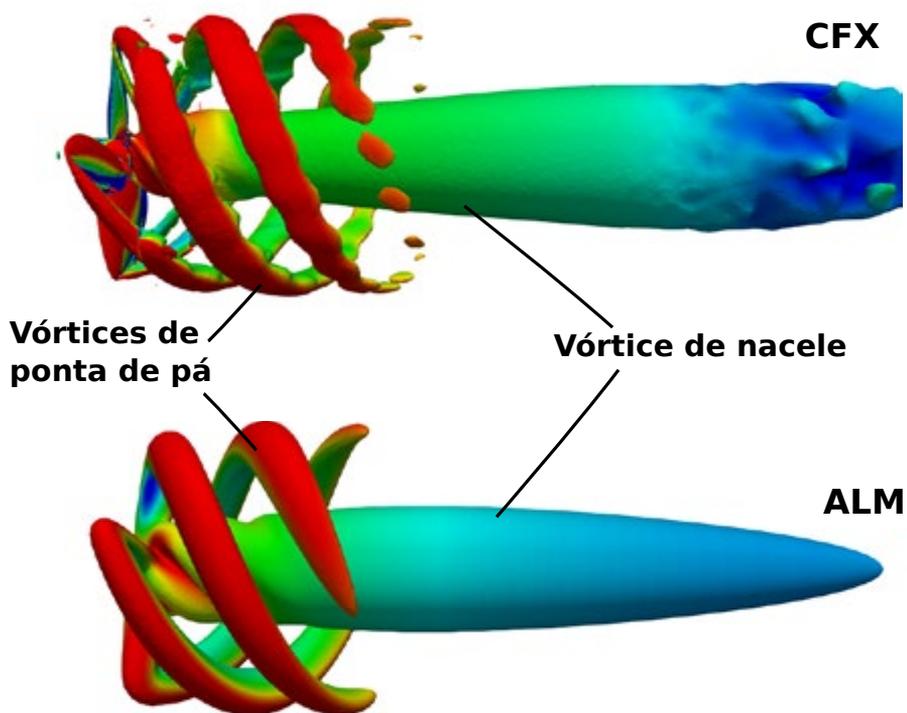


Figura 9.39: Comparação das estruturas de vórtices tridimensionais a partir das iso-superfícies criadas com o parâmetro critério-Q ($Q=0.3$) nos métodos: simulações ANSYS-CFX com geometria do rotor (CFX) e método simplificado da linha atuadora (ALM).

Destacam-se que os resultados exibidos oferecem apenas a identificação do fluido na esteira próxima, apresentada aqui pelo comprimento de $4D$. Ainda nessa região, as estruturas coerentes de ponta de pá e raiz aparecem bem definidas, mas à medida que o escoamento se distancia do rotor, os vórtices de ponta de pá e raiz começam colapsar um ao o outro, delimitando assim o final da esteira próxima e formando estruturas menores que irão se difundir ao longo da esteira distante.

A metodologia da linha atuadora pode não ser o método mais adequado se o objetivo é analisar de forma aprofundada o desempenho de uma máquina uma vez que se trata de um método simplificado em que a geometria do rotor não intervém como superfície, sacrificando alguns aspectos como a caracterização dos efeitos na camada limite. Todavia, visando ao nosso objetivo, que consiste em reproduzir um peixe nadando na esteira de uma turbina hidrocínética, o método ALM aparece como uma forma satisfatória para abordar o problema. Isso porque induz todas as estruturas de vórtices principais em um escoamento dessa topologia, e que os requisitos computacionais são menores, tanto na malha empregada, com todos os elementos hexaédricos e sem necessidade de malhar superfícies, como em níveis de cálculo, já que não precisa resolver escoamento na camada limite da superfície das pás. Ademais, a validação dos resultados de acordo com os experimentos em túnel de vento para a máquina em escala eleva a confiabilidade do método aqui construído.

9.5.3 Estudo numérico do problema acoplado turbina-peixe

A seguir, apresenta-se a análise, visando à interação peixe-turbina. O fluido considerou-se escoando em velocidade constante de $2,5\text{ m/s}$ e o rotor operando na condição de $TSR = 1,6$, sendo a velocidade de rotação da máquina 35 rpm ($\Omega = 3,66\text{ rad/s}$). Portanto, o comportamento da turbina replica o investigado na análise exclusiva do rotor, apresentado na seção anterior. Sob essas condições de trabalho da máquina, executou-se uma bateria de simulações, localizando o peixe em diferentes posições na esteira da turbina. A frequência de natação foi também variada em algumas situações para avaliar a dependência desse parâmetro com a produção de forças, como já foi realizado anteriormente.

Inicialmente, avaliou-se o peixe posicionado em três distâncias diferentes na esteira da turbina ($1D, 2D$ e $4D$), a uma distância do eixo da máquina de $0,5D$, deixando o peixe alinhado com a ponta da pá do rotor. A frequência de natação do

peixe foi escolhida como $\omega = 36,6 \text{ rad/s}$, configurando um número de Strouhal aproximado em $St = 0,33$, considerando a velocidade do escoamento não perturbado $U = 2,5 \text{ m/s}$ no cálculo de St . Nesta situação, a cada rotação da turbina o peixe executa 10 ciclos de natação.

Antes de apresentar a análise da interação peixe-turbina, na situação acima descrita, se exhibe a evolução temporal dos coeficientes de forças, considerando o peixe nadando em um escoamento não perturbado sob as condições de velocidade constante igual a $U = 2,5 \text{ m/s}$ e frequência de natação $\omega = 36,6 \text{ rad/s}$. Resultados sobre essa situação não foram exibidos na seção anterior e, portanto, é importante sua apresentação prévia à análise peixe-turbina para estabelecer posteriores comparações. Dessa forma, na Fig. 9.40, são mostrados os esforços realizados sob o peixe durante 10 ciclos de natação. O coeficiente de força médio na direção do escoamento foi computado como $\bar{C}_{Fx} = 0,625$, enquanto \bar{C}_{Fy} e \bar{C}_{Fz} tomaram valores próximos a 0. Observa-se que na direção de deformação do peixe y , os esforços apresentam um comportamento periódico devido ao movimento do mesmo, sendo que em z , devido à simetria do problema em relação ao plano frontal, a componente dos esforços é nula.

Nas Figs. 9.41, 9.42 e 9.43 apresentam-se os coeficientes de forças adimensionais nas três direções do espaço, C_{Fx} , C_{Fy} e C_{Fz} , para cada uma das situações enumeradas acima, durante uma volta completa do rotor, visando comprovar como afeta o escoamento induzido pela turbina na região da ponta da pá sobre as forças hidrodinâmicas produzidas pelo peixe durante o nado em diferentes regiões da esteira. A seguir, serão referidas as situações em que o peixe nada a 1, 2 e 4 diâmetros a jusante do rotor, como: situação 1D, situação 2D e situação 4D, respectivamente, para facilidade do leitor.

As forças exercidas pelo peixe na situação 1D refletem de forma clara o movimento rotatório da turbina na produção de tais forças, consequência direta da flutuação da velocidade nessa região, como exibido previamente na Fig. 9.32, na qual se constata que na região da esteira próxima ao rotor, o escoamento está bastante influenciado pela geometria e frequência de rotação da máquina, o que se aprecia de forma mais evidente nos sinais das forças, C_{Fx} e C_{Fy} . O comportamento irregular dos coeficientes de força observados na Fig. 9.41, segue um padrão de repetição coincidente a cada meia volta do rotor, devido à sincronização da posição da pá com a configuração do peixe de máxima amplitude, que acontece quando

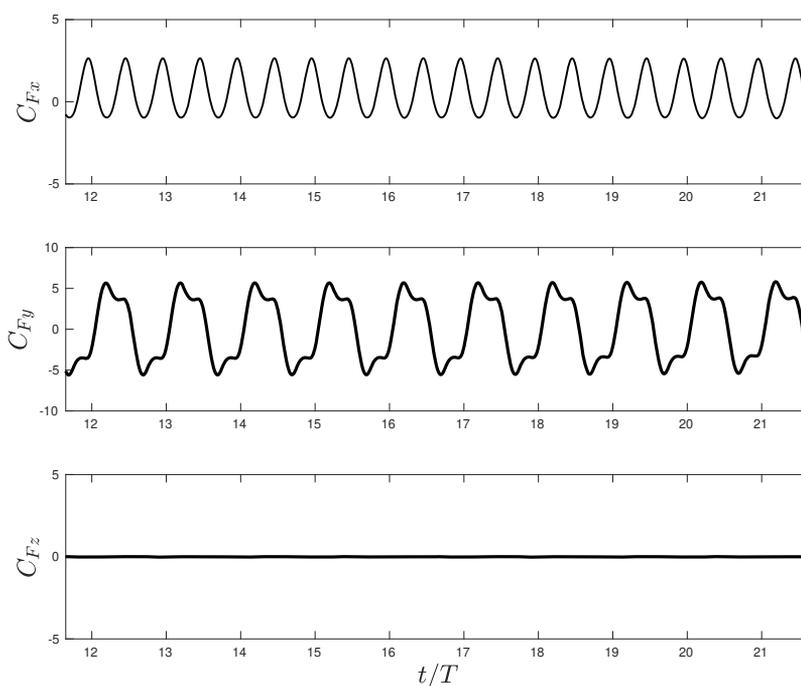


Figura 9.40: Evolução temporal dos coeficientes de forças adimensionais C_{Fx} , C_{Fy} e C_{Fz} , na situação do peixe nadando em um escoamento não perturbado em velocidade constante $U = 2,5\text{ m/s}$ (sem presença do rotor) sob o número de Strouhal, $St = 0,33$ ($\omega = 36,6\text{ rad/s}$).

o peixe realiza 5 ciclos completos. Consequentemente, a cada quarto de volta do rotor, o peixe executa 2,5 ciclos, como indicado pelas linhas vermelhas pontilhadas na figura.

Se compararmos os sinais das Figs. 9.40 e 9.41, referentes às situações sem e com rotor, nota-se como a forma das ondas é muito similar, porém os picos de máximo e mínimo apresentam variações como consequência do escoamento

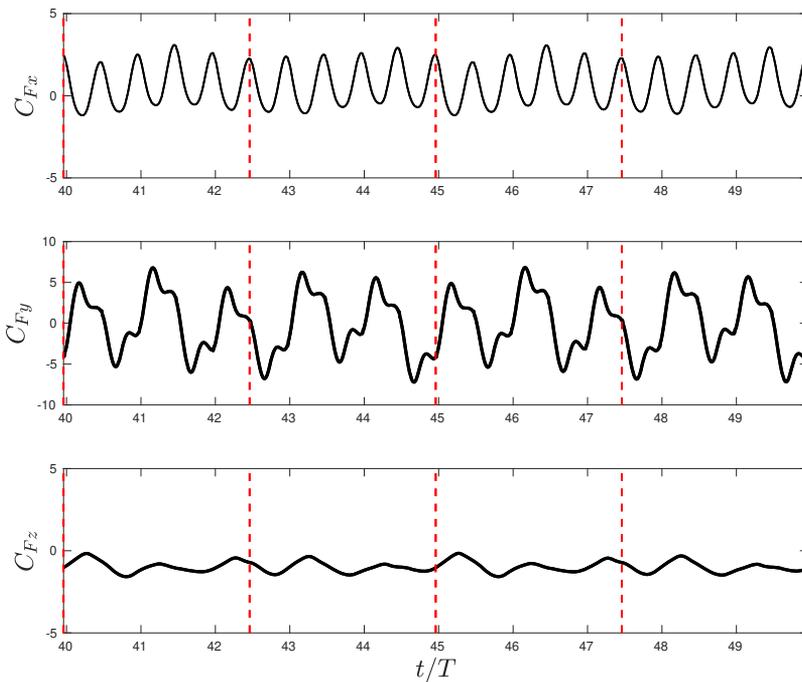


Figura 9.41: Evolução temporal dos coeficientes de forças adimensionais C_{Fx} , C_{Fy} e C_{Fz} , localizando-se o peixe a $1D$ a jusante do rotor e nadando sob o número de Strouhal, $St = 0,33$ ($\omega = 36,6 \text{ rad/s}$). As linhas vermelhas pontilhadas correspondem a cada quarto de ciclo do rotor.

perturbado. Sem embargo, observa-se que os valores desses picos não exibem diferenças consideráveis, o que reflete no valor médio do coeficiente de força longitudinal que toma o valor $\bar{C}_{Fx} = 0,637$, quantidade muito próxima à calculada na situação do peixe nadando sem a turbina. Por outro lado, o valor médio dos coeficientes de força verticais e transversais são estimados em $\bar{C}_{Fy} = -0,181$ e $\bar{C}_{Fz} = -0,979$, apresentando diferenças significativas em relação à situação

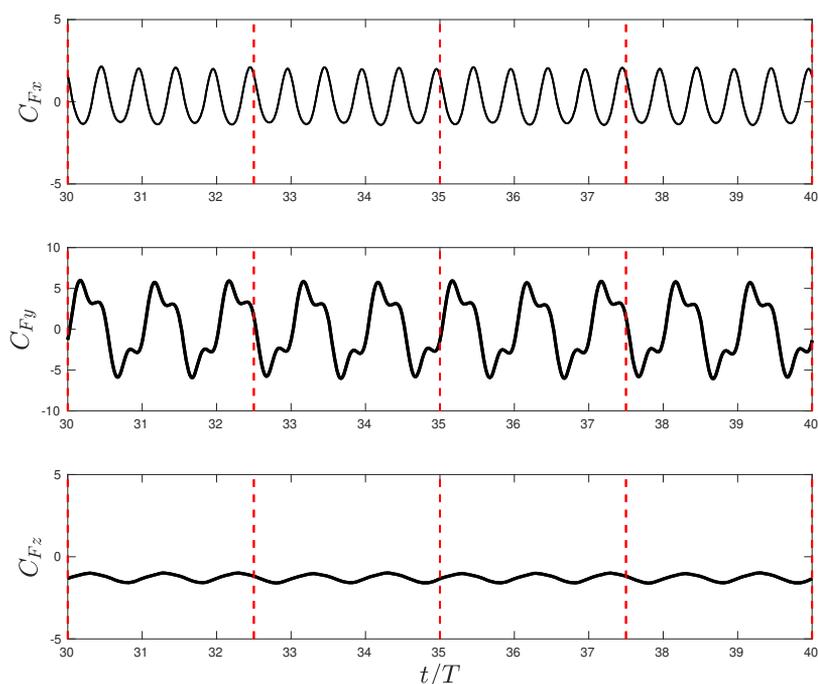


Figura 9.42: Evolução temporal dos coeficientes de forças adimensionais C_{F_x} , C_{F_y} e C_{F_z} , localizando-se o peixe a $2D$ a jusante do rotor e nadando sob o número de Strouhal, $St = 0,33$ ($\omega = 36,6 \text{ rad/s}$). As linhas vermelhas pontilhadas correspondem a cada quarto de ciclo do rotor.

sem turbina, onde esses coeficientes eram nulos devido à unidirecionalidade do escoamento.

Nas outras duas situações analisadas, sob as mesmas condições de U e St (Fig. 9.42 e 9.43), o peixe posiciona-se a dois e quatro diâmetros ($2D$ e $4D$) a jusante do rotor. Nesses casos, não se aprecia a influência do batimento das pás do rotor sobre as forças desenvolvidas pelo peixe. Veja-se que as funções força aparecem já com

um comportamento regular, no qual os picos de máximo e mínimo oscilam sempre em torno ao mesmo valor médio.

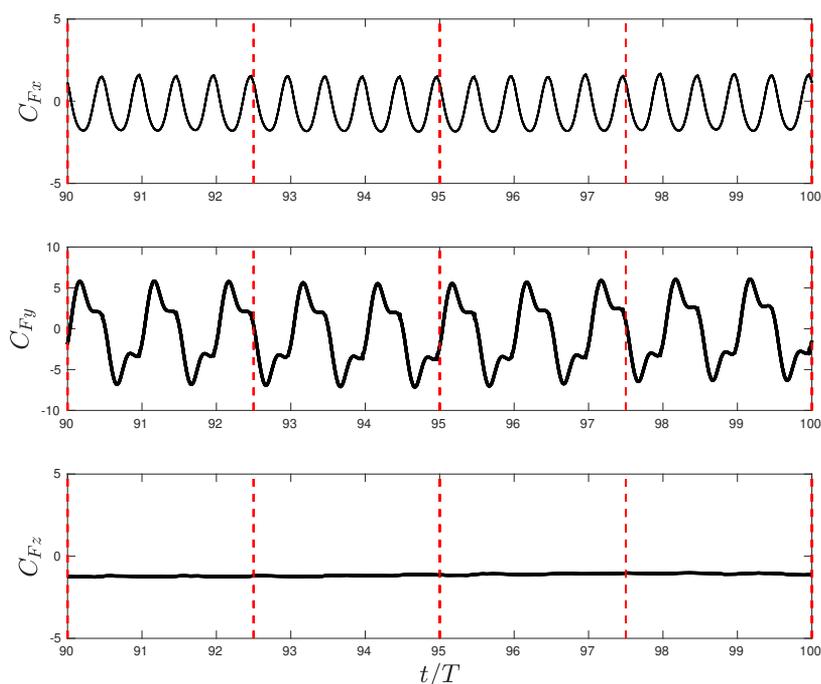


Figura 9.43: Evolução temporal dos coeficientes de forças adimensionais C_{F_x} , C_{F_y} e C_{F_z} , localizando-se o peixe a $4D$ a jusante do rotor e nadando sob o número de Strouhal, $St = 0,33$ ($\omega = 36,6 \text{ rad/s}$). As linhas vermelhas pontilhadas correspondem a cada quarto de ciclo do rotor.

Os valores médios de $C_{F_x}(t)$ computados são $\bar{C}_{F_x} = 0,116$ e $\bar{C}_{F_x} = -0,369$, respectivamente, para as situações $2D$ e $4D$. Os coeficientes nas outras duas direções, apresentaram os seguintes valores, $\bar{C}_{F_y} = 0,032$ e $\bar{C}_{F_z} = -1,284$, para $2D$, e $\bar{C}_{F_y} = -0,104$ e $\bar{C}_{F_z} = -1,115$, para $4D$. Igual ao que acontece, na situação $1D$,

as forças verticais e transversais não são mais nulas (como no caso não perturbado), como consequência das velocidades nas direções y e z , que mesmo pequenas em relação a x causam um efeito sobre os esforços realizados pelo peixe. Portanto, a diferença do primeiro caso analisado, em que a velocidade do escoamento era $U = 0,7 \text{ m/s}$, agora sim a estabilidade do peixe pode ver-se comprometida devido aos possíveis deslocamentos transversais.

Em relação aos valores computados dos esforços na direção propulsiva do peixe, nas situações com rotor (1D, 2D, 4D) e sem rotor, evidenciam-se diferenças significativas entre eles. Sendo que, conforme o peixe se afasta do rotor, o coeficiente \bar{C}_{Fx} decai até tomar valores negativos, implicando no fato de que o peixe passa a experimentar uma força resultante de empuxo, quando se posiciona a 1D e 2D, a uma força de arrasto na situação 4D. No que se refere a \bar{C}_{Fy} e \bar{C}_{Fz} , não se observa uma tendência clara entre as variáveis de força e posição, porém, sugere-se que o aumento das forças nessas direções aparece como resposta ao escoamento perturbado que impacta o peixe. Na Tab. 9.4, para uma análise mais aprofundada, são sumarizadas as forças sobre o peixe nas diferentes situações, desacopladas nas suas componentes de pressão e cisalhamento, nas três direções do espaço.

A partir da Tab. 9.4, observa-se como os esforços viscosos na direção axial aumentam conforme a peixe se afasta do rotor. Em contraposição, as forças de pressão, nessa componente, mostram uma tendência decrescente com a posição, o que faz com que a força total diminua, passando de uma resultante positiva, do tipo empuxo, a uma resultante negativa, como reportado anteriormente. Assim, quando o peixe é posicionado a $4D$ a jusante do rotor será arrastado na direção do escoamento. Em relação à análise dos esforços nas outras direções do espaço, nota-se como na direção z a produção de forças de pressão é muito mais relevante do que na direção y , refletindo, portanto, nos valores das forças totais, já que o aporte das forças viscosas é muito reduzido. Na componente z notam-se valores muito pequenos de \bar{C}_{Fv} , e em y consideram-se nulos. A aparição dos esforços na direção z era esperada como consequência do aumento da velocidade nessa componente devido ao movimento rotatório da turbina, como reportado na seção anterior.

Para compreender a variação das forças computadas segundo a região da esteira correspondente, será necessária a correlação dessas forças com as restantes variáveis da esteira para, assim, estabelecer relações de dependência. Inicialmente, os valores de velocidade nos locais investigados são analisados para avaliar a sua influência

Tabela 9.4: Valores médios do coeficiente de esforços viscosos (\bar{C}_{F_v}), de pressão (\bar{C}_{F_p}) e total ($\bar{C}_{F_t} = \bar{C}_{F_v} + \bar{C}_{F_p}$) sobre o peixe, nas três direções do espaço (x, y, z), nas situações investigadas. O peixe nadando no $St = 0,33$ ($\omega = 36,6 \text{ rad/s}$), com velocidade do fluxo livre $2,5 \text{ m/s}$, em um escoamento não perturbado e na esteira da turbina hidrocínética nas posições $1D, 2D, 4D$ a jusante do rotor alinhado com a ponta da pá.

	\bar{C}_{F_v}			\bar{C}_{F_p}		
	x	y	z	x	y	z
Sem rotor	-0,489	0,000	-0,000	1,042	0,000	-0,000
1D	-0,372	0,000	-0,056	1,009	-0,181	-0,923
2D	-0,394	0,000	-0,059	0,510	0,033	-1,224
4D	-0,454	0,001	-0,046	0,085	-0,105	-1,069
	\bar{C}_{F_t}					
	x	y	z			
Sem rotor	0,265	0,000	0,000			
1D	0,637	-0,181	-0,979			
2D	0,116	0,032	-1,284			
4D	-0,369	-0,104	-1,115			

sobre a produção dos esforços. Nesse sentido, apresentam-se os perfis de velocidade do escoamento adimensionais (U e U_z) antes e depois do peixe, para cada situação analisada (Fig. 9.44 e 9.45).

Relacionam-se, então, os esforços produzidos pelo peixe (Tab. 9.4) com os perfis de velocidade (Figs. 9.44 e 9.45). Em primeiro lugar, segundo os perfis nota-se um ligeiro aumento da magnitude da velocidade (e, conseqüentemente, U_x) quando o peixe encontra-se mais próximo do rotor, devido ao fato de que a esteira nessa região tem menor diâmetro do que nas zonas distantes (pelo seu formato cônico). Essa abertura da esteira se percebe claramente pelo fato reportado na seção anterior durante a análise do rotor e, por conseguinte, o peixe na situação 4D aparece imerso em uma correnteza de menor magnitude do que no caso 1D, já que a região alinhada com a ponta da pá nas zonas mais afastadas do rotor apresenta velocidades a princípio mais reduzidas. Essa região já não é, portanto, fronteira direta com o escoamento não perturbado, como no caso 1D.

Por outro lado, observando-se as velocidades na direção z também se nota como a componente transversal da velocidade vai perdendo relevância conforme o peixe se situa nas regiões mais afastadas ao rotor na esteira. Por um lado, observa-se, desde os perfis de velocidade U_z , o efeito de conicidade da esteira; e, por outro, a componente rotativa do escoamento, devido ao efeito da rotação do rotor que faz com que a velocidade transversal perca intensidade com a evolução da esteira. De qualquer forma, é claro que o importante aumento das forças na direção z deve-se ao crescimento da velocidade nessa componente. O que não foi observado com tanta significância na direção y , já que é conhecido que as velocidades nessa componente na esteira são muito menores.

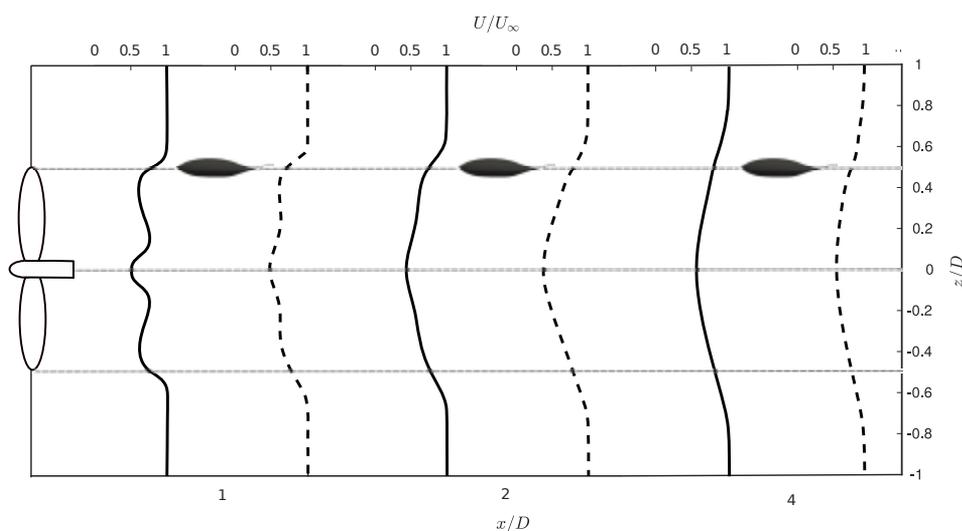


Figura 9.44: Perfis da magnitude de velocidade média no plano médio longitudinal, antes (—) e depois do peixe (- -), nas situações em que ele é posicionado a 1D, 2D e 4D a jusante do rotor.

Como reportado por Tritico and Cotel [152] e Liao [82], peixes nadando em escoamentos turbulentos são expostos a um complexo sistema de forças atuando sobre seu corpo que podem causar deslocamentos translacionais e/ou rotacionais.

Para trazer mais informação sobre o problema em questão, ilustram-se, nas Figs. 9.46 e 9.47, os campos adimensionais de velocidade e vorticidade instantâneos

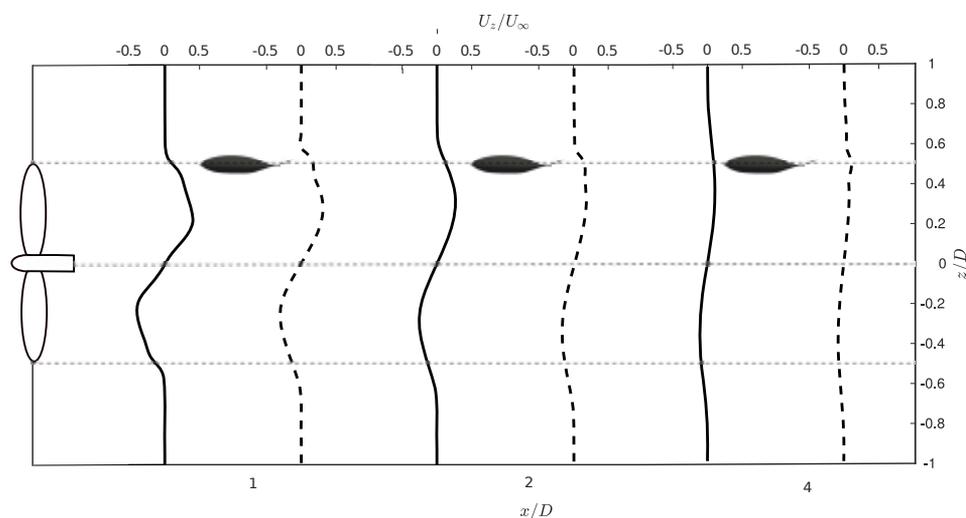


Figura 9.45: Perfis da velocidade média na direção z no plano médio longitudinal, antes (—) e depois do peixe (- -), nas situações em que ele é posicionado a 1D, 2D e 4D a jusante do rotor.

nas três situações que nos ocupam. Nelas, pode-se observar a posição do peixe na esteira, assim como os níveis de velocidade e vorticidade aos quais o peixe fica submetido em cada um dos casos, para continuar tentando estabelecer relações entre os esforços produzidos pelo peixe com as variáveis do escoamento.

Primeiramente, nota-se como de forma geral o campo de velocidades apresenta grandes similitudes independentemente da região onde o peixe se posiciona. No entanto, na situação 1D, é possível perceber como o peixe está em contato com as regiões de alta velocidade que surgem do resultado da aceleração do fluido pelo batimento das pás, na região da fronteira entre esteira e escoamento livre. Veja-se, ademais, que nas situações 2D e 4D, o peixe encontra-se o suficientemente longe como se isso representasse a interferência causada pelo movimento do rotor, como já foi descrito durante a análise das forças nas Fig. 9.42 e 9.43. Ademais, se observa também como o jato em alta velocidade, provocado pela natação do peixe durante sua propulsão, aparece encurtado, igual ao que no caso com $U = 0,7 \text{ m/s}$, pelo efeito da esteira da turbina que absorve grande parte da esteira do peixe.

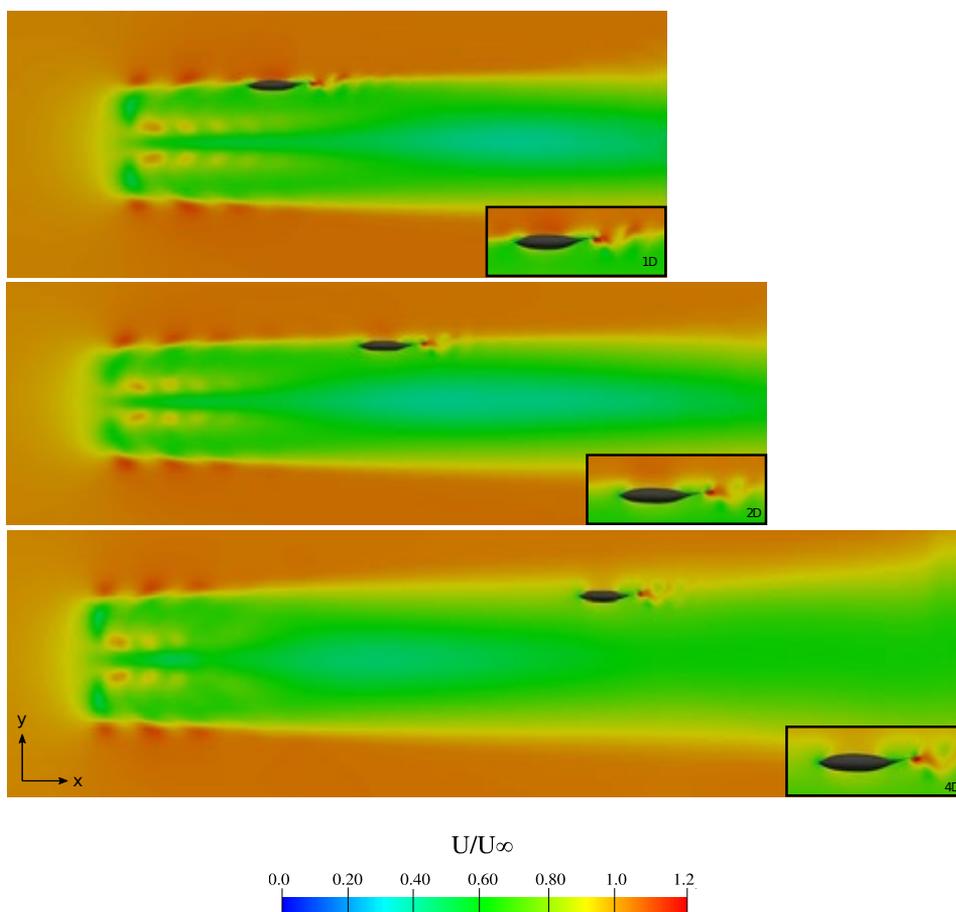


Figura 9.46: Campo da magnitude da velocidade adimensional (U/U_∞) no plano longitudinal xy nas situações com o peixe posicionado a jusante do rotor 1D, 2D e 4D e $St = 0,33$ ($\omega = 33,6 \text{ rad/s}$).

De qualquer forma, não parece clara a relação entre velocidade e esforços já que a variação destes últimos parece muito mais significativa do que a da velocidade. Além disso, esperado é que um peixe sob as mesmas condições cinemáticas experimente maior propulsão quando nada em um escoamento de menor velocidade. Para

clarificar esta questão de velocidades na esteira, foram calculados os valores médios de velocidade na região do peixe para confirmar quantitativamente a diferença entre elas. Portanto, na Tab. 9.5 são apresentados os valores de velocidade do escoamento nas proximidades do peixe em cada componente espacial, assim como o valor da média quadrática (RMS^{21}) normalizado com a velocidade média, em cada caso. A razão $U_{iRMS}/|\bar{U}_i|$ quantifica a oscilação nos valores da velocidade, que podem ter um efeito considerável no desempenho do peixe. Tanto os valores da tabela como os perfis de velocidade representam a média temporal, considerando 1 ciclo da turbina, uma vez atingido o regime permanente.

Em primeiro lugar, nota-se como as velocidades \bar{U}_x não apresentam diferenças significativas nos locais 1D e 2D, ($\bar{U}_x = 2,3 m/s$, tomando valores em torno a 20% da velocidade e fluxo livre ($U_x = 2,5 m/s$). Olhando agora para os esforços médios axiais e estabelecendo uma relação com as velocidades nesses locais, observa-se que os casos 1D e sem turbina, apresentam valores próximos, 0,637 e 0,629, respectivamente, sendo as velocidades diferentes. Ademais, a situação 2D exibe a mesma velocidade local que a 1D, e, mesmo assim, o coeficiente de força vê-se consideravelmente reduzido tomando o valor de $\bar{C}_{Fx} = 0,116$. Por outro lado, a velocidade axial na distância de 4D mostra um pequeno crescimento, em relação a 1D e 2D, devido ao início da recuperação da velocidade na esteira, e sem embargo o coeficiente de força axial é o menor encontrado.

Tabela 9.5: Velocidades médias nas três direções do espaço nos locais de avaliação do peixe, a 1D, 2D e 4D a jusante do rotor alinhados com a ponta da pá.

	$\bar{U}_x (m/s)$	$U_{xRMS}/ \bar{U}_x $	$\bar{U}_y (m/s)$	$U_{yRMS}/ \bar{U}_y $	$\bar{U}_z (m/s)$	$U_{zRMS}/ \bar{U}_z $
1D	2,029	0,003	0,007	1,188	0,325	0,009
2D	2,030	0,003	-0,024	0,241	0,278	0,019
4D	2,057	0,001	-0,005	0,423	0,195	0,003

Portanto, *a priori* não é possível estabelecer uma relação direta entre a velocidade média do escoamento e a produção dos esforços. Para aprofundar um pouco mais sobre o entendimento do peixe nadando nas diferentes zonas do escoamento, investiga-se o campo de vorticidade para compreender a possível influência das

²¹ Acrônimo da expressão original da língua inglesa *Root Mean Square*.

estruturas de vórtices tridimensionais no comportamento do peixe.

No que concerne ao campo de vorticidade adimensional $\omega_z D/U_\infty$, observa-se, primeiramente, na Fig. 9.47 como o peixe exhibe uma esteira de vórtices do tipo de von Kármán reversa, isto é, uma sequência de vórtices que se emitem de forma periódica posicionando os vórtices positivos sobre a linha média e os negativos sob ela. No canto inferior direito de cada imagem, se exhibe com maior detalhe o peixe e sua esteira, utilizando uma escala de maior abrangência para a representação da variável $\omega_z D/U_\infty$, neste caso, os limites do intervalo foram tomados em ± 5 , o que permite eliminar parte da vorticidade do escoamento do rotor para vislumbrar melhor o que acontece em volta do peixe.

Nota-se como parte da esteira do peixe é absorvida pela região de vorticidade induzida pelo rotor, exceto na situação 4D, na qual o peixe se encontra longe o bastante como para ser minimamente afetado por esta condição. Nesse caso, mesmo o peixe exibindo uma esteira de von Kármán reversa, a resultante de força axial se computou como negativa, originando portanto, uma força resultando do tipo arrasto sobre esse peixe que provocaria sua desaceleração. Nas outras duas situações, a sucessão de vórtices na esteira aparecem também como do tipo de von Kármán reverso porém, de uma forma menos clara, embora, a resultante das forças que o peixe experimenta na direção do escoamento seja do tipo empuxo.

Na literatura sobre peixes em escoamentos turbulentos presta-se especial atenção ao tamanho dos vórtices, e à orientação destes, em relação à avaliação dos impactos do fluxo perturbado sobre o animal. Neste sentido, é conhecido que vórtices com tamanhos similares ao comprimento do peixe são os que maior impacto poderiam causar, pelos peixes terem maiores dificuldades para seu gerenciamento. Vórtices pequenos poderiam não ser percebidos pelo peixe e vórtices muito grandes podem ser entendidos como uma grande massa de fluido chegando, sem causar desorientação ou mudança de posicionamento.

Do estudo da esteira de uma turbina hidrocinética, conhece-se que os vórtices presentes nessa esteira: os vórtices de ponta de pá, os vórtices de nacele e os vórtices provenientes da quebra das estruturas tridimensionais anteriores. O vórtice de nacele está orientado na direção do escoamento, tendo como eixo principal o eixo x e experimentando uma rotação anti-horária (positiva) em relação ao eixo. De qualquer forma, o peixe não interage com ele nas situações agora analisadas, mas sim com os vórtices de ponta de pá, que são estruturas turbulentas tridimensionais

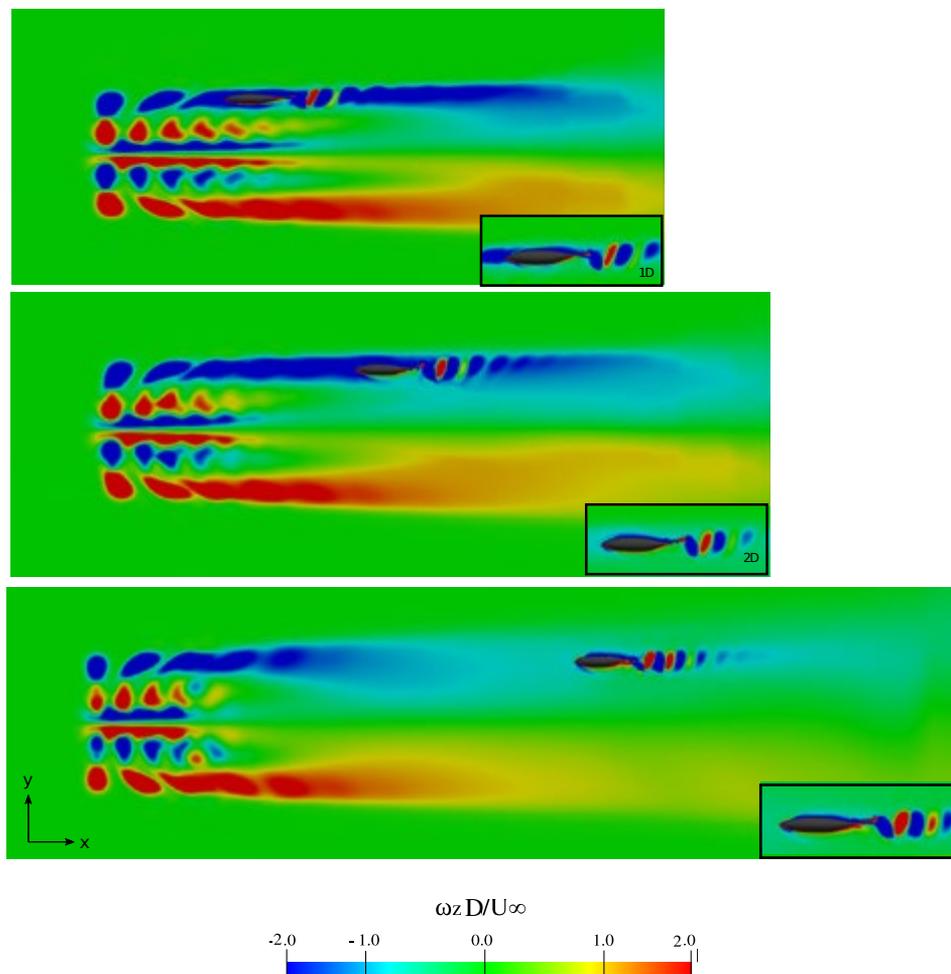


Figura 9.47: Campo da componente z da vorticidade adimensional ($\omega_z D/U_\infty$) no plano longitudinal xy nas situações com o peixe posicionado a jusante do rotor 1D, 2D e 4D e e $St = 0,33$ ($\omega = 33,6 \text{ rad/s}$).

helicoidais. Portanto, a sua orientação será tridimensional, no avanço segundo o eixo x . No plano xy , como apresentado na Fig. 9.47, o diâmetro desses vórtices

pode-se estimar com um valor aproximado de $0,7m$, o que significa que apresentam um tamanho similar ao comprimento do peixe e, portanto, causar impactos não desejáveis. Ademais, tanto nas regiões 1D como 2D, a intensidade dos vórtices parece similar, o que não acontece na situação 4D.

Para maior claridade, a Fig. 9.48, ilustra as estruturas de vórtices de forma tridimensional empregando o filtro critério-Q, colorido com os níveis da magnitude da vorticidade. Nota-se como na situação 4D o critério-Q não consegue proporcionar a informação suficiente para a análise das estruturas de vórtices como nos casos 1D e 2D, em que aparecem perfeitamente definidas. Nessa região, não se visualizam mais os vórtices de ponta de pá, apenas se observam pequenos restos que apontam a vórtices nessa região, ao redor do peixe, porém, não se tem mais informação ao respeito, podendo ser parte da quebra dos vórtices coerentes observados previamente. Ademais, na situação 4D, observa-se como o vórtice de nacele sofre uma leve modificação do seu formato quando encontra o peixe.

Como é conhecido da teoria de turbinas de eixo horizontal, o fim da esteira próxima (3-4D) e o início da esteira distante (a partir de 5D) vêm caracterizados por um comportamento mais desordenado do escoamento devido à quebra das estruturas coerentes formadas na esteira próxima e à formação de pequenos vórtices sem uma orientação definida. Portanto, a situação 4D, faz referência a essa região, de mais difícil caracterização. Isto é devido, tanto ao grande intervalo de escalas temporais e espaciais de um problema desta natureza, como à abordagem empregada pela resolução das equações médias de Navier-Stokes, que apresenta limitações na resolução desse tipo de estruturas.

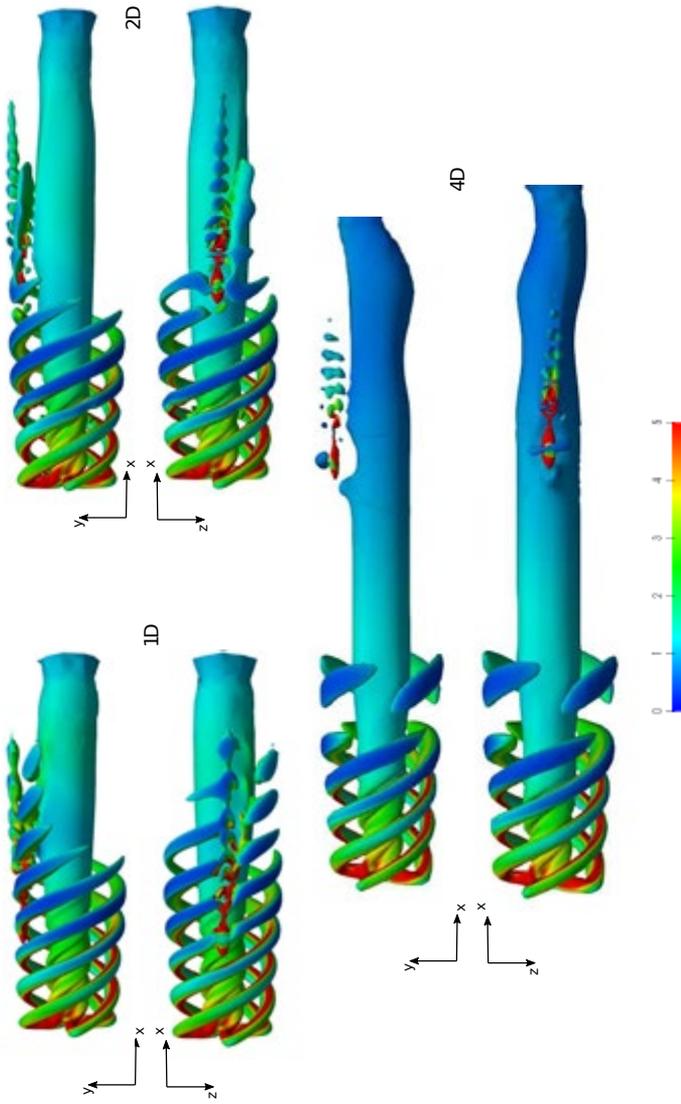


Figura 9.48: Vistas frontais e laterais das estruturas de vórtices tridimensionais a partir das isosuperfícies definidas pelo critério- Q ($Q=0,03$), coloridas com a magnitude de vorticidade adimensional $\omega_{mag}/U_{\infty}D$, nas situações 1D, 2D e 4D e $St = 0,33$ ($\omega = 33,6 \text{ rad/s}$).

Na Fig. 9.48, nota-se também como nas situações 1D e 2D o peixe interage com os vórtices de ponta de pá, ainda perfeitamente definidos devido à proximidade entre peixe e rotor. Porém, no caso 1D, o impacto sobre o peixe é maior, já que a intensidade dos vórtices aparece superior nessa região. Esse comportamento foi ainda percebido na evolução temporal dos coeficientes de força na Fig. 9.41, onde foi notada claramente a interferência do batimento das pás na variação da função dos esforços. Ademais, observa-se a maior influência desses vórtices na esteira do peixe na situação 1D, em relação ao caso 2D. Por outro lado, nota-se que a região central, onde aparecem os vórtices de nacele, interage com a esteira do peixe nas duas primeiras situações, aparecendo uma junção entre esses vórtices e a esteira do peixe. No caso da distância a 2D, essa união aparece mais próxima ao peixe, do que na situação 1D, o que pode ser outra das causas da variação na produção das forças.

Além de velocidade e vorticidade, existem outros descritores da turbulência avaliados na literatura, tais como: o tensor de tensões aparentes de Reynolds, a distribuição de energia cinética turbulenta na esteira e os níveis de intensidade de turbulência, que podem servir para elucidar alguns pontos avaliados, como a variação das forças sobre o peixe.

Discussão dos resultados

Nesta subseção serão sumarizados os principais resultados obtidos, aportando algumas conclusões e/ou discussões que até o momento não foram realizadas. Fundamentalmente, porque a subseção anterior foi dedicada principalmente a apresentar e analisar os resultados devido ao elevado número de simulações e dados extraídos destas.

Entre os resultados de maior destaque, reporta-se a mudança significativa dos esforços produzidos pelo peixe nas diferentes posições da esteira induzida pela turbina, já que cada uma dessas regiões vem caracterizada por fenômenos próprios. Foi observado que, quanto mais afastado se encontra o peixe do rotor, menores são as forças propulsivas que experimenta (peixe alinhado com a ponta da pá), encontrando no caso 4D, a situação limite em que a força de arrasto é maior do que a de empuxo e o peixe, portanto, não consegue experimentar mais a propulsão das restantes situações (1D e 2D), sendo arrastado pelo escoamento.

Até o momento, foi estabelecida uma relação de dependência entre o coeficiente de esforços e o número de Strouhal, onde C_F crescia monotonicamente com o

aumento do St para um Re constante, considerando o caso do peixe nadando em um escoamento não perturbado. Sem embargo, esta relação não terá mais validade nas situações peixe-rotor porque, como mencionado, foram observadas mudanças importantes nos coeficientes de esforços, sendo que o número de Strouhal é mantido constante (já que a velocidade da corrente livre não apresentou modificações).

O principal parâmetro cambiante foi, neste caso, a posição do peixe na esteira. Neste sentido foram investigadas algumas das variáveis fundamentais envolvidas no problema (velocidade, pressão, vorticidade), mas têm sido, complicado estabelecer uma relação de dependência direta entre as ditas variáveis e os esforços computados para compreender a causa da variação dos esforços com a posição.

Algumas questões de interesse foram observadas sobre a relação hidrodinâmica entre o peixe e a esteira do rotor e devem ser destacadas para tentar elucidar qual é o efeito do escoamento perturbado sobre o nado do peixe. Em primeiro lugar, observou-se que a diferença em termos de velocidade média foi pouco expressiva nas três situações analisadas. Porém, é notável a mudança de velocidade ao redor do peixe nas diferentes posições. Observa-se que, em regiões próximas, esta diferença é muito mais acentuada, porque o tubo de corrente que configura a esteira é de menor diâmetro do que em seções mais distantes (pelo formato tubular cônico da esteira) e porque a redução da velocidade na região próxima ao rotor é muito mais expressiva, por causa do efeito de bloqueio da nacele. Veja-se a modo de exemplo, na Fig. 9.49, como tal e como comentado, a velocidade a ambos os lados do peixe é bem diferente nas posições 1D, 2D e 4D. Por um lado, na situação 1D, o peixe está em contato tanto, com uma região de alta velocidade, como uma de velocidade reduzida. Por outro lado, na situação 4D, as velocidades do escoamento em torno ao peixe apresentam valores intermédios e menos alterados.

Ademais, essas variações da velocidade estão intimamente relacionadas com a vorticidade do escoamento. Observa-se, portanto, na Fig. 9.50, os diferentes valores de vorticidade em cada uma das posições do peixe na esteira. Neste caso, o campo de vorticidade se apresenta no plano transversal ao peixe e a variável é exibida utilizando um intervalo reduzido de variação de poucos níveis para sua representação, o que ajuda na visualização quantitativa da vorticidade.

A variação da vorticidade com a posição já foi observada em resultados anteriores, embora não de forma tão expressiva pelo tipo de análise realizado. Além disso, pela já conhecida configuração das estruturas de vórtices nas diferentes regiões da

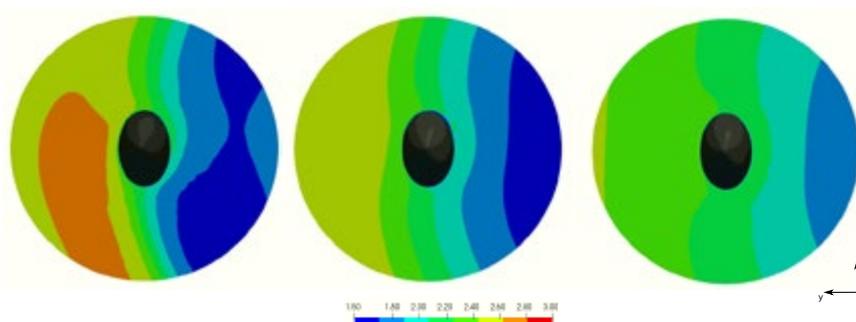


Figura 9.49: Campo da magnitude da velocidade (U_{mag}) no plano de corte transversal (yz), com origem no centro do peixe. Nas posições da esteira 1D, 2D e 4D.

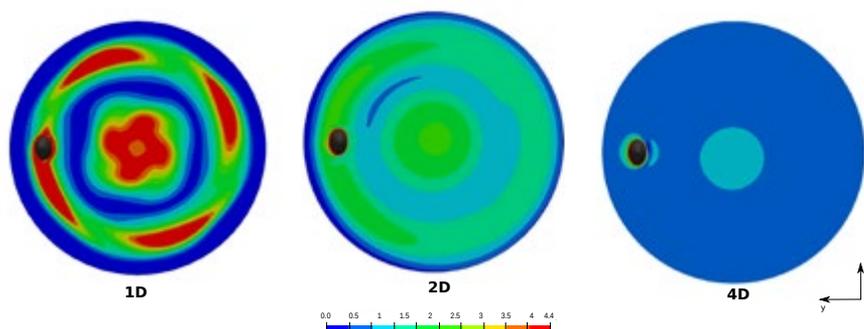


Figura 9.50: Campo da magnitude da vorticidade adimensional ($\omega_{mag} D/U$) no plano de corte transversal (yz), com origem no centro do rotor. Nas posições da esteira 1D, 2D e 4D.

esteira, este resultado era esperado. Assim, será utilizada a variável vorticidade para estabelecer essa relação entre o escoamento e o peixe, e conseguir caracterizar as mudanças de esforços nas diferentes posições.

Portanto, um novo parâmetro é proposto baseado no número de Strouhal (St), tal e como tem sido computado até o momento no trabalho, e a vorticidade adimensional ($\omega D/U$), que caracterizará o escoamento em cada uma das regiões em função do diâmetro do rotor e a velocidade do fluxo livre.

A vorticidade adimensional pode ser também considerada como um número de Strouhal do escoamento perturbado, já que proporciona a relação entre a variação local do fluido (dada pela vorticidade) e a variação pelo movimento do escoamento (velocidade da corrente livre). No que segue, será denominado St_ω , tal que $St_\omega = \omega D/U$.

O novo parâmetro, nomeado como número de Strouhal local (St_l), vem definido como

$$St_l = St \cdot St_\omega, \quad (9.36)$$

no qual o número de Strouhal do peixe vem ‘escalado’ com o número de Strouhal do escoamento perturbado, estabelecendo uma relação com a vorticidade na região onde o peixe encontra-se nadando.

O número de Strouhal local (St_l) permitiu apresentar o coeficiente de esforços \bar{C}_{F_x} como função do número, tal e como apresentado na Fig. 9.51. Observa-se, na mesma figura, o crescimento monotônico dos esforços com o número de Strouhal local, onde se recolhem todos os casos simulados para o mesmo número de Reynolds do escoamento. Na Tab. 9.6, aparecem recolhidos os casos mostrados na figura, possuindo cada um deles seu próprio número de Strouhal, e seus valores de vorticidade e posição. Todos esses casos vêm caracterizados pelo valor do coeficiente de esforços, tal e como foram descritos anteriormente e nomeados com as letras de A a E. Ademais, o valor de vorticidade empregado para tal análise foi extraído da Fig. 9.50 e, portanto, apresenta apenas uma estimativa da vorticidade em cada uma das regiões.

Observa-se, na Fig. 9.51, como nos casos A, B e C, o balanço de forças no peixe é positivo, experimentando este uma força de empuxo. As situações nas quais o peixe é arrastado pelo escoamento vêm caracterizadas pelos casos D e E. Veja-se que, com este novo parâmetro, é possível caracterizar o comportamento do peixe desde o ponto de vista da mecânica de nado, considerando conjuntamente a cinemática dele e a posição dentro da esteira, entendendo a possibilidade do peixe de autopropulsionar-se ou não. Para o número de Reynolds considerado, o número de Strouhal local de equilíbrio pode ser estimado da mesma forma que se fez nas situações do escoamento não perturbado nas Figs. 9.18 e 9.18. Portanto, $\bar{C}_{F_x}(St_l^*) = 0$ estimando St_l^* utilizando uma interpolação linear aplicada ao par de

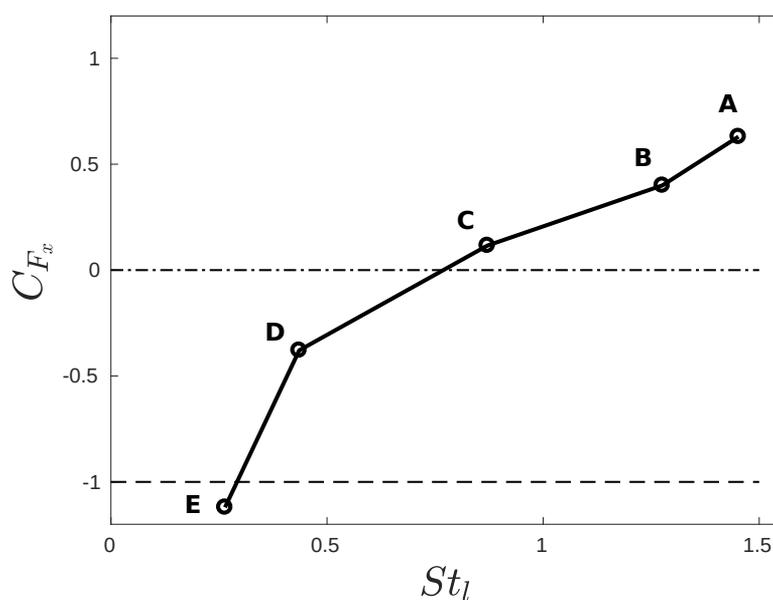


Figura 9.51: \bar{C}_{F_x} como função do número de Strouhal local St_l (Eq. 9.36) para o número de Reynolds, $Re = 5,5 \times 10^6$.

Tabela 9.6: Caracterização dos diferentes casos com $U = 2,5\text{m/s}$ (nomeados de A-E) segundo algumas das variáveis de interesse para análise ($Re = 5,5 \times 10^6$).

	CASOS				
	A	B	C	D	E
\bar{C}_{F_x}	0,635	0,400	0,116	-0,379	-1,120
St	0,33	0,29	0,33	0,33	0,10
St_ω	4,40	4,40	2,64	2,64	1,32
St_l	1,45	1,28	0,87	0,44	0,26
Posição	1D	1D	2D	4D	2D

pontos na curva $\bar{C}_{F_x} \times St_l$ que contém St_l^* . Assim, podemos estimar que $St_l^* = 0,77$.

Ademais, o número de Strouhal local pode ser utilizado para conjecturar a possível admissibilidade do peixe nadar na esteira do rotor contra-correnteza. Tendo a vorticidade como uma das principais variáveis influenciando na biomecânica do peixe, e, portanto, estabelecendo essa relação que faltava com a posição desse na esteira. A vantagem que oferece St_l , tal e como foi definido, que a análise não se baseia apenas na posição ou na cinemática de nado. Por isso, observamos, como nos casos C e E, o peixe posicionado a 2D a jusante do rotor, apresenta diferenças significativas em relação aos esforços, devido à frequência de nado em cada situação, e, conseqüentemente ao número de Strouhal, $St = 0,33$ e $St = 0,10$, respectivamente. Portanto, dependendo da cinemática do peixe, ele será arrastado ou não.

Podemos determinar que se um peixe é arrastado pela correnteza ele não poderá sequer realizar manobra alguma para sair da região da esteira e encontrar outras zonas do escoamento mais confortáveis para o nado. Ademais, se analisamos o caso no qual varia a posição e se mantém o número de Strouhal (caso A, C e D), observa-se claramente como o peixe, quanto mais afastado do rotor, menores esforços desempenha, sendo que na situação 4D, o peixe apresenta uma força de arrasto.

Desde o ponto de vista da admissibilidade de nado de um peixe na esteira de uma turbina hidrocínética (sob as mesmas condições cinemáticas), pode-se entender que um peixe entrando na esteira irá apresentar comportamentos diferentes, sendo que, se um peixe entra na região de esteira distante, ele encontrará um escoamento com níveis de turbulência maiores do que o acostumado, além de uma série de vórtices desorganizados, em orientação e tamanho, e sem padronização previsível. Soma-se, ademais, que o peixe vem nadando contra a correnteza, o que já supõe um esforço para ele. Portanto, e segundo o valor do coeficiente de esforços computados na direção do escoamento \bar{C}_{F_x} , espera-se que o animal, uma vez que tenha entrado na esteira na situação 4D, terá dificuldades para sair dela, já que será arrastado pelo fluxo.

En contraposição, quando o peixe é localizado a 1D a jusante, ele está totalmente imerso nos vórtices de ponta de pá, que são estruturas tridimensionais do escoamento bem caracterizadas, onde o peixe pode aproveitar parte da energia neles contida. Na mesma linha que em outros trabalhos reportados na literatura, onde o peixe nada em numa esteira de vórtices de von Kármán, após um obstáculo ou

em formação de cardumes, negociando com as estruturas de vórtices [109, 84]. Ademais, quando o peixe está na situação 1D, foi observado que a intensidade de turbulência e o tensor de tensões aparentes de Reynolds do escoamento apresentam níveis menores do que nos casos restantes. Todos os indicadores destacam o melhor desempenho que o peixe apresenta nessa situação. Essas forças mais elevadas poderiam ajudar o peixe a sair da região da esteira devido à maior quantidade de força disponível que poderia ser empregada na realização de manobras evasivas para evitar a entrada no rotor. Por outro lado, teria que se considera o tempo de reação do peixe, já que a proximidade da máquina é pequena tendo em consideração o tamanho do animal. E, portanto, o animal poderia entrar no rotor sem a possibilidade de se evitar tal situação.

Como última situação, encontramos o peixe nadando a 2D após o rotor, região onde começa a vislumbrar-se o final da esteira próxima e, por conseguinte, ainda podem ser visualizados os vórtices de ponta de pá porém, com menor intensidade do que na situação 1D. Neste caso (C), o coeficiente de esforços do peixe é próximo a zero, o que significa que o peixe está próximo da situação de equilíbrio, estando as forças de empuxo e arrasto balanceadas. O peixe encontra-se nadando em velocidade constante e pode-se considerar que, devido à distância do rotor teria alguma possibilidade de sair da esteira à procura de um escoamento com menores níveis de turbulência. Isso porque, é preciso atender aos altos valores de energia cinética de turbulência e tensor de tensões de Reynolds (nas zonas mais afastadas do rotor) como condição de nado.

Nesse sentido, não existe um consenso na literatura. Encontram-se trabalhos que reportam que os peixes evitam zonas de maiores turbulências [152, 141, 34] e outros que relatam que os peixes sentem-se confortáveis nesses tipos de escoamentos e vão à procura destes [157]. Como mencionado, durante a investigação relatada neste trabalho, entendemos que, desde a perspectiva biomecânica, o peixe desenvolve maiores esforços (nadando nas mesmas condições cinemáticas) em zonas de maior vorticidade, onde as estruturas coerentes são previsíveis e periódicas, que, neste caso, correspondem a menores níveis de turbulência. Esta última afirmação poderia resultar contraditória, porém, foi observado que o peixe quando nada próximo ao rotor consegue dissipar a energia cinética de turbulência fazendo com que decresça o valor dessa energia.

Conclui-se, portanto, que o parâmetro proposto St_l , que combina a cinemática

do peixe com a vorticidade do escoamento, pode fornecer de forma quantitativa uma estimativa sobre a admissibilidade de nado do peixe na esteira, entendendo-se por admissibilidade que o peixe, em umas dadas condições de nado e do escoamento, possa evitar a entrada no rotor, saindo da região da esteira, se assim fosse conveniente. Portanto, essa situação se propõe como possível quando o número de Strouhal local é maior do que o número de Strouhal local $St_l > St_l^*$ (veja Fig. 9.51), fazendo com que o peixe consiga empregar parte da força propulsiva na realização de manobras evasivas. Contrariamente, em situações caracterizadas com $St_l < St_l^*$, o peixe seria arrastado pela correnteza sem ter possibilidade de movimentar-se da forma desejada.

9.5.4 Estudo experimental de peixes em tanque de água

Estudos experimentais em laboratório

Devido à preocupação com as emissões de carbono, o uso de fontes renováveis de energia está aumentando, pois é possível observar o desenvolvimento de uma nova variedade de dispositivos para explorar recursos verdes não tradicionais, como turbinas de maré ou hidrocinéticas, nas quais são encobertas as correntes marítimas/fluviais em eletricidade. Ao contrário dos recursos energéticos tradicionais, que vêm sendo estudados há anos, essa tecnologia inovadora ainda demanda um esforço considerável para esclarecer as questões práticas, principalmente as relacionadas aos seus impactos ambientais e como essas máquinas afetam a fauna e a flora locais.

O *Astyanax bimaculatus*, amplamente conhecido como lambari, é uma espécie comum em rios brasileiros. O objetivo principal desta parte da pesquisa é estudar a natação do *Astyanax bimaculatus*, no contexto da fluidodinâmica, aplicando as ferramentas CFD e o procedimento experimental para examinar os padrões de escoamento.

Os testes experimentais foram realizados para determinar a forma do corpo e os parâmetros cinemáticos para usar como entrada para as simulações CFD. A forma foi modelada seguindo a mesma metodologia de Zhu et al. [187], em que as seções corpo-núcleo são assumidas como elipses com razão de aspecto constante ao longo de todos os peixes. O eixo maior corresponde à altura e é definido pela distância entre as curvas de contornos superior e inferior, ver Fig.

9.52. Para cauda e barbatanas, a seção foi considerada o perfil NACA0012, onde o bordo de ataque e o bordo de fuga também foram limitados pelas curvas de contorno. A Fig. 9.52 apresenta as curvas de contorno obtidas pelo processo de ajuste sobre os dados da imagem fotográfica. O contorno do *Astyanax bimaculatus* foi diferenciado em 7 curvas para descrever o núcleo (curvas I e II), nadadeira dorsal (III), nadadeira anal (IV) e nadadeira caudal (V, VI e VII). Cada curva foi ajustada pelas equações apresentadas na Tab.9.7, e os respectivos coeficientes estão na Tab. 9.8. O comprimento real do peixe, L, corresponde a 70 mm e a razão de aspecto elíptica medida foi de 2,14.

Nº	Equações	Intervalo
I	$a \sin(b x/L) + c(\exp(d x/L) - 1)$	$0.00 < x/L < 0.88$
II	$a \sin(b x/L) + c(\exp(d x/L) - 1)$	$0.00 < x/L < 0.88$
III	$a \exp(b x/L) + c \exp(d x/L)$	$0.50 < x/L < 0.72$
IV	$a \exp(-((x/L - b)/c)^2)$	$0.63 < x/L < 0.90$
V	$(a \exp(-((x/L - b)/c)^2)) + d$	$0.88 < x/L < 1.14$
VI	$(a \exp(-((x/L - b)/c)^2)) + d$	$0.88 < x/L < 1.16$
VII	$f(y) = a \exp(-((y/L - b)/c)^2) + \dots$ $\dots d \exp(-((y/L - e)/f)^2) + g$	$-0.15 < y/L < 0.17$

Tabela 9.7: Equações de ajuste para o contorno do peixe.

a	b	c	d	e	f	g
0.0560	4.606	-0.0581	-17.01	-	-	-
0.1798	-3.506	0.0558	-28.6	-	-	-
-1.303e-17	51.7	0.012	4.41	-	-	-
-0.279	0.7183	0.1665	-	-	-	-
0.3219	1.382	0.314	-0.0111	-	-	-
-1.758e+04	8.408	2.115	-0.106	-	-	-
0.4453	-0.1463	0.1042	1.141	0.1236	0.3922	0.0142

Tabela 9.8: Coeficientes de ajuste para as equações da Tabela 9.7.

Estudos utilizando a técnica Particle Image Velocimetry (PIV) mostram excelentes resultados em termos de cinemática e caracterização de esteira para inúmeros

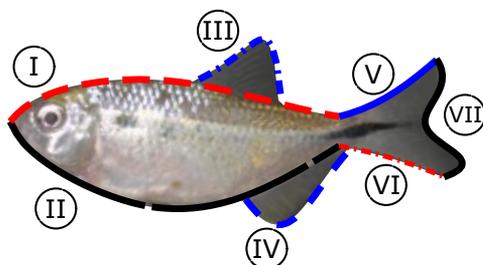


Figura 9.52: Fotografia e curvas de ajuste do peixe.

casos de exemplos de mecânica dos fluidos. Desta forma, as variáveis medidas durante os experimentos de PIV fornecem informações suficientes para a caracterização dos vórtices induzidos na esteira dos peixes, sendo informações relevantes sobre o regime de natação dos peixes e a força propulsiva que eles experimentam na água.

Os principais trabalhos que aplicam a técnica PIV para a caracterização de peixes nadando em fluxos não perturbados estudam a esteira para avaliar a relação entre sua topologia e a capacidade de produzir força propulsora do peixe. Outros motivos relevantes relatados na literatura são a importância da esteira na eficiência natatória de cardumes de peixes sob diferentes configurações e as informações que ela pode fornecer aos predadores, no sentido de direção e tempo em que os peixes passam em cada local. Nesse cenário, o objetivo principal deste trabalho é estudar um lambari, um peixe comum em águas doces brasileiras mediante a técnica experimental do PIV.

Os experimentos foram realizados em um túnel de água em circuito fechado, mostrado nas Figs. 9.53 e 9.54. A vazão foi controlada pela velocidade da bomba e foi normalizada por um favo de mel colocado a montante da seção de teste. Para evitar qualquer movimento vertical do peixe, o nível da água era constante e foi ajustado para ficar na mesma altura no topo do peixe. Uma folha de luz horizontal foi colocada para cruzar a seção de peixes do meio. A câmera BFS-U3-32S4C-C FLIR Blackfly foi posicionada para capturar o visualizador de peixes. Tanto a câmera quanto o laser estavam fora do túnel. Para o PIV, foi semeada uma partícula de 0,15 mm com fluotabilidade neutra. A Fig. 9.55 mostra o peixe testado, com 70 mm de comprimento.

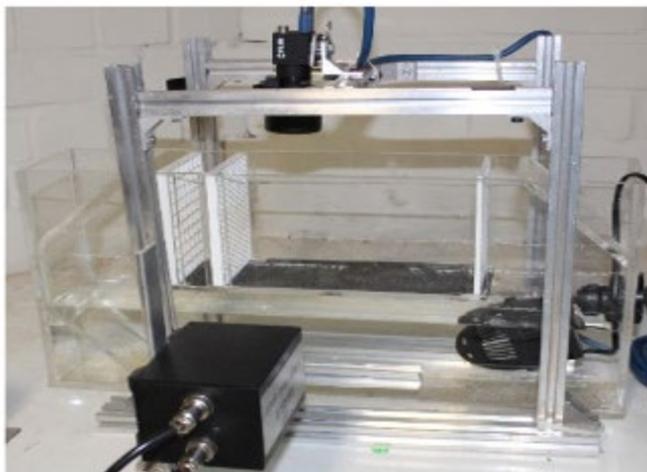


Figura 9.53: Fotografia do túnel de água.

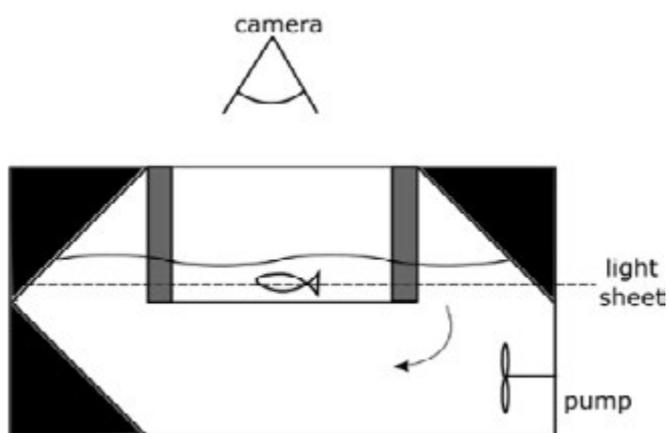


Figura 9.54: Esquema do túnel de água.

Finalmente, apresentam-se os resultados obtidos em túnel de água mediante a aplicação da técnica experimental do PIV. A Fig. 9.56 apresenta os resultados

do PIV à esquerda e a vorticidade computada à direita. Os núcleos vermelho e azul na figura à direita mostram a esteira de vórtices, que é uma estrutura de fluxo fundamental responsável pelos mecanismos de geração de força de propulsão na natação de peixes carangiformes. Em particular, o padrão de desprendimento de vórtices pode mudar a influência geral da esteira de geração de ‘arrasto’ para ‘impulso’, e é decisivo para a economia de energia do movimento de natação.

Na natureza, observa-se que um peixe que durante seu nado produz uma resultante força de empuxo, induz uma esteira de vórtices subsequentes de direções opostas. Neste tipo de esteira, o campo de vorticidade assemelha-se a uma esteira de von Kármán invertida, onde os vórtices negativos (sentido horário), na cor vermelha, são ejetados para baixo no plano de simetria do movimento do peixe, enquanto os vórtices positivos (sentido anti-horário), na cor azul, viajam para cima do plano de simetria. Consequentemente, a rua de vórtice de von-Kármán inversa induz uma região de alta velocidade atrás do peixe, promovendo a geração de impulso através da ejeção de fluido, aumentando a propulsão do peixe.



Figura 9.55: Fotografia do lambari (*Astyanax bimaculatus*).

Estudos sobre protótipo mecatrônico

Com o objetivo geral de contribuir com conhecimentos nacionais para o desenvolvimento de estimativas realistas e confiáveis de potenciais hidrocineéticos em reservatório de jusante de usinas hidroelétricas, este trabalho precisa estudar os impactos ambientais sobre cardumes de peixes. Esta parte do projeto terá fases em campo, em laboratório e simulação.

O trabalho em laboratório compõe-se assim:

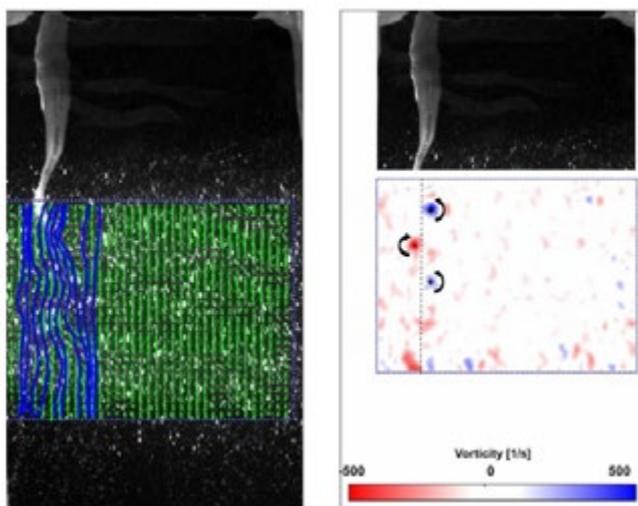


Figura 9.56: Resultados do PIV (a) e do campo de vorticidade (b) mostrando a esteira de vórtices de Von Kármán.

- Projeção um novo túnel de água a partir do modelo *Benchmark* existente.
- Visualização do nado do lambari.

1. **Novo túnel de água** Para estudar a aerodinâmica do lambari, foi proposta a projeção de uma montagem experimental em laboratório baseada no túnel de água disponível no Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília. Esse túnel de água foi projetado inicialmente para o estudo experimental do estol dinâmico em um aerofólio NACA 0018 (OLIVEIRA, 2011). Trata-se de um túnel de água de circuito fechado Armfield modelo HAN 5, com 2750 mm de altura, 4900 mm de comprimento e 1100 mm de largura, alimentado por um conjunto motor/bomba de 5500 W.

Para habilitar o túnel de água aos objetivos desse projeto, foram necessárias alterações na seção de testes. Troca de acrílicos, novos sensores e uma manutenção geral do túnel foram as principais etapas desse trabalho. Também foi necessário um novo inversor.

Para atender à essa demanda, foi elaborado um termo de referência para revitalização do túnel de água. O objetivo do documento foi descrever o serviço de revitalização do túnel para empregá-lo nos experimentos do projeto lambari. O termo foi finalizado e enviado para a empresa AeroAlcool. Iniciou-se o acompanhamento da prestação de serviço da empresa AeroAlcool na revitalização do túnel de água. AeroAlcool encaminhou fotos de alguns elementos com o objetivo de mostrar o andamento do condicionamento do túnel ao longo da prestação.

Os principais assuntos a serem abordados com a UnB foram as dimensões do tubo-eixo a ser conectado no modelo do peixe. Esta peça atravessa o acrílico da janela de observação para fixar o peixe dentro da seção de testes. Chegou-se à conclusão de que usar um tubo padrão de inox $\emptyset 1/2''$ ($\emptyset 12,7\text{mm}$) seria a opção mais adequada. Dessa forma o eixo pode ser rosqueado no peixe por meio de uma rosca tipo NPT, garantindo a vedação do eixo com o peixe. O diâmetro interno é de $\emptyset 9,7\text{mm}$, o que é bem suficiente para passar a fiação do servomotor.

Finalmente, a Fig. 9.57 apresenta o túnel de água de circuito fechado Armfield modelo HAN 5 totalmente reconicionado. A Tab. 9.9 apresenta os principais itens do túnel.

Itens	Descrição
1	Conjunto motobomba principal com variador mecânico de velocidade
2	Tubo base
3	Seção curva inferior-direita
4	Seção curva superior-direita
5	Seção vertical esquerda
6	Seção curva superior-esquerda
7	Bocal de entrada da seção de testes (bocal de contração)
8	Difusor de saída da seção de testes
9	Seção de testes

Tabela 9.9: Elementos principais do túnel de água.

2. Lambari mecatrônico O impacto ambiental dos peixes na presença de tur-



Figura 9.57: Túnel de água recondicionado.

binas hidrocínéticas em rios é uma preocupação real, em que há uma falta de descrições de risco de colisão na literatura. Estudos sobre nado de peixes são, em sua maioria, focados na hidrodinâmica [87, 174] e baseados na observação de peixes nadando em fluxo imperturbado [181]. Desta forma, este trabalho propôs uma metodologia para estudar o nado de peixes nos limites de turbinas hidrocínéticas axiais com base em uma abordagem experimental. Um peixe robô autônomo foi desenvolvido para replicar o peixe *Astyanax bimaculatus*, também conhecido como lambari, uma espécie comum encontrada no Brasil. Tal espécie foi considerada por sua cinemática carangiforme e pelo fato de que o modelo geométrico já ter sido construído em um trabalho anterior [97]. O peixe foi fabricado empregando impressão 3D e sua concepção é descrita no capítulo a seguir. O movimento oscilante foi produzido por meio de um servomotor, inserido dentro do modelo, onde foi controlado por um sinal senoidal obtido a partir de um modelo matemático estabelecido em experimentos reais de nado. O objetivo principal foi validar os parâmetros hidrodinâmicos, arrasto e coeficiente de pressão, do nado dentro do túnel de água e compará-los com dados numéricos.

A partir do modelo 3D do lambari, criado por Macias, Souza, Junior and

Oliveira [97], foi definida uma escala adequada para o túnel de água a ser utilizado para os testes de comportamento hidrodinâmico. Foi necessário aumentar o tamanho do peixe para este se adaptar à seção do túnel e às dimensões da janela de observação. O comprimento do corpo do peixe é de 296 mm. O resultado final dessa primeira etapa é ilustrado na Fig. 9.58, onde foi considerado um fator de bloqueio máximo inferior a 10%. Comparando a maior seção do peixe com a do túnel, esse fator de bloqueio não ultrapassou 3% e o tamanho do peixe está de acordo com as dimensões da janela. Nessa mesma figura, aparece a peça chamada ‘eixo-tubo’, que permite, além da fixação do peixe dentro da seção de observação, a passagem da fiação elétrica.

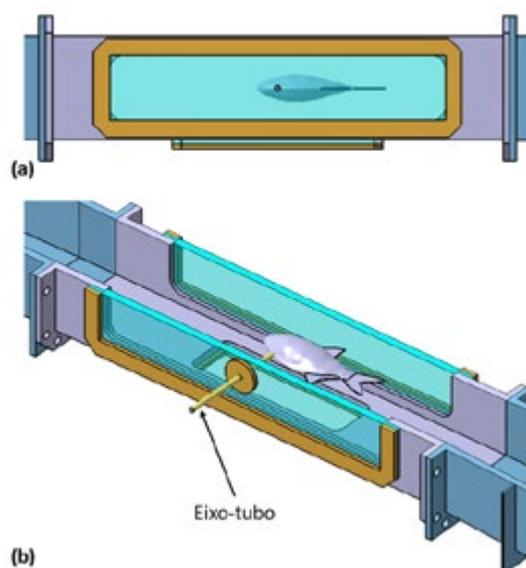


Figura 9.58: Vista frontal da janela de observação do túnel de água (a) e vista isométrica com corte longitudinal da seção de observação (b).

Um peixe mecatrônico foi então projetado a partir do modelo 3D definido na primeira etapa. Existem muitos peixes robôs na literatura, cada um desenvolvido em diferentes contextos e objetivos. Mas, em geral, as motivações são as mesmas: a eficiência e a complexidade da locomoção do peixe. O objetivo

deste estudo é reproduzir o perfil de nado do lambari de forma simples. O lambari mecatrônico foi inspirado no modelo de atum, desenvolvido por Zhu et al., em 2019, e também no peixe robô, projetado por Zhong e colaboradores, em 2017. O Tunabot [187] possui uma parte rígida, a cabeça, e a cauda se move por meio de um servomotor inserido na cabeça. No caso do peixe robô [186] foi a cauda composta por cinco vértebras que despertou interesse. O desenho final do lambari mecatrônico foi uma fusão das duas concepções citadas acima. O robô lambari consiste em duas partes: a cabeça e o corpo ativo, incluindo a cauda, conforme mostrado na Fig. 9.59.

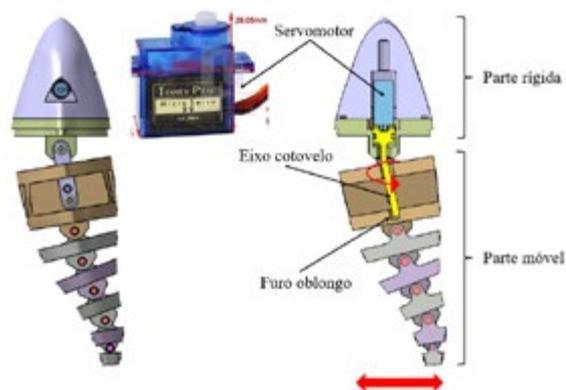


Figura 9.59: Detalhes da concepção do lambari mecatrônico.

A cabeça é equipada com um servomotor de modelo “Micro SG90 Servo Motor 9G” para Arduino. O movimento é produzido girando o servomotor acoplado a um eixo cotovelo preso dentro de um furo oblongo. O movimento circular do servomotor é convertido em um vá e vem da cauda por meio do “conjunto eixo cotovelo/furo oblongo”, a Fig. 9.60 apresenta de forma esquemática o funcionamento desse mecanismo. Dessa forma, o servomotor pode reproduzir a frequência de nado do peixe, atingindo assim a velocidade de nado do lambari de 2,5 m/s. A cauda ativa é composta de cinco vértebras, como mostrado na Fig. 9.59, e conduzida por uma pele de silicone flexível com nadadeiras dorsal e anal e o pedúnculo caudal (Fig. 9.61).

Formam planteadas outras soluções para a concepção do peixe mecatrônico,

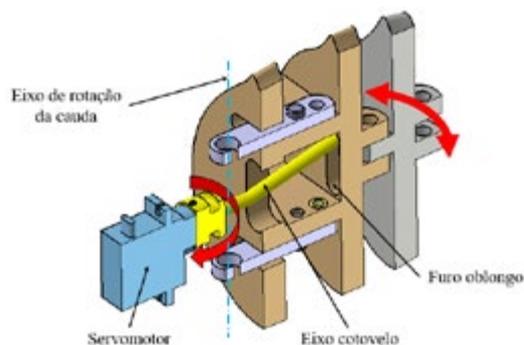


Figura 9.60: Detalhe do conjunto servomotor/eixo cotovelo/furo oblongo.

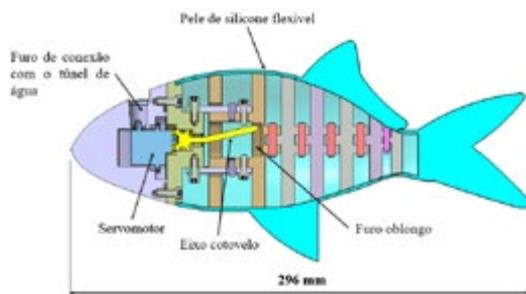


Figura 9.61: Corte longitudinal do robô lambari.

como o uso de um miniaturador linear. Porém, a escolha da versão do lambari movido por servomotor foi considerada mais vantajosa, já que evita montagem simétrica e a dificuldade de garantir a vedação, e assim iniciou-se a fabricação do primeiro protótipo. A cabeça, o corpo e as estruturas internas de suporte foram impressas em 3D em *Polylactic Acid* (PLA) no Laboratório Aberto de Brasília (LAB), da Universidade de Brasília. Este material é um dos materiais de impressão 3D mais ecológicos e está em total adequação para esta pesquisa.

As peças que precisavam de fixação por meio de parafusos foram equipadas com insertos de latão M4, tecnologia amplamente utilizada na impressão 3D

por seu baixo custo e facilidade de instalação. A vedação do servomotor foi garantida através de O-rings. Algumas peças, como pinos e espaçadores que precisavam de usinagem, foram solicitadas para o Laboratório de Usinagem do ENM-UnB. Usando a geometria especificada anteriormente para a pele de silicone flexível, dois moldes simétricos foram projetados e impressos em 3D. Tratam-se de quatro peças no total, sendo duas por molde, pois um molde serve para uma meia cauda de silicone. Uma vez que os moldes foram impressos, eles foram fixados e o silicone líquido foi derramado. Seguindo o projeto original, o produto final após a impressão 3D e a pré-montagem é mostrado na Fig. 9.62.



Figura 9.62: Estrutura final do peixe.

Antes de realizar a montagem final do lambari mecatrônico, foi necessário programar o servomotor para obter a amplitude e a frequência de nado desejadas. O programa foi desenvolvido por meio da plataforma Arduino. Como o servomotor não pode executar um giro completo, foi definido um ângulo mínimo (40°) e máximo (180°), assim como a velocidade de rotação (3 ms°).

3. **Ensaio no túnel de água** Foram realizados os primeiros testes do peixe mecatrônico dentro do túnel de água. As figuras a seguir mostram as fases de montagem do lambari dentro da seção de observação do túnel começando com a montagem do peixe robô dentro da seção de observação do túnel. A fixação do servomotor sai pelo eixo tubo e a fixação dos extensômetros foi colada ao longo das paredes da seção de testes para sair na parte superior.

A Fig. 9.63 mostra o lambari em movimento com a água circulando. O teste confirmou a boa vedação do lambari e apresentou o peixe mecatrônico realizando os movimentos de nado em fluxo de água contínuo. O protótipo atende aos objetivos do projeto, porém, a amplitude na ponta da cauda ficou um pouco abaixo do esperado com aproximadamente 30 mm sob o fluxo de água.



Figura 9.63: Lambari reproduzindo os movimentos de nado sob fluxo de água contínuo.

9.6 Conclusões

Neste ponto, apresentam-se algumas as conclusões fundamentais obtidas, uma vez finalizada a etapa de pesquisa durante o projeto. Com base nas discussões e nos resultados alcançados pelo Work Package 3, em que foi realizado um estudo dos impactos ambientais da tecnologia hidrocínética (especificamente na ictiofauna de um local), conclui-se que de forma geral os impactos ocasionados por esses dispositivos são menos relevantes se comparados aos produzidos pelas tecnologias hidroelétricas convencionais. Ademais, este projeto é finalizado com uma base de conhecimento robusta e validade, obtida mediante metodologias inovadoras, nas quais o desempenho e a caracterização de um peixe nadando na vizinhança de uma turbina hidrocínética é avaliada.

Desde a perspectiva da admissibilidade do nado do peixe na esteira de turbinas hidrocínéticas, foi proposto que, independentemente do lugar da esteira, um peixe poderá nadar nessa região dependendo da sua frequência de natação. Porém, em uma determinada frequência, seu desempenho é muito mais afetado quando nada na

região de esteira distante do que na próxima, possivelmente ajudado pelos vórtices de ponta de pá. Ademais, foi analisado como, um peixe, posicionado a 2D a jusante do rotor, poderia, segundo sua frequência de nado, manter-se nadando no lugar ou ser arrastado pela correnteza. Dessa forma, propõe-se que a admissibilidade de nado na esteira venha determinada pelo coeficiente de esforços médio na direção do escoamento o qual, sendo do tipo empuxo, permitirá a realização de manobras evasivas para sair da esteira ao escoamento livre ou evitar a entrada ao rotor. Por último, importante destacar que existe também aumento nas forças transversais (em todas as posições devido ao escoamento rotativo da esteira), que devem ajudar o peixe a sair do tubo da esteira em direção à corrente livre, embora, altos valores destes esforços pudessem produzir traslações ou rotações indesejadas no peixe, as quais dificultariam o retorno à posição escolhida pelos mesmos.

Finalmente, é relevante comentar que os estudos de peixes nadando em escoamentos perturbados estão no auge da discussão na literatura, nos últimos anos, e que não existe um consenso sobre o efeito das variáveis turbulentas nos animais. Existem trabalhos relatando a necessidade de o peixe afastar-se de regiões onde a intensidade de turbulência é alta, outros onde o consumo de oxigênio em regiões de altos níveis de turbulência viu-se reduzido e também, trabalhos nos quais se expõem as vantagens do nado de peixes em regiões de vorticidade como a esteira de vórtices de von Kármán. Nesta pesquisa, chega-se à conclusão que, em regiões onde as variáveis próprias de um escoamento turbulento são mais altas, o peixe apresenta forças propulsivas reduzidas, além de o fato de a vorticidade poder ser uma variável positiva em relação ao nado.

Referências Bibliográficas

- [1] Abedi, H., Davidson, L. and Voutsinas, S. [2014]. Development of Free Vortex Wake Method for Aerodynamic Loads on Rotor Blades, *EWEA 2014: Europe's Premier Wind Energy Event, Barcelona, Spain* .
- [2] Adcock, T., Draper, S., Nishino, T., AA Adcock, T., Draper, S., Nishino, T., Adcock, T., Draper, S. and Nishino, T. [2015]. Tidal power generation - A review of hydrodynamic modelling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* **229**.
- [3] Adkins, D. and Yan, Y. Y. [2006]. CFD Simulation of Fish-like Body Moving in Viscous Liquid, *Journal of Bionic Engineering* **3**(3).
- [4] Amaral, S., Hecker, G. and Dixon, D. [2011]. Designing leading edges of turbine blades to increase fish survival from blade strike, *EPRI-DOE, Conference on* .
- [5] Amaral, S. V., Bevelhimer, M. S., Cada, G. F., Giza, D. J., Jacobson, P. T., McMahon, B. J. and Pracheil, B. M. [2015]. Evaluation of Behavior and Survival of Fish Exposed to an Axial-Flow Hydrokinetic Turbine, *North American Journal of Fisheries Management* **35**(1): 97–113.
- [6] Ashraf, I., Bradshaw, H., Ha, T. T., Halloy, J., Godoy-Diana, R. and Thiria, B. [2017]. Simple phalanx pattern leads to energy saving in cohesive fish schooling, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **114**(36): 9599–9604.

- [7] Ashraf, I., Godoy-Diana, R., Halloy, J., Collignon, B. and Thiria, B. [2016]. Synchronization and collective swimming patterns in fish (*Hemigrammus bleheri*), *Journal of the Royal Society Interface* **13**(123): 20160734.
- [8] Baba-Ahmadi, M. H. and Dong, P. [2017]. Validation of the actuator line method for simulating flow through a horizontal axis tidal stream turbine by comparison with measurements, *Renewable Energy* **113**: 420–427.
- [9] Bale, R., Neveln, I. D., Bhalla, A. P. S., MacIver, M. A. and Patankar, N. A. [2015]. Convergent Evolution of Mechanically Optimal Locomotion in Aquatic Invertebrates and Vertebrates, *PLoS Biology* **13**(4): 1–22.
- [10] Baratchi, F., Jeans, T. and Gerber, A. [2017]. Actuator line simulation of a tidal turbine in straight and yawed flows, *International Journal of Marine Energy* **19**: 235–255.
- [11] Baratchi, F., Jeans, T. L. and Gerber, A. G. [2019]. A modified implementation of actuator line method for simulating ducted tidal turbines, *Ocean Engineering* **193**(October): 106586.
- [12] Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S., Yue, D. K. P., Grosenbaugh, M. A. and Wolfgang, M. J. [1999]. Drag reduction in fish-like locomotion, *Journal of Fluid Mechanics* **392**: 183–212.
- [13] Bastankhah, M. and Porté-Agel, F. [2014]. A new analytical model for wind-turbine wakes, *Renewable Energy* **70**: 116–123.
- [14] Batten, W. M. J., Harrison, M. E. and Bahaj, A. S. [2013]. Accuracy of the actuator disc-RANS approach for predicting the performance and wake of tidal turbines, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **371**(1985).
- [15] Beal, D. N., Hover, F. S., Triantafyllou, M. S., Liao, J. C. and Lauder, G. V. [2006]. Passive propulsion in vortex wakes, *Journal of Fluid Mechanics* **549**: 385–402.
- [16] Betz, A. [1920]. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren, *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen* **26**: 307–309.

- [17] Bevelhimer, M., Colby, J., Adonizio, M. A., Tomichck, C. and Scherelis, C. [2016]. Informing a Tidal Turbine Strike Probability Model through Characterization of Fish Behavioral Response using Multibeam Sonar Output, *Technical Report July*, Department of Energy Us, Springfield.
- [18] Bevelhimer, M., Scherelis, C., Colby, J. and Adonizio, M. [2017]. Hydroacoustic Assessment of Behavioral Responses by Fish Passing Near an Operating Tidal Turbine in the East River, New York, *Transactions of the American Fisheries Society* **146**.
- [19] Blackmore, T., Batten, W. M. and Bahaj, A. S. [2014]. Influence of turbulence on the wake of a marine current turbine simulator, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* .
- [20] Borazjani, I. and Daghooghi, M. [2013]. The fish tail motion forms an attached leading edge vortex, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **280**(1756).
- [21] Borazjani, I. and Sotiropoulos, F. [2008]. Numerical investigation of the hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes, *Journal of Experimental Biology* **211**(4): 1541–1558.
- [22] Borazjani, I. and Sotiropoulos, F. [2010]. On the role of form and kinematics on the hydrodynamics of self-propelled body/caudal fin swimming, *Journal of Experimental Biology* **213**(1): 89–107.
- [23] Bottom, R. G., Borazjani, I., Blevins, E. L. and Lauder, G. V. [2016]. Hydrodynamics of swimming in stingrays: Numerical simulations and the role of the leading-edge vortex, *Journal of Fluid Mechanics* **788**: 407–443.
- [24] Breder, C. M. [1965]. Vortices and fish schools, *Zoologica* **50**: 97–114.
- [25] Brooks, S. A. and Green, M. A. [2019]. Experimental Study of Body-Fin Interaction and Vortex Dynamics Generated by a Two Degree-Of-Freedom Fish Model, *Biomimetics* **4**(4): 67.
- [26] Cada, G., Ahlgrimm, J., Bahleda, M., Bigford, T., Stavrakas, S. D., Hall, D., Moursund, R. and Sale, M. [2007]. Potential Impacts of Hydrokinetic and

- Wave Energy Conversion Technologies on Aquatic Environments., *Fisheries*, **32**(4): 174–181.
- [27] Cada, G. F., Bevelhimer, M. S., Riemer, K. P. and Turner, J. W. [2011]. Effects on freshwater organisms of magnetic fields associated with hydrokinetic turbines, *Technical report*, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Oak Ridge, Tennessee.
- [28] Cada, G. F., Coutant, C. C. and Whitney, R. R. [1997]. Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines, *Technical report*, Oak Ridge National Laboratory. U.S. Department of Energy.
- [29] CASTRO-SANTOS, T. and HARO, A. [2013]. Survival and Behavioral Effects of Exposure to a Hydrokinetic Turbine on Juvenile Atlantic Salmon and Adult American Shad., *Estuaries and Coasts* **38**: 1–12.
- [30] Chamorro, L. P. and Porté-Agel, F. [2009]. A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes: Boundary-Layer turbulence effects, *Boundary-Layer Meteorology* **132**(1): 129–149.
- [31] Chang, X., Zhang, L. and He, X. [2012]. Numerical study of the thunniform mode of fish swimming with different Reynolds number and caudal fin shape, *Computers and Fluids* **68**: 54–70.
- [32] Churchfield, M. J., Li, Y. and Moriarty, P. J. [2013]. A large-eddy simulation study of wake propagation and power production in an array of tidal-current turbines, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **371**(1985).
- [33] Costa, M. J., Fuentes-Pérez, J. F., Boavida, I., Tuhtan, J. A. and Pinheiro, A. N. [2019]. Fish under pressure: Examining behavioural responses of Iberian barbel under simulated hydropeaking with instream structures, *PLoS ONE* **14**(1): 1–25.
- [34] Cotel, A. J. and Webb, P. W. [2015]. Living in a turbulent world - A new conceptual framework for the interactions of fish and eddies, *Integrative and Comparative Biology* **55**(4): 662–672.

- [35] Coutant, C. C. and Whitney, R. R. [2000]. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: A review, *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 129, pp. 351–380.
- [36] Crespo, A., Hernandez, J. and Frandsen, S. [1999]. Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms, *Wind Energy* **2**(1): 1–24.
- [37] Cui, Z., Gu, X., Kangkang, L., Jiang, H., Li, K. and Jiang, H. [2017]. CFD Studies of the Effects of Waveform on Swimming Performance of Carangiform Fish, *Applied Sciences* **7**(2): 149.
- [38] Daghooghi, M. and Borazjani, I. [2015]. The hydrodynamic advantages of synchronized swimming in a rectangular pattern, *Bioinspiration and Biomimetics* **10**(5).
- [39] Daneshvar, F., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A. and Herman, M. R. [2017]. Applications of computational fluid dynamics in fish and habitat studies, *Ecohydrology and Hydrobiology* **17**(1): 53–62.
- [40] Daskiran, C., Riglin, J. and Oztekin, A. [2015]. Computational Study of Multiple Hydrokinetic Turbines: The Effect of Wake, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, number November, p. V07AT09A021.
- [41] De Bie, J., Kemp, P. and Manes, C. [2020]. Collective behaviour of fish in the presence and absence of flow, *Animal Behaviour* **167**: 151–159.
- [42] Dixon, K., Branlard, E. and Gaunaa, M. [2013]. *Vortex methods to answer the need for improved understanding and modelling of tip-loss factors*, PhD thesis.
- [43] Drucker, E. G. and Lauder, G. V. [2000]. A hydrodynamic analysis of fish swimming speed: wake structure and locomotor force in slow and fast labri-form swimmers., *The Journal of experimental biology* **203**(Pt 16): 2379–93.
- [44] Electric Power Research Institute [2011]. Fish passage through turbines: Application of conventional hydropower data to hydrokinetic technologies, *Technical report*, EPRI, Palo Alto.

- [45] Electric Power Research Institute, Amaral, S., Perkins, N., Giza, D., McMahon, B. and Electric Power Research Institute [2011]. Evaluation of Fish Injury and Mortality Associated with Hydrokinetic Turbines, *Technical report*, EPRI, Palo Alto, USA.
- [46] Enders, E. C., Boisclair, D. and Roy, A. G. [2003]. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60**(9): 1149–1160.
- [47] Espenchitt, A. A. N. [2018]. Estudo numérico da hidrodinâmica do nado de peixes em regime quasi-estacionário, *Technical report*, Universidade de Brasília, Brasília.
- [48] Fallon, D., Hartnett, M., Olbert, A. and Nash, S. [2014]. The effects of array configuration on the hydro-environmental impacts of tidal turbines, *Renewable Energy* **64**: 10–25.
- [49] Fausch, K. [2011]. Experimental Analysis of Microhabitat Selection by Juvenile Steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) and Coho Salmon (*O. kisutch*) in a British Columbia Stream, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **50**: 1198–1207.
- [50] Fish, F. E. [1999]. Swimming and flying in nature, *Comm. Theor. Biol.* **5**(1): 283–304.
- [51] Fraenkel, P. L. [2007]. Marine current turbines: Pioneering the development of marine kinetic energy converters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* **221**(2): 159–169.
- [52] Fraser, S., Nikora, V., Williamson, B. J. and Scott, B. E. [2017]. Hydrodynamic Impacts of a Marine Renewable Energy Installation on the Benthic Boundary Layer in a Tidal Channel, *Energy Procedia*.
- [53] Fraser, S., Williamson, B. J., Nikora, V. and Scott, B. E. [2018]. Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation, *Energy Reports* **4**: 65–69.

- [54] Gazzola, M., Argentina, M. and Mahadevan, L. [2014]. Scaling macroscopic aquatic locomotion, *Nature Physics* **10**(10): 758–761.
- [55] Gazzola, M., Hejazialhosseini, B. and Koumoutsakos, P. [2014]. Reinforcement learning and wavelet adapted vortex methods for simulations of self-propelled swimmers, *SIAM Journal on Scientific Computing* **36**(3): 622–639.
- [56] Gibouin, F., Raufaste, C., Bouret, Y. and Argentina, M. [2018]. Study of the thrust-drag balance with a swimming robotic fish, *Physics of Fluids* **30**(9).
- [57] Glauert, H. [1935]. *Aerodynamic Theory*.
- [58] Godoy-Diana, R., Vacher, J., Raspa, V. and Thiria, B. [2019]. On the fluid dynamical effects of synchronization in side-by-side swimmers, *Biomimetics* **4**(4).
- [59] Hammar, L., Andersson, S., Eggertsen, L., Haglund, J., Gullström, M., Ehnberg, J. and Molander, S. [2013]. Hydrokinetic turbine effects on fish swimming behaviour, *PLoS ONE* v. **8**, n. **1**(12): p. 1–12.
- [60] Hammar, L., Eggertsen, L., Andersson, S., Ehnberg, J., Arvidsson, R., Gullström, M. and Molander, S. [2015]. A probabilistic model for hydrokinetic turbine collision risks: Exploring impacts on fish, *PLoS ONE* **10**(3): 1–25.
- [61] Han, P., Lauder, G. V. and Dong, H. [2020]. Hydrodynamics of median-fin interactions in fish-like locomotion: Effects of fin shape and movement, *Physics of Fluids* **32**(1).
- [62] Hanke, W., Brücker, C. and Bleckmann, H. [2000]. The ageing of the low-frequency water disturbances caused by swimming goldfish and its possible relevance to prey detection., *The Journal of experimental biology* **203**(Pt 7): 1193–200.
- [63] Hansen, M. O. L. [2008]. *Aerodynamics of Wind Turbines*.
- [64] Hemelrijk, C. K., Reid, D. A., Hildenbrandt, H. and Padding, J. T. [2015]. The increased efficiency of fish swimming in a school, *Fish and Fisheries* **16**(3).

- [65] Hu, Q., Li, Y., Di, Y. and Chen, J. [2017]. A large-eddy simulation study of horizontal axis tidal turbine in different inflow conditions, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* **9**(6): 2019.
- [66] Hunt, J. C. R., Wray, A. A. and Moin, P. [1988]. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows, *Center for Turbulence Research: Proceedings of the Summer Program*.
- [67] Isaksson, N., Masden, E. A., Williamson, B. J., Costagliola-Ray, M. M., Slingsby, J., Houghton, J. D. and Wilson, J. [2020]. Assessing the effects of tidal stream marine renewable energy on seabirds: A conceptual framework, *Marine Pollution Bulletin* **157**(March).
- [68] Jacobson, P. T., Amaral, S. V., Castro-santos, T. and Giza, D. [2012]. Environmental Effects of Hydrokinetic Turbines on Fish: Desktop and Laboratory Flume Studies., *Technical report*, Report by Electric Power Research Institute (EPRI).
- [69] Jordan, L. B., Amoudry, L. O., Murdoch, L., Thorne, P. D., Cooke, R. D., McLelland, S. J., Ramírez-Mendoza, R., Parsons, D. R. and Simmons, S. M. [2018]. Laboratory study on the effects of hydro kinetic turbines on hydrodynamics and sediment dynamics, *Renewable Energy* **129**: 271–284.
- [70] Joukowsky, N. [1920]. Windmill of the NEJ type, *Transactions of the Central Institute for Aero-hydrodynamics of Moscow* **1**: 57.
- [71] Kajtar, J. B. and Monaghan, J. J. [2012]. On the swimming of fish like bodies near free and fixed boundaries, *European Journal of Mechanics, B/Fluids* **33**: 1–13.
- [72] Kartezhnikova, M. and Ravens, T. M. [2014]. Hydraulic impacts of hydrokinetic devices, *Renewable Energy* **66**: 425–432.
- [73] Kern, S. and Koumoutsakos, P. [2006]. Simulations of optimized anguilliform swimming, *Journal of Experimental Biology* **209**(24): 4841–4857.
- [74] Khan, M. J., Iqbal, M. T. and Quaicoe, J. E. [2008]. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(8): 2177–2193.

- [75] Kim, C. H., Kim, D. G., Kim, D. and Lee, P. S. [2017]. Directing the turning behavior of carp using virtual stimulation, *Ocean Systems Engineering* **7**(1): 39–51.
- [76] Lanchester, F. W. [1915]. Contribution to the Theory of Propulsion and the Screw Propeller, *Journal of the American Society for Naval Engineers* **27**(2): 509–510.
- [77] Lauder, G. V. and Madden, P. G. A. [2006]. Learning from fish: Kinematics and experimental hydrodynamics for roboticists, *International Journal of Automation and Computing* **3**(4): 325–335.
- [78] Laws, N. D. and Epps, B. P. [2016]. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**: 1245–1259.
- [79] Li, G., Kolomenskiy, D., Liu, H., Thiria, B. and Godoy-Diana, R. [2019]. On the energetics and stability of a minimal fish school, *PLOS ONE* **14**(8): 1–20. **URL:** <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215265>
- [80] Li, N., Liu, H. and Su, Y. [2017]. *Numerical study on the hydrodynamics of thunniform bio-inspired swimming under self-propulsion*, Vol. 12.
- [81] Liao, J. C. [2006]. The role of the lateral line and vision on body kinematics and hydrodynamic preference of rainbow trout in turbulent flow, *Journal of Experimental Biology* **209**(20): 4077–4090.
- [82] Liao, J. C. [2007]. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **362**(1487): 1973–1993.
- [83] Liao, J. C. and Akanyeti, O. [2017]. Fish Swimming in a Kármán Vortex Street: Kinematics, Sensory Biology and Energetics, *Marine Technology Society Journal* **51**(5): 48–55.
- [84] Liao, J. C., Beal, D. N., Lauder, G. V. and Triantafyllou, M. S. [2003a]. Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity, *Science* **302**(2003): 1566–1569.

- [85] Liao, J. C., Beal, D. N., Lauder, G. V. and Triantafyllou, M. S. [2003b]. The Kármán gait: Novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street, *Journal of Experimental Biology* **206**(6): 1059–1073.
- [86] Lighthill, J. . [1971]. Large-Amplitude Elongated-Body Theory of Fish Locomotion, *Royal Society* **179**(1055): 125–138.
- [87] Lighthill, M. [1960]. Note on the swimming of slender fish, *Journal of Fluid Mechanics* **9**(2): 305–371.
- [88] Lin, X. F., Zhang, J. S., Zhang, Y. Q., Zhang, J. S. and Liu, S. [2019]. Comparison of actuator line method and full rotor geometry simulations of the wake field of a tidal stream turbine, *Water (Switzerland)* **11**(3).
- [89] Linden, P. F. and Turner, J. S. [2004]. 'Optimal' vortex rings and aquatic propulsion mechanisms, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **271**(1539): 647–653.
- [90] Liu, C. and Hu, C. [2019]. An actuator line - immersed boundary method for simulation of multiple tidal turbines, *Renewable Energy* **136**: 473–490.
- [91] Liu, G., Ren, Y., Dong, H., Akanyeti, O., Liao, J. C. and Lauder, G. V. [2017]. Computational analysis of vortex dynamics and performance enhancement due to body-fin and fin-fin interactions in fish-like locomotion, *Journal of Fluid Mechanics* **829**: 65–88.
- [92] Liu, J., Lin, H. and Purimitla, S. R. [2016]. Wake field studies of tidal current turbines with different numerical methods, *Ocean Engineering* **117**: 383–397.
- [93] Lossent, J., Lejart, M., Folegot, T., Clorennec, D., Di Iorio, L. and Gervaise, C. [2018]. Underwater operational noise level emitted by a tidal current turbine and its potential impact on marine fauna, *Marine Pollution Bulletin* **131**(May 2017): 323–334.
- [94] Lupandin, A. I. [2005]. Effect of flow turbulence on swimming speed of fish, *Biology Bulletin* **32**(5): 461–466.

- [95] Macias, M. M., Mendes, R. C. F., Oliveira, T. F. and Brasil, A. C. P. [2020]. On the upscaling approach to wind tunnel experiments of horizontal axis hydrokinetic turbines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* **2**.
- [96] Macías, M. M., Mendes, R. C. F., Oliveira, T. F. and Brasil Junior, A. C. P. [2019]. Hydrokinetic Turbine Simulations using Actuator Line Methodology, *25th International Congress of Mechanical Engineering*.
- [97] Macias, M. M., Souza, I. F., Junior, A. C. P. B. and Oliveira, T. F. [2020]. Three-dimensional viscous wake flow in fish swimming - A CFD study, *Mechanics Research Communications* **107**: 103547.
- [98] Maertens, A. P., Triantafyllou, M. S. and Yue, D. K. [2015]. Efficiency of fish propulsion, *Bioinspiration and Biomimetics* **10**(4).
- [99] Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, J., Nayeri, C. N. and Paschereit, C. O. [2013]. QBLADE: an open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines, *Int J Emerg Technol Adv Eng* **3**: 264–269.
- [100] Martínez-Tossas, L. A., Churchfield, M. J. and Meneveau, C. [2015]. Large Eddy Simulation of wind turbine wakes: Detailed comparisons of two codes focusing on effects of numerics and subgrid modeling, *Journal of Physics: Conference Series* **625**(1): 1–10.
- [101] Martínez-Tossas, L. A., Churchfield, M. J., Yilmaz, A. E., Sarlak, H., Johnson, P. L., Sørensen, J. N., Meyers, J. and Meneveau, C. [2018]. Comparison of four large-eddy simulation research codes and effects of model coefficient and inflow turbulence in actuator-line-based wind turbine modeling, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* **10**(3): 2019.
- [102] Martínez-Tossas, L. A. and Leonardi, S. [2013]. Wind Turbine Modeling for Computational Fluid Dynamics, *Technical report*.
- [103] Matta, A., Bayandor, J., Battaglia, F. and Pendar, H. [2019]. Effects of fish caudal fin sweep angle and kinematics on thrust production during low-speed thunniform swimming, *Biology Open* **8**(7): bio040626.

- [104] Mendelson, L. and Techet, A. H. [2015]. Quantitative wake analysis of a freely swimming fish using 3D synthetic aperture PIV, *Experiments in Fluids* **56**(7): 0–29.
- [105] Mendes, R. C. F. [2020]. *Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos*, Thesis, Universidade de Brasília.
- [106] Meng, H., Li, L. and Zhang, J. [2020]. A preliminary numerical study of the wake effects on the fatigue load for wind farm based on elastic actuator line model, *Renewable Energy* **162**: 788–801.
- [107] Mignano, A., Kadapa, S., Tangorra, J. and Lauder, G. [2019]. Passing the Wake: Using Multiple Fins to Shape Forces for Swimming, *Biomimetics* **4**(1): 23.
- [108] Mikkelsen, R. F., Sorensen, J. N., Henningson, D. S., Andersen, S. J., Ivanell, S. and Sarmast, S. [2015]. Simulation of wind turbine wakes using the actuator line technique, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **373**(2035): 20140071–20140071.
- [109] Montgomery, J. C., McDonald, F., Baker, C. F., Carton, A. G. and Ling, N. [2003]. Sensory integration in the hydrodynamic world of rainbow trout, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **270**(SUPPL. 2): 195–197.
- [110] Müller, U. K., Smit, J., Stamhuis, E. J. and Videler, J. J. [2001]. How the body contributes to the wake in undulatory fish swimming: flow fields of a swimming eel (*Anguilla anguilla*), *The Journal of experimental biology* **204**(Pt 16): 2751–62.
- [111] Munnier, A. and Pinçon, B. [2010]. Locomotion of Articulated Bodies in an Ideal Fluid: 2D Model With Buoyancy, Circulation and Collisions, *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* **20**(10): 1899–1940.
- [112] Musa, M., Hill, C., Sotiropoulos, F. and Guala, M. [2018]. Performance and resilience of hydrokinetic turbine arrays under large migrating fluvial bedforms, *Nature Energy* **3**(10): 839–846.

- [113] Najafi, S. and Abbaspour, M. [2016]. Numerical Study of Propulsion Performance in Swimming Fish using Boundary Element Method, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* .
- [114] Nash, S. and Phoenix, A. [2017]. A review of the current understanding of the hydro-environmental impacts of energy removal by tidal turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **80**(June): 648–662.
- [115] Nelson, J. S. [1984]. *Fishes of the World*, Wiley Sons, New York.
- [116] Nikora, V. I., Aberle, J., Biggs, B. J., Jowett, I. G. and Sykes, J. R. [2003]. Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: A case study of *Galaxias maculatus*, *Journal of Fish Biology* **63**(6): 1365–1382.
- [117] Nunes, M. M., Mendes, R. C. F., Oliveira, T. F. and Junior, A. C. P. B. [2019]. An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines, *Renewable Energy* **133**: 840–848.
- [118] Odeh, M., Noreika, J. F., Haro, A., Maynard, A., Castro-santos, T. and Cada, G. F. [2002]. Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish. Prepared for : U . S . Department of Energy Bonneville Power Administration Division of Fish and Wildlife P, (March): 46.
- [119] Ogami, Y. [2017]. A three-dimensional source-vorticity method for simulating incompressible potential flows around a deforming body without the Kutta condition, *Computers and Fluids* **154**: 184–199.
- [120] Ogunka, U. E., Daghooghi, M., Akbarzadeh, A. M. and Borazjani, I. [2020]. The Ground Effect in Anguilliform Swimming, *Biomimetics* **5**(1): 1–13.
- [121] Pavlov, D., Lupandin, A. I. and Skorobogatov, M. A. [2000]. The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish, *J. Ichthyol.* **40**: S232–S261.
- [122] Petrie, J., Diplas, P., Gutierrez, M. and Nam, S. [2014]. Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites, *Renewable Energy* **69**: 393–401.

- [123] Porté-Agel, F., Wu, Y. T., Lu, H. and Conzemius, R. J. [2011]. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* .
- [124] Ravensbergen, M., Mohamed, B. A. and Korobenko, A. [2020]. The actuator line method for wind turbine modelling applied in a variational multiscale framework, *Computers and Fluids* **201**: 104465.
- [125] Richmond, M. C. and Romero-Gomez, P. [2014]. Fish passage through hydropower turbines: Simulating blade strike using the discrete element method, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **22**.
- [126] Romero-Gomez, P. and Richmond, M. C. [2014]. Simulating blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines, *Renewable Energy* **71**(71): 401–4013.
- [127] Rosenberg, A. and Sharma, A. [2016]. A Prescribed-Wake Vortex Lattice Method for Preliminary Design of Co-Axial, Dual-Rotor Wind Turbines, *Journal of Solar Energy Engineering* .
- [128] Rosli, R., Shi, W., Aktas, B., Norman, R. and Atlar, M. [2020]. Cavitation observations, underwater radiated noise measurements and full-scale predictions of the Hydro-Spinna turbine, *Ocean Engineering* **210**(May): 107536.
- [129] Rossington, K. and Benson, T. [2020]. An agent-based model to predict fish collisions with tidal stream turbines, *Renewable Energy* **151**: 1220–1229.
- [130] Sanderse, B. [2009]. Aerodynamics of wind turbine. Literature review, *Technical report*.
- [131] Scherelis, C., Penesis, I., Hemer, M. A., Cossu, R., Wright, J. T. and Guihen, D. [2020]. Investigating biophysical linkages at tidal energy candidate sites; A case study for combining environmental assessment and resource characterisation, *Renewable Energy* **159**: 399–413.
- [132] Schweizer, P., Cada, G. and Bevelhimer, M. [n.d.]. Laboratory experiments on the effects of blade strike from hydrokinetic energy technologies on larval

- and juvenile freshwater fishes, *Technical report*, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.
- [133] Schmitz, S. and Jha, P. K. [2013]. Modeling the wakes of wind turbines and rotorcraft using the actuator-line method in an OpenFOAM - LES solver, *American Helicopter Society 69th Annual Forum* **3**(May): 2228–2235.
- [134] Schramm, M. P., Bevelhimer, M. and Scherelis, C. [2017]. Effects of hydrokinetic turbine sound on the behavior of four species of fish within an experimental mesocosm, *Fisheries Research* **190**: 1–14.
- [135] Seitz, A. C., Moerlein, K., Evans, M. D. and Rosenberger, A. E. [2011]. Ecology of fishes in a high-latitude, turbid river with implications for the impacts of hydrokinetic devices, *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **21**(3): 481–496.
- [136] Sfakiotakis, M., Lane, D. M. and Davies, J. B. C. [1999]. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* .
- [137] Shen, H., Zydlewski, G. B., Viehman, H. A. and Staines, G. [2016]. Estimating the probability of fish encountering a marine hydrokinetic device, *Renewable Energy* **97**: 746–756.
- [138] Shen, W. Z., Mikkelsen, R., Sorensen, J. N. and Bak, C. [2005]. Tip loss corrections for wind turbine computations, *Wind Energy* **8**(4): 457–475.
- [139] Shields, M. A., Woolf, D. K., Grist, E. P., Kerr, S. A., Jackson, A., Harris, R. E., Bell, M. C., Beharie, R., Want, A., Osalusi, E., Gibb, S. W. and Side, J. [2010]. Marine Renewable Energy : The ecological implications of, *Ocean and Coastal Management* **54**(1): 2–9.
- [140] Shuler, S. W., Nehring, R. B. and Fausch, K. D. [1994]. Diel habitat selection by brown trout in the Rio Grande river, Colorado, after placement of boulder structures, *N. Am. J. Fish. Manag.* **14**: 99–111.
- [141] Silva, A. T., Katopodis, C., Santos, J. M., Ferreira, M. T. and Pinheiro, A. N. [2012]. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow, *Ecological Engineering* **44**: 314–328.

- [142] Silva, P. A. S. F., de Oliveira, T. F., Brasil Junior, A. C. P., Vaz, J. R. P., De Oliveira, T. F., Brasil Junior, A. C. P. and Vaz, J. R. P. [2016]. Numerical Study of Wake Characteristics in a Horizontal-Axis Hydrokinetic Turbine, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **88**(4): 2441–2456.
- [143] Simms, D., Schreck, S., Hand, M. and Fingersh, L. J. [2001]. NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements.
- [144] Sørensen, J. [2011]. Wind turbine wakes and wind farm aerodynamics, *Wind Energy Systems* pp. 112–e131.
- [145] Sørensen, J. and Shen, W. Z. [2002]. Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes, *Journal of Fluids Engineering* **124**(2): 393.
- [146] Souza, I. F. D. [2019]. Estudo numérico da hidrodinâmica do nado de peixes, *Technical report*, Universidade de Brasília, Brasília.
- [147] Sutterlin, A. M. and Waddy, S. [1975]. Possible Role of the Posterior Lateral Line in Obstacle Entrainment by Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*), *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **32**(12): 2441–2446.
- [148] Tangler James, L. [2002]. The nebulous art of using wind tunnel aerofoil data for predicting rotor performance, *Wind Energy* **5**(2-3): 245–257.
- [149] Tennekes, H. and Lumley, J. [1972]. *A First Course in Turbulence*, The MIT Press.
- [150] Thekkethil, N., Sharma, A. and Agrawal, A. [2018]. Unified hydrodynamics study for various types of fishes-like undulating rigid hydrofoil in a free stream flow, *Physics of Fluids* **30**(7).
- [151] Trinci, G., Harvey, G. L., Henshaw, A. J., Bertoldi, W. and Hölker, F. [2017]. Life in turbulent flows: interactions between hydrodynamics and aquatic organisms in rivers, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **4**(3): e1213.
- [152] Tritico, H. M. and Cotel, A. J. [2010]. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*), *Journal of Experimental Biology* **213**(13): 2284–2293.

- [153] Troldborg, N., Sørensen, J. and Sorensen, J. [2014]. Atmospheric stability-dependent infinite wind-farm models and the wake -decay coefficient, *Technical Report April 2013*.
- [154] Tytell, E. D. [2006]. Median fin function in bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*: streamwise vortex structure during steady swimming, *Journal of Experimental Biology* **209**(8): 1516–1534.
- [155] Tzimas, M. and Prospathopoulos, J. [2016]. Wind turbine rotor simulation using the actuator disk and actuator line methods, *Journal of Physics: Conference Series* **753**(3).
- [156] U.S. Department of Energy [2009]. Report to Congress on the Potential Environmental Effects of Marine and Hydrokinetic Energy Technologies, *Technical Report December*, U.S. Department of Energy Wind and Water Power Program.
- [157] van der Hoop, J. M., Byron, M. L., Ozolina, K., Miller, D. L., Johansen, J. L., Domenici, P. and Steffensen, J. F. [2018]. Turbulent flow reduces oxygen consumption in the labriform swimming shiner perch, *Cymatogaster aggregata*, *The Journal of experimental biology* **221**: 1–11.
- [158] van Els, R. H. and Junior, A. C. P. B. [2015]. The Brazilian Experience with Hydrokinetic Turbines, *Energy Procedia* **75**: 259–264.
- [159] Verma, S., Novati, G. and Koumoutsakos, P. [2018]. Efficient collective swimming by harnessing vortices through deep reinforcement learning, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **115**(23): 5849–5854.
- [160] Vermeer, L. J., Sørensen, J. N. and Crespo, A. [2003]. Wind turbine wake aerodynamics, *Progress in Aerospace Sciences* **39**(6–7): 467–510.
- [161] Videler, J. J. [1993]. Fish Swimming, (January 1980): 260.
- [162] Videler, J. J. and Wardle, C. S. [1991]. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance, *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **1**(1): 23–40.

- [163] Viehman, H. A. and Zydlewski, G. B. [2014]. Fish Interactions with a Commercial-Scale Tidal Energy Device in the Natural Environment, *Estuaries and Coasts* **38**(1): 241–252.
- [164] Viehman, H., Zydlewski, G., McCleave, J. and Staines, G. [2015]. Using Hydroacoustics to Understand Fish Presence and Vertical Distribution in a Tidally Dynamic Region Targeted for Energy Extraction, *Estuaries and Coasts* **38**: 215–226.
- [165] Wang, J., Wainwright, D. K., Lindengren, R. E., Lauder, G. V. and Dong, H. [2020]. Tuna locomotion: A computational hydrodynamic analysis of finlet function, *Journal of the Royal Society Interface* **17**(165).
- [166] Webb, P. W. [1998]. Entrainment by river chub *Nocomis micropogon* and smallmouth bass *Micropterus dolomieu* on cylinders, *Journal of Experimental Biology* **201**(16): 2403–2412.
- [167] Webb, P. W. and Cotel, A. J. [2010]. Turbulence: Does vorticity affect the structure and shape of body and fin propulsors, *Integrative and Comparative Biology* **50**(6): 1155–1166.
- [168] Weihs, D. [1973]. Hydromechanics of fish schooling, *Nature* **241**(5387): 290–291.
- [169] Weihs, D. [1975]. Some hydrodynamical aspects of fish schooling, *Swimming and Flying in Nature* pp. 703–718.
- [170] Wiesebron, L. E., Horne, J. K., Scott, B. E. and Williamson, B. J. [2016]. Comparing nekton distributions at two tidal energy sites suggests potential for generic environmental monitoring, *International Journal of Marine Energy* .
- [171] Williamson, B., Fraser, S., Williamson, L., Nikora, V. and Scott, B. [2019]. Predictable changes in fish school characteristics due to a tidal turbine support structure, *Renewable Energy* **141**: 1092–1102.
- [172] Wilson, B., Batty, R., Daunt, F. and Carter, C. [2007]. Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds, *Oban* (March): 110.

- [173] Wolfgang, M., Anderson, J., Grosenbaugh, M., Yue, D. and Triantafyllou, M. [1999]. Near-body flow dynamics in swimming fish, *The Journal of experimental biology* **202** (Pt 17): 2303–2327.
- [174] Wu, T. Y. [2010]. A Review on Fish Swimming and Bird/Insect Flight.
- [175] Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T., Adcock, T., Jiang, Z., Gao, Z., Lin, Z., Borthwick, A. and Liao, S. [2019]. Foundations of offshore wind turbines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **104**: 379–393.
- [176] Wu, Y. T., Porte-Agel, F. and Porté-Agel, F. [2011]. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations, *Boundary-Layer Meteorology* **138**(3): 345–366.
- [177] Wu, Y. T., Porté-Agel, F., Porte-Agel, F. and Porté-Agel, F. [2013]. Simulation of Turbulent Flow Inside and Above Wind Farms: Model Validation and Layout Effects, *Boundary-Layer Meteorology* .
- [178] Xiong, Z. and Liu, X. [2019]. Numerical investigation on evolutionary characteristics of the leading-edge vortex induced by flapping caudal fin, *Physics of Fluids* **31**(12).
- [179] Yang, X., Khosronejad, A. and Sotiropoulos, F. [2017]. Large-eddy simulation of a hydrokinetic turbine mounted on an erodible bed, *Renewable Energy* **113**(July): 1419–1433.
- [180] Yoshida, T., Zhou, J., Park, S., Muto, H. and Kitazawa, D. [2020]. Use of a model turbine to investigate the high striking risk of fish with tidal and oceanic current turbine blades under slow rotational speed, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **37**(January): 100634.
- [181] Yu, C. L., Ting, S. C., Hsu, Y. H., Yeh, M. K. and Yang, J. T. [2012]. Mechanical capability and timing of a fish to maneuver from a steady straight-line swimming state, *Mechanics Research Communications* **39**(1): 59–64.
- [182] Yu, Z., Zheng, X. and Ma, Q. [2018]. Study on Actuator Line Modeling of Two NREL 5-MW Wind Turbine Wakes, *Applied Sciences* **8**(3): 434.

- [183] Yuce, M. I. and Muratoglu, A. [2015]. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **43**: 72–82.
- [184] Zangiabadi, E., Masters, I., Williams, A. J., Croft, T. N., Malki, R. and Edmunds, M. [2017]. Computational prediction of pressure change in the vicinity of tidal stream turbines and the consequences for fish survival rate, *Renewable Energy* (101): 1141–1156.
- [185] Zhang, J., Kitazawa, D., Taya, S. and Mizukami, Y. [2017]. Impact assessment of marine current turbines on fish behavior using an experimental approach based on the similarity law, *Journal of Marine Science and Technology (Japan)* **22**(2): 219–230.
- [186] Zhong, H., Du, P., Tang, F. and Wang, L. [2015]. Lagrangian dynamic large-eddy simulation of wind turbine near wakes combined with an actuator line method, *Applied Energy* **144**: 224–233.
- [187] Zhu, Q., Wolfgang, M. J., Yue, D. K. P. and Triantafyllou, M. S. [2002]. Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming, *Journal of Fluid Mechanics* **468**: 1–28.

Brasília – Distrito Federal – Brasil

2022

Local de aplicação
do ISBN



ANEEL
AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

*Programa de Pesquisa e
Desenvolvimento - P&D*


Sefac
Serra do Facão Energia S.A.

Proponente


Universidade de Brasília

Executora


FINATEC
Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos

Fundação de Apoio