



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

GUILHERME ANTÔNIO RIBEIRO DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DO ESCOAMENTO HIDRÁULICO
NA PRESENÇA DE PEIXES EM UM CANAL DE FUGA**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, abril de 2019

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Guilherme Antônio Ribeiro de Souza

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DO ESCOAMENTO HIDRÁULICO
NA PRESENÇA DE PEIXES EM UM CANAL DE FUGA**

Dissertação de Mestrado

Documento de defesa de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Hersília de Andrade e Santos

Belo Horizonte, abril de 2019

S729i Souza, Guilherme Antônio Ribeiro de
Influência de variáveis do escoamento hidráulico na presença de peixes em um canal de fuga / Guilherme Antônio Ribeiro de Souza. – 2019.

xvi, 92 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.

Bibliografia: f. 85-92.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Fluidodinâmica computacional – Teses. 2. Telemetria acústica subaquática – Teses. 3. Análise fatorial – Teses. 4. Análise multivariada – Teses. 5. Usinas hidroelétricas – Teses. 6. Ecoturismo – Teses.

I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 621.312134

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da Instituição, do autor e dos orientadores.

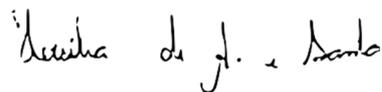
Guilherme Antônio Ribeiro de Souza

Possui graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy - (2004), graduação em Tecnólogo em Construção de Edifícios pelo Centro Universitário UNI-BH – (2016), especialização em Gestão de Projetos de Engenharia pela Pontifícia Universidade Católica – PUC-Minas (2010) e especialização em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário UNA. Participou do Programa de Estudos em Engenharia, Sociedade e Tecnologia (PROGEST) como formador de Planejamento e Orçamento para o curso de Gestão de Obras. Mestrando em Engenharia Civil, área de Construção Civil, pelo CEFET-MG (2019).

GUILHERME ANTÔNIO RIBEIRO DE SOUZA

INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DO ESCOAMENTO HIDRÁULICO
NA PRESENÇA DE PEIXES EM UM CANAL DE FUGA

Dissertação apresentada ao Programa de
PósGraduação em Engenharia Civil do CEFET-
MG como requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil



Prof^a. Dr^a. Hersília de Andrade e Santos, D.Sc.
Orientador
a Departamento de Engenharia Civil,
CEFET-MG



Dr^a Raquel Coelho Loures Fontes,
D.Sc. Analista Meio
Ambiente, CEMIG



Prof^a. Dr^a. Edna Maria de Faria Viana,
D.Sc. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos
Hídricos, UFMG



Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo
Departamento de Engenharia Civil - CEFET/MG
STAPE 1039643

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo,
D.Sc. Departamento de Engenharia Civil,
CEFET-MG

Belo Horizonte, 10 de Abril de 2019

Dedicado aos meus pais.
Meus melhores amigos e maiores exemplos
de humildade, fé e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tantas bênçãos em minha vida, concedendo-me força, saúde e tantas pessoas especiais ao meu redor.

Gratidão imensa a Prof^a. Dr^a. Hersília de Andrade e Santos, minha orientadora, exemplo de profissionalismo, dedicada e apaixonada pela pesquisa. Agradeço por sempre acreditar em mim. Incentivadora contumaz do meu aprendizado e evolução no trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo, que além de fazer parte da banca, foi meu professor durante o curso de mestrado. Agradeço pela disponibilidade, ensinamentos e cooperação direta no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais membros da banca, Dr. Fabio Mineo Suzuki, Profa. Dra. Edna Maria de Faria Viana e Raquel Coelho Loures, pelas valiosas observações e sugestões que enriqueceram meu trabalho.

À minha mãe, Maria Aparecida Ribeiro de Souza, minha maior referência, que com seu amor incondicional e fé inabalável, deposita em mim força e confiança para eu realizar meus sonhos.

Ao meu pai, José Antônio de Souza Coelho, querido amigo e companheiro, às minhas irmãs, Lívia e Luciana pelo carinho, orações e aconselhamentos, e à minha sobrinha Júlia pelo carinho e alegria de sempre.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG, e funcionários.

Aos colegas do mestrado, especialmente aos amigos Scarlet Jorge, Harley Viana, Tathiana Caetano, Thiago José, Camila Lacerda, Adriana Rodrigues, Diego Goulart, Jerônimo Coura, Maria da Conceição, Paulo Roberto e Nathália Wellida. Com vocês essa jornada foi mais valiosa e possível de ser concluída.

Aos diretores, professores e colegas da Passo Básico, local de muita alegria onde sou acolhido com muito amor! Gratidão eterna a todos os momentos com palavras de carinho e motivação que recebo.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET MG) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento da bolsa de estudo durante o mestrado. Sou grato também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto de pesquisa 456390/2014-6 e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), por meio do projeto de pesquisa “Comportamento de peixes a jusante de barragens: subsídios para conservação da ictiofauna” e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), por meio do convênio 01.10.0794.00 PROINFRA 01/2009, pelo financiamento da estrutura de pesquisa (computadores, softwares), bem como ao CEFET-MG pela disponibilização da infra-estrutura.

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

E a todas pessoas queridas que torceram por mim.
Muito obrigado!

“E como os peixes enfrentam a correnteza para chegar em um lugar desconhecido, apenas com fé eu sigo...”

RESUMO

A hidreletricidade é uma importante e significativa fonte na matriz elétrica de vários países no mundo. Entre os impactos ambientais causados pelas usinas hidrelétricas ressalta-se o bloqueio da rota de migração de peixes, que podem se acumular em partes do canal de fuga quando na ausência de medidas mitigadoras. O presente trabalho analisou a influência de variáveis hidráulicas do escoamento do canal de fuga sobre a presença de peixes na Usina Hidrelétrica de Três Marias (Brasil). Neste local em 2007, 7 toneladas de peixes foram mortos durante parada de turbinas e abertura de vertedor. Magnitude da velocidade, vorticidade, energia cinética turbulenta, intensidade turbulenta, dissipação de energia e deformação hidráulica ao longo escoamento, gerado por um modelo hidrodinâmico 3D no software Ansys, foram comparadas com as presenças do *Pimelodus maculatus (mandi)* e do *Prochilodus argenteus (curimba)*, obtidas por meio de telemetria acústica realizado em estudo prévio. Os resultados indicaram maior presença dos peixes próximo a Turbina 1, cujos valores de velocidade, vorticidade e deformação hidráulica foram maiores em relação as outras partes. A análise fatorial para dados misturados constatou que a combinação da energia cinética turbulenta, taxa de dissipação de energia, intensidade turbulenta e vorticidade explicou 34.8% da variância, seguida pela combinação da deformação hidráulica, vorticidade e velocidade com 21.3%. Em termos medianos, a variância foi diferente para duas espécies e o mandi percorreu pontos com padrões hidráulicos diversos. Conclui-se que a combinação de variáveis hidráulicas atrai ambas espécies para área da turbina 1, área insegura para permanência dos cardumes.

Palavras-chave: Dinâmica de fluidos computacional (CFD); telemetria acústica; análise fatorial para dados misturados; hidroeletricidade; atração de peixes

ABSTRACT

Hydroelectricity is a significant source of electricity in many countries around the world. The block of the fish migration route is an environmental impact caused by hydroelectric power plants and the schools can accumulate in regions of the trailraces with no mitigation structure. The present work analyzed the influence of hydraulic variables of the tailrace flow on the fish presence in the Três Marias Hydroelectric Power Plant (Brazil). There 7 tons of fish were killed in 2007 during turbine shutdown and spillway opening. We compared velocity magnitude, vorticity magnitude, turbulent kinetic energy, turbulent intensity, energy dissipation rate and hydraulic strain rate along the flow, generated by a 3D hydrodynamic model in the Ansys software, to the presences of *Pimelodus maculatus* (mandi) and *Prochilodus argenteus* (curimba), obtained with previous study of acoustic telemetry. The results indicated a higher fish presence near Turbine 1, whose values of velocity, vorticity and hydraulic strain were higher than the other regions. The factorial analysis for mixed data found that the combination of turbulent kinetic energy, energy dissipation rate, turbulent intensity and vorticity explained 34.8% of the variance, followed by the combination of hydraulic rate, vorticity and velocity with 21.3%. In median terms, the variance was different for two species and the mandi navigated in points on diverse hydraulic patterns. It is concluded that the combination of hydraulic variables attracts both species to turbine 1 area, an unsafe region for the permanence of the shoals.

Keywords: Computacional fluid dynamics (CFD); acoustic telemetry; factor analysis for mixed data; hydroelectricity; fish attraction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de Energia Elétrica do Brasil	17
Figura 2 - Tipo de grade de Volume Finito	32
Figura 3 - Exemplar de mandi, <i>Pimelodus maculatus</i>	39
Figura 4 - Exemplar de Curimba, <i>Prochilodus argenteus</i>	40
Figura 5 - Fluxograma Metodologia.....	42
Figura 6 - Localização da UHE Três Marias.....	43
Figura 7 - Arranjo da barragem da UH Três Marias	44
Figura 8 – Período utilizado para análise de seleção da vazão turbinada a ser simulada no modelo hidrodinâmico	45
Figura 9 - Condições de contorno	46
Figura 10 - Malha do canal de fuga.....	47
Figura 11 - Dimensões do canal de fuga.....	47
Figura 12 - Exemplo de monitoramento biológico sem cruzamento com as informações hidrodinâmicas. Dados obtidos para o indivíduo 4120 (mandi) em novembro de 2011	52
Figura 13 - Indivíduo excluído - mandi 4834 novembro	53
Figura 14 - Representação TecPlot turbinas e volumes de análise	54
Figura 15 - Canal de fuga de Três Marias, volumes de análise e pontos de presença dos indivíduos a) 3322 – curimba em dezembro e b) 5044 – mandi em novembro de 2011	55
Figura 16 - Box plot para variável magnitude da velocidade nos volumes de análise	59
Figura 17 - Variável magnitude da velocidade em perfis para diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas	60
Figura 18 - Box plot para variável vorticidade nos volumes de análise	61
Figura 19 - Box plot para variável deformação hidráulica nos volumes de análise ...	61
Figura 20 - Variável Vorticidade em perfis par diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas.....	62
Figura 21 - Variável deformação hidráulica em perfis par diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas.....	63

Figura 22 - Box plot para variável energia cinética turbulenta nos volumes de análise	64
Figura 23 - Variável energia cinética turbulenta em perfis par diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas	65
Figura 24 - Box plot para variável intensidade turbulenta nos volumes de análise ...	66
Figura 25 - Variável intensidade turbulenta em perfis par diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas.....	67
Figura 26 - Box plot para dissipação de energia nos volumes de análise	68
Figura 27 - Variável dissipação de energia em perfis par diferentes profundidades (Z= 503 e Z=505) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas.....	69
Figura 28 - Pontos visitados pelo do indivíduo 3448 (curimba) no canal de fuga da UHE de Três Marias nos meses de novembro e dezembro de 2011	70
Figura 29 - Pontos visitados pelo do indivíduo 4246 (mandi) no canal de fuga da UHE de Três Marias nos meses de novembro e dezembro de 2011	70
Figura 30 - Box Plot Presença espécie Mandi Dezembro	72
Figura 31 - Gráfico Correlação das Variáveis Hidráulicas.....	73
Figura 32 - Variância Variáveis Hidráulicas - Eixo 1.....	74
Figura 33 - Variáveis Hidráulicas que mais contribuem para dimensão 1	75
Figura 34 - Variáveis hidráulicas que mais contribuem para a dimensão 2	75
Figura 35 - Contribuição de todas as variáveis hidráulicas nos 2 eixos	76
Figura 36 - Localização das variáveis nos quadrantes.....	77
Figura 37 - Gráfico Comparativo entre variáveis qualitativas e quantitativas	78
Figura 38 - Gráfico Intervalos de Confiança para categoria Mês	78
Figura 39 - Gráfico Intervalos de Confiança para categorias Presença / Ausência...	79
Figura 40 - Gráfico Intervalos de Confiança para categoria Espécie	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade de vazão de cada turbina	46
Tabela 2 - Número de Elementos.....	47
Tabela 3 - Indivíduos excluídos por não apresentarem dados após o filtro de vazão	51
Tabela 4 - Total de indivíduos trabalhados	51
Tabela 5 - Registros máximos e mínimos de variáveis hidráulicas com presença de peixe.....	69
Tabela 5 - ANOVA Presença de todos os indivíduos	71
Tabela 6 - ANOVA Presença Mandi Dezembro	71
Tabela 7 - Teste de Duncan para Presença de Peixes nos Volumes de Análise	72
Tabela 8 - Teste de Tukey para Presença de Peixes nos volumes de Análise	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
ANEEL	Agência Nacional de Energia elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
CEMIG	Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais
CFD	Dinâmica Computacional de Fluidos
ELAM	Eulirian Lagrangian Agent Method
NFS	Numerical Fish Surrogate
STP	Sistemas de Transposição de Peixes
SVP	Strain-Velocity-Pressure
UHE	Usina Hidrelétrica
VOF	Volume of Fluid
Vel	Magnitude da velocidade
Vort	Vorticidade
ECT	Energia Cnética Turbulenta
TDE	Taxa de Dissipação de Energia
IT	Intensidade Turbulenta
DH	Deformação Hidráulica
PCA	Análise de Componentes Principais
FAMD	Análise Fatorial de Dados Misturados

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	17
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	20
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 MODELOS DE PREVISÃO DE COMPORTAMENTO DE PEIXE	22
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESCOAMENTO DE FLUIDOS.....	24
2.2.1 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)	24
2.2.2 Softwares	26
2.2.3 Equações RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes)	27
2.2.4 Modelo de Turbulência K- Épsilon (k- ϵ).....	28
2.2.5 Número de Courant	29
2.2.6 escoamentos Multifásicos	30
2.2.7 Método de Discretização	31
2.2.7.1 Método Volumes Finitos	32
2.2.8 Malhas Numéricas.....	32
2.3 VARIÁVEIS HIDRÁULICAS RELACIONADAS AO COMPORTAMENTO DE PEIXES	33
2.4 BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	36

2.5 MONITORAMENTO DA ICTIOFAUNA.....	38
2.5.1 Telemetria Acústica	38
2.6 ESPÉCIES	39
2.6.1 Pimelodus Maculatus	39
2.6.2 Prochilodus argenteus.....	40
2.7 ANÁLISE FATORIAL PARA DADOS MISTURADOS	40
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	42
3.1 FLUXOGRAMA METODOLOGIA.....	42
3.2 ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.3 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	44
3.3.1 Cenário do Estudo.....	44
3.3.2 Malha.....	47
3.3.3 Dimensões Canal de Fuga	47
3.3.4 Simulação Numérica Do Estudo.....	48
3.4 DADOS BIOLÓGICOS	48
3.4.1 Coleta de Dados.....	48
3.4.2 Indivíduos de Peixes Utilizados no Cruzamento com as Variáveis Hidráulicas	50
3.5 Cruzamento de Dados.....	53
3.5.1 Volumes de Análise.....	53
3.5.2 Presença de Peixes nos Volumes de Análise	54
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	56

3.6.1 Box-plot variáveis hidráulicas	56
3.6.2 Análise Anova e testes Duncan e Tukey	56
3.6.3 Análise Fatorial para Dados Misturados.....	57
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	59
4.1 REPRESENTAÇÃO TEC PLOT COMPORTAMENTO DE PEIXES NO CANAL DE FUGA	59
4.1.1 Variáveis hidráulicas	59
4.1.2 Registros máximos e mínimos de Variáveis Hidráulicas com presença de peixe	69
4.1.3 Presença do Peixe nos Volumes de Controle	70
4.2 ANÁLISE VARIÂNCIA PARA PRESENÇA DOS PEIXES NOS VOLUMES DE ANÁLISE	71
4.3 CRUZAMENTO DA PRESENÇA DE PEIXES NO VOLUME DE ANÁLISE 1 E VARIÁVEIS HIDRÁULICAS	73
4.3.1 Correlação das Variáveis Hidráulicas.....	73
4.3.2 Análise Fatorial de Dados Misturados.....	74
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
5.1 DISCUSSÃO	80
5.2 CONCLUSÃO.....	83
5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS.....	85

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

A Matriz Elétrica Brasileira (figura 1) tem a fonte hídrica como sua principal fonte de energia, alcançando uma representatividade de aproximadamente 61%. A capacidade instalada no Brasil está atualmente em 104 mil MW, provenientes de 1337 usinas hidrelétricas (UHE) (ANEEL, 2019).

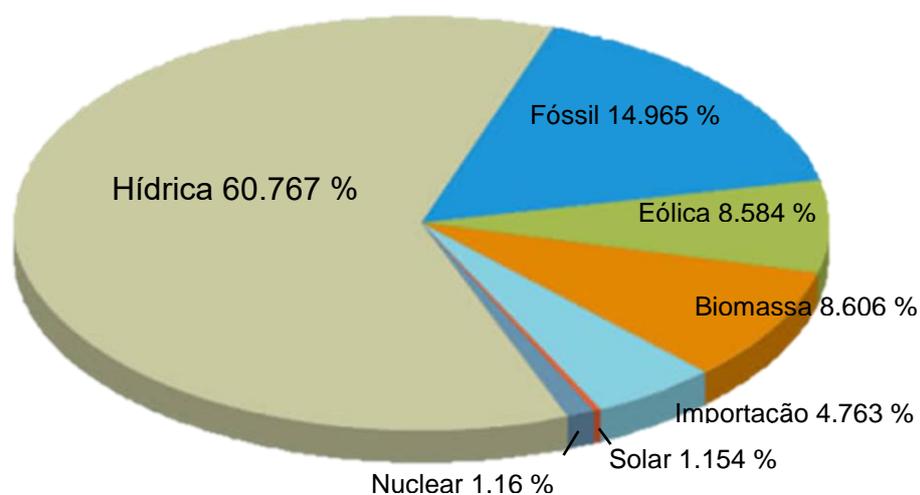


Figura 1 - Matriz de Energia Elétrica do Brasil
Fonte: ANEEL 2019

A construção de barragens, além de estar associada a produção de energia elétrica, é também conhecida como uma solução adequada para fornecer água para o consumo agrícola, abastecimento e industrial, controle de enchentes e controle de qualidade (ZARE; KALANTARI, 2018).

No entanto, além de benefícios, a construção de barragens provoca também impactos negativos (FEARNSIDE, 2016) que afetam o ambiente de várias formas. (ZARE; KALANTARI, 2018). Tem-se por exemplo, a geração de impactos negativos em sistemas fluviais, alterando o padrão de escoamento da água e remodelando os habitats naturais (CHEN; CHEN; FATH, 2015). Outra consequência são os problemas sociais causados pela formação do reservatório tais como crescimento populacional em cidades, devido ao deslocamento de populações. Destacam-se também os impactos causados na saúde com a transmissão de doenças como a malária, no lago da represa, e até mesmo impactos físicos e químicos, caracterizados pelo acúmulo de sedimentos a montante da barragem, e o conseqüente processo de erosão a jusante devido à redução de sedimentos do rio (ZARE; KALANTARI, 2018).

Entre os impactos ambientais, Loures (2009) destaca os que ocorrem sobre a fauna aquática (especialmente peixes) nas fases de implantação e operação dos empreendimentos hídricos.

A montante do barramento, impactos a fauna de peixe podem ocorrer devido a eliminação de sítios vitais como os de desova e berçário, uma vez que ambientes lóticos (água corrente) do rio são transformados em um ambiente lêntico (PRADO et al., 2016). O bloqueio de rotas migratórias pela barragem, supersaturação gasosa que ocorre na água devido a ação do vertedouro causando embolia gasosa nos peixes, e também o aumento da predação próximo à barragem, são alguns exemplos das várias modificações sofridas pela ictiofauna local a jusante do barramento dos rios (LOURES, 2009).

Em Minas Gerais, com frequência são observadas grandes concentrações de cardumes de peixes em canais de fuga de UHE's (ANEEL, 2008), local onde as águas que passam pelas turbinas é restituída ao leito natural do rio (LOURES, 2009). Acredita-se que os peixes sejam atraídos por condições hidrodinâmicas nesta área. Esses cardumes correm risco de morte na partida das unidades geradoras. Nesta operação, o funcionamento das turbinas é interrompido mas as comportas e o tubo de sucção permanecem abertos em continuidade com o rio (canal de fuga), permitindo a entrada dos peixes (LOURES, 2009).

Entre os riscos relacionados a esta entrada, estão os de danos e injúrias com o impacto com as pás das turbinas durante a partida da máquina e a asfixia relacionados a redução do oxigênio dissolvido (OD) na água quando do aprisionamento dos peixes no tubo de sucção (LOURES, 2009).

Desta forma, acidentes ambientais envolvendo cardumes de peixes atraídos por condições geradas em UHE, tem sido frequentes no Brasil. Em março de 2007, um evento de grande proporção ocorreu na área a jusante da UHE Três Marias, operada pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Ao realizar manobras no vertedouro e na turbina mais próxima a margem direita do rio, cerca 7 toneladas de peixes morreram (NETO, 2007).

Assim, medidas de mitigação destes impactos devem ser propostas e o entendimento dos padrões de movimentação e comportamento dos peixes frente ao escoamento hidráulico gerado pela operação das UHE's permite a proposição de soluções ambientais (SANTOS et al., 2018; STEPHENS et al., 2015).

Goodwin (2006) afirma que parâmetros hidrodinâmicos como magnitude da velocidade da água, pressão hidrostática e deformação hidráulica são variáveis que podem ajudar a entender o comportamento dos peixes. Técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) tem sido empregadas para decodificar e prever tais respostas através de simulações numéricas do escoamento hidráulico (GOODWIN, et. al., 2006). Estes parâmetros combinados com dados biológicos coletados através de telemetria acústica, podem auxiliar no monitoramento de peixes e no entendimento dos padrões natatórios em ambientes próximos às barragens (ARENAS et al., 2015).

Desde 2010, o grupo de pesquisa em Ecohidráulica do CEFET- MG estuda o escoamento hidráulico a jusante da UHE Três Marias através de técnicas de CFD. Na primeira etapa, foi realizada a coleta de informações da batimetria do rio com auxílio do ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Em seguida, Duarte (2014), criou o primeiro modelo numérico do canal de 3 km a jusante da UHE Três Marias. Solano (2017), além de melhorar a malha numérica, iniciou o cruzamento de informações hidrodinâmicas e biológicas.

No presente trabalho o modelo numérico do escoamento do canal de fuga da UHE foi cruzado com o trajeto das espécies *Pimelodus maculatus (mandi)* e *Prochilodus argenteus (curimba)* pela telemetria acústica. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi verificar como as variáveis hidráulicas influenciam a presença ou ausência de indivíduos destas espécies em determinadas áreas do canal de fuga e o poder desta influência frente a demais fatores monitorados e não monitorados.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Como as variáveis hidráulicas do escoamento explicam a presença ou ausência das espécies *Pimelodus maculatus (mandi)* e *Prochilodus argenteus (curimba)* no canal de fuga de uma UHE?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das variáveis hidráulicas do escoamento, obtidas em um modelo numérico 3D, na presença ou ausência de indivíduos das espécies *Pimelodus maculatus* e *Prochilodus argenteus* no canal de fuga de uma UHE.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir com base na literatura e na disponibilidade de dados o local de aplicação do estudo;
- Definir as variáveis hidráulicas do escoamento do canal de fuga da UHE que seriam mais importantes para correlacionar ao movimento de peixes, com base na literatura;
- Selecionar dentro dos dados de monitoramento tele-acústico as informações de movimentação do peixe que podem ser correlacionadas as variáveis hidráulicas;
- Identificar a ocorrência ou não da atração de peixes para determinada área específica da UHE;
- Identificar o poder de explicação das variáveis hidráulicas sobre essa atração;
- Identificar os padrões de influência das variáveis hidráulicas sobre essa atração.

1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Dentre as limitações deste trabalho destaca-se:

- Simplificações na geometria do canal de fuga devido a utilização de malha estruturada;
- Quantidade de peixes monitorados devido a problemas técnicos e determinação do cenário de vazão;

- Limitação computacional e utilização de softwares comerciais. A licença adquirida para utilização do software Fluent, permitia usar apenas um terço da capacidade máxima do computador do CEFET MG.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MODELOS DE PREVISÃO DE COMPORTAMENTO DE PEIXE

Estudos científicos e pesquisas acerca de monitoramento e previsão de comportamento de peixes podem auxiliar ações mais eficazes para mitigação de impactos ambientais e vem ganhando espaço no meio científico juntamente com novos métodos e ferramentas de pesquisas (KATOPODIS, 2005).

Assim, este item do trabalho destaca modelos de previsão de comportamento de peixe construídos com a junção de informações sobre o escoamento e sobre o comportamento de peixes.

Um modelo mundialmente divulgado para propor soluções ambientais é o Numerical Fish Surrogate (NFS), desenvolvido por Goodwin et al. (2007) e cuja base está na cognição e percepção dos peixes dos padrões hidráulicos. O NFS é uma espécie de peixe virtual que responde a estímulos de um campo de fluxo simulado, obtido através de técnicas de dinâmica de fluido computacional (CFD).

Por meio de um método de agente euleriano lagrangiano (ELAM), o NFS combina três abordagens de modelagem em apenas um único ambiente de simulação integrado (GOODWIN et al., 2007):

- Estrutura Euleriana: que rege os domínios físico, hidrodinâmico e de qualidade da água;
- Estrutura Lagrangiana: que rege a percepção sensorial e as trajetórias de movimento de peixes individuais;
- Estrutura Agente: que rege o domínio cognitivo responsável pela percepção, decisões de comportamento e aclimatação.

Segundo Weber (2006), os ELAM's tem extrema eficácia ao realizar decodificação e simulação individual da variação de comportamento e trajetória de organismos aquáticos, utilizando a alta precisão do CFD para representar campos de fluxos complexos.

O peixe percebe alguns padrões hidráulicos, além de pressão, força e direção do fluxo, aceleração no corpo e gradientes de velocidade. No NFS, a intuição sensorial do peixe é incorporada a um conceito básico de geomorfologia fluvial, onde é criado um padrão de fluxo gerando uma “regra de tráfego de peixe”. Esta regra é conhecida como “*Strain-Velocity-Pressure (SVP) Hypothesis*” (Hipótese da Tensão–Velocidade–Pressão), que necessita de três estímulos hidrodinâmicos (GOODWIN et al., 2007):

- Distorção do campo de fluxo;
- Magnitude da velocidade;
- Pressão Hidrostática.

O NFS já é usado em projetos de Sistemas de Transposição de Peixes (STP) na América do Norte. Para ser utilizado na América do Sul é necessário entender como os peixes locais respondem aos estímulos hidrodinâmicos e conhecer também seu ciclo de vida e estratégias de sobrevivência nos rios sul-americanos (GOODWIN et al., 2007).

Outro modelo que correlaciona informações hidrodinâmicas com comportamento de peixes foi desenvolvido por Delavan et. al. (2017). Utilizando um “*Acoustic Doppler Current Profiler*” (ADCP) e também um “*Acoustic Doppler Velocimeter*” (ADV), dados hidráulicos foram coletados e comparados com a capacidade natatória da “*Emerald shiner*” (*Notropis atherinoides*) em “*Broderik Park*”, litoral americano no Rio Niagara. Após análises dos dados biológicos e hidráulicos, os resultados mostram que este trecho é caracterizado por velocidades acima da capacidade natatória dessa espécie fluvial e as condições de turbulência são impróprias para o movimento desses peixes.

Na América do Sul são raros os estudos de comportamentos de peixes a jusante de barramentos (LOURES, 2009). Os motivos estão relacionados a diferença entre os padrões comportamentais de migração da ictiofauna neotropical quando comparada

com os praticados pelos peixes na América do Norte. A maioria dos impactos causados por barramentos a migração de peixes na América do Sul está relacionada a subida de peixes e não a descida como na América do Norte (POMPEU et al., 2015). Isto faz com que muitos estudos realizados em outros países não tenham aplicação no Brasil. Adicionado a isto, a falta de recursos aplicados a estudos de problemas ambientais, grande diversidade de peixes, a grande quantidade de bacias hidrográficas e extensão do Brasil, constituem grandes desafios para pesquisas acerca de mitigação de impactos a ictiofauna provenientes de usinas hidrelétricas (CALLISTO, M.; ALVES; LOPES, J.M.; CASTRO, 2014).

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESCOAMENTO DE FLUIDOS

2.2.1 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)

Atualmente, é possível modelar geometrias e padrões de escoamento relativamente complexos em um computador. Equações diferenciais parciais básicas do escoamento devem passar por um método de discretização para obter uma solução numérica (FERZIGER; PERIC, 2002; WHITE, 2011).

O CFD é o conjunto de metodologias que auxilia no entendimento do comportamento de fluidos em geometrias complexas através de simulações numéricas (HIRSCH, 2007). Esta técnica de estudo é aplicada em diferentes áreas de pesquisa como: hidrodinâmica de navios, aerodinâmica, engenharia elétrica e eletrônica, engenharia mecânica, engenharia marítima, processos de engenharia química, engenharia ambiental, engenharia biomédica, ventilação externa e interna de edificações, hidrologia e oceanografia e meteorologia (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Além de todas estas aplicações, o CFD é útil para estudo de estruturas de mitigação de impacto ambiental a ictiofauna, como projeto de passagem de peixes (FERRARI; POLITANO; WEBER, 2009) e turbinas amigáveis à passagem de peixes (TAYLOR; COUTANT; WHITNEY, 2000).

Segundo Saleh (2002), o emprego do CFD no estudo de comportamento de fluidos divide-se em:

1. Equações matemáticas que descrevem o fluxo do fluido;
2. Discretização destas equações para gerar uma equação numérica análoga, dividindo o domínio em pequenos elementos;
3. Definição de condições iniciais e de contorno para solucionar as equações. Certos parâmetros de controle de estabilidade, convergência e a exatidão do método, também são utilizados.

Os três elementos principais dos códigos CFD são (SALEH, 2002):

1. Um pré-processador – utilizado para gerar a malha, definir parâmetro de escoamento e condições de contorno, e também para inserir o problema da geometria;
2. Um solucionador de escoamento – utilizado para solucionar as equações que regem o fluxo submetido às condições previstas. Os mais usados são: Método de Diferenças Finitas, Método de Elementos Finitos e Método de Volumes Finitos.
3. Um pós-processador – utilizado para atenuar os dados e expor os resultados em formato gráfico.

Através destes pacotes de software, é possível realizar a simulação de um dado problema de escoamento viscoso construindo uma geometria a partir de condições de contorno estabelecidas. O software gera a malha e soluciona os cálculos em cada elemento da mesma. Porém estes cálculos não são facilmente solucionáveis, e requerem atenção e precisão para o responsável da modelagem. O número de Reynolds do escoamento por exemplo, pode variar de entre laminar e turbulento, comprometendo a exatidão da simulação. Isso acontece porque as equações do movimento completas não resolvem totalmente escoamentos turbulentos, sendo necessário o uso de modelos de turbulência aproximados (WHITE, 2011).

2.2.2 Softwares

Alguns dos principais softwares utilizados em Simulações Numéricas Computacional são:

- *FLUENT*: Software do pacote Ansys, o *Fluent* é uma das principais ferramentas de simulações CFD. Além de ser capaz de realizar o estudo de escoamentos livres multifásicos, neste software também é possível solucionar problemas tridimensionais complexos utilizando o Método de Volumes Finitos (“ANSYS”, 2018).
- *OPENFOAM*: Software CFD gratuito de código aberto. O *OPENFOAM* foi desenvolvido em 2004 pela OpenCFD. Além de possuir uma ampla gama de recursos para resolver problemas de escoamentos de fluidos complexos, este software proporciona total liberdade aos seus usuários, que por meio de códigos modulares, é capaz de reunir suas aplicabilidades em uma biblioteca compartilhada exclusiva. O *OPENFOAM* possui mais de 80 aplicações para solucionar problemas específicos da Engenharia Mecânica, e para realizar tarefas de pré e pós-processamento são mais de 170 serviços públicos (OPENFOAM, 2018).
- *CFX*: Software do pacote Ansys, ele é utilizado para solucionar problemas relacionados a fluxos de alto nível de complexidade. É um software robusto e flexível que oferece modelos físicos variados, que podem ser aplicados em diferentes áreas, com níveis de personalização e automação diversificados (CAE, 2017).
- *FLOW-3D*: Configurado para simulações de pós processamento, o *FLOW-3D* é uma ferramenta adequada para o CFD, que oferece informações importantes sobre processos de fluxos físicos. Além da simplicidade em sua execução, por não possuir módulos adicionais necessários, este software possui uma estrutura cartesiana que executa geometrias complexas automaticamente (FLOW-3D, 2018).

2.2.3 Equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*)

As equações de *Navier-Stokes* foram desenvolvidas por C. L. M. H. Navier (1785-1836) e sir George G. Stokes (1819-1903), que através da inclusão de termos viscosos Newtonianos na equação da quantidade de movimento aplicada a fluidos, introduziram a teoria do escoamento viscoso. Assim, elas são formadas por equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem (EQ. 1) (WHITE, 2011).

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (\text{EQ. 1})$$

Onde:

ρ : densidade

g : gravidade

p : pressão;

τ : Tensão de cisalhamento

μ : viscosidade cinemática

u, v, w : componentes cartesianas das velocidades médias temporais

As incógnitas encontradas nestas equações ($p, u, v, w,$) devem ser combinadas com a relação de continuidade incompressível (Equação 2), formando assim 4 equações para solução dos problemas (WHITE, 2011).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{EQ. 2})$$

Em escoamentos turbulentos, os valores instantâneos das variáveis (u, v, w, p) flutuam em torno de um valor médio. Em alguns estudos, valores médios são suficientes para conhecer o comportamento do escoamento. Mas para outros estudos, é necessário conhecer a componente flutuante destas variáveis (SOUZA et al., 2011).

Quando as variáveis das equações de Navier-Stokes são decompostas numa parte média e outra flutuante, estas recebem o nome de equações Navier-Stokes com médias de Reynolds. Isto porque em 1895, Osborne Reynolds propôs que o escoamento instantâneo fosse desdobrado em uma componente média (de grande escala) e outra flutuante (de pequena escala) (SOUZA et al., 2011).

Assim, aplicando esta decomposição para a componente x, chega-se nas seguintes equações (EQ. 3):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{EQ. 3})$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

onde \bar{u}_i e \bar{u}_j são componentes da velocidade média, u'_i e u'_j são componentes flutuantes das velocidades, \bar{p} é a pressão média, ρ é a densidade do fluido e μ é a viscosidade dinâmica do fluido (WHITE, 2002).

2.2.4 Modelo de Turbulência K- Épsilon ($k-\epsilon$)

Modelos de turbulência tem como objetivo prever os efeitos de turbulência em fluidos. Assim, nas equações RANS o termo não linear $\overline{\rho u'_i u'_j}$, também conhecido como tensão de Reynolds, deve ser modelado para conseguir solucionar tais equações (SOUZA et al., 2011).

Introduzido em 1968 pelos pesquisadores Nakayama e Harlow, o modelo de turbulência K épsilon ($k-\epsilon$), com duas equações de transporte, é um dos modelos de viscosidade turbulentos mais comumente utilizado com base nas equações *Reynolds de Navier- Stokes* em códigos CFD (SCOTT-POMERANTZ, 2004) (SOUZA, 2014). Ele utiliza a hipótese de Boussinesq e dispõe de um cálculo de custo relativamente baixo para a viscosidade turbulência (WHITE, 2011).

Assim, de acordo com a hipótese Boussinesq, a tensão de Reynolds é calculada pela Equação

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (\text{EQ. 4})$$

onde u' é a velocidade média, ρ é a densidade do fluido, k é a energia cinética turbulenta, δ_{ij} é o coeficiente de Kronecker e μ_t é a viscosidade turbulenta.

Duas equações adicionais devem ser resolvidas para fechar a formulação matemática do escoamento: uma é chamada de equação para energia cinética turbulenta e a outra dissipação turbulenta (WILCOX, 1998):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (\text{EQ. 5})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_b - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Onde:

G_k : Geração de energia cinética turbulenta, devido aos gradientes de velocidade média.

G_b : Geração de energia cinética turbulenta devido as flutuações das velocidades.

Y_M : $\partial \left(\frac{\rho k}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon$: Representa a contribuição na taxa de dissipação total devido à variação volumétrica para o caso compressível.

$C_{1\varepsilon}$ $C_{2\varepsilon}$ $C_{3\varepsilon}$: São constantes.

σ_k σ_ε : São os números de *Prandtl* turbulentos (Para K e ε).

2.2.5 Número de *Courant*

A estabilidade da solução numérica em uma malha computacional é influenciada diretamente pelo valor do número de *Courant*, número adimensional que relaciona as

dimensões temporais e espaciais da simulação numérica computacional (WANDER, 2011).

Ele é dado pela seguinte relação (Equação 12):

$$Co = \frac{v \cdot \Delta x}{\Delta t} \quad (\text{EQ. 6})$$

Onde:

Δt : É o passo do tempo de integração

Δx : É a dimensão do volume discreto

v : É a velocidade de escoamento

2.2.6 Escoamentos Multifásicos

O escoamento multifásico acontece quando um fluido apresenta diferentes condições e fases em sua extensão, ou quando em um domínio existe a ocorrência de dois fluidos, como por exemplo escoamentos livres (SOUZA, 2014). São bastante complexos os fenômenos físicos ocorridos nestes tipos de escoamentos. As duas fases apresentam características diferentes, onde a densidade provoca a segregação das fases, deixando cada uma com velocidade diferente no escoamento (NASCIMENTO, 2013).

O escoamento bifásico tem como característica possuir uma ou mais interfaces (SOUZA, 2014) e para os softwares de simulação, casos de determinação da interface água-ar é uma dificuldade a mais na solução. Por isso faz-se necessário o uso de simplificações numéricas adicionadas ao modelo computacional, como o método *Volume of Fluid* (VOF). O VOF é baseado no conceito de fração de volume de fase, onde uma fase não pode ocupar o mesmo lugar que a outra. A fração de volume preenchida pelo fluido mais denso em um volume de controle é definida por uma função F , podendo obter valores de 0 a 1. A fração de volume preenchida pelo fluido menos denso é representado pelo valor de $1-F$. O volume de controle preenchido apenas por água é representado pelo valor $F=1$, e o valor $F=0$ indica que o volume de controle contém apenas ar. Informações sobre variáveis de interesse como pressão,

velocidade e temperatura são mantidas dentro de cada célula das malhas (POLITANO; CARRICA; WEBER, 2009).

2.2.7 Método de Discretização

Depois que o modelo matemático é encontrado, é necessário escolher um método de discretização adequado que terá a função de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo (GONÇALVES, 2007).

Os métodos mais conhecidos dentre os vários existentes são: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e Método dos Elementos Finitos (MEF). O Método de Diferenças Finitas além de ser o mais antigo e mais dinâmico para geometrias simples, é de fácil utilização, porém não é apropriado para geometrias complexas (GONÇALVES, 2007).

Similar ao MVF, o MEF tem a vantagem de trabalhar com geometrias arbitrárias, e já que cada elemento pode ser dividido em vários, as malhas podem ser refinadas de forma simples em regiões de interesse. Sua principal desvantagem, que é comum aos métodos que usam malhas não estruturadas, é o fato de as matrizes das equações linearizadas não serem tão bem estruturadas como as das malhas estruturadas, dificultando a escolha de métodos de resolução eficientes (GONÇALVES, 2007).

Na presente pesquisa, o uso do MVF está relacionado a opção de utilizar o software Fluent (Ansys 12) para simulação do escoamento hidráulico do canal de fuga de Três Marias.

2.2.7.1 Método Volumes Finitos

Para resolução dos casos de escoamentos turbulentos, que utilizam as equações Navier-Stokes e Reynolds, o MVF é o mais utilizado em escoamentos tridimensionais (FILL, 2011 e SALEH, 2002).

Devido sua generalidade, é adequado para qualquer tipo de malha, inclusive as que possuem geometrias complexas, pois a malha é definida apenas pelos limites de volumes de controle (VC) e não precisa estar relacionado a um sistema de coordenadas e os valores podem ser aproximados (FILL, 2011).

O MVF é o método de discretização que divide o domínio em Volumes de Controle, que são pequenos volumes conectados ente si, formando uma grade de Volumes Finitos (Figura 2) (FERZIGER; PERIC, 2002; GONÇALVES, 2007).

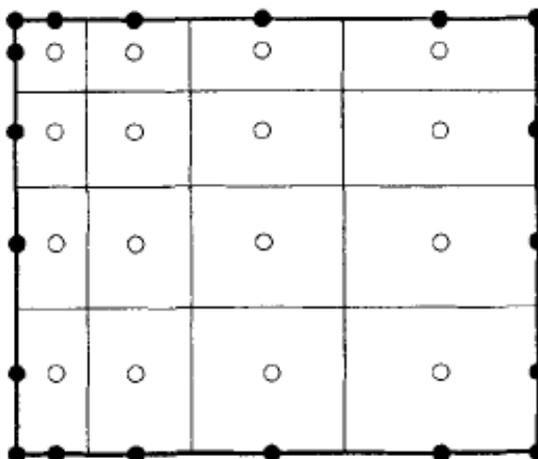


Figura 2 - Tipo de grade de Volume Finito
Fonte: (GONÇALVES, 2007)

Os valores das variáveis são calculados em nós computacionais localizados no centro de cada VC, e após de interpolar estes valores nodais, obtém-se os valores das superfícies destes volumes (GONÇALVES, 2007).

2.2.8 Malhas Numéricas

Na simulação do escoamento, as malhas numéricas representam a discretização do domínio em vértices, onde as variáveis de interesse são calculadas. O domínio da solução é dividido pela malha em números finitos de sub-domínios (elementos, volumes de controle, etc.).

As Malhas Numéricas são classificadas em (GONÇALVES, 2007):

- Ortogonal – Estruturada;
- Não Ortogonal – Estruturada e Não Estruturada.

Algumas desvantagens como aproximações de fronteira, possíveis erros e limitações em problemas com geometrias irregulares, são verificados ao se trabalhar com a malha ortogonal, que é utilizada no caso de geometrias simples (GONÇALVES, 2007).

Devido às desvantagens descritas na malha ortogonal, faz-se necessário a utilização de malhas não ortogonais. Esta classificação ocorre em função da disposição relativa dos diferentes elementos que a compõe, e é dividida em estruturada e não estruturada (GONÇALVES, 2007).

A malha não estruturada é o tipo mais flexível, podendo-se adaptar sem quaisquer dificuldades às fronteiras do domínio de interesse. Sem qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices, os elementos dessa malha podem apresentar qualquer forma (GONÇALVES, 2007). A malha não estruturada é comumente utilizada em geometrias complexas, onde a malha pode ser refinada em locais específicos (INOUE, 2005).

2.3 VARIÁVEIS HIDRÁULICAS RELACIONADAS AO COMPORTAMENTO DE PEIXES

Atualmente, em diversos países, vários são os estudos que visam conhecer as preferências de determinadas espécies de peixes em relação às características do escoamento onde se encontram. Habitualmente utilizado nestes estudos, o cruzamento de dados hidráulicos com o comportamento biológico do peixe, evidencia que algumas espécies preferem escoamentos rápidos, enquanto outros preferem áreas mais profundas e baixa velocidade (SANTOS; DUARTE, 2012).

Conhecer a influência das variáveis hidráulicas no comportamento da ictiofauna, é de grande importância para que as ações da engenharia na obra sejam mais eficientes em criar intervenções no escoamento que estimulam os hábitos dos indivíduos (SANTOS et al., 2018).

Além de promoverem os movimentos de peixes migradores (KATOPODIS et al., 2012), magnitude da velocidade (EQ. 7) e turbulência são os parâmetros hidráulicos mais percebidos pelos peixes. Porém, não existe ainda um consenso em qual desses estímulos hidráulicos melhor explicam as respostas biológicas dos peixes (SANTOS; DUARTE, 2012).

$$u \equiv \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (\text{EQ. 7})$$

A água dos rios, ambiente de navegação dos peixes, sofre distorções ao fluir sobre ou ao redor de elementos estáticos do canal. Essas distorções podem ou não ocasionar a formação de vórtices e turbulência, que por sua vez, podem afetar a eficiência da natação e a acuidade sensorial do peixe (NESTLER et al., 2008). O alto fluxo de turbulência pode exceder as capacidades fisiológicas ou comportamentais dos peixes, afetando seu deslocamento (KATOPODIS et al., 2012). Para descrever a turbulência, Liao (2007) aponta o uso de uma métrica chamada intensidade turbulenta (EQ. 8), que é o desvio padrão da velocidade do fluxo dividido pela velocidade média do fluxo.

$$I \equiv \frac{u'}{U} \quad (\text{EQ. 8})$$

Onde:

u' : raiz média quadrada

U : velocidade média

Além da intensidade turbulenta, a energia cinética turbulenta (EQ. 9) e a tensão de cisalhamento de Reynolds são variáveis críticas que tem importante impacto no comportamento do peixe e devem ser levadas em consideração na concepção dos projetos de engenharia que visam a mitigação de impactos em sistemas aquáticos. A energia cinética turbulenta está associada com as flutuações de turbulência da velocidade, e a tensão de cisalhamento de Reynolds é resultante de gradientes de

velocidade. O peixe vivencia a tensão de cisalhamento ao mover-se entre diferentes camadas de velocidade (KATOPODIS et al., 2012).

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2_x} + \overline{u'^2_y} + \overline{u'^2_z}) = \frac{3}{2} u'^2 \quad (\text{EQ. 9})$$

Onde:

u'_i : flutuação de turbulência

Outro importante parâmetro hidráulico é a vorticidade, que é uma medida de força de movimento fluido que descreve a rapidez com que uma região de fluido está girando (JAY LACEY et al., 2012). Liao (2007) aponta que é relativamente recente estudos sobre controle de vorticidade (EQ. 10) na locomoção de peixes. Isso pode ajudar a entender o comportamento de peixes migratórios em rios altamente turbulentos por longos períodos.

$$\vec{\omega} \equiv \nabla \times \vec{u} \quad (\text{EQ. 10})$$

Onde:

∇ : É operador delta

\vec{u} : Vetor de velocidade do fluido

Nas entradas de passagens onde a deformação hidráulica diminui significativamente é mais provável que os peixes migradores sejam arrastados em velocidades de água que excedem sua velocidade antes de perceberem uma tensão hidráulica elevada e tentar escapar. A deformação hidráulica (EQ. 11) pode ser usada para conectar os campos hidrodinâmicos de correntes naturais e do fluxo livre às capacidades do sistema mecanossensorial do peixe (usado pelo peixe para detectar estímulos acústicos e hidrodinâmicos) (NESTLER, 2008).

$$S_1 = \sum \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| = \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right| + \left| \frac{\partial w}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial w}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial w}{\partial z} \right| \quad (\text{EQ. 11})$$

Nível de Dissipação de Energia ε , juntamente com campos de velocidade e tensão cisalhante de Reynolds, é um dos importantes parâmetros que influenciam na migração de peixes, e é muito usado em projetos de sistemas de transposição de peixes na determinação da melhor declividade do sistema (VIANA et al., 2016). Jungwirth et. al (1998) aponta que 200 W/m^3 é o valor máximo para salmonídeos e 150 W/m^3 para ciprídeos e menos que 100 W/m^3 para “northern pike” e “zander”. Este fator de dissipação de energia dá uma idéia da média de turbulência e aeração do ambiente (JUNGWIRTH; WEISS; SCHMUTZ, 1998).

$$\varepsilon \equiv \nu \frac{\overline{\partial u'_i \partial u'_i}}{\partial x_k \partial x_k} \quad (\text{EQ. 12})$$

Onde:

ν : velocidade de escoamento

u'_i : flutuação de turbulência

2.4 BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

O Rio São Francisco, descoberto pelos exploradores Europeus Américo Vespúcio e Gaspar Lemos, recebe este nome por ter sido encontrado no dia 4 de Outubro de 1501, dia de São Francisco (Sato & Godinho, 2003). Abrangendo uma área de aproximadamente 640 mil km^2 , equivalente a 8,0% do território brasileiro (VILELA; VILELA, ANGELIS, 2016), a bacia do rio São Francisco apresenta variações climáticas de tropical úmido, temperado de altitude, semiárido e árido, e possui domínios ecológicos que vão desde Mata Atlântica até o Cerrado e a Caatinga (VILELA; VILELA; ANGELIS, 2018).

Na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, região centro-oeste do estado de Minas Gerais, encontra-se a cabeceira do rio São Francisco a uma altitude de 1.200m. Até desaguar no Oceano Atlântico, o rio percorre cerca de 2.863 km através dos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (VILELA; VILELA; ANGELIS, 2016).

Com topografia e formação geológica diversificada, a bacia do São Francisco possui grande variedade de tipos de solos, que são cobertos pelas vegetações da caatinga e cerrado da região (SATO; GODINHO, 2003).

A bacia contém 36 tributários, onde apenas 19 são perenes, e está dividida em 4 segmentos (SATO; GODINHO, 2003; VILELA; VILELA; ANGELIS, 2016):

1. Alto São Francisco – da nascente até a cidade de Pirapora, MG;
2. Médio São Francisco – de Pirapora até Remanso na Bahia;
3. Submédio São Francisco – de Remanso até Paulo Afonso na Bahia;
4. Baixo São Francisco– de Paulo Afonso até o Oceano Atlântico

Alves et. al (2011), ao realizar o diagnóstico do macrozoneamento ecológico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, levantaram que cerca de 205 espécies constituem a ictiofauna desta bacia.

Tanto no canal principal quanto nos tributários do São Francisco, os peixes migradores migram para seus locais de desova. A migração reprodutiva é uma ocorrência periódica que acontece geralmente no período chuvoso, durante os meses de outubro a janeiro. Nesse período, além dos níveis de água estarem mais altos, as temperaturas são também mais altas e os dias são mais longos (SATO; GODINHO, 2003).

Sato e Godinho (2003) descrevem que além da pesca, atividades humanas que modificam a qualidade do ambiente, como a construção e operação de UHE's, poluição e desmatamento, estão entre as principais ameaças às espécies migradoras da bacia do rio São Francisco.

2.5 MONITORAMENTO DA ICTIOFAUNA

Existem diversas técnicas utilizadas para monitorar o comportamento da ictiofauna. A telemetria por exemplo, palavra com origem nos termos *tele* (remoto) e *metron* (medida), é o nome que se dá a tecnologia capaz de realizar medições de dados feitas à distância, através de técnicas conhecidas como redes de rádio, telefonia e computação (THORSTAD et al., 2013).

Entre os tipos de marcação de peixe, destacam-se as marcas repetidoras de integração passiva (PIT-TAG), um chip colocado no interior dos peixes para que estes sejam registrados ao passarem por antenas que fazem uma leitura do código de barras do chip (JIE, 2009), as marcas DST (*Data Storage Tag*), que flutuam na água e armazenam gravações que posteriormente serão armazenadas em um software (GODØ; MICHALSEN, 2000), e a marca Pop-up que realiza um arquivamento de dados via Satélite (THORSTAD et al., 2013).

Dentro da técnica de telemetria, existem variações da forma de captura da informação, baseando no meio de transmissão desta. Assim, tem-se a rádio telemetria, que emite sinais de rádio para uma antena através de um transmissor inserido no peixe (ADAMS; BEEMAN; ELIER, 2012) e a telemetria acústica, que transmite ondas de som na água para identificar organismos na coluna d'água (BRANDT, 1996).

O presente trabalho utilizou informações obtidas pelo estudo de comportamento de peixes no canal de fuga da UHE Três Marias, através do uso de telemetria acústica, pela equipe da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.5.1 Telemetria Acústica

Segundo Suzuki (2014), seja em 2D ou 3D, o registro do comportamento de peixes tem sido realizado de forma precisa pelas técnicas de telemetria acústica. Através de hidrofones submersos, este sistema realiza a captação de sinais acústicos de um transmissor que pode ser implantado na cavidade celomática do peixe. Semelhante a um Sistema de Posicionamento Global (GPS), a posição do peixe é determinada por triangulação através do tempo decorrido para o sinal atingir cada

hidrofone. Para gravar os dados recebidos, é comumente utilizado o dispositivo eletrônico *Data Logger*.

Os transmissores acústicos, semelhantes aos transmissores de rádio, são reconhecidos por uma combinação única de frequência, ou também por sinais codificados (THORSTAD et al., 2013).

2.6 ESPÉCIES

As espécies mais encontradas no canal de fuga da UHE Três Marias são: *Pimelodus maculatus* e *Prochilodus argenteus*, e também são as espécies mais afetadas pelas manobras operacionais da UHE (SUZUKI, 2014).

2.6.1 *Pimelodus Maculatus*

O mandi, que dependendo da região é também conhecido como mandi amarelo, mandiguaçu, mandiu, pintado, pintadinho (LUZ; ZANIBONI FILHO, 2001), é uma espécie típica das bacias dos rios Paraná e São Francisco (PERESSIN et al. 2016). Segundo Sato e colaboradores (1999), o mandi pode chegar a um comprimento de 40 a 50 cm, e peso de 1,5 a 2,0 kg. Com maior concentração a jusante de barramentos, em ambiente lótico, esta espécie tem condição migratória controversa, podendo ou não ser considerado migrador (SANTOS; ALBIERI; ARAUJO, 2013). O mandi (Figura 3) pertencente à família Pimelodidae, é mais comum em amostragens noturnas, na lua cheia, nos meses de maior temperatura, pluviosidade e vazão, e com menor transparência da água. Além de plantas, sementes, frutos e detritos, sua alimentação é também constituída por moluscos, crustáceos e peixes (LOBÓN; BENNEMANN, 2000). Conforme Andrade e colaboradores (2012), o mandi é uma das espécies mais sujeitas à morte durante a operação e manutenção de UHE.



Figura 3 - Exemplar de mandi, *Pimelodus maculatus*
Fonte: (PERESSIN et al. 2016)

2.6.2 *Prochilodus argenteus*

Popularmente conhecido como curimba (SUZUKI, 2014), o *Prochilodus argenteus* é uma importante espécie para pesca comercial da bacia do Rio São Francisco (BONCOMPAGNI-JÚNIOR et al., 2013)(MELO, 2011).

Pertencente a família dos Prochilodontidae (Characiformes), a espécie é considerada detritívora. Seu período reprodutivo coincide com a estação chuvosa, quando os peixes desta espécie realizam migrações de longa distância rio acima para desovar (CHAGAS et al., 2015). A curimba (Figura 4) é uma espécie nativa do rio São Francisco e pode chegar a um comprimento total de 71 cm (SUZUKI, 2014), podendo pesar acima de 15 kg (SATO; GODINHO, 2003).

Segundo Boncompagni-Júnior et al. (2013), três fatores ocorridos nos últimos anos são responsáveis pela redução dos estoques de curimbas em várias regiões da bacia do rio São Francisco:

- ausência de enchentes que atingem as planícies de inundação e permitem o recrutamento;
- presença do reservatório de Três Marias que interrompe a migração;
- desobediência a legislação na captura de indivíduos abaixo do limite de tamanho.



Figura 4 - Exemplar de Curimba, *Prochilodus argenteus*
Fonte: (MELO, 2011)

2.7 ANÁLISE FATORIAL PARA DADOS MISTURADOS

A análise estatística de dados categóricos e quantitativos pode ser realizada através da ferramenta conhecida como Análise Fatorial para Dados Misturados (*Factor Analysis of Mixed Data- FAMD*). Esta técnica é uma aplicação da Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis- PCA*) das variáveis quantitativas e do Método de Análise de Correspondência (*Correspondence Analysis – MCA*) as variáveis qualitativas (PAGÈS 2004; GOTELLI & ELLISON 2011).

A ideia da PCA é foi criada por Karl Pearson em 1901, mas os algoritmos computacionais da análise foram desenvolvidos por Harold Hotelling em 1933. O objetivo da PCA é diminuir o número de variáveis que explicam determinado fenômeno através da translação e rotação do eixo que corresponde cada variável, criando assim novos eixos (dimensões) que são relação dos primeiros eixos das variáveis iniciais (GOTELLI & ELLISON 2011).

Uma das vantagens do uso da PCA está relacionada a correlação entre as variáveis explicativas. Após a aplicação da PCA, as novas dimensões não são mais correlacionadas entre si (FÁVERO & BELFIORE 2017) e os valores assumidos neste novo eixo de coordenadas é nomeado como escores.

A PCA é usada para interpretar as similaridades e diferenças de comportamento entre variáveis e entre categorias (GREENCARE 2008). Assim, o objetivo principal é avaliar a significância das similaridades, criando coordenadas com base na distribuição dos dados em tabelas cruzadas e construindo diagramas de dispersão (FÁVERO & BELFIORE 2017).

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 FLUXOGRAMA METODOLOGIA

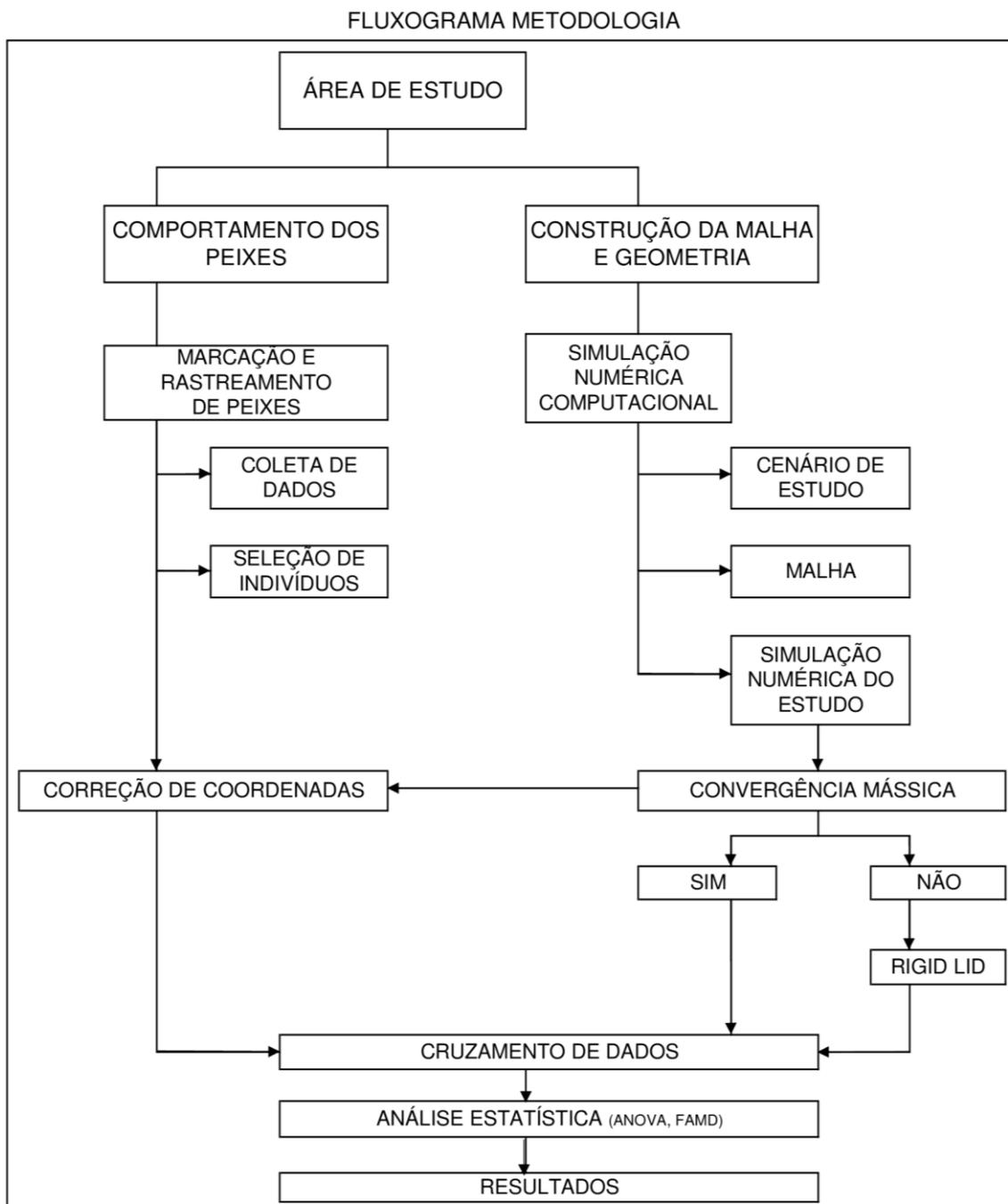


Figura 5 - Fluxograma Metodologia
Fonte: Autoria própria

3.2 ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município de Três Marias, Minas Gerais, Brasil (coordenadas $18^{\circ}12'50.96''$ sul e $45^{\circ}15'45.92''$ oeste) (Figura 6), na região do alto Rio São Francisco, a UHE teve sua construção iniciada no ano de 1957 e concluída em 1960.

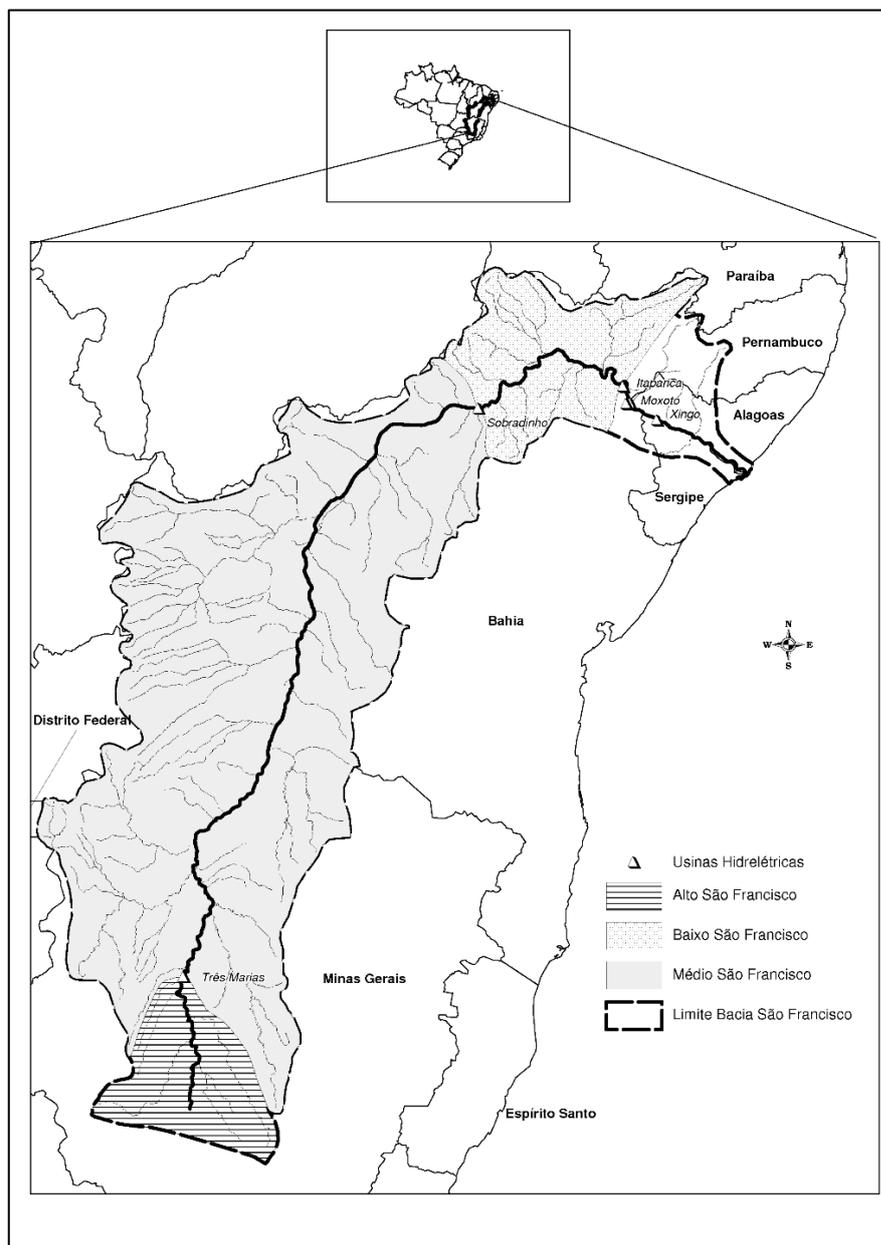


Figura 6 - Localização da UHE Três Marias
Fonte: Autoria própria

Com objetivos de produção de energia hidrelétrica, irrigação, navegação, controle de cheias e regularização da vazão do rio, a UHE iniciou sua operação em 1962. Com uma barragem de 2.700m de comprimento e 75m de altura, a UHE possui

uma área de reservatório de 1.090 km² (Figura 7). Possui 396 MW de potência instalada, trabalhando com seis turbinas do Tipo Kaplan e atinge 900 m³/s de vazão turbinada máxima e capacidade máxima de vertimento de 8.700 m³/s (LOURES; GODINHO, 2016).



Figura 7 - Arranjo da barragem da UH Três Marias
Fonte: Google Earth

3.3 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Para realizar a simulação numérica computacional do estudo, e resolver a hidrodinâmica do modelo, foi utilizado o software *FLUENT (ANSYS 12)*, devido a sua flexibilidade para resolver problemas de escoamentos complexo.

3.3.1 Cenário do Estudo

O cenário deste estudo considerou dois aspectos ao definir a vazão que foi simulada (SOLANO, 2017):

- A vazão analisada refere-se àquela ocorrida no mesmo período de maior concentração dos peixes no canal de fuga, ou seja, entre 19 de novembro a 22 de dezembro 2011;
- Não foi considerada vazão vertida, pois neste período não houve vertimento. A vazão do vertedouro poderia causar alterações nos padrões de escoamento do canal de fuga.

Portanto, a vazão mais representativa verificada neste período foi de $462\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 8).

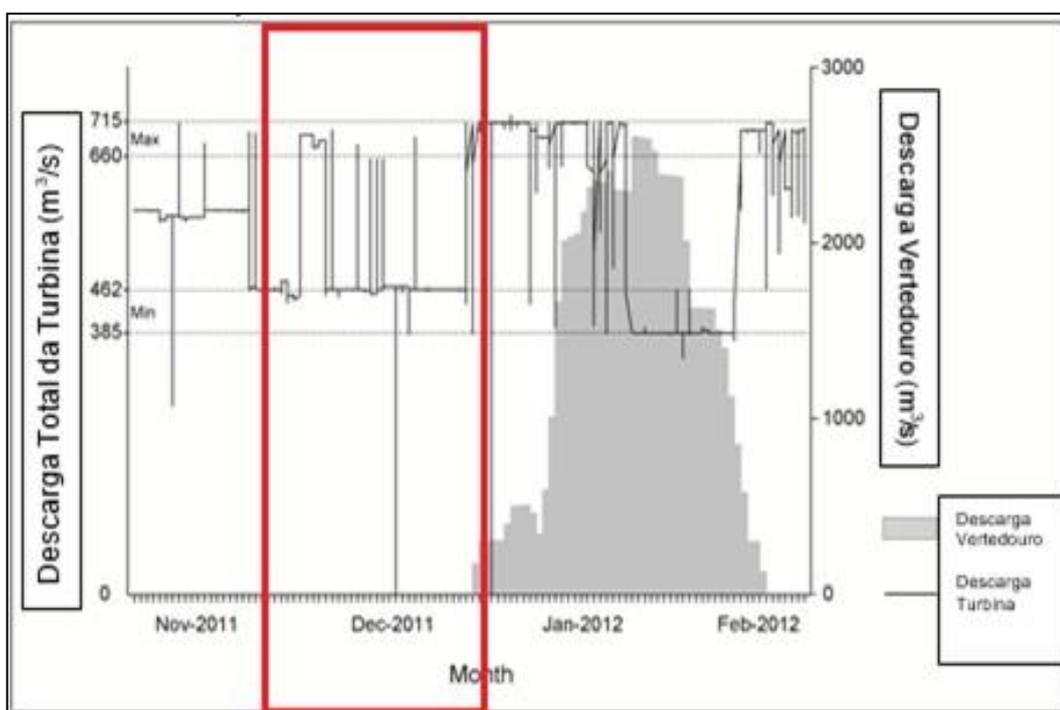


Figura 8 – Período utilizado para análise de seleção da vazão turbinada a ser simulada no modelo hidrodinâmico
Fonte: Suzuki 2014

O canal de fuga da UHE recebe a restituição do escoamento de 6 turbinas. Porém, no período analisado, a turbina 4 estava inoperante, pois passava por manutenção. Assim, foram consideradas 5 turbinas para este cenário.

As condições de contorno (Figura 9) foram, portanto:

- Setor de entrada: Vazão das turbinas

Tabela 1 - Velocidade de vazão de cada turbina

Turbinas	Vazão (m ³ /s)
Turbina 1	92,40
Turbina 2	92,18
Turbina 3	92,45
Turbina 4	-
Turbina 5	92,07
Turbina 6	92,15

- Setor de saída: Parte extrema do rio;
- Topo: Parte superior do rio, onde duas fases podem estar presentes (ar - água), sob pressão atmosférica;
- Parede: Faces laterais do rio e as faces rígidas do canal de fuga;
- Interfaces: Cada superfície que separa malhas com refinamento diferente.

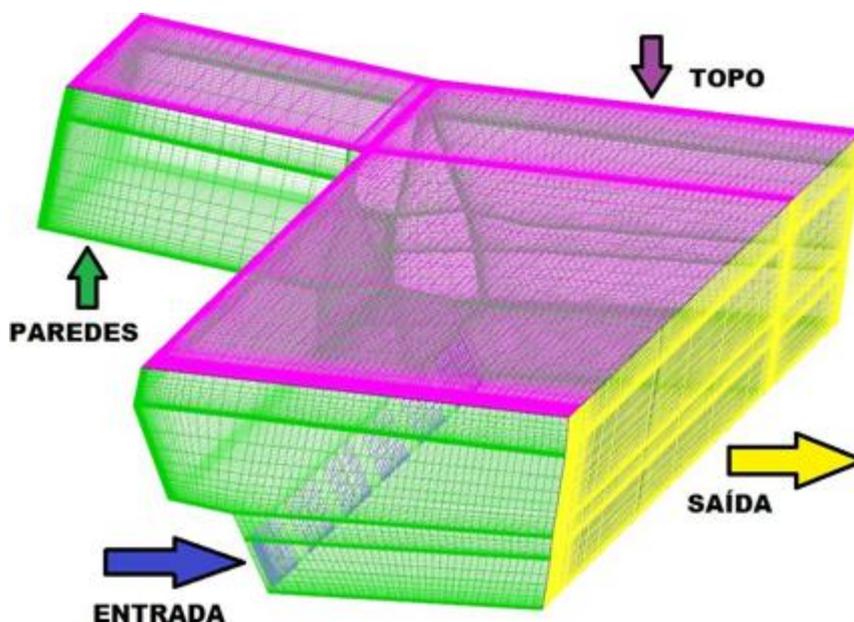


Figura 9 - Condições de contorno
Fonte: Solano (2017)

3.3.2 Malha

O domínio simulado para este estudo foi a área do canal de fuga, pois é neste trecho da UHE que os dados biológicos foram colhidos (Figura 10).

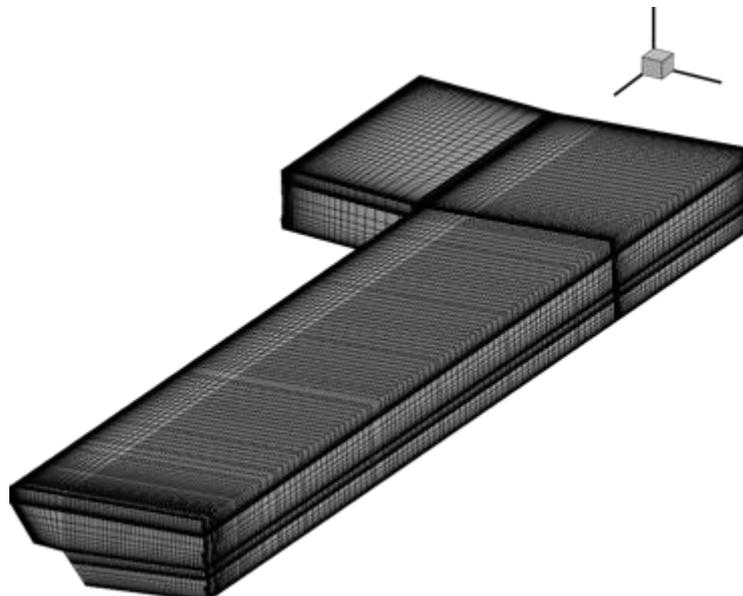


Figura 10 - Malha do canal de fuga
Fonte: Autoria Própria, 2018

Tabela 2 - Número de Elementos

Elementos	Quantidade
Nº de Hexaedros da Malha	1.483.948
Nº Total de Pontos	1.533.297

Fonte: Solano (2017).

3.3.3 Dimensões Canal de Fuga

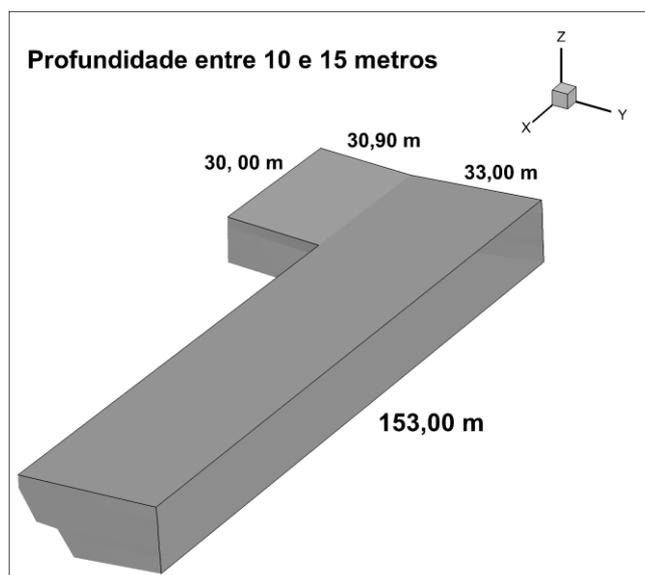


Figura 11 - Dimensões do canal de fuga
Fonte: Autoria própria

3.3.4 Simulação Numérica Do Estudo

3.3.4.1 Rigid-Lid

A fim de reduzir o tempo da simulação, e poder trabalhar com a convergência mássica do modelo, foi aplicada a metodologia *Rigid-lid*, que se trata de uma nova condição de contorno. O *Rigid-lid* delimita a lâmina d'água eliminando o cálculo do VoF no modelo. O escoamento deixa de ser bifásico (água-ar), passando a trabalhar apenas com o fluido água na simulação. O modelo *Rigid-lid* foi aplicado na simulação no dia 20/10/2018, e 7 dias depois conclui o processamento da simulação do escoamento do canal de fuga com 141.500 iterações.

No software *Fluent (Ansys 12)*, foram exportadas as informações de magnitude da velocidade, vorticidade, intensidade turbulenta, energia cinética, dissipação de energia e deformação hidráulica para todos os elementos da malha no respectivo tempo do escoamento para o formato do software *Tecplot 360 EX 2014 R1*.

3.4 DADOS BIOLÓGICOS

3.4.1 Coleta de Dados

Com auxílio da telemetria acústica, entre 31 de outubro de 2011 e 16 de fevereiro de 2012, Suzuki et al. (2017) realizaram o monitoramento de 90 peixes (50 mandis e 40 curimbas) no canal de fuga da UHE Três Marias. Ao serem capturados com tarrafas, os peixes foram submetidos a um processo cirúrgico onde transmissores acústicos foram inseridos em sua cavidade celomática. À medida que os peixes se

recuperavam da cirurgia e restabeleciam seu comportamento e hábitos natatórios normais, eles eram devolvidos no canal de fuga da UHE Três Marias.

Um *data logger* (ou gravador de dados), conectado à 11 hidrofones instalados submersos no canal de fuga, foi utilizado para auxiliar no rastreamento da movimentação dos peixes.

Trabalhando 24 horas por dia, o sistema de telemetria acústica recebeu e registrou todos os pulsos de transmissão para cada hidrofone simultaneamente.

Suzuki (2017) apontou quatro variáveis para explicar os diferentes comportamentos dos peixes no canal de fuga:

- Tempo de permanência - tempo entra a soltura e sua primeira saída da área rastreada;
- Número de visitas por indivíduo – número de vezes que um único peixe acessa a área do canal de fuga;
- Número de visita por tempo específico – número de visitas por cada dia rastreado;
- Permanência no canal de fuga – tempo gasto por um peixe na área monitorada entre cada entrada e saída no canal de fuga.

3.4.2 Indivíduos de Peixes Utilizados no Cruzamento com as Variáveis Hidráulicas

Suzuki (2017) coletou dados de 74 indivíduos dos 90 capturados (39 curimbas e 35 mandis). 16 indivíduos não apresentaram dados no rastreamento 3D, devido a morte, perda do transmissor acústico ou falha na recepção do sinal acústico de pelo menos quatro hidrofones.

Dos 74 peixes monitorados, 62 visitaram o canal de fuga em novembro de 2011, enquanto que, no mês de dezembro de 2011, apenas 17 peixes visitaram o local. Neste montante de 79 visitas ao canal de fuga nos meses indicados, somente 16 indivíduos registraram medições para os dois meses (SUZUKI et al., 2017). Devido a escolha do cenário hidrodinâmico ser relacionado a uma vazão, que ocorreu em ambos os meses (novembro e dezembro de 2011), estes 16 indivíduos foram utilizados no presente estudo.

Tabelas com informações do código do indivíduo, espécie, data e hora do sinal coletado e posicionamento nas três direções (x, y e z) foram tratadas com um filtro criado no software Access. Este software foi escolhido por trabalhar com número ilimitado de registros. Assim, após a aplicação do filtro, apenas pontos dos trajetos dos peixes ocorridos no valor de vazão de $462 \text{ m}^3/\text{s} \pm 5\%$ foram considerados para análise no cruzamento de posicionamento dos peixes de dados hidrodinâmicos.

O filtro consistiu no cruzamento de tabelas com informações biológicas coletadas pela telemetria acústica, mencionadas anteriormente, com tabela de vazões turbinadas dentro da faixa $462 \text{ m}^3/\text{s} \pm 5\%$ e seus respectivos dias e horários de ocorrência. O filtro aplicado considerou que os dias dos dados biológicos deveriam ser os mesmos dias das leituras de vazão na faixa $462 \text{ m}^3/\text{s} \pm 5\%$. Ressalta-se que os dados de vazão estavam listados a cada 5 minutos, enquanto os dados biológicos, estavam listados a cada 10 segundos. Assim, houve necessidade de padronização do intervalo de tempo entre as duas tabelas.

Após a aplicação deste filtro (Tabela 3), constatou-se que 2 indivíduos não apresentaram registros na faixa de vazão escolhida, bem como 7 indivíduos não

apresentaram registros em pelo menos um dos meses (novembro ou dezembro de 2011). Desta forma, foram selecionados 21 monitoramentos de utilização do canal de fuga, correspondendo a 14 indivíduos: 4 curimbas e 10 mandis (Tabela 4).

Tabela 3 - Indivíduos excluídos por não apresentarem dados após o filtro de vazão

PEIXE	MÊS	QUANTIDADE DE DADOS	PEIXE	MÊS	QUANTIDADE DE DADOS
3322	Novembro	0	4624	Novembro	2952
	Dezembro	7023		Dezembro	0
3448	Novembro	1194	4834	Novembro	48239
	Dezembro	8345		Dezembro	2296
4120	Novembro	2973	4876	Novembro	72553
	Dezembro	20340		Dezembro	49175
4183	Novembro	0	4960	Novembro	0
	Dezembro	10142		Dezembro	7117
4246	Novembro	1728	5044	Novembro	12375
	Dezembro	16958		Dezembro	2812
4309	Novembro	0	5086	Novembro	0
	Dezembro	0		Dezembro	106840
4393	Novembro	0	5170	Novembro	0
	Dezembro	4141		Dezembro	2977
4519	Novembro	0	5296	Novembro	3924
	Dezembro	0		Dezembro	9998

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Total de indivíduos trabalhados

CURIMBA		MANDI			
3322	Dezembro	4120	Dezembro	4960	Dezembro
3448	Novembro	4246	Novembro	5044	Novembro
	Dezembro		Dezembro		Dezembro
4183	Dezembro	4624	Novembro	5086	Dezembro
4393	Dezembro	4834	Dezembro	5170	Dezembro
		4876	Novembro	5296	Novembro
			Dezembro		Dezembro

Fonte: Autoria própria

Entretanto, durante a fase de cruzamento das informações biológicas com as de hidrodinâmicas, outros dois procedimentos resultaram em exclusão de indivíduos por não apresentarem dados necessários no desenvolvimento da pesquisa.

O primeiro deles refere-se ao cruzamento de dados hidrodinâmicos e biológicos dos indivíduos analisados. Nessa interpolação, os dados de novembro do peixe de código 4120 (mandi) foram inexistentes. Este indivíduo nadou fora da região dos dados hidrodinâmicos, impossibilitando a interpolação (Figura 12).

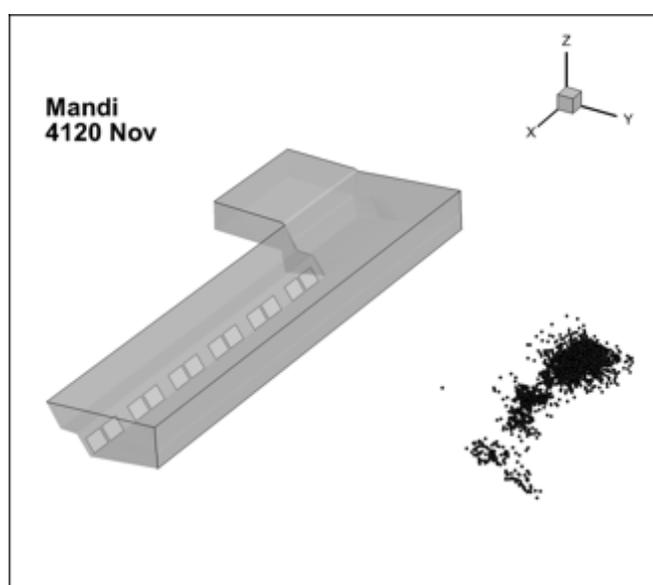


Figura 12 - Exemplo de monitoramento biológico sem cruzamento com as informações hidrodinâmicas. Dados obtidos para o indivíduo 4120 (mandi) em novembro de 2011
Fonte: Autoria própria

O segundo procedimento que eliminou um outro monitoramento da pesquisa, foi avaliação da presença de peixes nos “Volumes de Análise”. O indivíduo 4834, mandi de novembro, não nadou em nenhum dos delimitados no canal de fuga (Figura 13). Os “Volumes de Análise” foram criados para auxiliar os estudos de comportamento dos peixes e estão explicados com mais detalhes no item 3.4.3.1 desta metodologia.

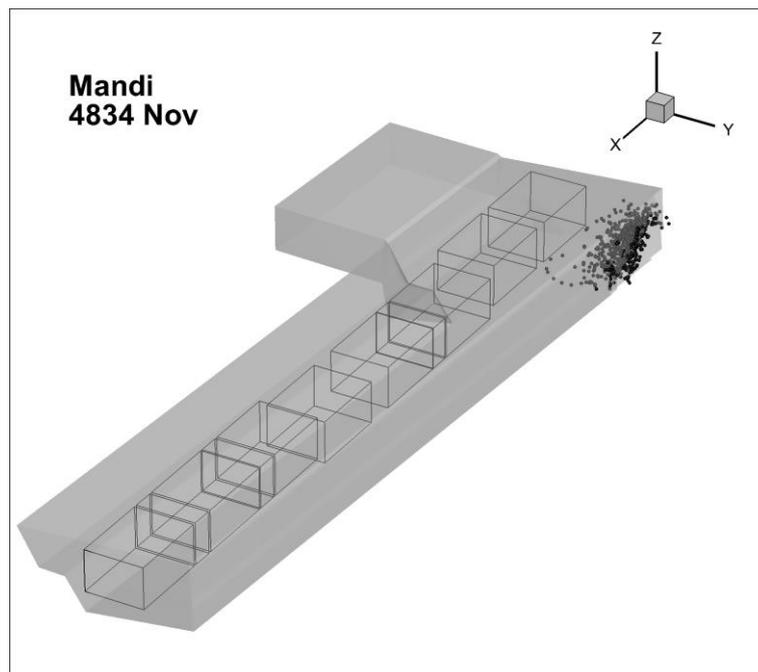


Figura 13 - Indivíduo excluído - mandi 4834 novembro
Fonte: Autoria própria

Dessa forma, o universo trabalhado é composto por 19 monitoramentos que estão informados na Tabela 4.

3.5 CRUZAMENTO DE DADOS

O posicionamento de cada peixe, no eixo de coordenada x , y e z , foi inserido na malha da simulação hidráulica do referido tempo do escoamento (Figura 10). Esta malha por sua vez possuía as informações de magnitude da velocidade, vorticidade, intensidade turbulenta, energia cinética, dissipação de energia e deformação hidráulica. Todo este procedimento foi realizado no software *Tecplot 360 EX 2014 R1*.

Assim, foram obtidos os valores de magnitude da velocidade, vorticidade, intensidade turbulenta, energia cinética, dissipação de energia e deformação hidráulica frequentados por um determinado peixe no referido tempo do escoamento.

3.5.1 Volumes de Análise

Para conhecer quais eram as regiões de maior permanência dos indivíduos no canal de fuga, e assim analisar o uso destas áreas pelos peixes, 11 volumes foram criados (Figura 14). Utilizou-se a ferramenta “Criar Zona > Retangular” no software *Tecplot 360 EX 2014 R1* e cada volume foi gerado como uma zona.

Estes volumes foram numerados de acordo com a proximidade de cada turbina a que se refere. Assim, os volumes de 1 a 6, representam as regiões que recebem influência direta das 6 turbinas da usina. As áreas 7 e 8 identificam uma região onde não há uma influência direta das turbinas instaladas, mas estão próximas do local aonde eram planejadas a inserção de duas turbinas.

Os volumes 9, 10 e 11 (Figura 14) são localizados entre as turbinas em funcionamento. A área 9 está entre as turbinas 1 e 2, a área 10 entre as turbinas 2 e 3 e a área 11 entre as turbinas 5 e 6. Devido ao fato da turbina 4 não estar em operação naquele período, não foram delimitadas áreas intermediárias que envolviam esta turbina.

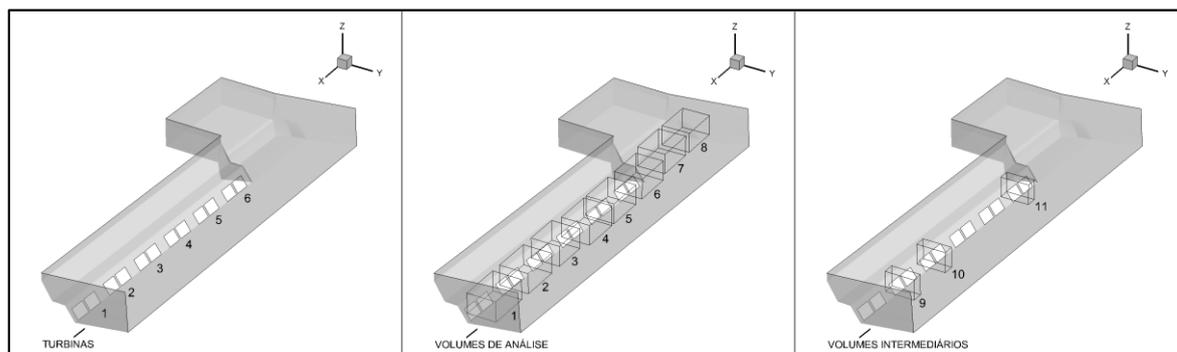


Figura 14 - Representação TecPlot turbinas e volumes de análise
Fonte: Autoria própria

Os dados hidrodinâmicos do escoamento foram inseridos por meio da ferramenta “Data > Interpolate > Linear” do software TecPlot 360 *EX 2014 R1*.

Os dados hidrodinâmicos foram analisados em gráficos Box Plot que consideraram mediana, percentil de 25% a 75% para valor do caixa, e Min-Max para definição do Whisker Value. A opção de indicar *outliers* foi desabilitada.

3.5.2 Presença de Peixes nos Volumes de Análise

Foi criada uma tabela utilizando os dados de presença de todos os 19 indivíduos analisados. O total de presença, ou número de pontos de cada indivíduo dentro do volume, foi dividido pelo total de pontos registrados quando o peixe nadou no canal de fuga (dentro da área simulada e nas condições de vazão impostas) e multiplicado por 100, para obtenção de porcentagem.

O uso dos Volumes de Análise pelos peixes foi avaliado (Figura 15). Para isto, foi criada uma variável no software Tecplot 360 *EX 2014 R1* que assumia valor 1 para o volume correspondente. Assim, a variável “Volume 1” assumiu o valor 1 na Zona “Volume 1” e valor 0 para as demais zonas. Em seguida, o valor da variável “Volume 1” foi interpolado para os pontos do trajeto do peixe, que no software Tecplot 360 *EX 2014 R1* era uma outra zona. Assim, os pontos do trajeto dos indivíduos que estavam dentro da zona “Volume 1” recebiam o valor 1 e o demais pontos fora deste volume, recebiam o valor 0.

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos (Magnitude da Velocidade, Vorticidade, Energia Turbulenta Cinética, Taxa de Dissipação de energia, Intensidade Turbulenta e Deformação Hidráulica) foram interpolados da zona com os resultados do modelo CFD (zona hidrodinâmica) para cada ponto do trajeto do indivíduo (zona peixe) no software Tecplot 360 *EX 2014 R1*.

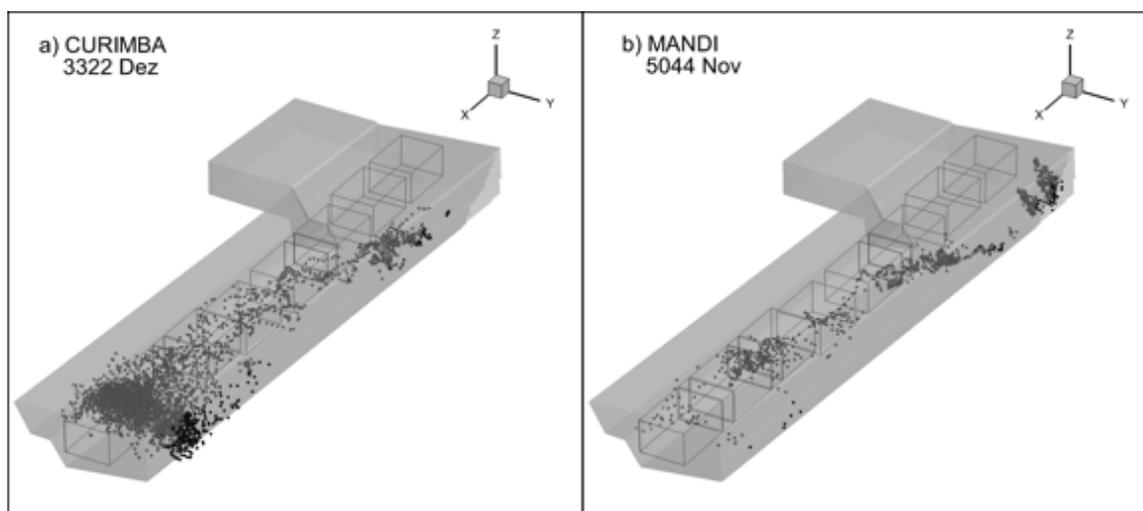


Figura 15 - Canal de fuga de Três Marias, volumes de análise e pontos de presença dos indivíduos a) 3322 – curimba em dezembro e b) 5044 – mandi em novembro de 2011

Fonte: Autoria própria

Os dados de presença dos peixes em cada volume de análise foi avaliado através de gráficos box-plots.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

3.6.1 Box-plot variáveis hidráulicas

No software Statistica 10 foram gerados seis gráficos box-plot para cada uma das variáveis hidráulicas. A finalidade desses gráficos foi a visualização da atuação das variáveis hidráulicas em cada um dos volumes de análise localizados no canal de fuga.

Esses gráficos são gerados na sequência dos comandos:

- “Graphs > Box Plot > Multiple > Variables”

3.6.2 Análise Anova e testes Duncan e Tukey

Foram geradas 2 análises de variância (ANOVA) no software Statistica 10. A primeira ANOVA considerou as variáveis mês, espécie e volumes de análise para verificar quais dessas eram as mais significativas considerando todos os peixes e todos os meses. A partir do resultado da primeira análise, o segundo ensaio de ANOVA considerou apenas a espécie e mês que apresentava o maior número de dados. Adotou-se o nível de significância de 5%. Portanto, quando p-valor era inferior a 0,05, havia rejeição da hipótese nula: que considerada que o efeito de todos os fatores são iguais.

Comandos para ANOVA no Statistica 10:

- “STATISTICS > ANOVA > Fatorial ANOVA > Ok > Variables (escolhas variáveis dependentes e categóricas) > Ok > aba Summary > All Effects.

Baseados nos resultados de ANOVA, utilizando também o software Statistica 10, foram realizados os testes de Duncan e Tukey com o propósito de verificar quais os dados eram mais significativos em relação a presença/ausência daquela espécie e mês com maior número de informações.

Comandos Teste de Tukey:

- Após o último comando “All effects” do ANOVA, seguir a sequência:
 - “More results > aba Post hoc > Tukey HSD

Comandos Teste de Duncan:

- Após o último comando “All effects” do ANOVA, seguir a sequência:
 - “More results > aba Post hoc > Duncan’s

As respostas obtidas nestes ensaios são indícios que podem explicar a presença ou ausência do peixe nessas áreas.

3.6.3 Análise Fatorial para Dados Misturados

A análise fatorial para dados misturados foi desenvolvida no software de código livre “R” (R 3.3.3 GUI 1.69 Mavericks build (7328)). Utilizou o pacote de “FactorMineR” (<http://factominer.free.fr/index.html>) para a análise e o pacote “factoextra” para geração dos principais resultados. As variáveis utilizadas com suas respectivas classificações foram:

- Presença/Ausência (PT) do peixe no volume de análise 1: categórica;
- Espécie (Esp): categórica;
- Mês (Mes): categórica;
- Magnitude da Velocidade (Vel): quantitativa;
- Vorticidade (Vor): quantitativa;
- Energia Cinética Turbulenta (ECT): quantitativa;
- Intensidade Turbulenta (IT): quantitativa;
- Dissipação de Energia (DE): quantitativa;
- Deformação Hidráulica (DH): quantitativa;

Foram gerados gráficos de:

- Porcentagem de explicação das dimensões (comando `fviz_screplot`);
- Todas variáveis utilizadas na FAMD (comando `fviz_famd_var`);
- Contribuição das variáveis em cada dimensão (comando `fviz_contrib`);
- Contribuição das variáveis quantitativas em ambas dimensões principais (comando `fviz_famd_var`);
- Contribuição das variáveis qualitativas em ambas dimensões principais (comando `fviz_famd_var`);

- Distribuição de todos os pontos individuais no novo sistema de coordenadas com grupamento nas variáveis categóricas de estudo (comando `fviz_famd_ind`).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 REPRESENTAÇÃO TEC PLOT COMPORTAMENTO DE PEIXES NO CANAL DE FUGA

4.1.1 Variáveis hidráulicas

4.1.1.1 Magnitude da Velocidade

Os valores de magnitude da velocidade apresentaram maior mediana no volume de análise 1 do que nos demais volumes. Percebe-se também que as distâncias entre os percentis de 25% e 75% nos volumes 1, 2, 3, 5 e 6 são similares, volumes estes afetados por turbinas que estavam em operação neste cenário. Porém, nos volumes onde não próximo a turbina parada (volumes 4) e próximo à área sem turbinas (volumes 7 e 8), as distâncias entre estes percentis são bem menores (Figura 16).

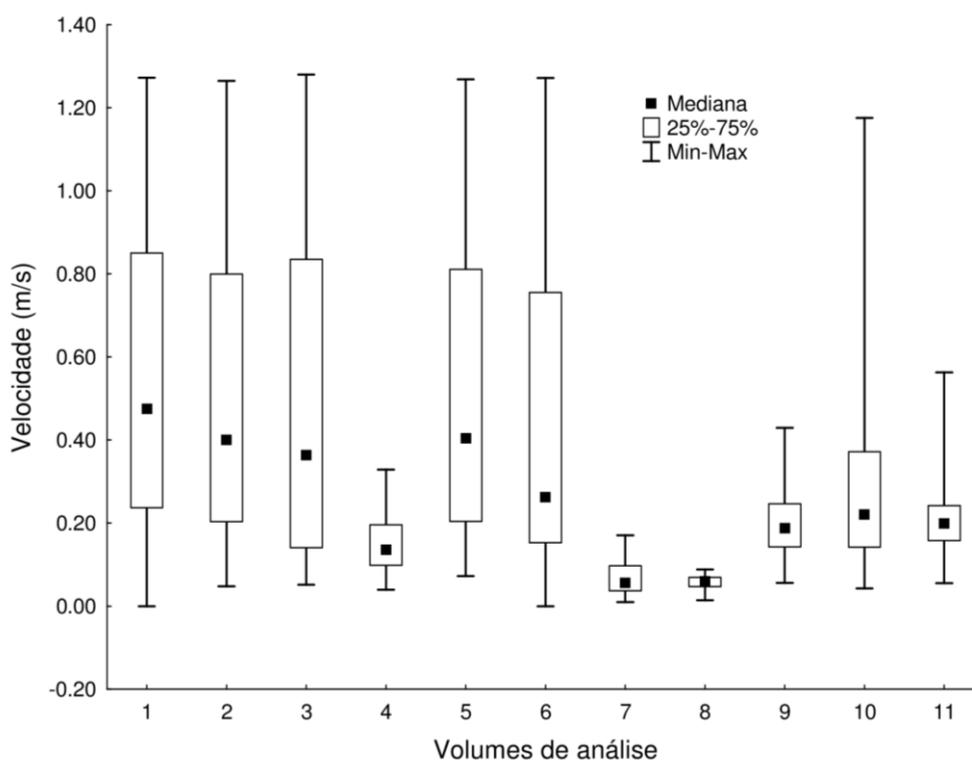


Figura 16 - Box plot para variável magnitude da velocidade nos volumes de análise

Fonte: Autoria própria

O valor máximo da magnitude da velocidade ficou em torno de 1,3 m/s. Em planos mais elevados ($Z=505$), percebe-se que os valores superiores a 0,2 m/s na região aonde não existe saída de escoamento pelas turbinas (isto pode ser percebido

também nos box-plots da figura 19). Nos planos posicionados de acordo com as turbinas, observou-se a formação de um jato principal com a direção a condição de contorno do topo. O valor de magnitude da velocidade que delimita este jato é da ordem de 0,6 m/s. Para turbina 1, nota-se um vermelho mais intenso evidenciando alta magnitude da velocidade. As demais turbinas seguem esse padrão, menos para a turbina 4, identificando uma representação mais homogênea, certamente por ser a turbina que não estava em operação (Figura 17).

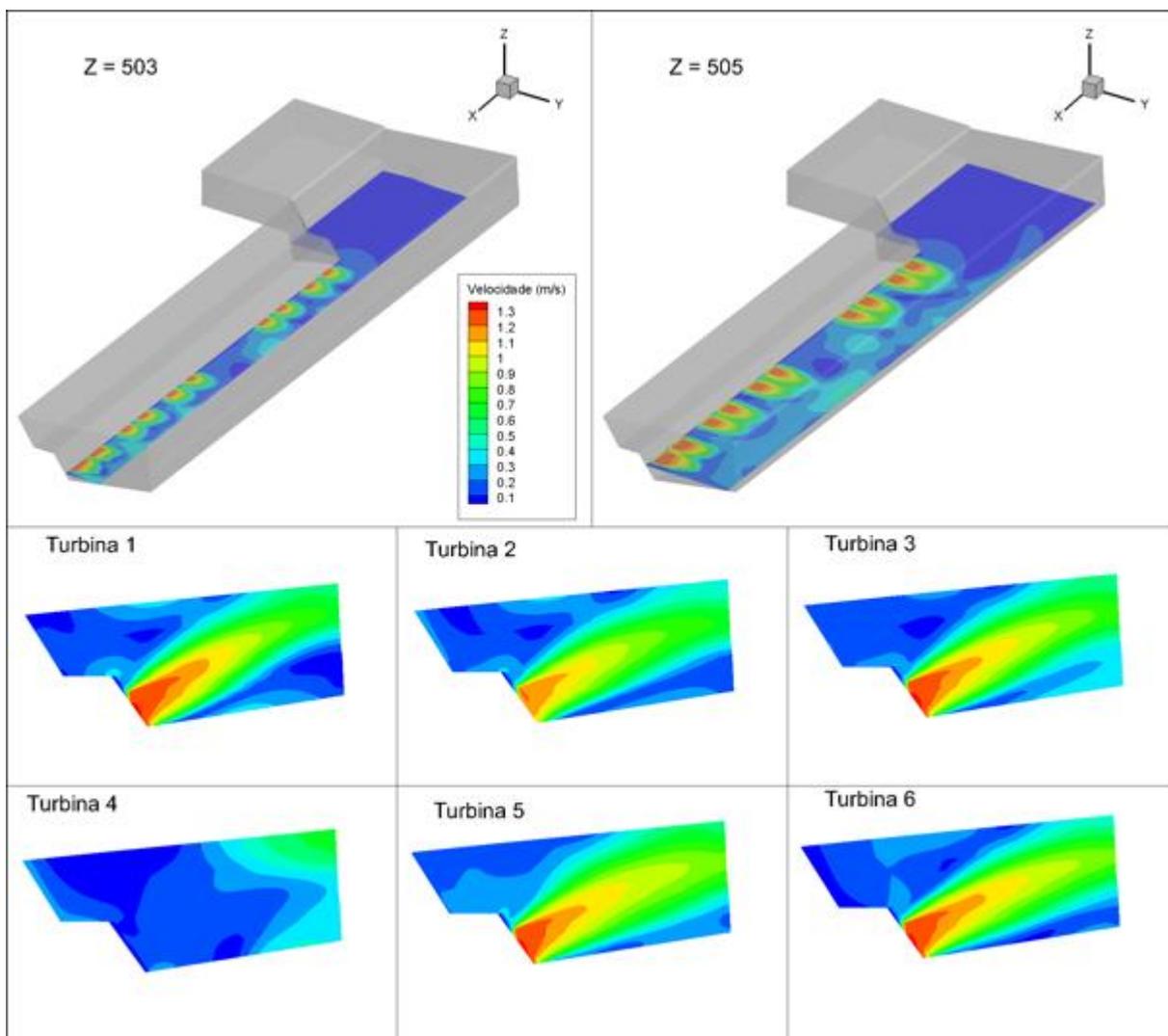


Figura 17 - Variável magnitude da velocidade em perfis para diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas

Fonte: Autoria própria

4.1.1.2 Vorticidade e Deformação Hidráulica

Os padrões de ocorrência de valores de vorticidade (Figura 18) foram semelhantes aos padrões de ocorrência da variável deformação hidráulica (Figura 19). O volume de análise 1 apresenta mediana relativa a essas variáveis superiores aos demais volumes de análise. Os volumes de análise 7 e 8 apresentaram vorticidade e deformação hidráulica praticamente nulos. A distância entre os percentis de 25 e 75% foi maior no volume próximo a turbina 6.

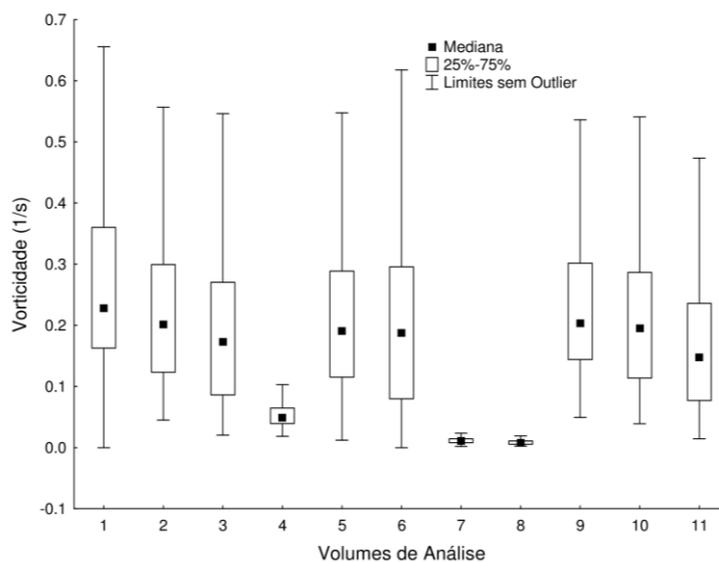


Figura 18 - Box plot para variável vorticidade nos volumes de análise

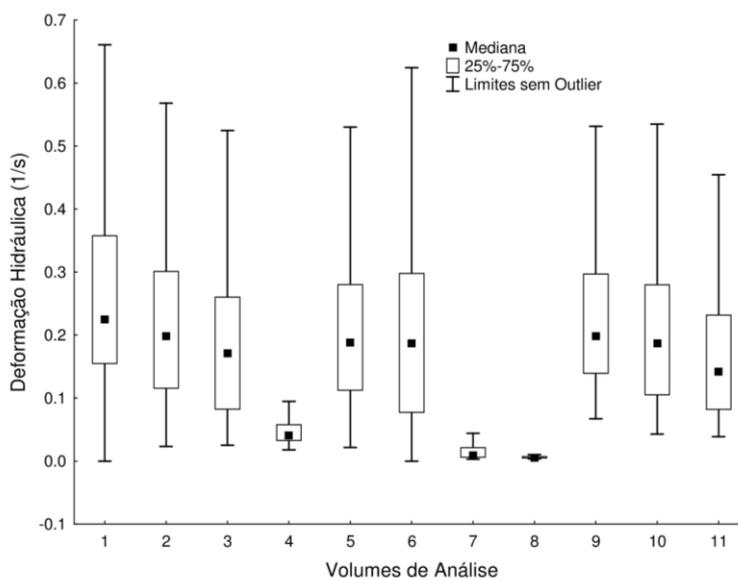


Figura 19 - Box plot para variável deformação hidráulica nos volumes de análise

Fonte: Autoria própria

A vorticidade segue um padrão diferente da magnitude da velocidade. Nos perfis ao longo da profundidade, percebe-se que os pontos de maiores vorticidades estão distantes dos pontos de saída de água e que próximo a turbina 1, a mancha de valores mais elevados (vermelhos) é maior do que nas demais turbinas. Não existe um jato principal para esta variável nos planos posicionados ao longo das turbinas, como na magnitude da velocidade. Ocorrem planos de maiores valores ao longo da profundidade do canal (Figura 20).

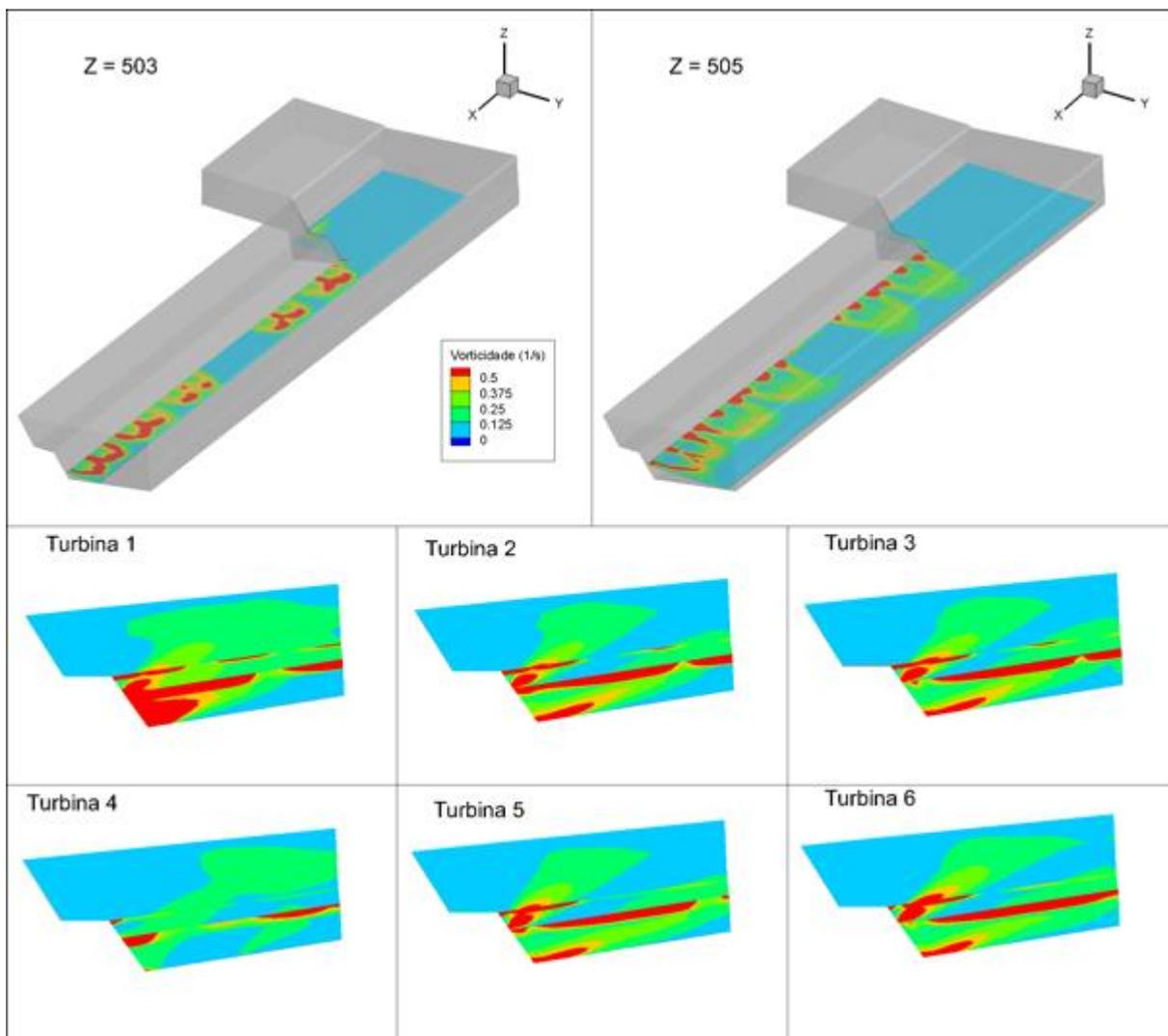


Figura 20 - Variável Vorticidade em perfis par diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas

Fonte: Autoria própria

A deformação hidráulica apresenta padrões semelhantes com a vorticidade. Entretanto, para na profundidade de $Z=505$, percebe-se a formação de uma faixa de maiores vorticidades nos limites do fluido e da parede de saída do escoamento (Figura 21).

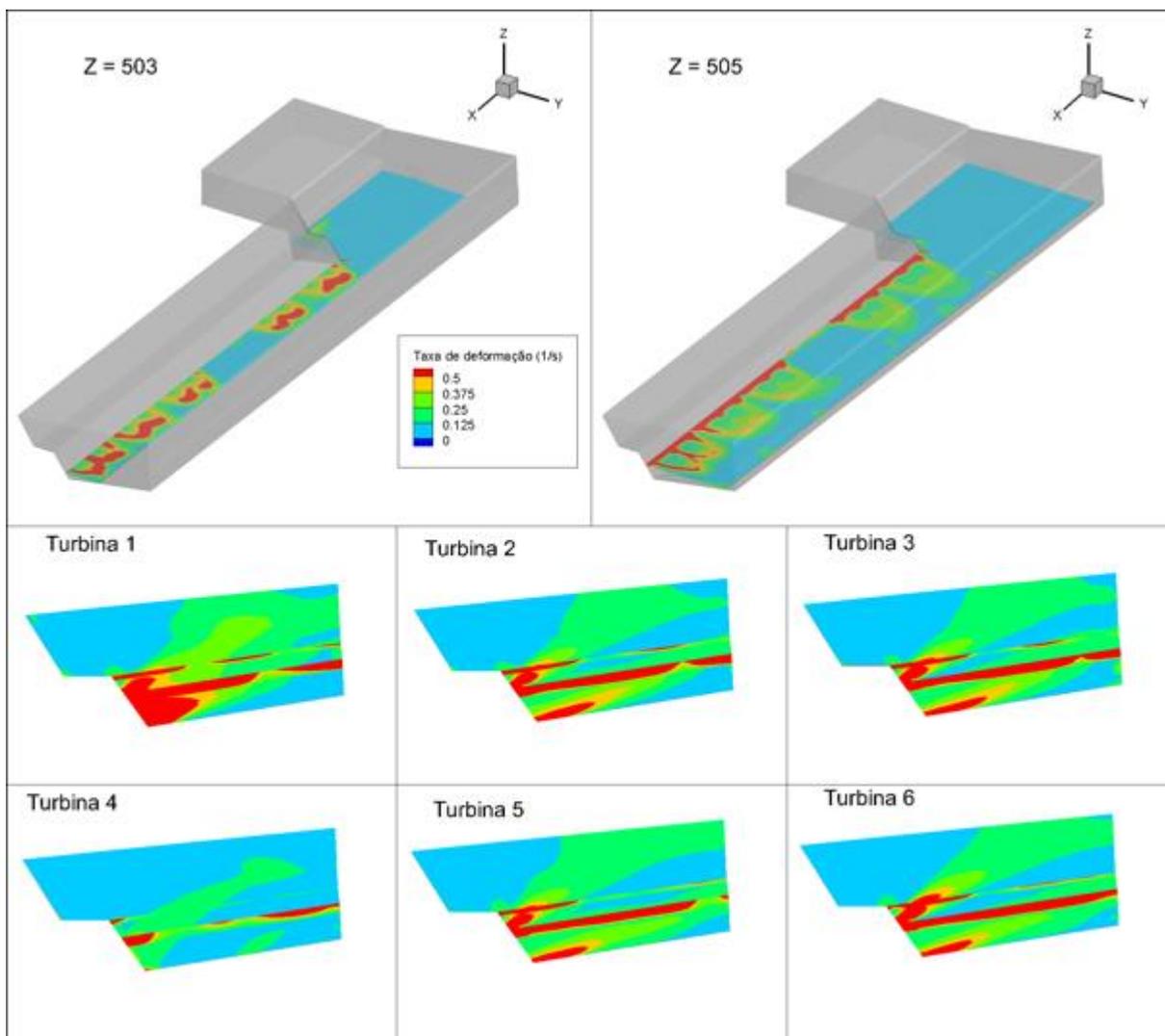


Figura 21 - Variável deformação hidráulica em perfis par diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas

Fonte: Autoria própria

4.1.1.3 Energia Cinética Turbulenta

A Energia Cinética Turbulenta (Figura 22), apresenta maiores medianas nos volumes de análise intermediários 9 e 10. Estas regiões encontram-se entre as turbinas 1 e 2, e 2 e 3, e também possuem maiores distâncias entre os percentis (25% e 75%).

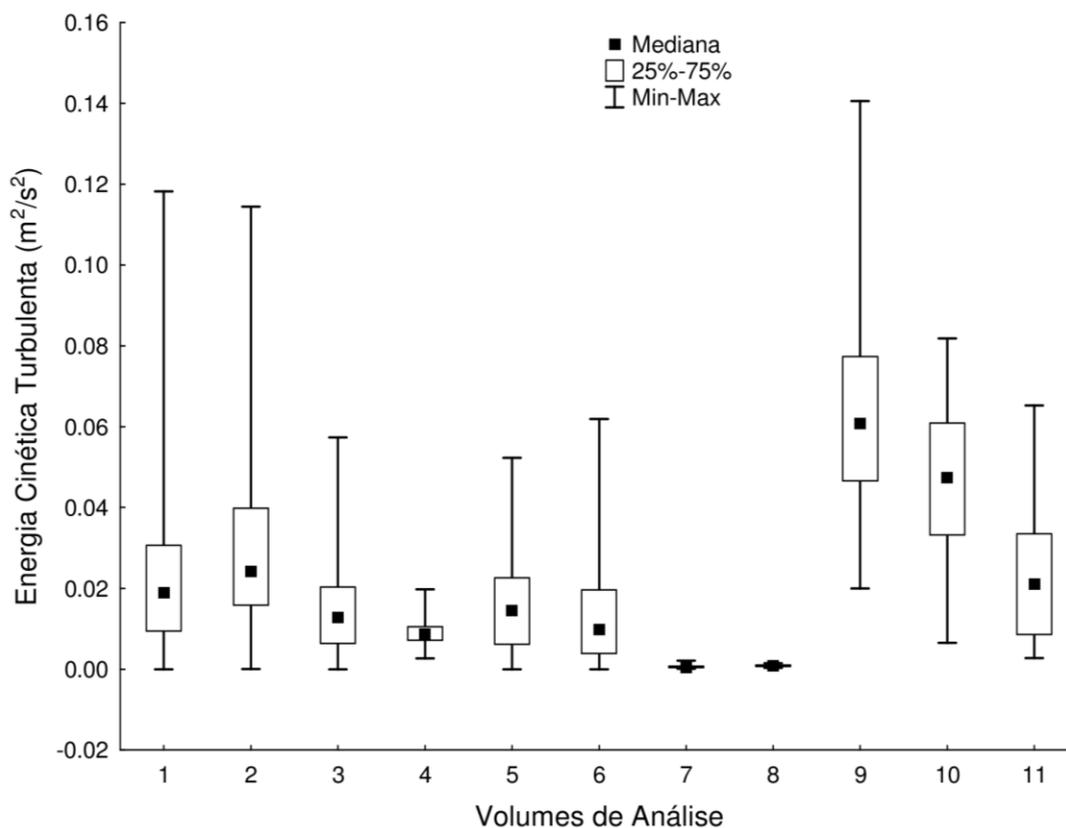


Figura 22 - Box plot para variável energia cinética turbulenta nos volumes de análise

Fonte: Autoria Própria

O plano de distribuição da variável energia cinética turbulenta na profundidade ($Z = 505$) indica que a região entre a turbina 1 e a 2 apresenta maiores valores quando comparado com os demais locais. Em relação a profundidade, percebe-se que os maiores valores de energia cinética turbulenta ocorrem próximas ao fundo do canal (Figura 23).

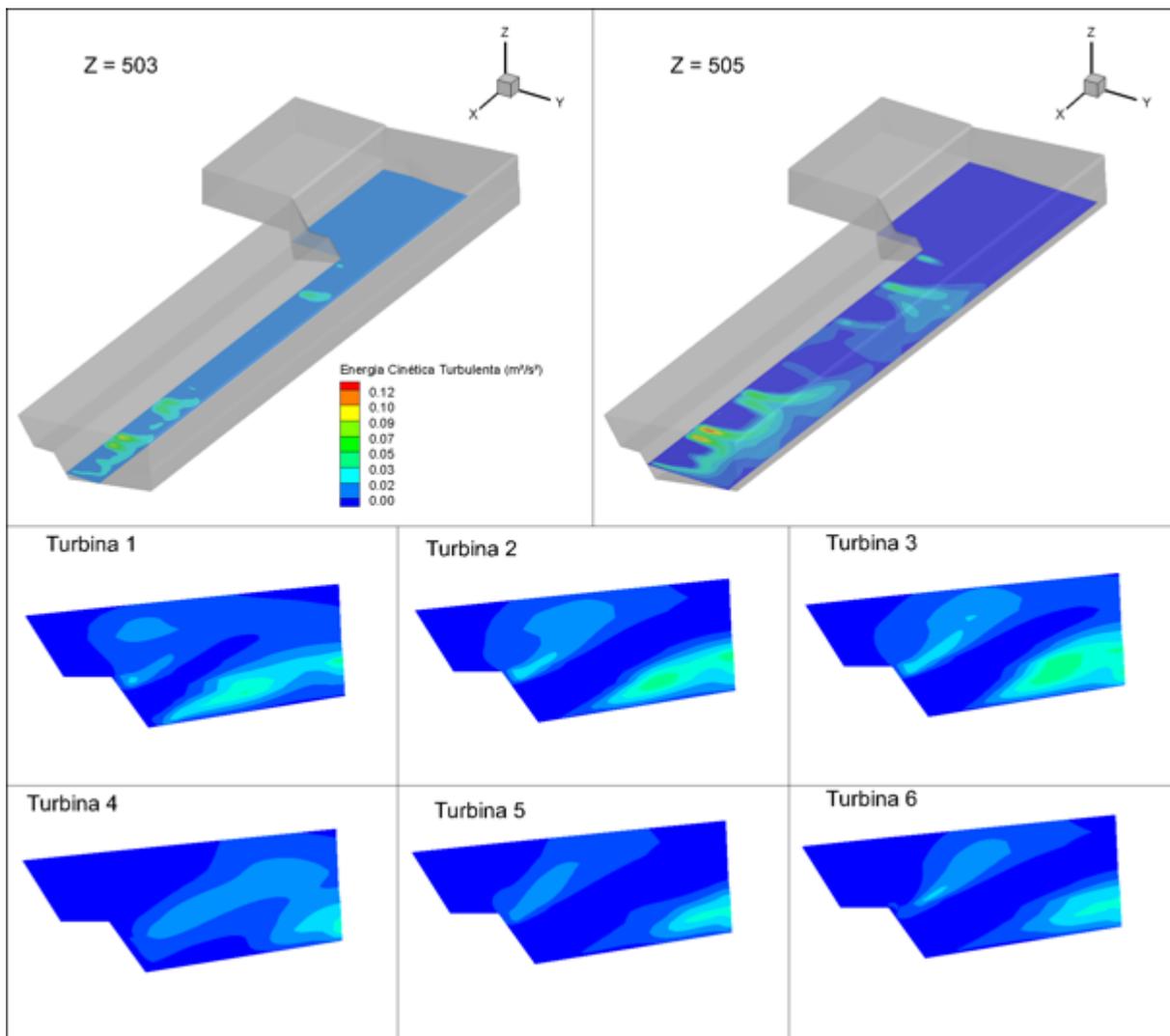


Figura 23 - Variável energia cinética turbulenta em perfis par diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas
 Fonte: Autoria própria

4.1.1.4 Intensidade Turbulenta

O Box Plot de Intensidade Turbulenta (Figura 24), apresentou maior mediana no volume influenciado pela turbina 2, quando comparado com os volumes localizados sob efeito de turbinas que estavam funcionando. Nos volumes de análise intermediários 9 e 10, as medianas são ainda maiores.

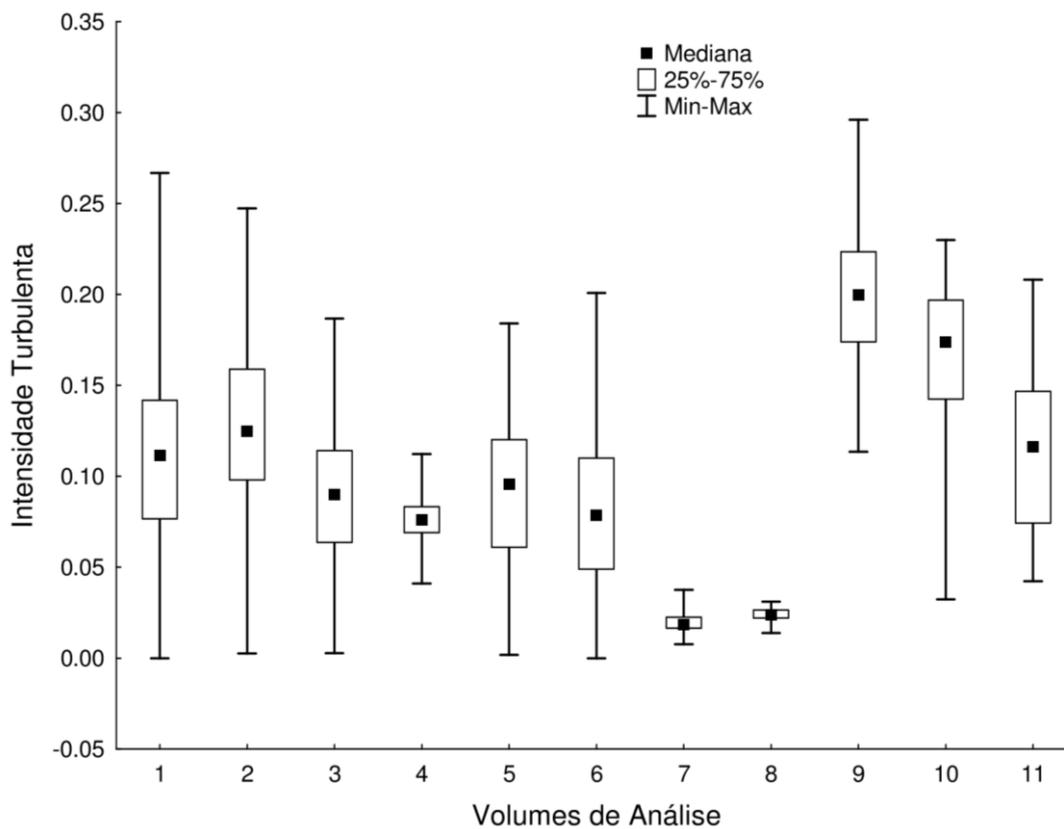


Figura 24 - Box plot para variável intensidade turbulenta nos volumes de análise

Fonte: Autoria própria

O padrão de distribuição da intensidade turbulenta mostra que os valores superiores a 0,15 ocupam todo o canal sob influência direta de turbinas (Figura 25). O jato principal de magnitude da velocidade (mostrado na Figura 17) corresponde a área de menor valores de intensidade turbulenta nos perfis tomados ao longo das turbinas (Figura 25).

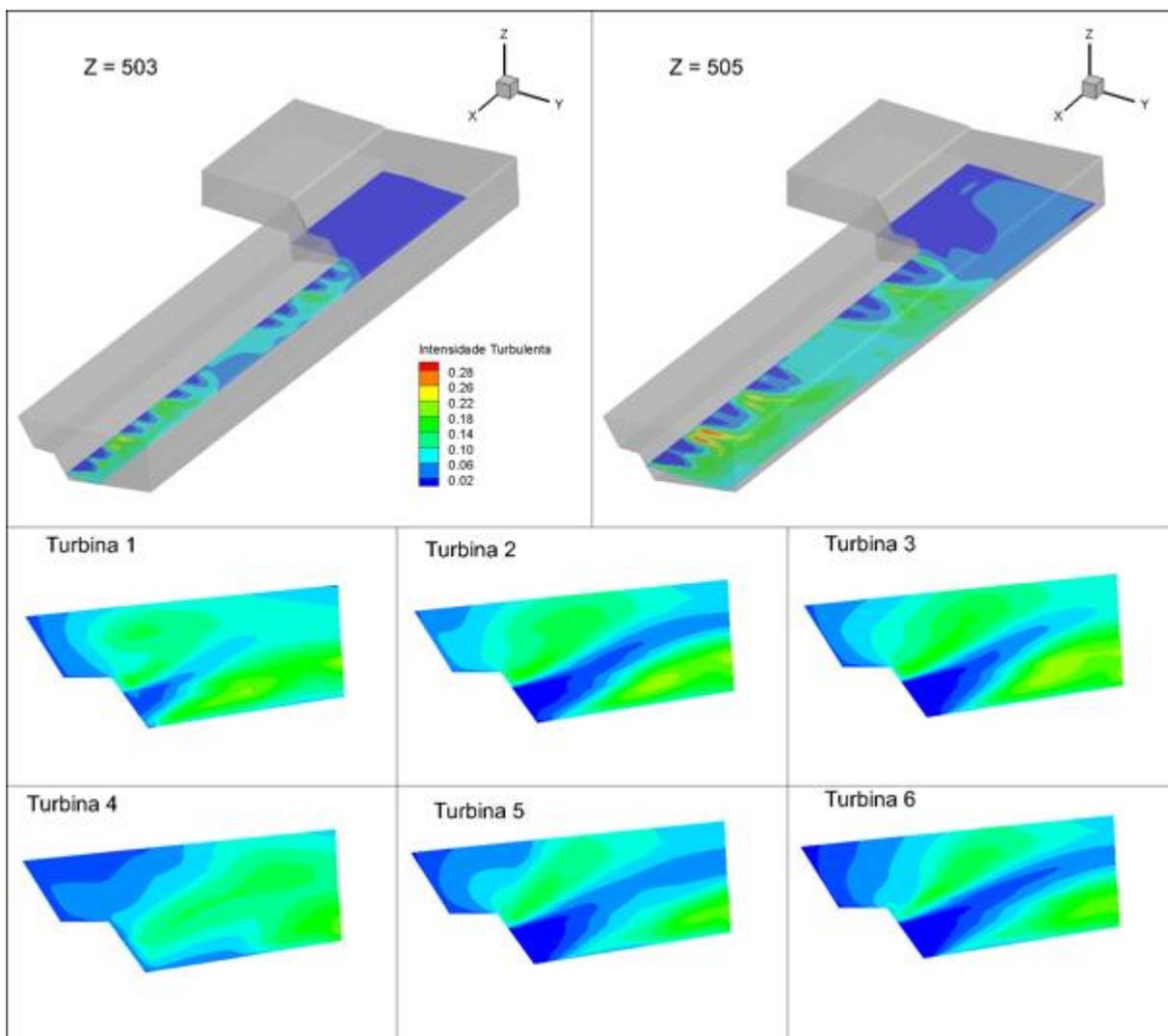


Figura 25 - Variável intensidade turbulenta em perfis par diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas

Fonte: Autoria própria

4.1.1.5 Taxa de Dissipação Turbulenta

A Taxa de Dissipação Turbulenta (Figura 26), apresentou baixos valores de mediana nas 5 turbinas do canal. As áreas intermediárias 9 e 10 apresentam medianas maiores em comparação às demais áreas delimitadas.

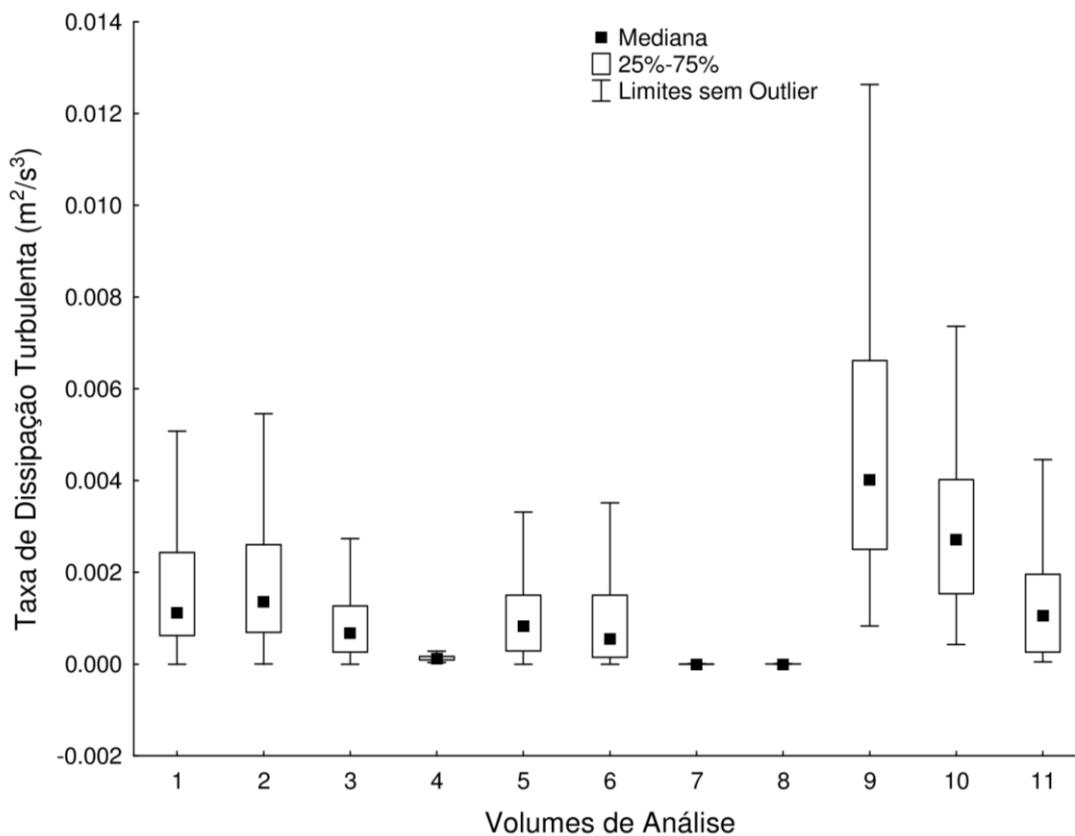


Figura 26 - Box plot para dissipação de energia nos volumes de análise

Fonte: Autoria própria

A apresentação da taxa de dissipação de energia segue o padrão de maiores leituras fora do jato principal de magnitude da velocidade, e à medida que se aprofunda na coluna de água, são evidenciadas maiores leituras dessa variável hidráulica (Figura 27).

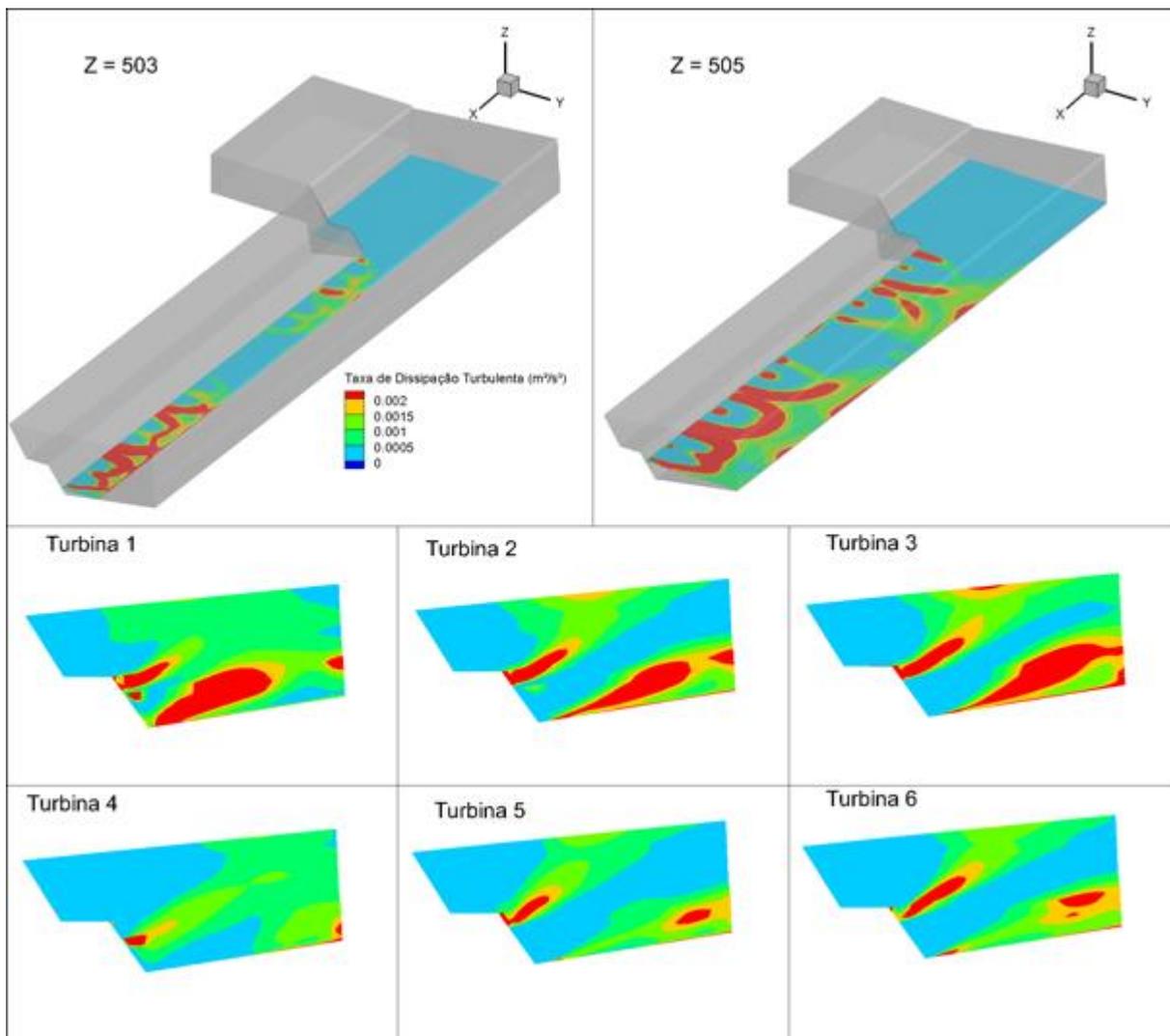


Figura 27 - Variável dissipação de energia em perfis par diferentes profundidades ($Z= 503$ e $Z=505$) e para diferentes planos posicionados de acordo com as turbinas

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Registros máximos e mínimos de Variáveis Hidráulicas com presença de peixe

A tabela 5 mostra os registros de valores máximos e mínimos de cada variável hidráulica onde forma verificados presença de peixes.

Tabela 5 - Registros máximos e mínimos de variáveis hidráulicas com presença de peixe

	Magnitude da Velocidade (m/s)	Vorticidade (1/s)	Deformação Hidráulica (1/s)	Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^2)	Intensidade Turbulenta	Taxa de Dissipação Turbulenta (m^2/s^3)
Máximo	1.27	4.25	0.14	0.29	0.02	4.37
Mínimo	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01

4.1.3 Presença do Peixe nos Volumes de Controle

4.1.3.1 Comportamento dos Peixes no Canal de Fuga

A título de exemplo do comportamento dos peixes, a presente seção irá detalhar a variação do comportamento de alguns indivíduos. No caso do indivíduo 3448, que é uma curimba, em novembro este indivíduo manteve-se próximo às turbinas 1 e 2. Em dezembro, com número maior de visitas, este indivíduo nadou em mais regiões ao longo do canal de fuga (Figura 28).

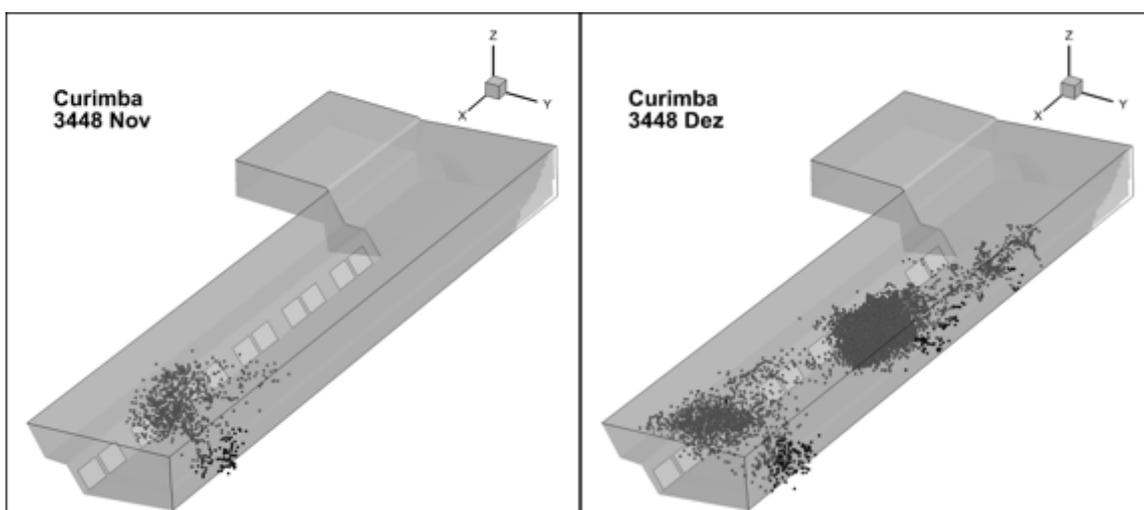


Figura 28 - Pontos visitados pelo do indivíduo 3448 (curimba) no canal de fuga da UHE de Três Marias nos meses de novembro e dezembro de 2011

Fonte: Autoria própria

O caso do indivíduo 4246 (mandi) percebe-se que este nadou por mais volumes em novembro e em dezembro se comparado a curimba (código 3448). Em dezembro também ocorreu um maior uso de outros volumes no canal, comparando os meses (Figura 29).

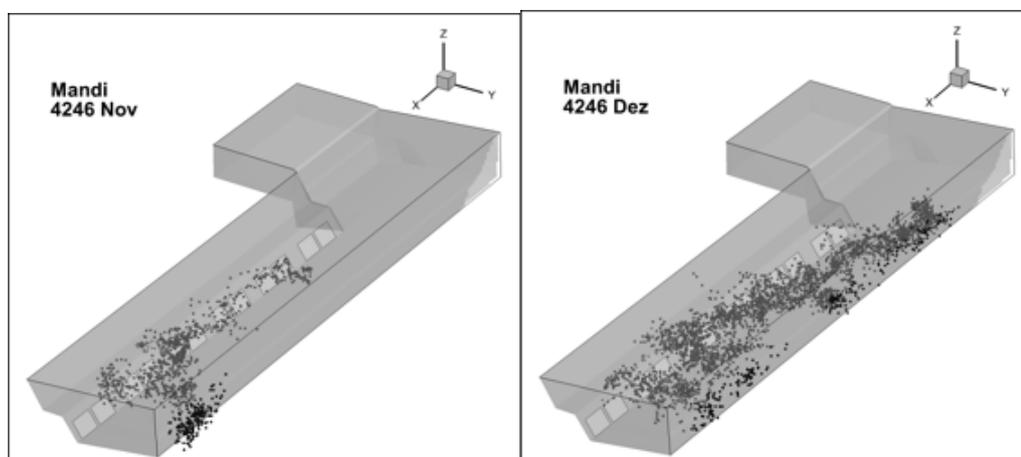


Figura 29 - Pontos visitados pelo do indivíduo 4246 (mandi) no canal de fuga da UHE de Três Marias nos meses de novembro e dezembro de 2011

Fonte: Autoria própria

4.2 ANÁLISE VARIÂNCIA PARA PRESENÇA DOS PEIXES NOS VOLUMES DE ANÁLISE

O teste ANOVA realizado para todos os indivíduos (Tabela 5) mostra que apenas o fator volume de análise foi significativo para explicar presença dos peixes. Os fatores espécie e mês não foram significativos (p -valor $> 0,05$).

Tabela 6 - ANOVA Presença de todos os indivíduos

	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepto	1334.011	1	1334.011	71.83863	0.000000
Mês	0.318	1	0.318	0.01710	0.896097
Espécie	33.903	1	33.903	1.82573	0.178190
Volume	1350.959	10	135.096	7.27513	0.000000
Erro	3639.631	196	18.570		

O teste ANOVA realizado para os dados dos indivíduos de mandis monitorados em dezembro (Tabela 6) indicou que o modelo pode ser explicado pelo único fator volume de análise.

Tabela 7 - ANOVA Presença Mandi Dezembro

	SS	Grau de Liberdade	MS	F	P
Intercepto	742.0845	1	742.0845	63.29215	0.000000
Volume	758.9781	10	75.8978	6.47330	0.000000
Erro	902.8056	77	11.7247		

A presença média dos indivíduos mandis no mês de dezembro (Figura 30) no volume de análise 1 foi significativamente diferente em relação a presença média nos demais volumes de análise de acordo com o teste de Duncan (Tabela 8). O teste de Tukey indicou que as presenças médias dos indivíduos mandis no mês de dezembro nos volumes 1, 2 e 3 não diferiram entre eles, mas apresentaram diferença clara das demais (Tabela 9).

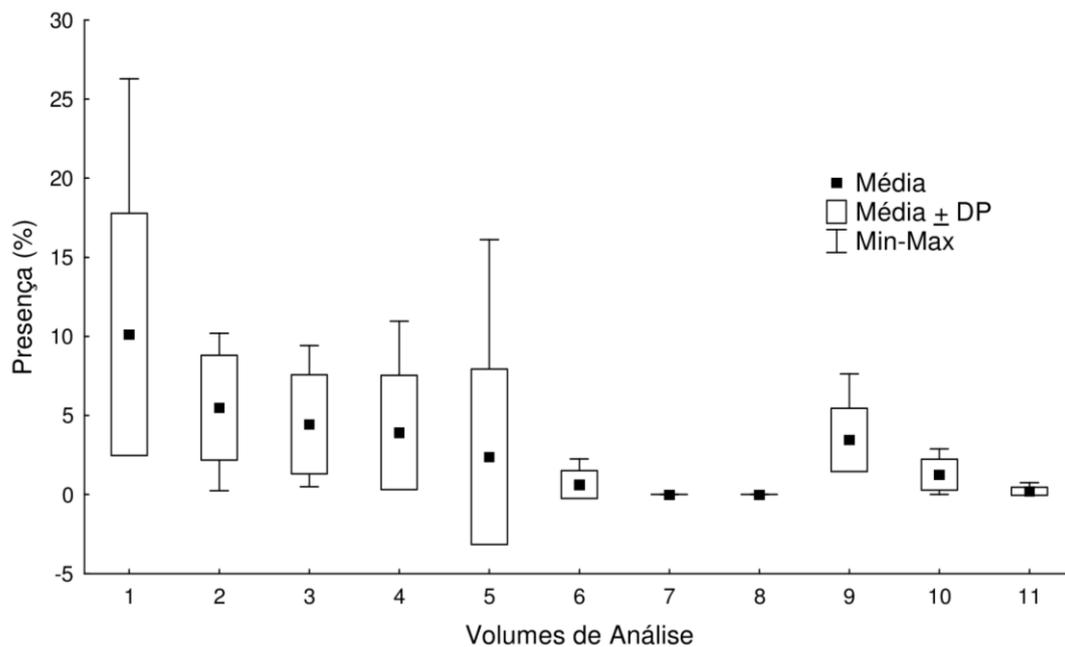


Figura 30 - Box Plot Presença espécie Mandi Dezembro
Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Teste de Duncan para Presença de Peixes nos Volumes de Análise

Volumes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.01	0.00								
2	0.01		0.55	0.40	0.11	0.01	0.01	0.01	0.29	0.03	0.01
3	0.00	0.55		0.76	0.28	0.05	0.03	0.03	0.59	0.10	0.03
4	0.00	0.40	0.76		0.40	0.09	0.05	0.05	0.78	0.16	0.06
5	0.00	0.11	0.28	0.40		0.34	0.22	0.23	0.53	0.51	0.25
6	0.00	0.01	0.05	0.09	0.34		0.73	0.74	0.14	0.72	0.80
7	0.00	0.01	0.03	0.05	0.22	0.73		1.00	0.08	0.51	0.90
8	0.00	0.01	0.03	0.05	0.23	0.74	1.00		0.08	0.52	0.91
9	0.00	0.29	0.59	0.78	0.53	0.14	0.08	0.08		0.23	0.09
10	0.00	0.03	0.10	0.16	0.51	0.72	0.51	0.52	0.23		0.57
11	0.00	0.01	0.03	0.06	0.25	0.80	0.90	0.91	0.09	0.57	

Tabela 9 - Teste de Tukey para Presença de Peixes nos volumes de Análise

Volumes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		0.22	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
2	0.22		1.00	1.00	0.77	0.16	0.07	0.07	0.98	0.34	0.09
3	0.05	1.00		1.00	0.98	0.49	0.27	0.27	1.00	0.74	0.33
4	0.02	1.00	1.00		1.00	0.70	0.45	0.45	1.00	0.89	0.53
5	0.00	0.77	0.98	1.00		0.99	0.95	0.95	1.00	1.00	0.97
6	0.00	0.16	0.49	0.70	0.99		1.00	1.00	0.85	1.00	1.00
7	0.00	0.07	0.27	0.45	0.95	1.00		1.00	0.64	1.00	1.00
8	0.00	0.07	0.27	0.45	0.95	1.00	1.00		0.64	1.00	1.00
9	0.01	0.98	1.00	1.00	1.00	0.85	0.64	0.64		0.97	0.71
10	0.00	0.34	0.74	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97		1.00
11	0.00	0.09	0.33	0.53	0.97	1.00	1.00	1.00	0.71	1.00	

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

4.3 CRUZAMENTO DA PRESENÇA DE PEIXES NO VOLUME DE ANÁLISE 1 E VARIÁVEIS HIDRÁULICAS

4.3.1 Correlação das Variáveis Hidráulicas

O teste de correlação de Pearson das variáveis hidráulicas e da presença dos peixes no volume 1 (Figura 31) indicou que as 7 variáveis hidráulicas são altamente correlacionadas.

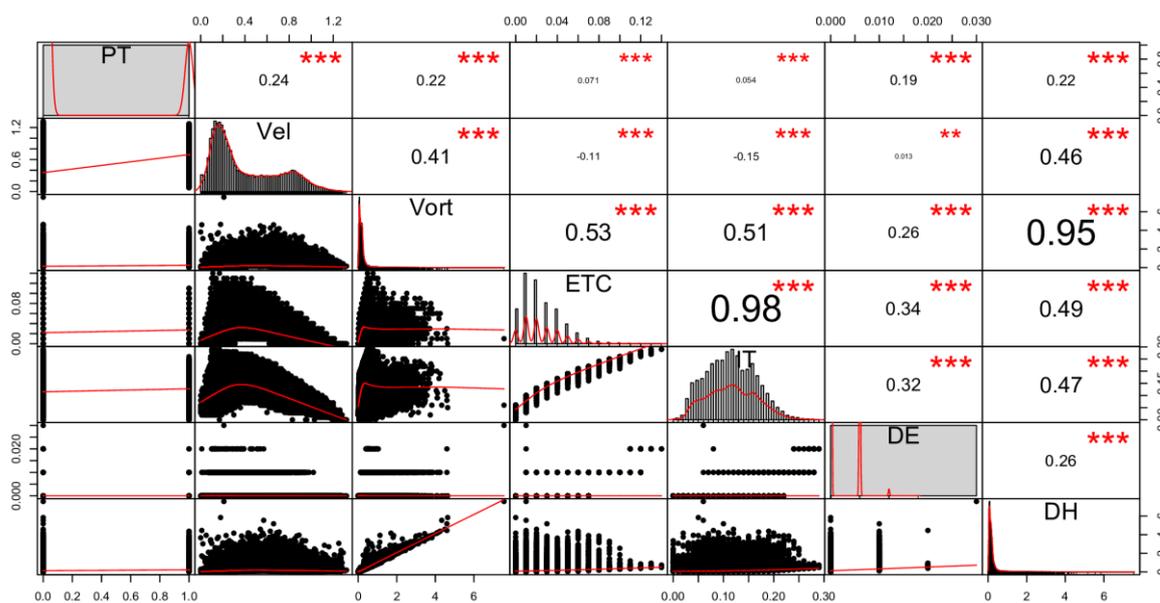


Figura 31 - Gráfico Correlação das Variáveis Hidráulicas
Fonte: Autoria própria

4.3.2 Análise Fatorial de Dados Misturados

Diante da alta correlação das variáveis, a análise fatorial de dados misturados apresentou uma boa opção para redução das variáveis explicativas do modelo, bem como avaliação da importância de cada uma delas em relação ao evento presença ou ausência de peixes no volume de análise 1.

Assim, a dimensão 1 explicou 34,8% da variância enquanto que a dimensão 2 explicou 21,3% (Figura 32). As principais variáveis que mais contribuem para dimensão 1 são ECT, TDE, IT e Vor (Figura 33), sendo que as três primeiras tiveram contribuições o dobro da última. As principais variáveis que mais contribuem para dimensão 2 são DH, Vor e Vel (Figura 34). Todas as variáveis anteriormente descritas contribuem positivamente na direção de aumento de ambas dimensões (Figura 35).

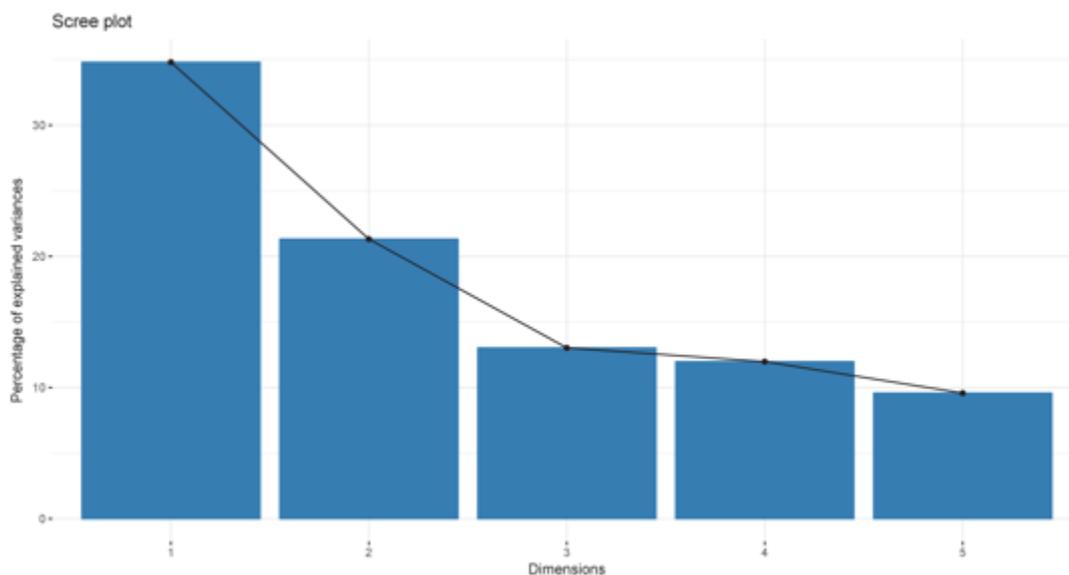


Figura 32 - Variância Variáveis Hidráulicas - Eixo 1
Fonte: Autoria própria

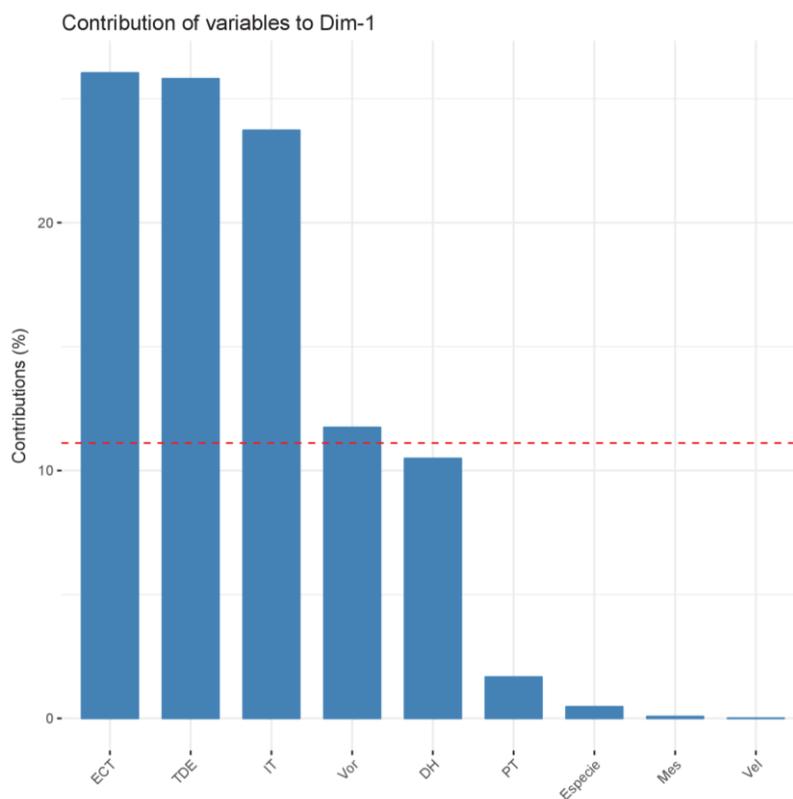


Figura 33 - Variáveis Hidráulicas que mais contribuem para dimensão 1
Fonte: Autoria própria

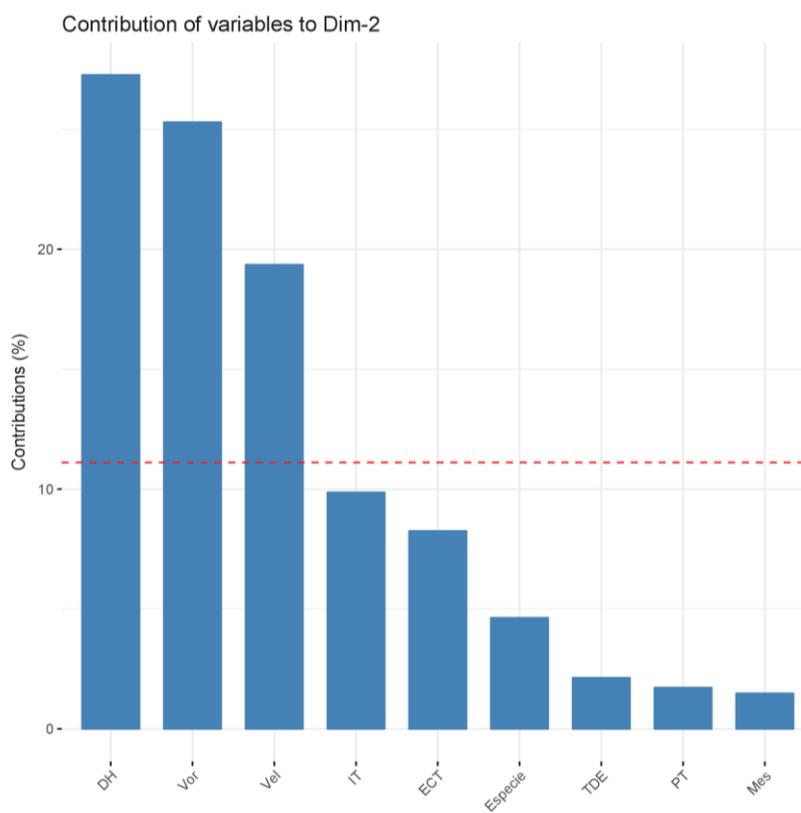


Figura 34 - Variáveis hidráulicas que mais contribuem para a dimensão 2
Fonte: Autoria própria

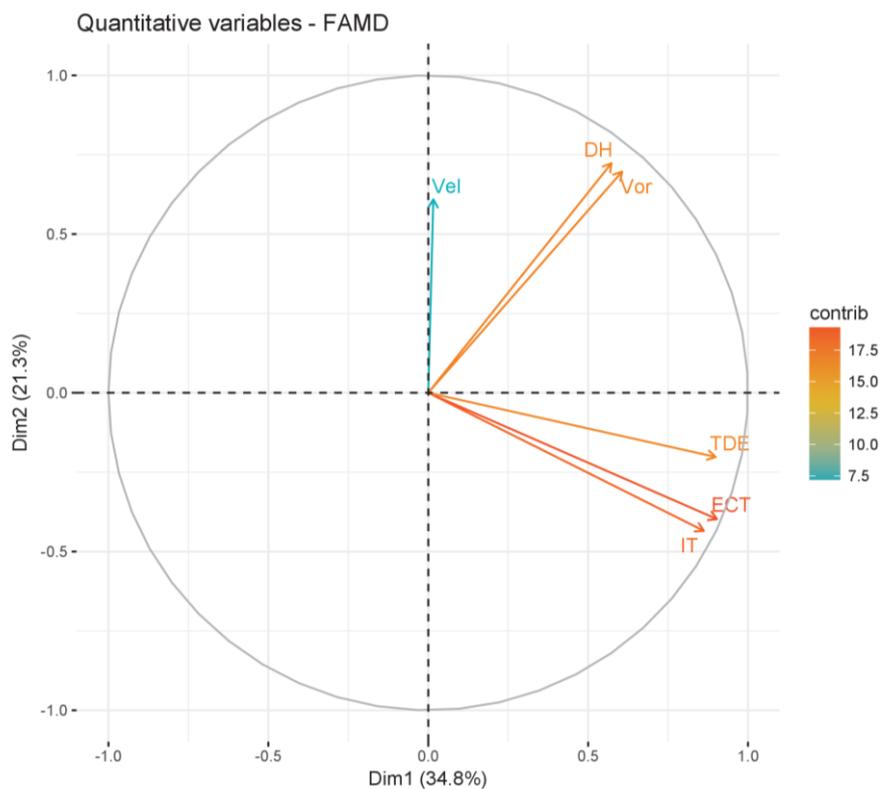


Figura 35 - Contribuição de todas as variáveis hidráulicas nos 2 eixos
Fonte: Autoria própria

Analisando as espécies, percebe um distanciamento da curimba e do mandi (ocorrendo em quadrantes opostos) em ambas direções (Figura 36). O mês de novembro fica no quadrante na direção do aumento da dimensão 2 e diminuição da dimensão 1 (Figura 37). As categorias mandi e presença ocorrem no mesmo quadrante (direção positiva para ambas dimensões) e as categorias ausência e dezembro ficam próximas da origem dos eixos (Figura 38).

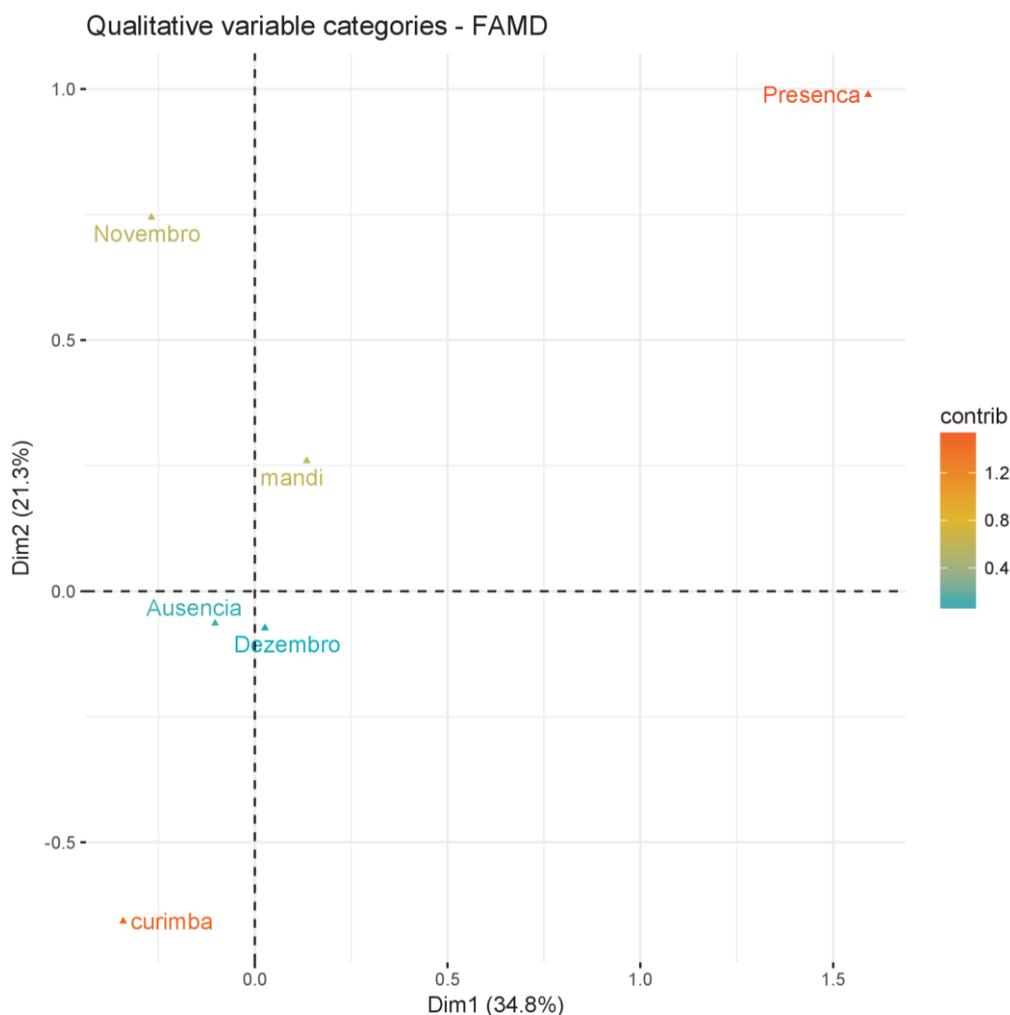


Figura 36 - Localização das variáveis nos quadrantes
Fonte: Autoria própria

Uma comparação com as variáveis quantitativas e categóricas indica que estas últimas se aproximam da origem do eixo de coordenadas (Figura 37). Os intervalos de confiança (elipses) gerados para os escores, foram praticamente concêntricos nas categorias de mês (Figura 38). O intervalo de confiança obtido para os escores da categoria presença foi mais amplo do que para a categoria ausência (Figura 39), o mesmo acontecendo com o intervalo de confiança dos escores do mandi (Figura 40).

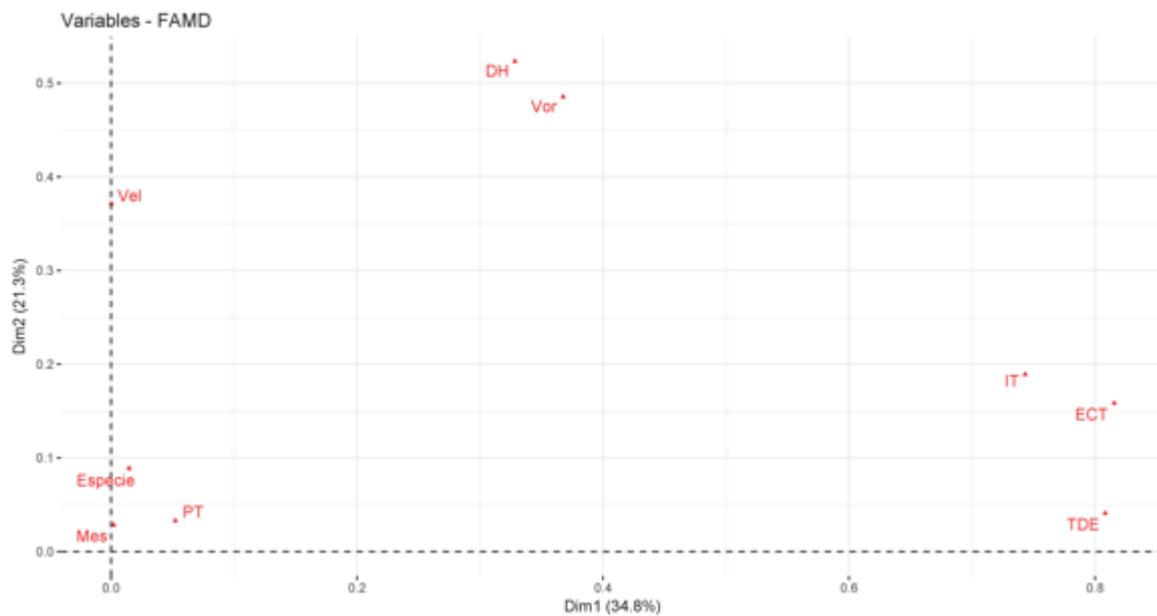


Figura 37 - Gráfico Comparativo entre variáveis qualitativas e quantitativas
Fonte: Autoria própria

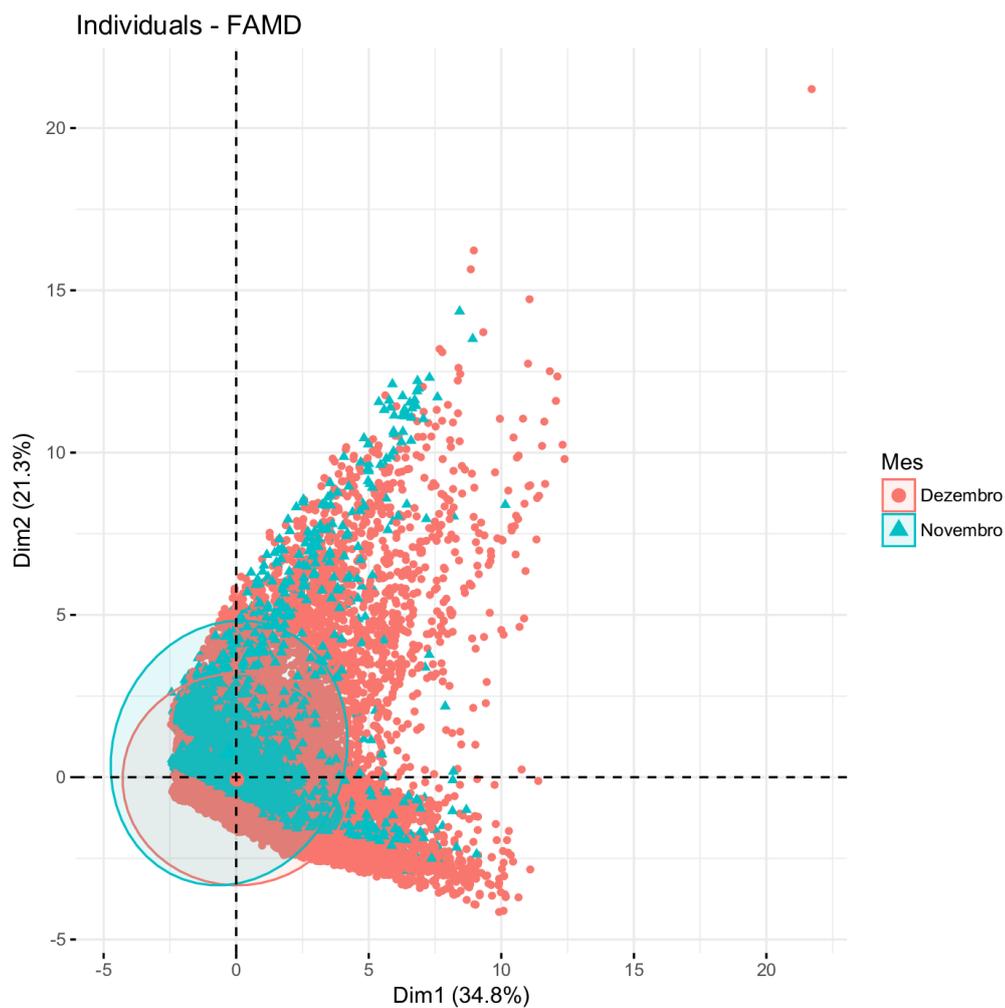


Figura 38 - Gráfico Intervalos de Confiança para categoria Mês
Fonte: Autoria própria

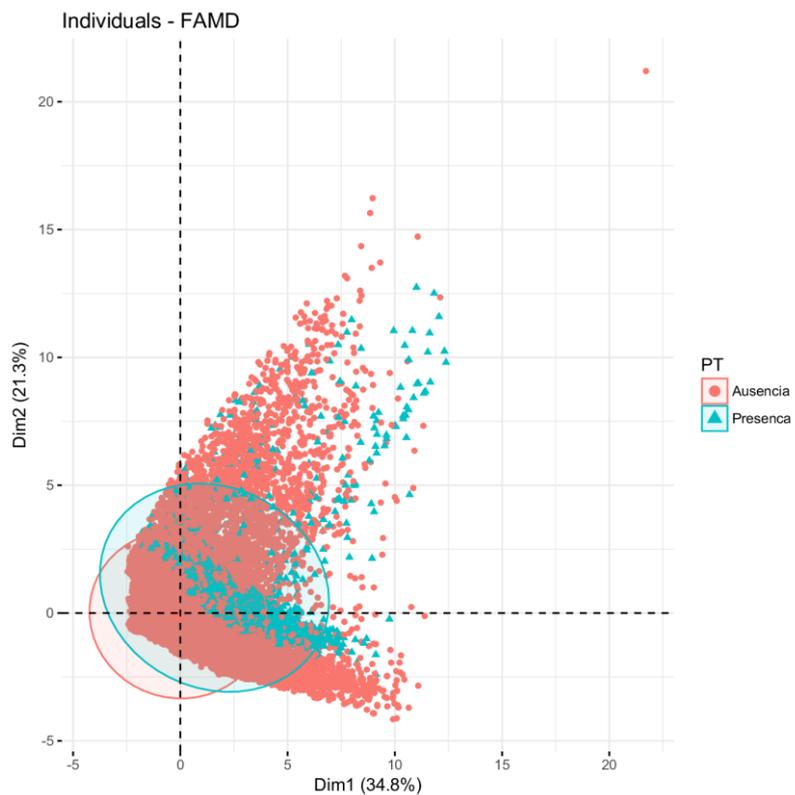


Figura 39 - Gráfico Intervalos de Confiança para categorias Presença / Ausência
Fonte: Autoria própria

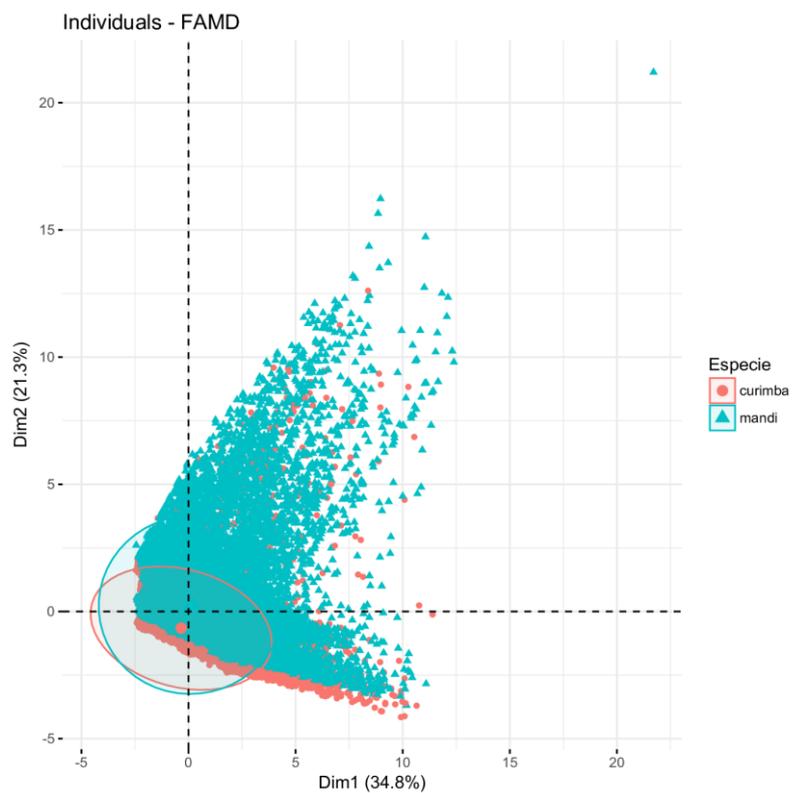


Figura 40 - Gráfico Intervalos de Confiança para categoria Espécie
Fonte: Autoria própria

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 DISCUSSÃO

O estudo do comportamento de peixes no escoamento hidráulico é motivação para vários estudos em regiões de clima temperado (GOODWIN et al. 2006; GOODWIN et al. 2007; KATOPODIS et al. 2012; LIAO et al. 200; NESTLER et al 2008; STEPHENS et al. 2015). Para regiões tropicais, raros são os estudos que tratam do tema, estando muito deles relacionados a monitoramento ou estudos de mecanismos de transposição de peixes ou vazão ecológica (COSTA et al., 2013; TERESA & CASATTI, 2013; DUARTE et al. 2014; RAMOS et al. 2014; SANTOS et al. 2018).

Os resultados do presente trabalho evidenciam a presença significativa do mandi próximo da turbina 1 no canal de fuga de Três Marias especialmente no mês de dezembro para um cenário de operação comum nessa UHE. O evento pode ser explicado em torno de 50% pelas variáveis hidráulicas obtidas com o modelo numérico. Entre o conjunto de variáveis que mais contribuíram para explicação da variância no modelo está o formado pela a energia cinética turbulenta, taxa de dissipação turbulenta e intensidade turbulenta (34,8%), sendo, portanto, caracterizado por variáveis relacionadas a turbulência do escoamento. O segundo grupo mais explicativo é composto pela deformação hidráulica, vorticidade e magnitude da velocidade (21,2%).

Estudos realizados com outras espécies de clima temperado, tanto em testes laboratoriais como em ambientes livres, têm mostrado que apenas um grupo ou apenas uma variável melhor explica o comportamento destas espécies.

Já para Nestler et al (NESTLER et al., 2008), o combinado entre deformação hidráulica, magnitude da velocidade e pressão hidrostática fornecem informações suficientes para explicar tomada de decisão de salmões frente a escoamentos complexos. Ressalta-se a semelhança desse grupo com o conjunto de variáveis

obtidas no segundo eixo deste trabalho que explicam a variância relacionada ao presença e ausência de peixes no volume de análise 1.

Segundo Silva et al. (2012), o sucesso na passagem e o tempo de trânsito de indivíduos ciprínidos em escada para peixe foi explicado principalmente pela tensão de Reynolds em detrimento das variáveis intensidade turbulenta e energia cinética turbulenta. Os indivíduos desse estudo, testados no canal laboratorial evitaram áreas de elevada tensão de cisalhamento de Reynolds e quando enfrentaram vórtices de tamanho similar ao comprimento total dos indivíduos apresentaram comportamento desorientado e perda de estabilidade.

Entretanto, é importante ponderar na avaliação comportamental de peixes frente a escoamentos que efeitos de intensidade turbulenta, periodicidade, orientação e escala de vórtices pode ser consideravelmente diferente entre canais naturais e laboratoriais. Soma-se a isto a questão da correlação das variáveis, o que cria um grande desafio de avaliar o efeito de apenas uma determinada variável de turbulência no desempenho da natação ou no uso do habitat no campo (LACEY et al. 2012)

Pode-se considerar o valor de explicação das variáveis hidráulicas obtidas neste estudo alto para a presença do mandi próximo a turbina 1. Outros fatores tais como motivação de migração (GODINHO et al. 2007), ocorrência de precipitação e valores de temperatura (LOURES & POMPEU, 2012) e turbidez da água (NORMANDO et al. 2014), tem sido apontado como fatores explicativos da presença desta espécie e de outras a jusante do barramento de Três Marias.

A presença / ausência de indivíduos no volume 1 apresentou em termos de variância comportamento diferente para a curimba e do mandi. Os pontos visitados pela primeira espécie estiveram relacionados a baixos valores do grupo de variáveis do eixo 1 (relacionadas a turbulência) e a baixos valores do grupo do eixo 2, dominado por variáveis relacionadas a magnitude da velocidade. O contrário aconteceu com o mandi. Estudos anteriores apontam o mandi como uma espécie com grande capacidade natatória (SANTOS et al. 2008) e seu comportamento evitando pontos com elevada tensão de Reynolds em canais laboratoriais (DUARTE et al. 2014). Entretanto, estudos que comprovam a importância de variáveis hidráulicas ligadas a

turbulência no comportamento desta espécie em canais naturais afetados pelo escoamento de turbinas são praticamente inexistentes.

A presença / ausência de indivíduos no volume 1 apresentou pouca diferença em termos de variância entre os meses de novembro e dezembro. Estudos relatam que o período úmido, que ocorre novembro e fevereiro, nesta região apresentam padrões semelhantes em termos de temperatura da água, precipitação e turbidez (LOURES & POMPEU, 2012; NORMANDO et al. 2014).

A variância na presença / ausência de indivíduos no volume de análise 1 indica que os valores de presença se relacionam positivamente com os dois grupos de variáveis hidráulicas. De uma forma mais individual, percebe-se que a presença quando ocorre em locais com maior valor do eixo 1, relacionado a turbulência, tem o valor do eixo 2 menor, relacionados a magnitude da velocidade. O oposto também ocorre: quando a presença está ligada a locais com maior valor do eixo 2, o valor no eixo 1 será menor. Esta constatação pode guiar tomadas de decisão relacionadas a operação de máquinas, mudanças no layout do canal de fuga e possível instalação de mecanismo de transposição na UHE de Três Marias.

Assim, o presente estudo verificou uma atração de indivíduos de mandi para área da turbina 1, que por ser um local inseguro para permanência de cardumes, pode ser denominada de “falsa atração” de acordo com Smith et al. 1997. As consequências dessa atração tem sido reportadas na literatura como aumento da probabilidade de injúrias e risco de mortandade (ANDRADE et al. 2012; LOURES & POMPEU 2012). Ressalta-se também que estudos anteriores sobre o escoamento hidrodinâmico do canal de fuga de Três Marias indicam que a pluma de escoamento gerado pela turbina 1 pode ter efeito sobre pontos localizados próximos a outra margem do rio (SANTOS et al. 2018) indicando o amplo poder de atração deste escoamento. Futuros estudos devem avaliar a ordem cronológica de entrada desta espécie no canal de fuga bem como a sua direção a fim de avaliar como ocorre o processo de adaptação dessa espécie às variáveis hidráulicas e a extensão do efeito de atração.

É importante ressaltar que Suzuki et al 2017 observou que o mandi permanece mais tempo no canal de fuga do que a curimba além de visitar mais vezes esta região do escoamento a jusante do barramento de Três Marias.

Apesar do presente trabalho tratar apenas um cenário de vazão, a continuidade da análise da “falsa atração” aqui descrita pode subsidiar a criação de modelos comportamentais para o mandi e conseqüentemente a predição do seu comportamento em escoamentos de outros cenários de vazão ou configuração de layout do canal de fuga.

Apesar do estudo ter sido realizado com apenas duas espécies, relato de problemas semelhantes em outras usinas hidrelétricas na América do Sul (AGOSTINHO et al. 2008), indicam que o presente trabalho pode ter aplicação em outras usinas e auxiliar tomadas de decisão relativas a medidas de mitigação de impactos ambientais relacionados a ictiofauna.

5.2 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar se as variáveis hidráulicas auxiliam na previsão do comportamento das espécies mandi e curimba no canal de fuga da UHE de Três Marias.

São raros na literatura os estudos direcionados aos casos de impactos a ictiofauna a jusante de barramentos na América do Sul, portanto este trabalho tem como finalidade contribuir na discussão e levantar indícios que possam explicar o comportamento dos peixes.

A principal conclusão do presente trabalho é a ocorrência da falsa atração da espécie mandi para a região da turbina 1 no cenário simulado.

O que atrai o mandi para a proximidade da turbina 1 é uma combinação de fatores hidráulicos: a primeira combinação relacionada a variáveis medidoras de

turbulência e a segunda combinação relacionada a variáveis medidoras de nível de magnitude da velocidade.

É importante que a UHE Três Marias considere ações mitigadoras para evitar que peixes alcancem essas zonas de perigo, principalmente nas proximidades da turbina 1.

Os resultados desta pesquisa são registros que podem ser utilizados para futuros estudos acerca da mitigação de mortalidade de peixes. Estes resultados podem auxiliar no entendimento de como as operações de uma usina hidrelétrica modificam as variáveis hidráulicas, e conseqüentemente, como essas características do escoamento irão afetar o comportamento dos peixes.

Usinas Hidrelétricas são importantes fornecedoras de energia, portanto, faz-se necessário que estudos como este sejam desenvolvidos e os desafios existentes sejam enfrentados e resolvidos visando a preservação do meio ambiente. Nesse sentido, do ponto de vista ambiental, estas estruturas serão menos predatórias e mais conciliadoras, cooperando com a conservação da ictiofauna.

5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, sugere-se os seguintes estudos:

- avaliar a ordem cronológica de entrada do mandi no canal de fuga bem como a direção de entrada nesta região, de formar avaliar como ela realiza o processo de adaptação das variáveis hidráulicas e a extensão do efeito de “falsa atração”;
- criação de um modelo comportamental para o mandi com base na explicação da presença pelos dois grupos de variáveis hidráulicas aqui identificados;

- aplicação do modelo comportamental do mandi para outros cenários de vazão e configurações do canal de fuga para proposição de medidas mitigadoras de impactos esta espécie.

REFERÊNCIAS

ADAMS, N. S.; BEEMAN, J. W.; ELIER, J. H. Telemetry Techniques: A User Guide for Fisheries Research. **American Fisheries Society**. v. 39, n. 5, p. 543, 2012.

AGOSTINHO, A.; PELICICE, F.; GOMES, L. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4 suppl, p. 1119–1132, 2009.

ALVES C. B. M.; VIEIRA F.; POMPEU P. S. Ictiofauna da bacia hidrográfica do rio São Francisco: Ministério do Meio Ambiente. (Org.). Diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da bacia hidrográfica do rio São Francisco. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília, pp 226-241, 2011.

ANDRADE, F. DE; PRADO, I. G.; LOURES, R. C.; GODINHO, A. L. Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 10, n. 4, p. 723–730, 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. – Atlas de energia Elétrica do Brasil. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

ANEEL; BIG. Agência Nacional de Energia Elétrica; Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 14 fev. 2019.

ANSYS. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

ARENAS, A.; POLITANO, M.; WEBER, L.; TIMKO, M. Analysis of movements and behavior of smolts swimming in hydropower reservoirs. **Ecological Modelling**, v. 312, p. 292-307, 2015.

BONCOMPAGNI-JÚNIOR, O.; NORMANDO, F. T.; BRITO, M. F. G.; BAZZOLI, N. Reproductive biology of *Prochilodus argenteus* Agassiz, 1829 (Pisces: Prochilodontidae) in São Francisco River, Brazil. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 29, n. 1, p. 132–138, 2013.

BRANDT, S. B. Acoustic Assessment of fish abundance and distribution. In: MURPHY,

B. R. Fisheries techniques, 2.ed. Maryland: Bethesda. **American Fisheries Society**, p.385-432, 1996.

CALLISTO, M.; ALVES, C. B. M. .; LOPES, J.M.; CASTRO, M. A. Condições ecológicas em bacias hidrográficas de empreendimentos hidrelétricos. **SÉRIE PEIXE VIVO**, v5, p. 264, 2014.

CAE. Computacional Fluid Dynamics: Ansys CFX and Fluent CFD Software. Disponível em: <<https://caesai.com/ansys-software-support/ansys-software/computational-fluid-dynamics-ansys-cfx-and-fluent-cfd-software>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

CHAGAS, A. T. DE A.; CARMO, A. OLIVEIRA; COSTA, M. APARECIDA; RESENDE, L. CARDOSO; BRANDÃO DIAS, P. F. P; MARTINS, A. P. V.; KALAPOTHAKIS, E. Description and comparison of two economically important fish species mitogenomes: *Prochilodus argenteus* and *Prochilodus costatus* (Characiformes, Prochilodontidae). **Mitochondrial DNA**, v. 27, n. 4, p. 2852–2853, 2015.

CHEN, S.; CHEN, B.; FATH, B. D. Assessing the cumulative environmental impact of hydropower construction on river systems based on energy network model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 78-92, 2015.

COSTA, M. R. DA; MATTOS, T. M.; BORGES, J. L.; ARAÚJO, F. G. Habitat preferences of common native fishes in a tropical river in southeastern Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 11, n. 4, p. 871–880, 2013.

DELAVAN, S. K.; SOOD, S.; PÉREZ-FUENTETAJA, A.; HANNES, A. R.. Anthropogenic turbulence and velocity barriers for upstream swimming fish: A field study on emerald shiners (*Notropis atherinoides*) in the Upper Niagara River. **Ecological Engineering**, v. 101, p. 91–106, 2017.

DUARTE, B. A. DE F. Simulação Numérica Tridimensional de escoamentos Livres: Uma análise do trecho à jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias. 98 f. (Mestrado Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FÁVERO LP, BELFIORE P. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. **Elsevier Brasil**; 2017.

FEARNSIDE, P. M. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. **World Development**, v. 77, p. 48–65, 2016.

FERRARI, G. E.; POLITANO, M.; WEBER, L. Numerical simulation of free surface flows on a fish bypass. **Computers and Fluids**, v. 38, n. 5, p. 997–1002, 2009.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed.

Berlim: Vasa, p. 423, 2002.

FILL, G. C. Universidade Federal Do Paraná Modelagem Hidrodinâmica 3D De Escoamentos Em Vertedouros. 143 f. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FLOW-3D. Disponível em: <<https://www.flow3d.com/products/flow-3d/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

GODINHO, A. L.; KYNARD, B.; GODINHO, H. P. Migration and spawning of female surubim (*Pseudoplatystoma corruscans*, Pimelodidae) in the São Francisco river, Brazil. **Environmental Biology of Fishes**, v. 80, n. 4, p. 421–433, 2007.

GODØ, O. R.; MICHALSEN, K. Migratory behaviour of north-east Arctic cod, studied by use of data storage tags. **Fisheries Research**, v. 48, n. 2, 2000.

GONÇALVES, N. D. F. Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas. p. 71, (Mestrado em Engenharia Matemática) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

GOODWIN, R. A.; NESTLER, J. M.; ANDERSON, J. J.; WEBER, L. J.; LOUCKS, D. P. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). **Ecological Modelling**, v. 192, n. 1–2, p. 197–223, 2006.

GOODWIN, R. A.; WEBER, L. J.; BAIGÚN, C. R. M.; NESTLER, J. M.; OLDANI, N. O. Can north american fish passage tools work for South american migratory fishes? **Neotropical Ichthyology**, v. 5, n. 2, 2007.

GREENACRE M. Correspondence analysis of square asymmetric matrices. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**. 49(3):297- 2000.

HIRSCH, C. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The fundamentals of computational fluid dynamics**. 2. ed. Grã Bretanha. Elsevier. 2007.

INOUE, F. K. Modelagem matemática em obras hidráulicas. 114 f. (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

JAY LACEY, R. W.; NEARY, VINCENT S.; LIAO, J. C.; ENDERS, EVA C.; TRITICO, HANS M. The IPOS framework: Linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. **River Research and Applications**, n. 2, 2012.

JIE. Peixes com código de barra. Disponível em: <<http://jie.itaipu.gov.br/node/41564>> Acesso em: 10 maio. 2018.

JUNG, K. W.; DENG, Z. DANIEL; MARTINEZ, JAYSONJ.; GEIST, DAVID R.; McMICHAEL, G. A.; STEPHENSON, J. R.; GRAF, PETER J. Performance of an acoustic telemetry system in a large fishway. **Animal Biotelemetry**, v. 3, n. 1, p. 1–9, 2015.

JUNGWIRTH, M.; WEISS, S.; SCHMUTZ, S. Fish Migration and Fish Bypasses. **Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications**, p. 127–145, 1998.

KATOPODIS, C. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 5, p. 451–467, 2005.

KATOPODIS, C.; SILVA, A. T.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N. Passage Efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of iberian barbel in a pool-type fishway. **River Research and Applications**, 2012.

LEAL, C. G.; CUNHA, S. F.; CHAVES, C.; SANTOS, H. DE A. E; POMPEU, P. S. Physical habitat simulation for small-sized characid fish species from tropical rivers in Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 16, n. 4, p. 1–14, 2018.

LIAO, J. C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1487, p. 1973–1993, 2007.

LOBÓN-CERVIÁ, J.; BENNEMANN, S.T. Temporal trophic shifts and feeding diversity in two sympatric, neotropical omnivorous fishes: *Astyanax bimaculatus* and *Pimelodus maculatus* in Rio Tibagi (Paraná, Southern Brazil). **Archives of Hydrobiology**, 149 (2), P. 285-306, 2000.

LOURES, R. C. A Compatibilização da operação de Usinas com a Ictiofauna, **Revista Ação Ambiental**, v. 12, n. 41, p. 24–28, 2009.

LOURES, R. C.; GODINHO, A. L. Avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas. **SÉRIE PEIXE VIVO**, v. 5, p. 309-329, 2016.

LOURES, R. C.; POMPEU, P. S. Temporal variation in fish community in the tailrace at Tres Marias Hydroelectric Dam, Sao Francisco River, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 10, n. 4, 2012.

LUZ, R. K.; ZANIBONI FILHO, E. Utilização de diferentes dietas na primeira alimentação do mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*, Lacépède). **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 2, p. 483–489, 2001.

MELO, B. F. Genética de populações de *Prochilodus argenteus* e *P. costatus* do médio São Francisco. (Mestrado em Ciências Biológicas) - Instituto de Geociências de Botucatu, Universidade Estadual Paulista. 2011.

NASCIMENTO, J. C. S. Simulador De Escoamento Multifásico Em Poços De Petróleo

(Sempp). (Mestrado em Ciência Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2013.

NESTLER, J. M.; GOODWIN, R. A.; SMITH, D. L.; ANDERSON, J. J.; LI, S. Optimum fish passage and guidance designs are based in the hydrogeomorphology of natural rivers. **River Research and Applications**, v. 24, n. 2, p. 148–168, 2008.

NETO, F. SÃO FRANCISCO. Mortandade de Peixes em Três Marias. Disponível em: <<http://www.sfrancisco.bio.br/noticias/morte3marias.html>>. Acesso em: 10 maio. 2018.

NORMANDO F. T.; SANTIAGO K. B.; GOMES M. V.; RIZZO E.; BAZZOLI N. Impact of the Três Marias dam on the reproduction of the forage fish *Astyanax bimaculatus* and *A. fasciatus* from the São Francisco River, downstream from the dam, southeastern Brazil. **Environmental biology of fishes**, v1, n. 3, p. 309-19, 2014.

OPENFOAM. OPENFOAM. The open source CFD toolbox. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

PAGÈS, J. “Analyse Factorielle de Donneés Mixtes.” **Revue Statistique Appliquee**, v. 4, p. 93 –111, 2004.

PERESSIN A.; PRADO I. G.; RESENDE L. C.; SILVA T. T.; CALDEIRA Y. M. & GODINHO A. L. Biologia do Mandi (*Pimelodus Maculatus*) a jusante de usinas hidrelétricasdo sudeste do Brasil. In: R. C. Loures & A. L. Godinho (orgs.) **Avaliação de Risco de Morte de Peixes em Usinas Hidrelétricas**. Belo Horizonte. Companhia Energética de Minas Gerais. Série Peixe Vivo, v 5, p. 155-178, 2016.

POLITANO, M.; CARRICA, P.; WEBER, L. A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 35, n. 11, 2009.

POMPEU, P.; SUZUKI, FABIO; PRADO, I.; SOUZA, RAFAEL. Downstream Fish Passage: the New Challenge of the Hydropower Sector for the Conservation of the Brazilian Fish Fauna. **American Journal of Hydropower, Water and Environment Systems**, v. 2, n. 45, 2015.

PRADO, I. G.; ANDRADE F.; MONTEIRO A. B.; SOUSA S. C. R.; GODINHO A. L. Influência de fatores abióticos na captura e condição de peixes imediatamente a jusante da usina hidrelétrica de Três Marias, Rio São Francisco. In: R. C. Loures & A. L. Godinho (orgs.) **Avaliação de Risco de Morte de Peixes em Usinas Hidrelétricas**. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais. Série Peixe Vivo, v 5, p. 231-245, 2106.

SALEH, J. M. **Fluid Flow Handbook**. McGraw-Hill New York, 2002.

SANTOS, A. B. I.; ALBIERI, R. J.; ARAUJO, F. G. Influences of dams with different

levels of river connectivity on the fish community structure along a tropical river in Southeastern Brazil. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 29, n. 1, p. 163–171, 2013.

SANTOS, H. DE; DUARTE, B. Tensão de Reynolds e Velocidade Média em uma Escada para Peixes do Tipo Ranhura Vertical: Comportamento Preferencial da Espécie *Leporinus reinhardti*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 157–167, 2012.

SANTOS, H. DE; DUARTE, B.; PINHEIRO, A.; CRUZ, D.; SOUZA, G. Flow characteristics in tailrace: understanding how hydrodynamics may attract fish to hydropower plant in South America. **Marine and Freshwater Research**, v. 69, n. 12, p. 1962–1973, 2018.

SANTOS, H.; MACHADO, N.; FREIRE, L.; LOPES, P.; SILVA, I.; SOARES, G.; RAMOS, I. Adição de Rugosidade ao Concreto de Escadas para Peixes: Análise para a Espécie Neotropical *Pimelodus Maculatus*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 87–96, 2016.

SATO, Y.; FENERICH-VERANI, NELSY; VERANI, J. R.; GODINHO, H. P.; SAMPAIO, E. V. Reproductive traits of the yellow-mandi catfish *Pimelodus maculatus* Lacépède (Osteichthyes, Siluriformes) in captive breeding. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 16, n. 4, p. 981–986, 1999.

SATO, Y.; GODINHO, H. P. Migratory fishes of South America - Biology, Fisheries and Conservation Status. **The World Bank**, p. 361, 2003.

SCOTT-POMERANTZ, C. D. The K-Epsilon Model in the Theory of Turbulence. Thesis, (Dissertação de Doutorado) - Universidade de Pittsburgh p. 52, 2004.

SCOTTISH, T.; AGRICULTURE, O.; ROAD, V. Upstream migration of adult Atlantic salmon past a fish counter weir in the Aberdeenshire Dee, Scotland. **Journal of Fish Biology**, p. 266–274, 1997.

SILVA, A. T.; KATOPODIS, C.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. **Ecological Engineering**, v. 44, p. 314–328, 2012.

SILVA, A. T.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N.; KATOPODIS, C. EFFECTS OF WATER VELOCITY AND TURBULENCE ON THE BEHAVIOUR OF IBERIAN BARBEL (*LUCIOBARBUS BOCAGEI*, STEINDACHNER 1864) IN AN EXPERIMENTAL POOL-TYPE FISHWAY. **River Research and Applications**, v. 30, n. February 2010, p. 132–133, 2010.

SILVA, L. G. M.; SOARES, L. G.; BRAZ, F. N.; FORMAGIO, P. S.; MARTINEZ, C. B. Uso da luz estroboscópica para repulsão de peixes nas áreas de risco em Usinas Hidrelétricas, Seminário Nacional de produção e Transmissão e Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2007.

SHENG, Y. P.; LICK, W.; GEDNEY, R. T.; MOLLS, F. B.; Numerical Computation of Three-Dimensional Circulation in Lake Erie: A Comparison of a Free-Surface Model and a Rigid-Lid Model - **Journal of Physical Oceanography**, 1977.

SOLANO, D. S. T. Modelo de Comportamento de Peixes no Trecho a Jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias. (Mestrado Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SOUZA, J. F. A. DE; DE OLIVEIRA, L. R.; DE AZEVEDO, J. L. L.; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011.

SOUZA, A. S. P. Escoamento de fluidos bifásicos em empacotamentos geométricos (Mestrado em Física) - Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

STEPHENS, T. A.; BLEDSOE, B. P.; FOX, B. D.; KOLDEN, E.; KONDRATIEFF, M. C.; Effects of whitewater parks on fish passage: A spatially explicit hydraulic analysis. **Ecological Engineering**, v. 83, p. 305–318, 2015.

SUZUKI, F. M. Estudo Do Comportamento De Peixes No Canal De Fuga Da Usina Hidrelétrica de Três Marias Utilizando Telemetria Acústica. (Doutorado em Ecologia Aplicada). Universidade Federal e Lavras, 2014.

SUZUKI, F. M.; DUNHAM, J. B.; SILVA, L. G. M.; ALVES, C.B. M.; POMPEU, P. S. Factors Influencing Movements of Two Migratory Fishes within the Tailrace of a Large Neotropical Dam and their Implications for Hydropower Impacts. **River Research and Applications**, v. 33, n. 4, p. 514–523, 2017.

TAYLOR, P.; COUTANT, C. C.; WHITNEY, R. R. Fish Behavior in Relation to Passage through Hydropower Turbines : A Review. **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 129, n.2, p. 37–41, 2000.

TERESA, F. B.; CASATTI, L. Development of habitat suitability criteria for Neotropical stream fishes and an assessment of their transferability to streams with different conservation status. **Neotropical Ichthyology**, v. 11, n. 2, p. 395–402, 2013.

THORSTAD, E. B.; RIKARSEN, A. H.; ALP, A.; OKLAND, F. The Use of Electronic Tags in Fish Research - An Overview of Fish Telemetry Methods. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 13, n. 5, p. 881–896, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics** The Finite Volume Method, 2. ed. Glasgow, Pearson Education, 2007

VIANA, E. M. DE F.; SALIBA, A. P. M.; MARTINEZ, C. B.; TOLENTINO, B. DA S.; TOMÉ, F. L. F. DE O.; FARIA, M. T. C. DE. Análise do comportamento hidráulico de um mecanismo de transposição de peixes do tipo escada com ranhura vertical em

duas declividades. **Rbrh**, v. 21, n. 4, p. 811–820, 2016.

VILELA, P.; VILELA, P.; ANGELIS, R. DE. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 15 ANOS. **CBHSF**, v. 15, n. 1, p. 200, 2016.

VILELA, P.; VILELA, P.; ANGELIS, R. DE. Manual do comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **CBHSF**, v. 17, p. 24, 2018.

WANDER, A. P. Validação das aproximações do tipo Hele-Shaw aplicadas ao escoamento de fluídos viscoplásticos em uma cavidade simétrica. 49 f. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Química – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WEBER, L. J.; GOODWIN, R. A.; LI, S.; NESTLER, J. M.; ANDERSON, J. J. Application of an Eulerian-Lagrangian-Agent Method (ELAM) to rank alternative designs of a juvenile fish passage facility. **Journal of Hydroinformatics**, v. 8, n. 4, 2006.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. McGraw – Hill: Rio de Janeiro, 2002

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. AMGH Editora. Porto Alegre, 2011.

WILCOX, C. D. **Turbulence Modeling for CFD**. 2. ed. DCW Industries: La Canada, 1998.

ZARE, R.; KALANTARI, B. Evaluating Negative Environmental Impacts Caused by Dam Construction. **Urban Studies and Public Administration**. v. 1, n. 1, 2018.